

fol
1096^e

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA
CENTRO DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO TRÓPICO SEMI-ÁRIDO - CPATSA
INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPMENT EN
COOPERATION - ORSTOM

Computador RW
OK

ANALYSE NUMERIQUE DES UNITES DE PAYSAGE
EN TANT QU'ENSEMBLES HETEROGENES

APPLICATION A L'ETUDE DU COUPLE SOL-VEGETATION
DANS LE MUNICIPE DE JUAZEIRO DA BAHIA (BRESIL)

PETROLINA - PE

1 9 8 7



ANALYSE NUMERIQUE DES UNITES DE PAYSAGE
EN TANT QU'ENSEMBLES HETEROGENES

APPLICATION A L'ETUDE DU COUPLE SOL-VEGETATION
DANS LE MUNICIPE DE JUAZEIRO DA BAHIA (BRESIL)

Jean-François PARROT*
Georges FOTIUS**
Gilles RICHE**
Luis MONTOVANI***

* ORSTOM-Téledétection 70 route d'Aulnay 93140 Bondy (France)

ORSTOM EMBRAPA Convention ORSTOM/EMBRAPA-CPATSA CP 23 Petrolina PE (Brésil)

*** EMBRAPA-CPATSA CP 23 Petrolina PE (Brésil)

RESUME

Les unités de paysage du Municipio de Juazeiro da Bahia (Brésil) ont été définies sur le terrain en associant sol et végétation. Des parcelles caractéristiques issues de cette classification croisée ont servies de support à l'étude numérique des données satellitaires. Les unités de paysage servant de base à cette étude essentiellement axée sur l'exploitation de ce type de données, ne regroupe que des parcelles à même de fournir une réponse radiométrique homogène à la taille des pixels Landsat.

La méthodologie développée à cette occasion en raison de la diversité des éléments constitutifs des unités de paysage dans le Municipio de Juazeiro da Bahia, consiste dans un premier temps à définir le degré de corrélation existant entre les valeurs de réflectance et leurs divers rapports, et les variables de toute nature mesurées dans les parcelles d'entraînement, qu'il s'agisse de données caractérisant les sols et les formations végétales ou bien même de données physico-chimiques. Cette première phase implique que l'on n'exclue a priori, sur terrain, aucun élément d'observation susceptible d'être quantifié.

La définition des thèmes, qui peuvent être cartographiés ultérieurement à l'aide des documents MMS Landsat résulte donc de cette recherche préalable qui met en évidence les thèmes que l'on peut discriminer. On constate ainsi qu'il est souvent illusoire de rechercher tel ou tel type de sol ou de végétation; mais qu'en revanche des thèmes tels que par exemple l'état de surface des sols, l'importance globale du couvert végétal, voire même la teneur en certains éléments chimiques, représentent des ensembles qu'il est possible de cartographier en s'appuyant sur les valeurs de réflectance ou leur combinaison.

Dans un deuxième temps, on cherche à savoir si tous les pixels d'une classe correspondant à un thème retenu au cours de la première phase et défini par ses huit bornes radiométriques, forment un ensemble disjoint ou bien sécant, et lorsqu'il est sécant, à savoir quel est le nombre des pixels des classes d'origine qui entrent dans l'intersection.

On obtient ainsi des documents cartographiques mettant en évidence, d'une part les ensembles monothématiques correspondant soit à la totalité, soit à une portion d'un thème, d'autre part les ensembles hétérogènes issus du croisement des thèmes.

Dans cet article, les traitements effectués sont illustrés par l'étude d'un secteur du Municipio de Juazeiro da Bahia, celui-ci entrant dans le cadre d'une recherche plus vaste couvrant l'ensemble du Municipio.

INTRODUCTION

La caractérisation des unités de paysage en tant qu'unités géo-ambientales à partir des images satellitaires repose sur la recherche de caractères discriminants, qu'il s'agisse de la réponse spectrale dans un ou plusieurs canaux, de la texture et/ou de la structure, voire de la morphologie. La difficulté réside essentiellement dans l'hétérogénéité fréquente si ce n'est quasi-générale des unités de paysage; l'extrapolation à l'ensemble de l'image de ces unités éventuellement cernées dans des zones d'entraînement aboutit alors souvent à des phénomènes de regroupement ou de dispersion des classes correspondantes et l'on doit généralement faire appel à des critères de plus en plus subjectifs afin de mettre en évidence au stade de l'interprétation, les thèmes recherchés sur les documents cartographiques obtenus.

L'utilisation de matrice de confusion montre qu'en général seuls quelques thèmes sont susceptibles d'être correctement individualisés lorsqu'on les considère comme formant un tout.

