

# Cartographie morphopédologique : de l'évaluation des terres à la recherche en géomorphologie

## *Morphopedological mapping: from land evaluation to research in geomorphology*

François Bétard\*, Gérard Bourgeon\*\*

### Résumé

L'objectif de cet article est de montrer comment la cartographie morphopédologique, d'abord employée pour réaliser des inventaires pédologiques, peut être aujourd'hui utilisée comme outil scientifique pour améliorer les connaissances géomorphologiques régionales. Les cartes morphopédologiques représentent des unités du même nom pour lesquelles relief et sol sont liés par de fortes interactions entre l'évolution géomorphologique et le développement du sol. Ce type de carte a d'abord démontré son efficacité dans les années 1970 pour les inventaires des sols tropicaux dans le cadre d'études d'évaluation des potentialités des terres. Les étapes importantes de l'histoire de la méthode sont rappelées avant une présentation des résultats obtenus récemment au Brésil, pour la recherche géomorphologique, au cours de l'étude du massif de Baturité (Ceará). Les résultats découlant de cette étude de cas tropical soulignent également l'importance de tenir compte de la composante sol en géomorphologie.

**Mots-clés** : morphopédologie, régions tropicales, cartographie, modelé, altération, sol, Brésil.

### Abstract

*The goal of this article is to show how the morphopedological mapping method, initially employed for soil surveys, can be used today as a scientific method to improve regional geomorphological knowledge. Morphopedological maps represent soil-landform units that result from strong interactions between geomorphic evolution and soil development. This type of map initially served useful in the 1970s for tropical soil inventories within the framework of land evaluation studies. We begin by summarizing important milestones in the history of the method before presenting recent results obtained in Brazil during a geomorphological study of the Baturité massif, Ceará. The results arising from this case study in the Tropics also highlight the importance of taking into account information on soils in geomorphology.*

**Keywords**: morphopedology, Tropics, mapping, landform, weathering, soil, Brazil.

### Abridged English version

*Morphopedological maps result from integrated studies that take into account both the geomorphological and pedological characteristics of the physical environment. This mapping method, which was implemented by many scientists from the French School of pedology, has illustrated its efficiency for soil mapping in tropical regions, mostly in West Africa. The objective of this article is to illustrate how this mapping method can be used today as a scientific method to improve regional geomorphological analysis. We begin by summarizing important milestones in the history of the method before presenting recent results obtained in Northeast Brazil.*

*With the team of pedologists from IRAT (Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des cultures vivrières), J. Kilian (1972) formulated for the first time the basic principles of an integrated study, qualified as 'morphopedological', of the physical environment with applications in ecological management (the term 'sustainable' was not yet used at the time). Two years later, other articles collated in a special issue of *L'Agronomie Tropicale* (Collectif, 1974) completed the presentation of the mapping approach, illustrating it with examples of application mainly set in West Africa. New diagnostic criteria were proposed for land evaluation, for example the stability assessment of each morphopedological unit based on the concept of balance between morphogenesis and pedogenesis (Tricart, 1974). The*

\* Université Paris 12 et Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591, 61 avenue du Général-de-Gaulle, 94010 Créteil cedex, France. Courriel : francois.betard@univ-paris12.fr

\*\* CIRAD, UPR Recyclage et Risque, TA B 78/01, avenue Agropolis, 34398 Montpellier, France. Courriel : gerard.bourgeon@cirad.fr

legends of morphopedological maps were typically presented as double entry tables, with factors in columns and units in rows.

The notion of 'morphopedological landscape' appeared slightly later in the pedological survey of the Odienné region (Ivory Coast), authored by V. Eschenbrenner and L. Badarello (1975). It was also probably the first attempt to address scale-change problems by referring to the hierarchical structure between elementary morphopedological units and a first level of integration, i.e. the morphopedological landscape. G. Bourgeon (1989) delineated morphopedological landscapes directly from satellite images to prepare a reconnaissance soil map at 1:1 000 000 scale for a large area of peninsular India. R. Poss (1996), during his morphopedological study of northern Togo, discovered a terrain where rock properties played a major role in slope evolution and soil development, and where the boundaries between morphopedological landscapes were globally in agreement with the geological outcrops. The rest of the world has also produced soil maps based on more or less detailed geomorphological analysis but we will not evoke them here (see for example the syntheses by P. Birkeland, 1999 and by R. Schaetzl and S. Anderson, 2005).

The analysis of a tropical case study in the Northeast of Brazil – the Baturité massif, Ceará (fig. 1) – illustrates a recent use of the morphopedological method for geomorphological research, and highlights the value of detailed soil characterization for a geomorphological survey. To realise this morphopedological study of the humid Baturité massif and its semi-arid piedmont (Bétard, 2007), we proceeded in three stages, involving (i) a detailed field survey based on a combined description of landforms, weathering mantles and soils; (ii) the analytical characterization of weathered layers and soils based on a wide range of laboratory methods; and (iii) the compilation of field and laboratory data into a geographic information system (GIS) followed by spatial analysis. Figures 2 and 3 summarise the main results of this study and depict the key features of the regional landscapes: (1) the high surface of the humid Baturité massif (800-900 m a.s.l.) exhibits a 'meia laranja' topography associated with a thick kaolinitic weathering mantle and low-activity-clay Acrisols (fig. 4); (2) the highly dissected sub-humid peripheral area punctuated with crystalline domes (200-800 m a.s.l.) presents more shallow weathering and soil profiles (Lixisols); (3) the semi-arid plain (100-200 m a.s.l.) or 'Sertao' is a landscape of pediments and inselbergs (fig. 5A and fig. 5B) with shallow, smectite- and illite-rich grus weathering mantles associated with red Luvisols (fig. 5C) and brown Cambisols; (4) the Neogene clastic sediments (i.e. the Barreiras formation) are dominated by morphopedological inheritance (Lixisols with plinthite), but poorly evolved soils (Arenosols) are also found on the Pleistocene aeolian sand-cover. Each landscape unit was then subdivided into different sub-units, each corresponding to an elementary landform unit (e.g. residual butte, valley floor...), to a weathering process (mono- or bi-siallisation and their diagnostic clay minerals), and characterized by few soil types (named according to the WRB and SiBCS systems).

This study opens new perspectives: (i) the morphopedological mapping realised around the Baturité massif could be extended to other areas of Ceará or Northeast Brazil; it would allow to update the soil map at minimum cost and would help to clarify particular aspects of the regional geomorphology; (ii) for the area covered by this first map, it is also possible to prepare more detailed morphopedological maps (downscaling) that would show various soil and ecological facets which have been already identified but not yet mapped.

## Introduction

Les cartes morphopédologiques résultent d'études prenant en compte à la fois les caractéristiques géomorphologiques et pédologiques du milieu physique. Elles ont d'abord montré leur efficacité pour la réalisation rapide d'inventaires des sols tropicaux débouchant sur l'évaluation des potentialités agricoles des terres, en particulier en Afrique francophone (Kilian, 1972 ; Collectif, 1974). Si, comme l'a rappelé M. Petit (1990), « la recherche morphopédologique concerne au premier chef les morphologues », elle a pourtant été dans un premier temps réservée aux études de pédologie appliquée et à la cartographie des potentialités agricoles. Récemment, elle a été utilisée dans le cadre d'un travail de thèse (Bétard, 2007) en géomorphologie, dans le Nordeste brésilien. L'objectif de l'article est de montrer l'intérêt de cette méthode cartographique dans le contexte d'une recherche géomorphologique, après en avoir rappelé les bases méthodologiques et les grandes étapes de développement dans le cadre de la cartographie des sols. La présentation détaillée de l'exemple brésilien permettra d'expliquer comment elle a permis de progresser de façon appréciable dans la connaissance d'un milieu physique pour lequel des études de géomorphologie structurale et de pédologie classique étaient disponibles. L'analyse de cet exemple illustrera aussi l'intérêt de la prise en compte des sols pour le géomorphologue.

## Bases méthodologiques et rappels historiques sur le développement de la cartographie morphopédologique

Le but de cette section est d'expliquer l'origine, les principes et l'évolution de la cartographie morphopédologique telle qu'elle a été pratiquée par les chercheurs francophones à travers quelques exemples de réalisations. Il ne s'agit donc ni d'un inventaire des cartes morphopédologiques réalisées par ces chercheurs, car beaucoup sont des travaux d'expertise jamais publiés et certains sont aujourd'hui introuvables, ni de celui des différentes approches scientifiques qui ont permis de montrer que les évolutions des sols et du relief interféraient constamment. Il ne sera pas fait non plus référence aux différents travaux anglo-saxons sur le thème de la 'soil geomorphology' pour lesquels nous renvoyons les lecteurs intéressés aux synthèses récentes de P.W. Birkeland (1999) et de R. Schaetzl et S. Anderson (2005) – deux ouvrages qui ne citent jamais les cartes morphopédologiques et n'emploient ni ce terme, ni la traduction, *morpho-pedological*, qui en a souvent été proposée.