La méthode proposée dans cet article, et appliquée ici à l'étude de la répartition géographique des unités de paysage définies à partir des couples sol-végétation répertoriés dans le Municipio de Juazeiro da Bahia (Brésil), part d'un a priori contraire et prend en compte l'hétérogénéité qui, le plus souvent, caractérise les unités de paysage. On cherche donc à individualiser les éléments homogènes qui entrent dans les ensembles hétérogènes que constituent généralement ces unités, et parmi ceux-ci, ceux qui présentent un caractère sinon dominant, du moins suffisamment discriminant. Une unité de paysage est ainsi définie par la somme multi-dimensionnelle des éléments qui la composent [cf. fig. 1]. Dans ces conditions, l'analyse numérique doit être précédée par une étude sur le terrain permettant d'établir sans a priori et de façon aussi précise que possible le répertoire des éléments primaires entrant dans les unités de paysage, qu'il s'agisse par exemple de l'état de surface des sols, de leur couleur, ou du niveau de recouvrement des strates végétales. Outre cet ensemble de variables propres aux observations faites directement sur le terrain, des données physico-chimiques telles que le pH ou la teneur en divers éléments chimiques sont également prises en compte.

Avant même d'analyser en détail les divers éléments qui composent les unités de paysage du Municipio de Juazeiro da Bahia et les développements méthodologiques inhérents aux applications thématiques concernant soit le couvert végétal soit la nature des sols rencontrés, seront globalement exposés la méthode utilisée et les différentes étapes d'utilisation.

METHODOLOGIE

Dans ce type d'étude, méthodologie de terrain et analyse numérique sont indissociables et complémentaires. Dans une première étape, les relevés sur le terrain sont effectués sur des parcelles d'entraînement dont la position est induite par une première analyse de documents satellitaires analogiques à l'échelle de 1/250 000. Ces parcelles, dont la position doit être aussi précise que possible, sont définies en raison de leur représentativité et regroupées dans un ensemble de classes a priori en fonction de leurs traits distinctifs. L'analyse numérique suit cette première étape et comporte deux volets : le premier est de type statistique et vise à la définition de classes réellement représentatives que l'on désignera sous le nom de thèmes, ceux-ci s'appuyant sur les plus fortes corrélations que présentent entre elles, pour un élément primaire ou un assemblage donné de quelques-uns de ces éléments, réflectance et variables exogènes; le second recherche le degré de résolution des thèmes susceptibles d'être discriminés.

A tous les niveaux de l'étude, l'interactivité entre la méthode mise en oeuvre sur le terrain et le traitement numérique des images, affine la fiabilité des premiers résultats.

L'ensemble méthodologique mis au point à l'occasion de l'étude du Municipale de Juazeiro da Bahia repose sur la recherche de critères objectifs, ce qui doit ainsi rendre cet ensemble transportable.

METHODOLOGIE DE TERRAIN : Parcelles et classes a priori

L'étude des échantillons types sur le terrain [cf. plus loin] se fait dans les limites de parcelles d'entraînement de 1 à n pixels. La taille de ces parcelles dépend soit d'une mesure réelle sur le terrain (mais celle-ci n'est pas toujours aisée en raison de la nature du couvert végétal), soit d'une estimation de l'extension géographique d'une unité de paysage en tenant compte d'une relative homogénéité des niveaux de gris entourant, sur un ou plusieurs canaux, le ou les pixels correspondant strictement à l'échantillonnage. Au cours de l'analyse numérique, la subjectivité de cette estimation est tempérée par une étude comparative des résultats fournis en prenant appui sur les parcelles ainsi définies et sur celles, plus petites, dont l'extension a été parfaitement mesurée sur le terrain.

Les parcelles d'entraînement sont regroupées en classes a priori; chaque classe a priori est définie comme représentative d'une unité de paysage répertoriée au cours d'une reconnaissance générale de la zone d'étude. Il peut s'agir par exemple, de vertisols à végétation clairsemée, de planosols dénudés à horizon de surface sableux, de caatingas denses sur sol caillouteux, etc... En fait, chaque parcelle, partant chaque classe a priori, résulte d'un regroupement d'éléments primaires, tels que par exemple, la granulométrie de l'horizon de surface des sols, l'état d'altération des éléments grossiers, la couleur du sol, la densité de la végétation et/ou son agencement..., ensemble d'éléments qui sont pris en compte sans exclusive et quantifiés. Plus de vingt variables ont été ainsi systématiquement répertoriées sur 218 parcelles, variables auxquelles il convient d'adjoindre celles qui sont issues de données physico-chimiques comme par exemple le pH, la teneur en matière organique et/ou en éléments chimiques divers.