## La cartographie morphopédologique de base

L'année 1972 peut être considérée comme celle où le terme morphopédologie est employé pour la première fois dans deux articles scientifiques : d'abord un exposé général de J. Kilian (1972) sur les principes et buts de cette technique cartographique, exposé suivi de peu par la présentation d'un exemple par R. Bertrand (1972). La morphopédologie est alors décrite comme une technique d'inventaire rapide des sols dans le cadre de projets d'aménagement, qu'il s'agisse de choisir les terres plus aptes au projet ou de préconiser des conseils d'aménagement ; les deux auteurs sont pédologues à l'IRAT (l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des cultures vivrières) et la morphopédologie sera une sorte de marque de fabrique des études réalisées par l'IRAT en cartographie des sols pendant les années qui suivront. En fait, comme l'écrira plus tard G. Gaucher (1981), « l'idée était dans l'air » depuis que les photographies aériennes permettaient de voir à la fois la surface des sols et les formes du relief indépendamment des « découpages artificiels de la connaissance (ou de l'ignorance ...) » (Tricart, 1974).

Le développement de cette nouvelle méthode a aussi pu bénéficier en Afrique de l'Ouest du canevas spatio-temporel décrivant la place des différentes composantes du milieu physique sur les bassins des fleuves Sénégal et Gambie qui venait d'être proposé par P. Michel (1969, 1973) et dont l'applicabilité en Haute-Volta (actuel Burkina Faso) et en Côte d'Ivoire avait été validée par V. Eschenbrenner et G. Grandin (1970) et V. Eschenbrenner *et al.* (1974). R. Bertrand s'en sert dès 1972 pour bâtir la légende de la carte morphopédologique du Siné-Saloum (Sénégal). Il sera suivi dans cette voie par d'autres pédologues travaillant sur d'autres terrains : notamment S. Guillobez (1979) et M. Raunet (1983) en Haute-Volta ; Bertrand *et al.* (1984) en Côte d'Ivoire ; B. Henquin *et al.* (1991) en Guinée. D'autres articles regroupés dans un numéro double de l'Agronomie Tropicale (Collectif, 1974) compléteront la présentation de cette méthode cartographique et l'illustreront avec des exemples d'application. La méthode proposait notamment des éléments nouveaux de diagnostic pour la mise en valeur des terres, en permettant par exemple une analyse des milieux selon une échelle de stabilité basée sur les rapports entre morphogénèse et pédogénèse (Tricart, 1974) au travers d'un bilan : étaient considérés comme les plus stables les milieux sur lesquels s'exerçait une morphodynamique faible ou nulle avec un bilan en faveur de la pédogénèse, donc à l'approfondissement des sols ; comme les plus instables ceux pour lesquels le bilan penchait en faveur de la morphogénèse, donc vers l'amincissement des sols, voire leur disparition (Teissier, 1974 ; Thibout, 1974). Elle permettait aussi clairement de dépasser la simple description des différences topographiques de la surface terrestre, c'est-à-dire le *relief* au sens anglo-saxon du terme, tel qu'on le retrouve dans l'équation de H. Jenny (1941) comme facteur de formation des sols, concept souvent critiqué par les géomorphologues (Tricart, 1978 ; Coque, 1993). Avec ces cartes, on abandonnait aussi « la taxonomie pédologique comme forme d'ex-

pression cartographique » (Pédro et Kilian, 1986), les limites des unités cartographiques étant définies indépendamment de l'application d'une classification pédologique. Une spécificité des cartes morphopédologiques tenait, et tient toujours, à la présentation de leurs légendes sous forme de tableaux à double entrée, les colonnes représentant généralement les facteurs explicatifs et les lignes les unités morphopédologiques identifiées ; au croisement des deux, on trouve la modalité du facteur pour l'unité considérée.

Cette première période au cours de laquelle de nombreuses cartes morphopédologiques ont été produites n'a pas vu, du moins à notre connaissance, s'amorcer de réflexion aboutie sur le changement d'échelle, bien que la référence à la classification taxonomique des faits géomorphologiques de A. Cailleux et J. Tricart (Tricart, 1965) soit omniprésente (Gaucher, 1974, 1981) et que J. Tricart lui-même ait largement participé à l'élaboration de la méthode. La carte morphopédologique est le premier document d'analyse d'une région et parmi les documents plus détaillés qui suivront, on trouvera encore des cartes morphopédologiques (Kilian, 1974). Les unités morphopédologiques peuvent donc présenter une structure gigogne comme le précise G. Gaucher (1981) : « Ces unités dimensionnelles sont des unités morphopédologiques ou des ensembles d'unités morphopédologiques (unités de rang supérieur ...) ». Ceci est certainement imputable au fait que l'échelle des photographies aériennes, qui furent un élément important dans la mise au point de cette approche, était toujours plus ou moins la même.

## Adaptations pour des études plus générales

L'introduction de la notion de paysage morpho-pédologique, qui permet de faire des changements d'échelle entre organisations élémentaires (qu'aborde bien la morphopédologie de base décrite ci-dessus) et un premier niveau d'intégration où sont identifiées les organisations élémentaires répétitives, est l'un des ajouts essentiels de V. Eschenbrenner et L. Badarello (1975) à l'occasion de leur étude pédologique de la région d'Odienné (Côte d'Ivoire). Les paysages morpho-pédologiques y sont le plus souvent décrits comme constitués d'une juxtaposition de formes identiques. À chaque forme sont associés un ou plusieurs types de sols (ces formes correspondent aux unités morphopédologiques de base définies précédemment), et les principaux paysages sont illustrés par une carte (esquisse) morphopédologique à 1/50 000 alors que la carte des paysages est éditée à 1/200 000. Il s'agit d'un travail s'appuyant sur une photo-interprétation classique ; l'emploi d'images satellitaires n'est pas mentionné. Quelques années plus tard, R. Poss (1979, 1982) fera de même pour la région de Katiola (Côte d'Ivoire) en précisant la façon dont sont intégrées les différentes données qu'il utilise pour réaliser sa carte.

G. Bourgeon (1989) reprendra la notion de paysage morphopédologique pour réaliser une carte des sols à 1/1 000 000 d'une vaste région de l'Inde péninsulaire. En fonction des documents disponibles pour son étude, images Landsat MSS et cartes topographiques, toutes à 1/250 000, il délimite directement les paysages morpho-pédologiques repré-

sentables à cette échelle sans passer par une analyse systématique des unités morphopédologiques plus fines, notamment celles qui s'organisent selon le chevelu hydrographique. R. Poss (1996) réalise l'inventaire morphopédologique du nord du Togo et y découvre un terrain où, selon ses propres termes, « la nature de la roche joue un rôle primordial dans l'évolution des versants et la mise en place des sols » et « les limites des paysages morphopédologiques sont pour la plupart en accord avec les limites géologiques ». Avec cette dernière référence, nous estimons avoir reconstitué les principales étapes du développement de la méthode morphopédologique française appliquée à la cartographie des sols tropicaux. En évoluant, cette méthode née de l'essor de la photographie aérienne, a su intégrer les nouvelles données disponibles (imagerie satellitaire) et gérer le changement d'échelle. Son développement s'est donc réalisé de façon concomitante avec celui des outils informatiques, notamment bases de données et télédétection, et a permis des applications performantes. Signalons encore qu'en France métropolitaine, le concept de paysage pédologique est maintenant largement utilisé lors de la réalisation des référentiels pédologiques régionaux qui s'attachent à identifier les principaux « pédopaysages » (Girard, 1972 ; Robbez-Masson *et al.*, 1991 ; Jamagne *et al.*, 1993 ; Robbez-Masson, 1994). La définition d'un pédopaysage (pour paysage pédologique) intègre, plus que ne le fait celle d'un paysage morphopédologique défini en zone tropicale, l'occupation du sol, donc son utilisation et la couverture végétale.