Le but de ce recensement dans une première étude systématique de cette nature sera précisément de mettre en évidence à l'issue de cette recherche les variables pertinentes qui devront seules être prises en compte pour étendre l'application de cette méthode à une zone plus vaste d'un même milieu climatique.

ANALYSE STATISTIQUE DISCRIMINANTE

De manière à tester entre autres la fiabilité des observations faites sur le terrain et celle des regroupements retenus, les classes a priori sont tout d'abord soumises à une analyse discriminante non paramétrique qui s'inscrit dans le cadre d'une approche bayésienne de la discrimination et qui est asymptotiquement efficace au sens de Bayes (classification). Cette méthode utilise la distance de Kolmogorov-Smirnov entre les distributions de probabilité. Elle découpe, à partir des seuils qu'elle définit dans les canaux les plus discriminants, des segments dans lesquels se répartissent les pixels correspondants aux classes considérées comme formant un ensemble a priori, et fournit l'arbre de décision. Il est ainsi possible de voir, dès cette étape, quels sont les thèmes ou les éléments les plus robustes et quelle est la répartition des pixels des classes a priori dans les segments obtenus.

A elle seule, cette analyse permet de mettre en évidence les classes a priori qui réagissent comme des ensembles relativement homogènes. Ceci se vérifie lorsque les pixels d'une classe a priori se retrouvent tous presque exclusivement au sein d'un des segments terminaux de l'analyse discriminante.

En revanche, la répartition dans un segment terminal de la quasi-totalité des pixels des parcelles entrant dans une classe, n'est pas exclusive de la présence éventuelle d'autres éléments dans ce segment. Ceci signifie seulement que le segment obtenu, et que l'on peut éventuellement visualiser, contient intégralement cette classe. En effet, l'analyse forme un segment terminal lorsqu'un certain nombre de conditions préalables sont remplies; ce peut être le nombre minimum de pixels fixé par segments terminaux, ou par exemple, le nombre minimum de pixels dans un segment pour pouvoir le scinder. Ainsi, une seule coupure sur un seul canal peut très bien conduire à un segment terminal. Dans ces conditions, la visualisation sur un écran vidéo par exemple, de tous les pixels de l'image correspondants au segment défini par cette seule coupure, ne conduira qu'à la définition de plages comprenant, non seulement les pixels de l'image présentant les mêmes caractéristiques que celles des parcelles de la classe priori comprise dans ce segment, mais également tous les pixels hors classe qui correspondent aux conditions imposées par ce seul seuillage.

Dans cet esprit, l'intersection des classes a priori, qui se traduit par une répartition en proportion variable des pixels de plusieurs classes dans un segment terminal, souffre du même handicap.

Quoiqu'il en soit, ce type d'analyse renseigne pour partie sur la qualité de l'échantillonnage et c'est sur le parcellaire ainsi testé que repose les premières étapes de l'étude statistique descriptive de l'association des parcelles au sein des classes.

ANALYSE STATISTIQUE DESCRIPTIVE : Typologie des thèmes

Le logiciel STEPPE [Parrot, 1986] mis au point dans le cadre de cette étude permet de savoir quel est le degré des corrélations existant entre les réflectances ou leurs différents rapports et les diverses variables exogènes introduites par le programme [cf. organigramme fig. 2]. A titre d'exemple, l'étude globale des 218 parcelles du Municipipe de Juazeiro da Bahia est reportée dans le tableau de la figure 3. Ce tableau fait déjà ressortir à lui seul les variables les plus pertinentes. Les corrélations ainsi mises en évidence au niveau global sont testées au niveau de chaque parcelle, de leur regroupement en classes a priori ou de tout autre type de regroupement. Cette méthode permet d'une part de confirmer ou d'infirmer la classification issue des observations de terrain, mais en outre, elle débouche sur une définition de thèmes sur lesquels s'appuiera la phase terminale de l'analyse numérique. Ces thèmes correspondent soit à des éléments primaires discriminants ou à l'association de certains de ces éléments (par exemple, pourcentage en éléments grossiers de surface, importance du couvert végétal, variation des teneurs en tel ou tel élément chimique, etc...), soit à l'association de ces éléments primaires en unité de paysage parfaitement circonscrite.

Le logiciel fournit aussi les histogrammes mono ou bidimensionnels de ces thèmes et des parcelles entrant dans ces thèmes. Ces histogrammes indiquent naturellement quelles sont les bornes inférieures et supérieures des valeurs de réflectance brute, ou recalculée, rencontrés. Ils permettent de plus en fonction de l'allure de la courbe obtenue et d'une confrontation des histogrammes entre eux, de valider le regroupement des parcelles d'entraînement dans tel ou tel thème, de cerner et de comprendre la présence de distorsions éventuelles que l'on pourra alors, soit rejeter soit maintenir en connaissance de cause pour effectuer le traitement suivant.

L'ensemble des programmes que comprend le logiciel STEPPE permet ainsi de définir une typologie aussi précise que possible des thèmes qui seront ultérieurement cartographiés.

CARTOGRAPHIE EN FONCTION DES VALEURS DES HYPERCUBES DES THEMES DEGRE DE RESOLUTION DE CES THEMES

La vérification de la pertinence des thèmes étant faite à l'aide de l'analyse précédente, il est alors possible de relever systématiquement les valeurs radiométriques des parcelles retenues dans quatre canaux. Les valeurs radiométriques pouvant être des valeurs brutes de réflectance ou des valeurs issues de rapports entre réflectance. On définit ainsi les bornes radiométriques de chacun des thèmes étudiés.

La prise en compte des valeurs des bornes radiométriques des thèmes sur quatre canaux Landsat ou leurs divers rapports (par exemple, indice de végétation verte, indice de végétation jaune, indice de brillance, etc...) a fait l'objet d'un traitement numérique mis au point dans le cadre de cette étude. Le traitement (programme TRIBOR, Parrot, 1985-1986) permet de savoir si tous les pixels d'une classe correspondant à un thème défini par huit bornes radiométriques forment un ensemble disjoint ou bien sécant, et lorsqu'il est sécant, quelle est la part respective des pixels des classes d'origine qui entrent dans ce nouvel ensemble.

Afin de mieux décrire la méthode, nous envisagerons à titre d'illustration une analyse ne comportant que huit classes. Dans cet exemple, les classes successives correspondant à un thème sont codées de la façon suivante :

classe 1	code 1
classe 2	code 2
classe 3	code 4
classe 4	code 8
classe 5	code 16
classe 6	code 32
classe 7	code 64
classe 8	code 128

Chaque classe est donc codée par la puissance $n-1$ de 2. Ce type de codage des classes successives prend en compte toutes les intersections possibles entre les différentes classes [cf. fig. 4]. Ces intersections, ainsi que les ensembles de pixels restant dans les classes d'origine, sont désignés sous le terme de lots. Dans l'exemple présent, le traitement est susceptible de former 255 lots différents correspondant à tous les cas de figure possibles, la valeur codée des lots étant le résultat d'une simple addition des valeurs codées des classes constitutives. Par exemple, l'intersection des classes 1 et 2 (codées 1 et 2) formera le lot codé 3, le lot codé 12 proviendra de l'intersection des classes 3 et 4 (codées 4 et 8), l'intersection des classes 4, 5 et 7 (respectivement codées 8, 16 et 64) formera le lot codé 88, etc...

Le tableau de la figure 5 fournit les résultats d'un traitement illustratif effectué sur une sous-zone du Municipio de Juazeiro da Bahia. Le programme TRIBOR calcule le nombre de pixels dans chacune des classes ou thèmes avant intersection, et le nombre de pixels dans les lots formés au cours du traitement. Dans l'exemple présent, les classes 1, 2 et 8 (codées 1, 2 et 128) forment des ensembles disjoints. En revanche, la classe 6 (codée 32) disparaît totalement en tant que lot en s'amalgamant pour partie avec la classe 4 (lot 36) et les classes 3 et 4 (lot 44). Pour leur part, les autres classes voient leur nombre de pixels diminuer dans les lots monothématiques correspondants.

La proportion des classes entrant dans chacun des lots obtenus peut ainsi être aisément calculée (cf. résultats reportés dans le bas du tableau de la fig. 5).

Dans cet exemple de traitement seulement effectué à partir des classes a priori représentées dans la sous-zone sans faire appel à l'étude typologique des thèmes décrite plus haut, on constate qu'en partant de huit classes, on forme 11 lots. Trois d'entre eux (1, 2 et 128) correspondent intégralement aux classes d'origine (1, 2 et 8), et deux autres classes a priori (4 et 5) ne subissent qu'une légère érosion. Par ailleurs, les lots codés 64 et 80 contiennent à eux deux 100% de la classe 7. Seul la classe 3 se répartit dans quatre lots différents (4, 12, 36 et 44). Elle correspond en fait à une classe dont les caractères n'étaient pas suffisamment cernés lorsque ce test d'utilisation du programme a été réalisé. C'est d'ailleurs pour répondre aux problèmes que posait l'existence d'une classe de cette nature que le logiciel STEPPE a été mis au point.