## Utilisation de la cartographie morphopédologique en recherche géomorphologique : exemple de l'étude du massif de Baturité (NE Brésil)

### Région étudiée et adaptations méthodologiques

C'est dans le cadre d'un travail de thèse de géographie physique tropicale au Brésil (Bétard, 2007) que nous avons été amenés à utiliser la cartographie morphopédologique comme un outil d'aide à la recherche en géomorphologie. Le massif de Baturité est l'un des nombreux massifs humides qui ponctuent la région semi-aride du Nordeste brésilien (fig. 1). D'une superficie totale proche de 800 km<sup>2</sup>, c'est un massif montagneux d'altitude modérée (800-900 m en moyenne dans la partie centrale et sommitale du massif) qui domine par des versants abrupts et sinueux les vastes plaines environnantes du *Sertão* établies vers 100-200 m. En faisant barrière aux alizés chargés d'humidité qui viennent de l'Atlantique, cet obstacle montagneux favorise le déclenchement de précipitations orographiques responsables d'une pluviométrie élevée (> 1 300 mm/an) et abrite un îlot de forêt sempervirente (*mata atlântica*) au milieu de la forêt sèche décidue (*caatinga*) du domaine semi-aride (< 900 mm/an). L'essen-

tiel du substratum géologique du massif montagneux et de son piémont est constitué de gneiss et de migmatites d'âge précambrien (CPRM, 2003). Une mince couverture de sédiments cénozoïques (formation Barreiras) recouvre le socle dans la partie orientale de la zone d'étude. Dans la littérature existant sur la région, e.g. les inventaires Projeto Radambrasil (1981) et l'atlas IPLANCE (1997), les nombreuses données géomorphologiques et pédologiques ont été systématiquement traitées de façon indépendante pour une édition cartographique à petite échelle. Signalons aussi les travaux plus académiques des pédologues de l'Université Fédérale du Ceará (Lima, 1983 ; Frutuoso do Vale, 1991) qui portent sur des secteurs restreints du massif de Baturité ou de son piémont mais sont rarement accompagnés d'une carte détaillée de la couverture pédologique étudiée.

Souvent utilisée par le passé pour faire l'inventaire des sols de régions peu connues, la méthode morphopédologique a dû être adaptée ici du fait de l'existence d'une quantité importante de données déjà disponibles ; de méthode d'investigation primaire elle est ainsi passée au rang d'outil de synthèse. Une autre adaptation méthodologique a concerné le recours aux techniques récentes que représentent les modèles numériques de terrain (MNT) et les systèmes d'information géographique (SIG). Pour réaliser la carte morphopédologique du massif de Baturité et de son piémont (Bétard, 2007), nous avons procédé en trois phases. Une première phase, préparatoire, s'est déroulée d'abord sur le terrain en le confrontant avec la documentation existante (cartes topographiques et géologiques, cartes de sols et descriptifs pédologiques), avec pour objectif d'élaborer un inventaire provisoire des principaux paysages morphopédologiques. Le travail préliminaire de terrain a principalement consisté en une description systématique des trois composantes essentielles de chaque paysage morphopédologique identifié : le modelé, le manteau d'altération et le sol. Pour la composante sol, chaque profil pédologique étudié sur le terrain a été décrit horizon par horizon, en prenant soin d'indiquer à chaque fois l'épaisseur, la couleur (code Munsell), la texture (appréciée au toucher), la structure, la porosité, l'enracinement, la présence ou l'absence de CaCO<sub>3</sub> (effervescence ou non à l'acide chlorhydrique dilué). Une seconde phase avec nouvelle prospection sur le terrain a ensuite permis de sélectionner plusieurs profils représentatifs sur lesquels ont été collectés des échantillons de sol et d'altérite. Cet échantillonnage a été réalisé dans le but d'aboutir à une caractérisation analytique précise des sols et des altérations grâce à un travail de laboratoire, ce qui a nécessité le recours à des techniques « standard » de la pédologie (pH H<sub>2</sub>O et KCl, granulométrie, détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange cationique, évaluation des teneurs en carbone et en azote, analyse chimique totale, extractions sélectives des formes du fer), ainsi qu'à des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX). À côté de ces analyses systématiques, plusieurs techniques d'analyse complémentaires ont été employées au cas par cas : sédimentologie des dépôts (granulométrie, morphoscopie, exoscopie), pétrographie et micromorphologie des horizons pé-

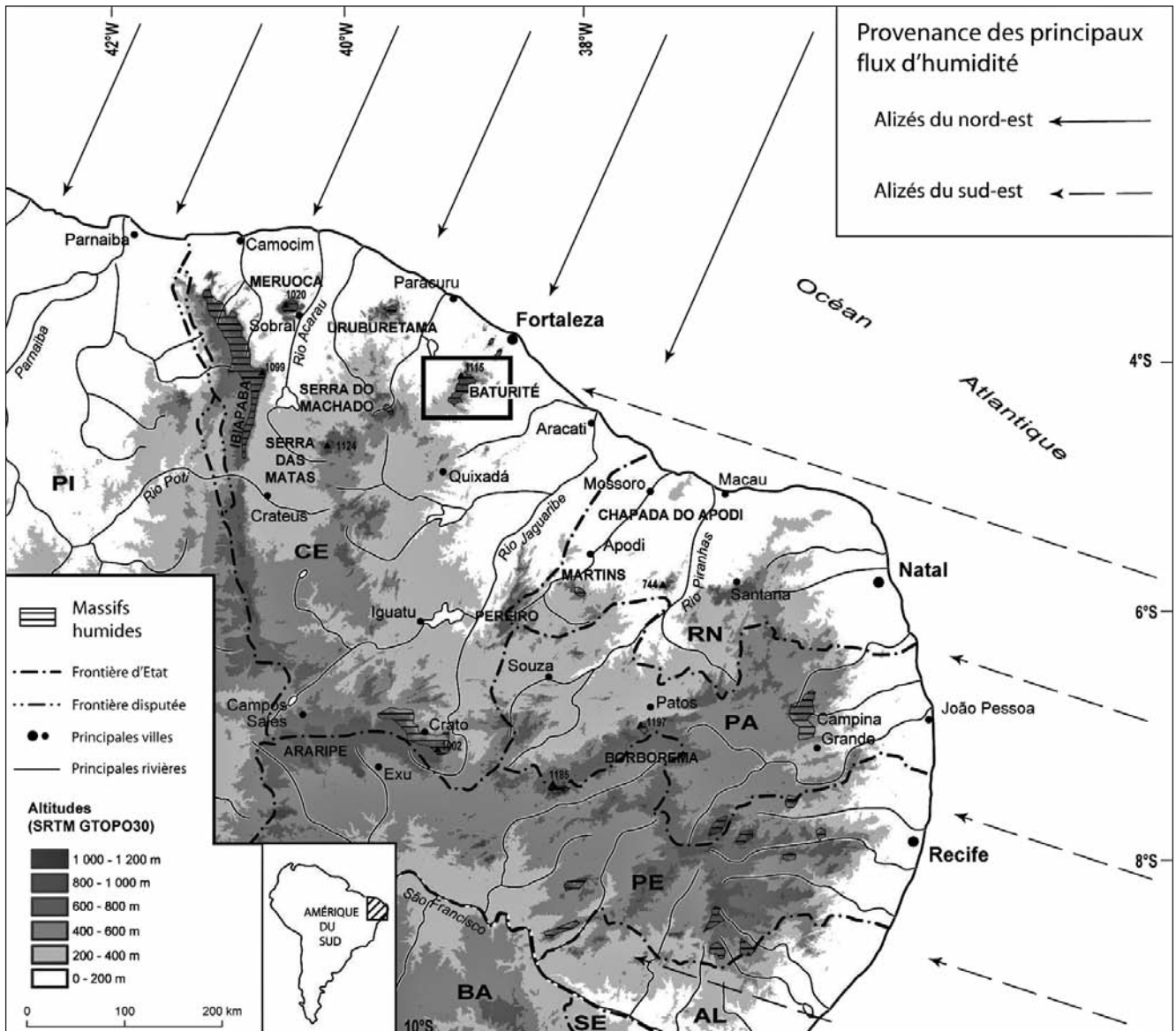


Fig. 1 – Carte de localisation des massifs humides du Nordeste brésilien montrant leur exposition face aux principaux flux atmosphériques d'humidité. 1 : massifs humides ; 2 : frontière d'état ; 3 : frontière disputée ; 4 : principales villes ; 5 : principales rivières ; 6 : alizés du nord-est ; 7 : alizés du sud-est. Les différents états représentés sur cette carte sont : AL, Alagoas ; BA, Bahia ; CE, Ceará ; PA, Paraíba ; PE, Pernambuco ; PI, Piauí ; RN, Rio Grande do Norte ; SE, Sergipe. Le rectangle représente la zone cartographiée lors de l'étude morphopédologique du massif de Baturité (Bétard, 2007), et représentée de manière simplifiée sur la figure 2.

Fig. 1 – Location map of the different humid massifs of Northeast Brazil showing their exposure to the trade winds. 1: humid mountains; 2: state border; 3: disputed state border; 4: main cities; 5: main rivers; 6: northeast trade winds; 7: southeast trade winds. The different states on the map are: AL, Alagoas; BA, Bahia; CE, Ceará; PA, Paraíba; PE, Pernambuco; PI, Piauí; RN, Rio Grande do Norte; SE, Sergipe. Rectangle outlines the area mapped for the morphopedological study of the Baturité massif (Bétard, 2007), represented on figure 2.

dologiques et d'altération sur lames minces, approche géochimique et cristallochimique par microscopie électronique à balayage et spectrométrie d'émission X. L'ensemble des méthodes et techniques utilisées pour caractériser les sols et les altérations de la région d'étude a été présenté en détail par F. Bétard (2007). Les principaux types de sols de la zone étudiée ont ensuite été classés en suivant le système international de la *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS Working Group WRB, 2006), mais aussi le système national

de classification des sols en vigueur au Brésil (SiBCS, 2005). Une troisième et dernière phase a consisté en l'élaboration d'un système d'information géographique (SIG), avec pour but de traiter et de spatialiser les informations recueillies sur le terrain et au laboratoire, puis de les cartographier. Plusieurs fonds cartographiques et imageries disponibles ont été à l'origine de la mise en place de ce SIG. Ce sont essentiellement des données topographiques numériques ou numérisées (modèle numérique d'altitude de la *Shuttle*

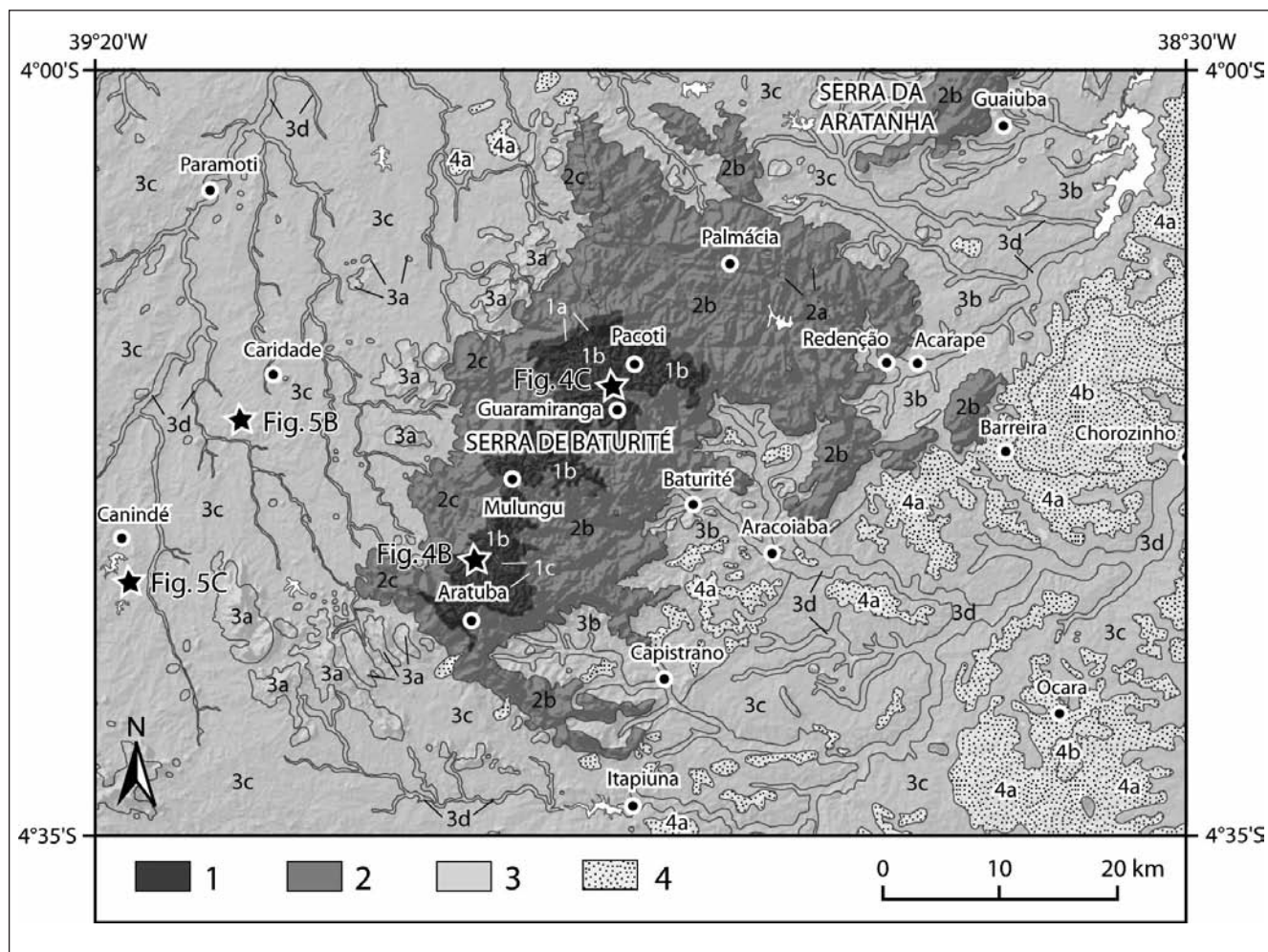


Fig. 2 – Carte simplifiée des paysages morphopédologiques du massif de Baturité et de son piémont (Nordeste brésilien). Cette esquisse correspond à une simplification de la carte des paysages morphopédologiques à 1/250 000 éditée par F. Bétard (2007). 1 : zone sommitale du massif de Baturité à modelé en « demi-oranges » ; 2 : zone périphérique de dissection profonde à modelé en « pains de sucre » ; 3 : basse plaine à pédiments et inselbergs du Sertão ; 4 : bas plateaux sédimentaires pré-littoraux ou Tabuleiros. Les indices sur la carte renvoient à la légende de la figure 3. Les étoiles localisent les photographies des figures 4 et 5.

Fig. 2 – *Simplified morphopedological map of the Baturité massif and its piedmont (Northeast Brazil)*. This sketch corresponds to a simplification of the 1:250 000 scale morphopedological landscape map edited by F. Bétard (2007). 1: summit area of the Baturité massif with 'meia laranja' topography; 2: peripheral area of highly dissected landscape with rocky domes; 3: 'Sertão' plain with pediments and inselbergs; 4: pre-littoral tablelands or 'Tabuleiros'. Lettered indications on the map refer to the legend in figure 3. Stars locate photos on figures 4 and 5.

Radar Topography Mission et cartes topographiques de l'Institut Brésilien de Géographie et Statistiques à l'échelle 1/100 000), les données géologiques de l'atlas digital du Ceará (CPRM, 2003), la carte des sols numérisée du volume concerné du Projeto Radambrasil (1981), ainsi qu'une image satellitaire de type Landsat ETM+ du 7/10/1999. Dans ce SIG, l'un de nos apports a été l'adjonction d'une couche d'information représentant le drainage climatique potentiel calculé (Bourgeon et Pédro, 1992), qui permet d'apprécier la quantité moyenne d'eau disponible annuellement pour participer à l'altération d'après les données météorologiques locales. L'ensemble de ce travail a finalement permis d'aboutir à la réalisation d'une carte morphopédologique du massif de Baturité et de son piémont éditée à l'échelle 1/250 000 (Bétard, 2007).