Classe d'origine	Code des classes	Code des lots	Nombre de pixels dans les classes	Nombre de pixels dans les lots
1	1	1	3202	3202
2	2	2	6895	6895
3	4	4	12526	1355
4	8	8	26038	19978
		12		2605
5	16	16	2414	2139
6	32	32	8566	0
		36		5111
		44		3455
7	64	64	325	50
		80		275
8	128	128	1338	1338
Lot codé	Pourcentage des classes d'origine dans les lots			
1	100% de la classe 1			
2	100% de la classe 2			
4	11% de la classe 3			
8	77% de la classe 4			
12	21% de la classe 3 et 10% de la classe 4			
16	89% de la classe 5			
36	60% de la classe 6 et 41% de la classe 3			
44	40% de la classe 6, 27% de la classe 3 et 13% de la classe 4			
64	15% de la classe 7			
80	85% de la classe 7 et 11% de la classe 5			
128	100% de la classe 8			

Fig. 5 : Résultat détaillé d'un traitement effectué à titre illustratif sur une sous-zone 256x256 pixels du Municípe de Juazeiro da Bahia.

Si le programme TRIBOR permet de savoir quelle est la proportion des thèmes qui entrent dans telle ou telle intersection, en revanche, les proportions respectives de ces thèmes au sein des intersections ne sont pas connues.

Signalons que dans la pratique, les n lots formés sont en fait recodés de 1 à n . Nous verrons plus loin, au cours des applications, que ceci présente l'avantage de pouvoir croiser, à l'aide d'histogrammes bidimensionnels, les informations provenant de recherches thématiques différentes. On pourra de la sorte obtenir des documents cartographiques pluri-thématiques.

APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A L'ETUDE DU COUPLE SOL-VEGETATION DANS LE MUNICIPE DE JUAZEIRO DA BAHIA

GENERALITES

(a) Choix de la zone d'étude

La zone géographique choisie pour tester la méthodologie d'inventaire des ressources naturelles du Tropic Semi-Aride (TSA) du Brésil en s'appuyant sur l'imagerie spatiale et les logiciels élaborés à cette fin, se situe à la limite des états du Pernambouc et de Bahia, sur la rive droite du Rio Sao Francisco [cf. fig. 6]. Cette zone couvre l'ensemble du Municipio de Juazeiro da Bahia qui s'étend sur 7 000 km² environ. Le Municipio de Juazeiro da Bahia présente en effet un grand nombre d'avantages pour entreprendre une étude de cette amplitude. On retiendra tout d'abord la proximité du siège du CPATSA* permettant d'effectuer autant d'aller et retour terrain-laboratoire qu'il est nécessaire, et la présence d'un réseau routier relativement dense et bien distribué dans un paysage de cette nature. Le Municipio de part son extension, présente une composition géologique variée : calcaires (Caatinga et Bambui), roches basiques et roches acides, entraînant une grande variété dans les types de sols. Les paysages végétaux sont également diversifiés et ont une extension géographique suffisamment importante pour chacune des formations principales. D'un autre côté, la morphologie essentiellement monotone qui prédomine dans la région élimine les effets parasites éventuellement dûs au relief. Enfin l'imagerie MSS Landsat est nette à la date retenue (23 juillet 1983); les paysages y apparaissent de façon très contrastée et le repérage des points de référence (routes, canaux, lignes à haute tension, lits des cours d'eau temporaires et permanents, mares, retenues d'eau, clairières, zones de culture, reliefs isolés, etc...) est somme toute assez facile.

(b) Choix des points de sondage

L'étude sur le terrain est initialisée par une interprétation visuelle d'une image en fausse couleur sur papier à l'échelle du 1/250 000. Ce document sert à l'établissement des itinéraires de prospection et à la localisation des premiers emplacements de relevés. Ces derniers sont sélectionnés dans des tâches chromatiquement homogènes à l'oeil nu et repérés au mieux sur les documents analogiques. Ils sont ensuite retenus s'ils répondent aux exigences que l'on s'impose pour être définitivement sélectionnés, à savoir, une extension largement supérieure à la taille du pixel afin d'être sûr d'obtenir au moins un pixel représentatif pour le point de sondage, et la présence d'une association sol-végétation également répartie sur l'ensemble de la zone.