## Résultats et discussion

Les principaux résultats obtenus en application de la méthode exposée sont synthétisés sur les figures 2 et 3. L'inventaire morphopédologique réalisé aboutit à proposer un découpage de l'espace en quatre grands paysages morphopédologiques : (1) la zone sommitale du massif de Baturité, à climat humide et à modelé en « demi-oranges » ; (2) la zone périphérique de dissection profonde, à climat sub-humide et à modelé en « pains de sucre » ; (3) la basse plaine à pédiments et inselbergs du Sertão à climat semi-aride, qui forme le piémont d'érosion légèrement disséqué du massif de Baturité ; (4) les bas plateaux sédimentaires ou *Tabuleiros* à climat semi-aride, formant le piémont construit en arrière de la côte (formation Barreiras). Le document carto-

ZONE GÉOGRAPHIQUE	PAYSAGES MORPHOPÉDOLOGIQUES		SYMBOLE	GÉOLOGIE	ALTÉRATION		TYPES DE SOL	
	UNITÉ	SOUS-UNITÉ			(1)	(2)	Classification WRB (2006)	Classification SiBCS (2005)
MASSIF DE BATURITÉ	1 Zone sommitale du massif	Crêtes culminantes de quartzite	1a	Quartzites	MONOSIALLITISATION	Kaolinite + gibbsite	Leptosols / Podzols	Neossolos Litólicos / Espodossolos
		Demi-oranges (collines convexes)	1b				Acrisols	Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos
		Bas-fonds plats	1c				Fluvisols / Gleysols	Neossolos Flúvicos / Gleissolos
	2 Zone périphérique de dissection profonde	Dômes rocheux de type <i>pain de sucre</i>	2a	Gneiss et granites		Kaolinite + illite	Leptosols	Neossolos Litólicos
		Pentes fortes/vallées en V de la bordure orientale humide	2b				Lixisols	Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos
		Pentes fortes/vallées en V de la bordure occidentale semi-aride	2c				Leptosols / Lixisols	Neossolos Litólicos / Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos
SERTÃO	3 Basse plaine à inselbergs	Reliefs résiduels de type inselberg	3a		BISIALLITISATION	Smectite + illite + kaolinite	Leptosols	Neossolos Litólicos
		Interfluves du piémont oriental sub-humide	3b				Lixisols	Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos
		Interfluves de la plaine semi-aride	3c				Luvissols / Cambisols	Luvissolos / Cambissolos
		Bas-fonds plats à excès d'eau temporaire	3d	Planosols			Planossolos	
TABULEIROS	4 Bas plateaux sédimentaires	Formations détritiques néogènes (Barreiras)	4a	Conglomérats et sédiments sablo-argileux	MONOSIALLITISATION "HÉRITÉE"	Lixisols	Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos	
		Couvertures de sables éoliens pléistocènes	4b	Sables	Pas ou peu d'altération	Arenosols	Neossolos Quartzarênicos	

Fig. 3 – Légende de la carte des paysages morphopédologiques du massif de Baturité et de son piémont à 1/250 000 (adaptée d'après Bétard, 2007). L'altération est décrite selon (1) le type dominant et (2) les minéraux argileux diagnostiques associés. Les types de sols ont été classés suivant deux systèmes de classification, très semblables par leur démarche scientifique (ce sont des référentiels morphogénétiques) et leur critères : le référentiel international WRB (IUSS Working Group WRB, 2006) et le référentiel pédologique brésilien (SiBCS, 2005).

Fig. 3 – Legend of the 1:250 000 scale morphopedological landscape map of the Baturité massif and its piedmont (adapted after Bétard, 2007). Weathering is indicated with (1) the dominant weathering type and (2) the associated clay minerals. Soil types follow two classification systems, very similar in their diagnostic criteria: the World Reference Base for soil resources (IUSS Working Group WRB, 2006) and the Brazilian taxonomic system (SiBCS, 2005).

graphique original à 1/250 000 (Bétard, 2007) était de trop grand format pour être reproduit à l'identique dans cet article et la figure 2 n'en représente qu'une forme synthétisée ; sa légende détaillée (fig. 3) donne en revanche un aperçu complet de l'inventaire réalisé et de la démarche employée. Celle-ci se présente sous la forme d'un tableau à double entrée : les composantes principales de chaque paysage morphopédologique (modélé, géologie, altération, sols) sont représentées en colonnes tandis que les grandes unités figurent en lignes. Chaque grande unité de paysage a ensuite été sub-

divisée en différentes sous-unités correspondant à la fois à un type de modelé élémentaire (relief résiduel, bas-fond...), à un type d'altération (mono- ou bi-siallitisations et leurs minéraux argileux diagnostiques) et au(x) type(s) de sol dominant(s) (taxons WRB et SiBCS).

La discussion des résultats porte sur 4 points :

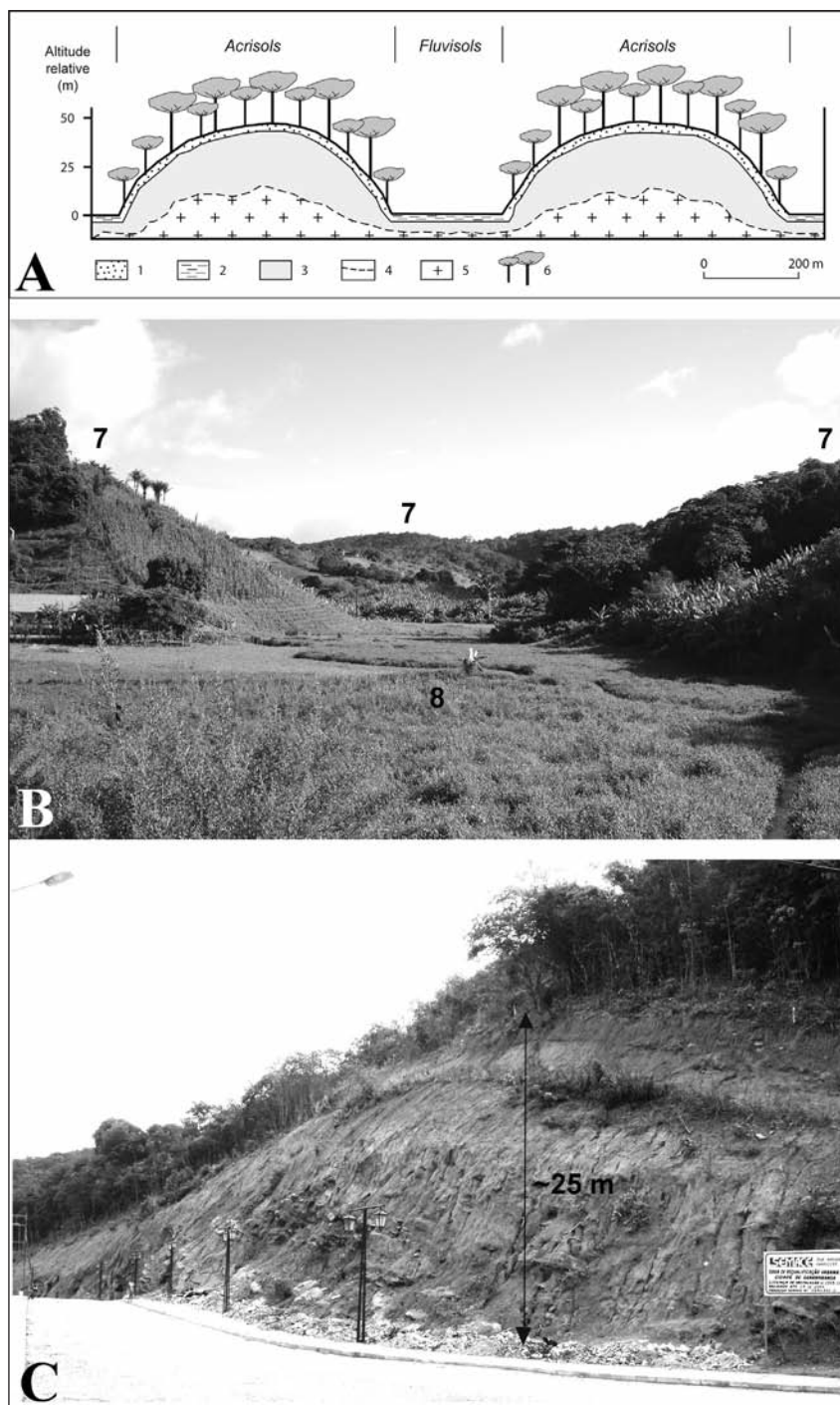
1) Au plan méthodologique, le choix de faire une carte morphopédologique a permis de s'affranchir des normes de précision d'une prospection pédologique classique, qui *grosso modo* auraient imposé une observation par cm<sup>2</sup> de

Fig. 4 – Le modelé en demi-oranges au sommet du massif de Baturité (Ceará, Brésil). A : paysage multiconvexe forestier de la zone sommitale du massif de Baturité. 1 : sol rouge-jaune profond (Acrisol) sur altérite en place ou remaniée ; 2 : sol jeune sur formations colluvio-alluviales (Fluvisol) ; 3 : manteau d'altération kaolinique ; 4 : front d'altération ; 5 : roche saine (gneiss cohérent) ; 6 : forêt sempervirente (*mata atlântica*) ; B : bas-fond plat entre les versants des demi-oranges, entre Mulungu et Aratuba au sud du massif de Baturité ; 7 : demi-orange ; 8 : bas-fond plat ; C : coupe dans une demi-orange à Guaramiranga. Le manteau d'altération, dont la puissance atteint ici 25 mètres au-dessus de la roche saine visible au niveau de la route, est issu de la décomposition poussée du gneiss précambrien. Sur ce manteau profond et de couleur rouge, dont la consistance très friable est typiquement celle d'une isaltérite kaolinique, se développent des Acrisols rouge-jaune où les horizons pédologiques atteignent régulièrement 2 mètres d'épaisseur. (photos : F. Bétard).