* CPATSA = Centro des Pesquisas Agropecuarias do Tropic Semi-Arido
(Centre de Recherches Agropastorales du Tropic Semi-Aride)

(c) Délimitation des parcelles d'entraînement

Les points de sondage ayant été ainsi définis et retenus par les thématiciens, les parcelles d'entraînement doivent être délimitées de façon à former des quadrilatères de 1 à n pixels et doivent être repréées en lignes et colonnes sur le document satellitaire. Cette recherche est facilitée par un suivi de l'extension géographique du point de sondage à l'aide de l'observation de fenêtres numériques sur les quatre canaux de la zone où se situe ce point. La taille de la parcelle d'entraînement dépend alors de l'évolution des valeurs de réflectance des pixels qui avoisinent le pixel correspondant au point de sondage strictement repéré et du plus ou moins grand écart entre ces valeurs et celle du pixel central. Cet artifice est utilisé lorsque l'extension géographique n'a pu être directement mesurée sur le terrain. Nous avons vu plus haut comment peut être levé le caractère apparemment subjectif de cette estimation. La taille des parcelles d'entraînement est variable et est fonction du degré d'homogénéité perçu par les thématiciens dans la zone étudiée.

ETUDE DE LA VEGETATION

(a) Généralités

Situé au centre de l'aire du Tropique Semi-Aride (TSA) du Nordeste Brésilien, le Municipie de Juazeiro da Bahia est fondamentalement recouvert d'une végétation ligneuse dénommée "Caatinga" (signifiant "Forêt blanche" en Tupi) se présentant en général sous la forme d'un "taillis" arbustif plus ou moins dense de 2 à 5 m de hauteur, piqueté d'arbres petits à moyens (6 à 10 m de haut). Les grands arbres, quand ils existent encore, se rencontrent le long des axes de drainage ou des cours d'eau, ou encore, en tête de vallée dans les montagnes.

Cependant, cette région de la moyenne vallée du Sao Francisco est assez exceptionnelle dans la mesure où l'on y rencontre des superficies importantes couverte par une végétation à forte dominance d'herbacées allant jusqu'à la prairie à graminées sans pour autant noter la présence de mares individualisées. On observe, bien entendu, toutes les transitions possibles jusqu'à la caatinga telle qu'elle a été définie plus haut. Cette particularité a d'ailleurs contribué au choix de cette région pour l'établissement de la méthodologie proposée.

Du point de vue de la conservation de la végétation, il est important de souligner que si, dans l'ensemble, l'occupation humaine ancienne des rives du Rio Sao Francisco a conduit à une très forte secondarisation du tapis végétal, le phénomène n'est pas très perceptible dans la région en dehors des environs des agglomérations et des zones de colonisation récente. Il est en revanche possible que la végétation modifiée anciennement soit actuellement en équilibre avec la pression anthropique, ce qui peut amener l'observateur à considérer comme climatique telle ou telle formation très claire en fait issue de la destruction d'une forêt sèche au siècle dernier. Quelques rares informations recueillies sur le terrain tendraient à le faire penser.

Les grands types de formations végétales que l'on peut noter sur l'ensemble du Municipie de Juazeiro da Bahia sont les suivantes :

- prairies à graminées inarbusives ou très faiblement arbusives; elles se situent au centre du Municipe;
- caatingas très claires, au Centre, à l'Ouest et à l'extrême Est;
- caatingas claires de transition
- caatingas semi-denses, surtout en piedmont; l'anthropisation y est nette;
- caatingas denses sur les serras et les reliefs ondulés caillouteux; elles se situent à l'Est, au Sud et à l'Ouest du Municipe.

(b) Relevés de terrain et variables

Les lieux de relevé étant définis à la suite d'un commun accord entre le Botaniste et le Pédologue, l'emplacement dépendant à la fois de l'état du tapis végétal et de la nature du substrat, le relevé phytosociologique est réalisé au moyen de la fiche phytoécologique du CPATSA (cf. annexe), directement dérivée de celle mise au point par le CEPE-CNRS de Montpellier, mais beaucoup plus réduite en raison du manque de certaines données de base (météorologiques, par exemple). Pour réaliser cette étude, quelques autres modifications ont été apportées de façon à détailler les rubriques "état de surface du sol" et "stratification de la végétation" qui, a priori, doivent influencer fortement les réponses radiométriques.