Fig. 4 – 'Meia laranja' topography at the top of the Baturité massif (Ceará, Brazil). A: typical morphopedological landscape of the summital area of the Baturité massif. 1: in situ or disturbed red-yellow soil (Acrisol); 2: poorly evolved soil on colluvio-alluvial formations (Fluvisol); 3: kaolinite-rich weathering mantle; 4: weathering front; 5: fresh bedrock (gneiss); 6: evergreen forest ('mata atlântica'); B: typical flat valley floor between the hillslopes of 'meias laranjas', between Mulungu and Aratanha in the southern part of the Baturité massif; 7: 'meia laranja'; 8: flat valley floor; C: deep section through a convex hill or 'meia laranja' at Guaramiranga. The kaolinite-rich, red-coloured, 25 m-thick weathering mantle was formed by decomposition of Precambrian gneiss. In the upper part of the section, red-yellow Acrisols developed under an evergreen forest ('mata atlântica') (photos: F. Bétard).

carte publiée (environ 950 observations pour la carte à 1/250 000 réalisée) si l'objectif poursuivi avait été de refaire la carte pédologique sans retomber dans le travers d'une simple révision de la légende sans reprise des limites. L'allègement du nombre des observations est une constante depuis les premières études morphopédologiques conçues en partie pour répondre à la nécessité de diminuer le coût des études (Kilian, 1972) ; il a ici été encore facilité par les nombreuses données disponibles.

2) L'inventaire réalisé, spécifiquement orienté vers une recherche fondamentale à travers l'étude des relations géomorphologie-altérations-sols, a conduit à des apports nouveaux pour la géomorphologie de la région étudiée. À l'échelle du massif de Baturité, la cartographie morphopédologique a permis d'introduire des nuances morphoclimatiques dans un schéma plus général et de type structural, comme souvent proposé dans les travaux antérieurs de géomorphologie portant sur la ré-



gion Nordeste (voir à ce sujet la synthèse de J.-P. Peulvast et V. Claudino Sales, 2003). En particulier, dans la zone sommitale du massif de Baturité à climat humide, les observations combinées sur la forme du modelé et l'épaisseur du manteau d'altération rougeâtre de nature kaolinique (20-30 m) ont conduit pour la première fois à l'identification de véritables demi-oranges, de 30 à 50 mètres de commandement et de largeur hectométrique à kilométrique (fig. 4). Bien que les demi-oranges soient devenues un symbole de la tropicalité né au Brésil, les descriptifs existants sur la morphologie du massif de Baturité ne mentionnaient jamais ce type de modelé morphologiquement associé au réseau de



Fig. 5 – Les paysages morphopédologiques de la plaine semi-aride formant le piémont légèrement disséqué du massif de Baturité (Ceará, Brésil). A : organisation morpho-pédologique typique de la plaine semi-aride autour du massif de Baturité. 1 : horizons pédologiques brun-rouge des Luvisols (A1 + Bt) ; 2 : horizons pédologiques bruns des Planosols ; 3 : horizons d'altération (arène gneissique) ; 4 : front d'altération ; 5 : roche saine (gneiss cohérent) ; 6 : forêt sèche décidue (caatinga) ; 7 : affleurement rocheux (tor) ; B : vue de la basse plaine à inselbergs, faiblement disséquée, dans les environs de Caridade sur le piémont occidental du massif de Baturité ; 8 : inselberg ; C : profil de Luvisol chromique typique, localisé sur le tiers supérieur d'un interfluve de la plaine semi-aride, au sud de Canindé. 9 : stone-line ; 10 : filon de quartz. La déformation du filon de quartz s'explique par la pédogenèse du sol rouge (effet du soutirage géochimique et effondrement de la structure héritée), peut être aidée par des processus de reptation sur l'interfluve en pente faible (photos : F. Bétard).

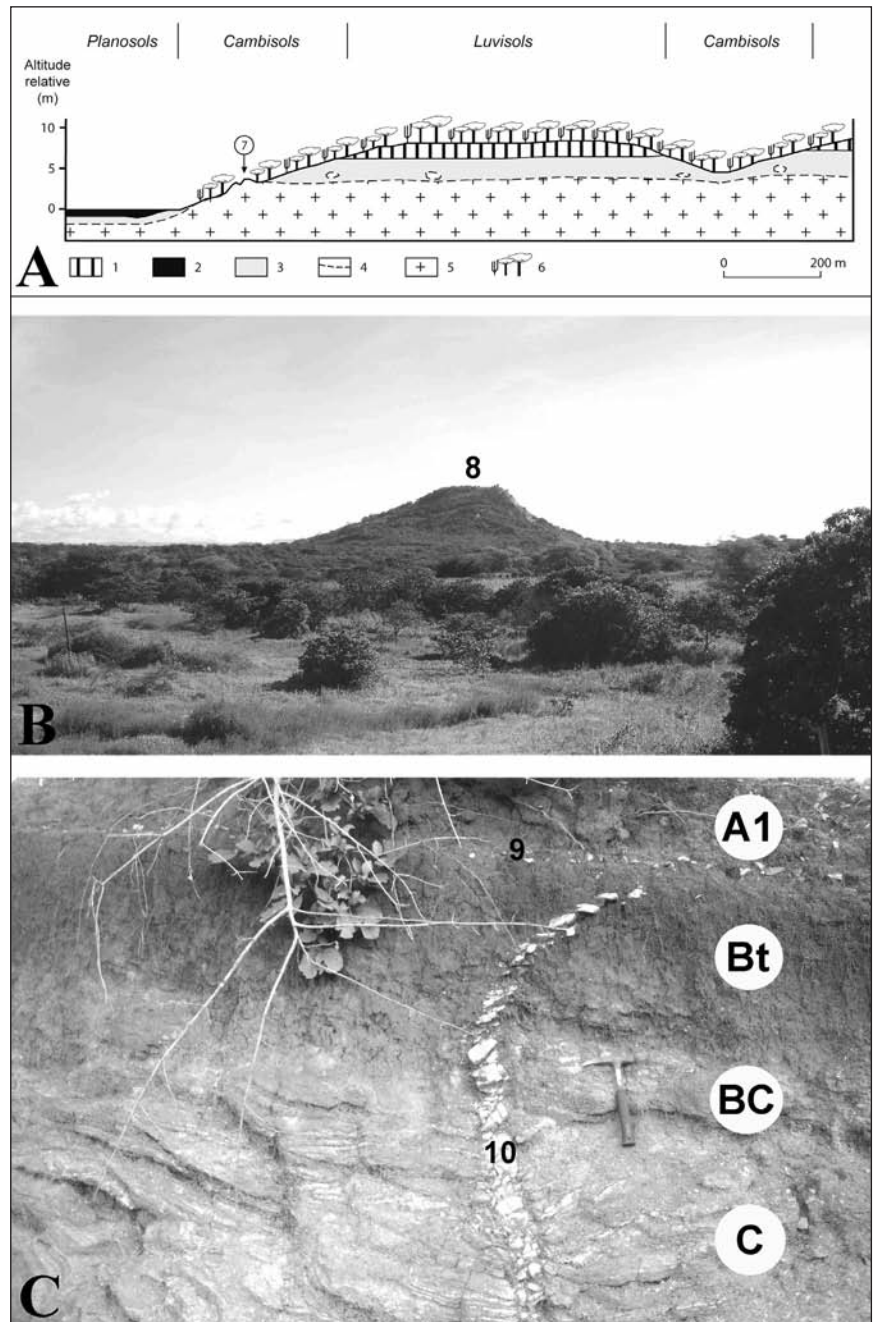


Fig. 5 – The morphopedological landscapes of the semi-arid plain forming the erosional piedmont of the Baturité massif (Ceará, Brazil). A: typical soil-landform assemblage of the semi-arid plain around the Baturité massif; 1: reddish-brown soil horizons of Luvisols; 2: brown soil horizons of Planosols; 3: weathering horizons (gneissic grus); 4: weathering front; 5: fresh bedrock (gneiss); 6: deciduous woodland ('caatinga'); 7: rock outcrop (tor); B: view of the slightly dissected plain with inselberg near Caridade on the western piedmont of the Baturité massif; 8: inselberg; C: profile of a typical chromic Luvisol, located on the upper third of an interfluve of the semi-arid plain, south of Canindé; 9: stone-line; 10: quartz vein. Deformation of the quartz vein is explained by red soil development through active geochemical dissolution, possibly aided by a soil creep process (photos: F. Bétard).