En dehors de l'en-tête consacré à l'identification de la station, le relevé comprend quatre chapitres principaux :

1. **Milieu physique** : outre les données correspondant au relief, l'analyse détaillée de la surface du sol permet une appréciation de la "pierrosité" et de la nature de la terre fine apparente. Les cailloutis ont été divisés en "quartz" et "autres" pour des raisons de commodité. En fait, cette partie de la fiche fait double emploi avec les données recueillies par le Pédologue, mais elle a été conservée dans la mesure où d'une part, ces résultats pondèrent ceux de la Pédologie (calibration différente des cailloux, opérateur différent), et où d'autre part, à partir de cette rubrique, le relevé phytosociologique prend en compte la rugosité du sol et rassemble de manière autonome, les principales variables du facteur "état de surface" nécessaires au traitement informatique des images Landsat.

2. **Stratification de la végétation** : les principales strates sont notées avec un indice subjectif d'importance relative de X à XXX, un pourcentage de recouvrement (cf. infra : observations) et également, pour les arbres et arbustes, une distance moyenne d'écartement (estimée) entre les individus permettant, si besoin est, d'évaluer grossièrement la densité des ligneux par hectare.

Le type de formation végétale est codé par un nombre à quatre chiffres au maximum où le premier correspond à la strate la mieux représentée. Une référence aux formations en bosquets a été introduite de manière à contrôler des déviations possibles dans les valeurs de réflectance.

3. **Inventaire floristique** : chaque espèce reçoit un indice d'abondance relative (subjectif), mais en séparant les espèces ligneuses des herbacées, ce qui assure un contrôle des données de la rubrique "stratification de la végétation". La superficie inventoriée peut être très variable, de quelques dizaines de mètres carrés à plusieurs hectares, en fonction de l'homogénéité de la végétation et/ou de l'étendue du sol correspondant au profil pédologique. En règle générale, la superficie du relevé est supérieure ou égale à 1/4 d'hectare.

4. **Artificialisation de la végétation** : cette partie de la fiche de relevé se révèle malaisée à remplir car, dans la plupart des cas, l'observation directe ne peut compenser la nécessité d'un informateur local qu'il est très difficile de rencontrer dans cette région peu peuplée lors d'une prospection sur itinéraires. Il en résulte une indétermination fréquente et le dernier caisson, résultant de tous les précédents, doit pourtant être rempli car il permet de juger des écarts des valeurs de réflectance des formations instables (caatingas semi-denses, par exemple) et, dans la grande majorité des cas, la codification dépend de la seule appréciation de l'observateur.

Observations : Pour être le plus représentatif possible, un relevé botanique se doit d'être exécuté en saison des pluies, mais l'interprétation des données Landsat se fait presque toujours sur des images prises en saison sèche pour des questions de contraste et de couverture nuageuse. A ceci, il faut ajouter que le TSA brésilien se caractérise par une pluviométrie annuelle faible (350 à 800-1 000 m/m) présentant de fortes variations aussi bien interannuelles que spatiales. Par ailleurs, la répartition des pluies au cours de la période humide (novembre à mai) est extrêmement aléatoire et entraîne fréquemment des arrêts dans la croissance des plantes et même des fanaisons précoces auxquelles succèdent de nouvelles poussées foliaires dès le retour des pluies.

Pour être comparatives, les estimations du couvert végétal ne peuvent pas correspondre aux valeurs réelles de couverture à la date du relevé, mais à une évaluation du pourcentage de recouvrement comme si les espèces pérennes caducifoliées se trouvaient en pleine période d'activité végétale. Cette estimation n'est pas si difficile à faire qu'il y paraît de prime abord, quand on sait que 90% du couvert ligneux des caatingas de la moyenne vallée du rio Sao Francisco est constitué par moins de 20 espèces et fréquemment de 3 à 6 par relevé, parfois moins encore. En ce qui concerne les espèces annuelles, dont l'apparition et la croissance sont étroitement liées à la régularité et à la périodicité des pluies utiles, l'importance de leur couvert sur le plan de l'exploitation des données satellitaires est relativement faible et, en tout état de cause, ne prend tout son sens que dans le cas de l'utilisation d'images de la même année que celle à laquelle sont effectués les relevés.

(c) Traitements

L'hypothèse de travail consiste à admettre que pour un pixel donné, soit une superficie d'environ 60x80 mètres au sol, la végétation quelle qu'elle soit modifie la réponse spectrale de ce pixel quelle que soit la nature du substrat et indépendamment de son influence et ce, même sur des images en saison sèche. Pour vérifier cette hypothèse, 9 variables quantifiées sur le terrain sont affectées à chacune des parcelles d'entraînement, à savoir :

- 1- strate II 0 à 25 cm
- 2- strate III 25 à 50 cm
- 3- strate IV 50 à 1 m
- 4- strate V 1 à 2 m
- 5- strate VI 2 à 4 m
- 6- strate VII 4 à 7 m
- 7- couvert total
- 8- terre fine
- 9- surface de base de la végétation