bas-fonds plats, pas même dans le volume concerné du Projeto Radambrasil (1981) où des systèmes de collines et de crêtes avaient simplement été décrits, ainsi que des vallées en V et des vallons à fond plat ayant fréquemment des formes « alvéolaires ». La carte géomorphologique établie suite au zonage environnemental de l'APA (Area de Proteção Ambiental) du massif de Baturité allait même jusqu'à employer les termes de « niveau de pédimentation » et de « vallées pédimentaires » pour décrire le réseau de bas-fonds qui s'inscrit uniformément en contrebas des demi-oranges (SEMACE, 1992). Considérer à la suite des travaux de la SEMACE que l'on a affaire à un « niveau de pédimentation » n'est pas acceptable dans un tel contexte morphopédologique et bioclimatique, car les bas-fonds plats inscrits en

contrebas des collines ferrallitiques n'ont absolument rien d'un pédiment ou d'un glacis d'ablation.

3) C'est aussi la cartographie morphopédologique déployée dans cette étude qui a permis, pour la première fois, de distinguer nettement deux unités pédo-stratigraphiques au niveau du piémont d'accumulation du massif de Baturité (ou *Tabuleiros*, cartographiés comme « Barreiras indifférencié » sur les cartes géologiques : CPRM, 2003) : (i) des formations détritiques néogènes, correspondant aux sédiments Barreiras *sensu stricto*, à faciès conglomératique et sablo-argileux rougeâtres superposés ; l'unité et l'ancienneté géologique de cet ensemble de dépôts sont attestées par la présence systématique d'horizons ferrugineux plinthitiques et carapacés, témoins de pédogenèses et d'altérations an-

ciennes développées sous climat plus humide que l'Actuel ; (ii) des couvertures de sables pléistocènes, plus récentes par leur position morphostratigraphique et surtout par leur faible degré d'évolution pédologique, dont la mise en place éolienne s'est accomplie lors des phases plus sèches qui ont affecté le Pléistocène.

4) Au plan pédologique, les apports sont moins significatifs mais nous ont néanmoins conduits à corriger les données existantes. Les cartes pédologiques les plus détaillées étaient celles du Projeto Radambrasil (1981) à 1/1 000 000, ainsi que la carte des sols de l'État du Ceará levée par F.A. Leite et J.N. Marques (IPLANCE, 1997) qui, bien que bénéficiant d'une échelle un peu plus grande (1/500 000), représentait le même niveau de détail. De la confrontation de ces documents avec le terrain, il est ressorti – et nous avons pu le vérifier à maintes reprises autour du massif de Baturité – que les auteurs des cartes pédologiques brésiliennes avaient eu 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 constitue néanmoins une entrave à la compréhension de la géographie des sols et de l'organisation du milieu. Ainsi les Luvisols chromiques, qui représentent les éléments les plus évolués des couvertures pédologiques du piémont semi-aride, sont surreprésentés par rapport à leur importance réelle sur le terrain. Ces derniers occupent en réalité des lanières disjointes, systématiquement en situation de sommet d'interfluve, et donc en position relativement préservée de l'érosion (fig. 5). À côté de ces sols évolués, on trouve d'importantes superficies de Cambisols qui correspondent pour leur part à des sols peu évolués, jamais cartographiés jusqu'alors, témoignant ici d'une dissection récente de la pédiplaine. Cette surreprésentation cartographique des Luvisols par des aplats de couleur homogène sur les cartes de sols peut être due en partie à l'échelle des documents élaborés, mais aussi à un enchaînement de faits notamment liés aux problèmes d'évolution des classifications de sols : rédaction initiale utilisant un système local de taxonomie des sols, conversion de la légende dans un nouveau système n'utilisant pas les mêmes critères de classification, puis réédition de la carte sans révision de ses limites. Nous avons pu corriger cette erreur en indiquant dans la légende de la carte morphopédologique les différents types de sols présents sur cette surface sans néanmoins pouvoir les distinguer par des limites sur la carte elle-même compte tenu, là aussi, de l'échelle retenue.

## Conclusion et perspectives

Après avoir longtemps été réservée aux inventaires des sols, la cartographie morphopédologique s'est avérée être aussi une méthode efficace dans le cadre d'une recherche géomorphologique en milieu tropical contrasté. La carte morphopédologique telle qu'elle a été conçue reste néanmoins un support utile dans une perspective appliquée à la mise en valeur agricole des terres : un diagnostic morphopédologique peut en effet servir de base solide à la recherche

agronomique et apporter son concours à la solution de problèmes touchant à la gestion des ressources naturelles, en particulier à la conservation des terres et des eaux : voir l'analyse réalisée dans les Andes équatoriennes pour caractériser les stations de mesure de l'érosion et en interpréter les résultats (De Noni *et al.*, 2001).

L'étude morphopédologique menée autour du massif de Baturité, dans le Nordeste brésilien, a aussi ouvert des perspectives : 1) La cartographie des paysages morphopédologiques réalisée autour du massif de Baturité pourrait être étendue à d'autres zones du Ceará ou du Nordeste ; cela permettrait de réviser/actualiser la carte des sols à moindre frais et certainement aussi de préciser certains aspects de la géomorphologie régionale ; 2) Pour la zone couverte par cette première cartographie, il est aussi envisageable de passer de la carte des paysages morphopédologiques à des cartes morphopédologiques plus détaillées, montrant les différentes facettes du milieu qui ont été identifiées mais non délimitées, avec l'appui des cartes topographiques à 1/50 000 et des photographies aériennes disponibles. Pour ces deux premières perspectives, la décision de donner suite appartient aux chercheurs brésiliens. Elles ont néanmoins un caractère assez général qui dépasse le cadre de l'exemple étudié. Les études géomorphologiques et pédologiques se sont en effet multipliées à la surface du globe depuis un peu plus d'un demi siècle ; les premières se sont souvent attachées à délimiter les surfaces d'aplanissement successives sans forcément bien identifier les retouches postérieures (exemple du modèle d'étagement des surfaces africaines de P. Michel, 1973, critiqué par G. Beaudet et R. Coque, 1994), et les secondes ont identifié des types de sols en accord avec les systèmes de classification en vigueur à l'époque de leur réalisation, systèmes qu'elles ont d'ailleurs contribué à faire évoluer. En présence de telles études, entre les deux attitudes extrêmes qui consistent à considérer que tout a été déjà fait ou que tout est à refaire, la cartographie morphopédologique telle qu'elle a été pratiquée dans l'exemple présenté ici apporte une solution séduisante, pour les corriger, les actualiser et les rendre compatibles avec une gestion informatisée des données sur le milieu physique.

Enfin, il faut aussi se poser la question des compétences disponibles pour réaliser de tels travaux. En France, la géomorphologie est traditionnellement enseignée dans les universités de lettres (cursus de géographie physique) et la pédologie dans les écoles d'agronomie et les universités de sciences (cursus de Sciences de la Terre). Cette situation est en train d'évoluer et l'on ne peut que suivre G. Rossi quand il écrivait (1989) « aussi, au-delà d'une collaboration dans la recherche, doit-on souhaiter que la formation dans nos disciplines fasse largement appel aux concepts et aux acquis de la spécialité voisine » en ajoutant que ces acquis soient bien les plus récents dans la production scientifique de chacune des deux disciplines.

## Remerciements

Les auteurs remercient J.-P. Peulvast (Université Paris-Sorbonne) et Y. Gunnell (Université Paris-Diderot), qui ont tous deux accepté de lire une version préliminaire du manuscrit. Ils

ont également apprécié les remarques constructives de G. Arnaud-Fassetta, de G. Bourrié et de trois relecteurs anonymes, qui ont tous contribué à l'amélioration de l'article.

## Références

- Beaudet G., Coque R. (1994)** – Reliefs et modelés des régions tropicales humides : mythes, faits et hypothèses. *Annales de Géographie*, 577, 227-254.
- Bertrand R. (1972)** – Morphopédologie et orientations culturelles des régions soudaniennes du Siné-Saloum (Sénégal). *L'Agronomie Tropicale*, 27, 1115-1190.
- Bertrand R., Bourgeon G., Angé A., Grégoire J.-M. (1984)** – Les paysages morphopédologiques du complexe sucrier de Borotou-Koro (Côte d'Ivoire). Caractéristiques et genèse. *L'Agronomie Tropicale*, 39, 107-120.
- Bétard F. (2007)** – *Montagnes humides au coeur 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 Paris-Sorbonne, 442 p.
- Birkeland P.W. (1999)** – *Soils and geomorphology*. Oxford University Press, New York, 430 p.
- Bourgeon G. (1989)** – *Explanatory booklet on the reconnaissance soil map of forest area, Western Karnataka and Goa*. Travaux de la Section Scientifique et Technique, Institut Français de Pondichéry, hors-série, 20, 203 p.
- Bourgeon G., Pedro G. (1992)** – Rôle majeur du drainage climatique dans la différenciation altéritique et pédologique des sols des régions chaudes. Exemple du passage sols fersiallitiques-sols ferrallitiques au sud du Karnataka (Inde). *C-R. Acad. Sci. Paris*, Sér. II, 314, 717-725.
- Collectif (1974)** – Aménagement écologique, réflexions méthodologiques, exemples pratiques. *L'Agronomie Tropicale*, 29, 121-363 + cartes.
- Coque R. (1993)** – *Géomorphologie*. Armand Colin, Paris, 5<sup>e</sup> édition, 503 p.
- CPRM (2003)** – *Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará*. Mapas na escala 1:500,000. Serviço Geológico do Brasil, CD Rom.
- De Noni G., Viennot M., Asseline J. et Trujillo G. (2001)** – *Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes*. Editions de l'IRD. Collection latitudes 23, 220 p.
- Eschenbrenner V., Badarello L. (1975)** – *Étude pédologique de la région d'Odienné ; carte des paysages morpho-pédologiques au 1 : 200 000<sup>e</sup> et notice explicative*. ORSTOM Éditions, Paris, 123 p.
- Eschenbrenner V., Filleron J.-C., Richard J.-F. (1974)** – Applications en Côte-d'Ivoire. *Annales de l'Université d'Abidjan*, série G – IV, 85-101.
- Eschenbrenner V., Grandin G. (1970)** – La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilékrou (Côte d'Ivoire) et Diébougou (Haute Volta). *Cahiers ORSTOM. Série Géologie*, 2, 205-245
- Frutuoso do Vale J. (1991)** – *Levantamento semidetalhado de solos de uma 'área piloto' nos municípios de Pacoti e Guaramiranga-CE*. Dissertação de Mestrado, UFC-Fortaleza.
- Gaucher G. (1974)** – Plaidoyer pour la pédologie agricole. *L'Agronomie Tropicale*, 29, 133-140.
- Gaucher G. (1981)** – *Traité de pédologie agricole. Tome II : Les facteurs de la pédogenèse*. G. Lelotte Editions, Dison, 730 p.
- Girard M.-C. (1972)** – Méthodologie de la photopédologie. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie*, 48, 1-10.
- Guillobez S. (1979)** – «Les milieux vertiques» du bassin de la Volta Blanche dans la région de Bagré (Haute Volta). *L'Agronomie tropicale*, 34, 23-39.
- Henquin, B., Avril, C., Bock, L., Mathieu, L. (1991)** – Potentialités physiques et stratégies de mise en valeur du milieu dans le haut bassin du fleuve Gambie. Cas d'étude : le village de Téliré. *Annales de Gembloux*, 97 (4), 277-291.
- IPLANCE (1997)** – *Atlas do Ceará*. IPLANCE, Fortaleza, 65 p.
- IUSS Working Group WRB (2006)** – *World Reference Base for Soil Resources 2006. 2<sup>nd</sup> edition*. World Soil Resources Report, 103, FAO, Rome, 128 p.
- Jamagne M., King D., Girard M.-C., Hardy R. (1993)** – Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie. *Science du sol*, 31, 141-169.
- Jenny H. (1941)** – *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York, 281 p.
- Kilian J. (1972)** – Les inventaires morphopédologiques, conceptions, applications au développement agricole. *L'Agronomie Tropicale*, 27, 930-938.
- Kilian J. (1974)** – Étude du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail, méthodes cartographiques. *L'Agronomie Tropicale*, 29, 141-153.
- Lima T.S.F. (1983)** – *Estudo comparativo dos solos das vertantes úmida e seca do Maciço de Baturité-CE*. Dissertação de Mestrado, UFC-Fortaleza.
- Michel P. (1969)** – Les grandes étapes de la morphogenèse dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. *Bull. IFAN Dakar*, 31, série A2, 293-324.
- Michel P. (1973)** – *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique*. Mém. ORSTOM, Paris, 63, 1, 2, 3, 752 p.
- Pédro G., Kilian J. (1986)** – Les travaux pédologiques et les études des milieux physiques réalisés par les organismes français de recherche pour le développement dans les régions chaudes. In : *Sols et eaux, acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale. Actes du séminaire tenu à la Banque Mondiale les 15 et 16 mai 1986*, ORSTOM Éditions, Paris, 5-65.
- Petit M. (1990)** – *Géographie physique tropicale. Approche aux études du milieu*, Khartala ACCT, 351 p.
- Peulvast J.-P., Claudino Sales V. (2003)** – Carta morfoestrutural do Ceará e áreas adjacentes do Rio Grande do Norte e da Paraíba. Nota explicativa. In CPRM : *Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará*. Mapas na escala 1:500,000. Serviço Geológico do Brasil, CD Rom, 73 p.
- Poss R. (1979)** – *Traitement de l'information et spatialisation en pédologie : l'exemple de la coupure Katiola*. ORSTOM, Adiopodoumé, 17 p. multigr.
- Poss R. (1982)** – *Étude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte d'Ivoire) : cartes des paysages et des unités morphopédologiques : feuille Katiola à 1:200.000*. ORSTOM, notice explicative n° 94, Paris, 144 + 30 p.

- Poss R. (1996)** – *Étude morphopédologique du nord du Togo à 1/500 000<sup>e</sup>*. ORSTOM, notice explicative n°109, Paris, 142 p.
- Projeto Radambrasil (1981)** – *Levantamento integrado dos recursos naturais do Brasil. Folha Jaguaribe-Natal*. Ministério das Minas e Energia-MME, Rio de Janeiro, 740 p.
- Raunet M. (1983)** – Les terroirs agricoles du «bas-glacis» de la haute vallée de la Volta Noire (Haute-Volta) : leur identification par approche géomorphologique et pédologique. *L'Agronomie tropicale*, 38, 175-185.
- Robbez-Masson.M. (1994)** – *Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale: application à la cartographie des pédopaysages*. Thèse de doctorat, École nationale supérieure agronomique de Montpellier, 189 p.
- Robbez-Masson J.M., Doledec A.F., Billy F. (1991)** – Relations entre facteurs du milieu naturel et pédopaysages : variables pertinentes pour une délimitation assistée. In *Gestion de l'espace rural et SIG*, Collection INRA, Florac, 5-15.
- Rossi G. (1989)** – Exemples de morphopédologie tropicale. In *Sol-trop 89 : actes du premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale*, ORSTOM Éditions, Paris, 87-105.
- Schaetzl R., Anderson S. (2005)** – *Soils: genesis and geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge, 817 p.
- SEMACE (1992)** – *Zoneamento ambiental da APA da Serra de Baturité : diagnósticos e diretrizes*. SEMACE, Fortaleza, 136 p.
- SiBCS (2005)** – *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2<sup>a</sup> edição, EMBRAPA, Rio de Janeiro, 360 p.
- Teissier J. (1974)** – Terroir de Mogtédo (Haute-Volta). Etude morpho-pédologique en vue de la mise en valeur des terres. *L'Agronomie Tropicale*, 29, 312-363.
- Thibout F. (1974)** – Interactions morphogénèse, pédogénèse. Exemple d'application dans la région de Bechloul (Algérie). *L'Agronomie Tropicale*, 29, 300-311.
- Tricart J. (1965)** – *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Masson, Paris, 496 p.
- Tricart J. (1974)** – De la géomorphologie à l'étude écographique intégrée. *L'Agronomie Tropicale*, 29, 122-132.
- Tricart J. (1978)** – *Géomorphologie applicable*. Masson, Paris, 204 p.

Article soumis le 12 janvier 2009, accepté le 25 juin 2009.