Observations

- le recouvrement par strate est noté sur le terrain en classes dégressives de 1 à 7 et chaque classe correspond à une fourchette de pourcentage de la surface totale.
ex. : classe 4 = recouvrement de 25 à 50%
Pour des raisons de commodité, on prend seulement en compte la borne supérieure du recouvrement, soit par exemple 50 pour la classe 4.
- le couvert total correspond à la somme des chiffres enregistrés sur les 6 strates mentionnées ci-dessus, plus celui de la strate VIII (>7m) qui n'a pas pu être prise en compte dans un premier temps.
- terre fine correspond au pourcentage de terre nue par rapport à la surface totale du relevé.
- la "pierrosité" du sol a été prise en compte dans les variables édaphiques.

Un calcul de corrélation sur les quatre canaux pour chacune des variables considérées (cf. tableau de la fig. 7) montre que la corrélation la plus élevée appartient à la variable 7. Dans un premier temps, il a donc été décidé de traiter graphiquement le seul couvert total qui représente la densité verticale de la végétation sans liaison nécessaire avec le nombre d'individus au mètre carré. C'est à dire qu'à une même valeur du couvert total peut correspondre soit une formation monostrate très basse, soit une végétation multistrate moyenne à haute.

A partir des données de terrain sur l'ensemble du Municipale (218 relevés) ont été définis a priori 22 types de classes de végétation avec 5 degrés possibles de densité, soit 110 combinaisons potentielles, mais seulement 72 d'entre elles ont été utilisées. Au vu de ce chiffre très élevé et de la dispersion des parcelles d'entraînement, il a été procédé à un premier regroupement en 10 classes et 2 degrés de densité, de manière à pouvoir effectuer une étude statistique des classes.

Le programme utilisé fournit les histogrammes de fréquence de chaque valeur de réflectance pour l'ensemble des pixels des parcelles prises en compte. La délimitation des valeurs maximales et minimales pour chaque classe est effectuée en fonction de la forme de la courbe que dessine l'histogramme. A quelques exceptions près (eau, ombre dense, par exemple), on observe toujours un certain tuilage entre les classes conduisant, s'il avère trop important, à un regroupement en thèmes de quelques unes de ces classes.

Le programme TRIBOR (cf. ci-dessus) est appliqué aux thèmes ainsi définis. Il met en évidence les thèmes "résistants", c'est à dire les formations végétales bien individualisées, et d'autres moins résistants qui n'apparaissent presque toujours qu'en mélange de thèmes. A ce stade, trois attitudes sont possibles : ou bien continuer à regrouper les classes pour définir de nouveaux thèmes, ou bien conserver ces formations mixtes si l'on estime devoir les individualiser en tant que types de végétation représentatifs phytosociologiquement, ou bien encore effectuer une vérification de la validité des parcelles d'entraînement et du bornage des thèmes.

ex. : un relevé de la classe "caatinga dense" correspondant en réalité à un bosquet isolé dans une plaine herbeuse présente des altérations de ses valeurs de réflectance et doit donc être éliminé de la classe "caatinga dense".

Au bout de ce cheminement, les 72 types de formations végétales ont été réduits à 8 thèmes sur l'ensemble du Municipio de Juazeiro da Bahia. C'est sur ces huit thèmes de base qu'ont été faits les traitements qui figurent dans le chapitre suivant.

ETUDE DES SOLS

(a) Généralités

Le très large éventail des sols observés dans le Municipio de Juazeiro da Bahia est en relation étroite avec la nature lithologique des roches-mères et les conditions de drainage naturel.

Le plateau central calcaire est pratiquement horizontal et dessine une surface structurale sur laquelle reposent des vertisols carbonatés, mais aussi des cambisols et des latosols eutrophes dans les zones les mieux drainées. Sur le socle cristallin sous-jacent qui est de nature très variée, les sols présentent des caractéristiques physico-chimiques également diversifiées. Sur sa bordure Est des calcaires métamorphiques portent des cambisols et des latosols eutrophes, les sols bruns non calciques (sols bruns eutrophes) prédominant sur les roches mélanocrates. Ces derniers se situent aussi, mais avec une extension réduite, dans la partie centrale du Municipio (sols "chocolats"). A l'Ouest, des sols "podzoliques" caillouteux ou non (sols ferrugineux) et des planosols sont largement dominants, les premiers se situant dans des zones bien drainées, les second sur des bas de pente. Une frange relativement étroite de régosols d'orientation nord-sud se place dans la partie centrale sur les granites et les migmatites. On observe des latosols dystrophes à l'extrême Sud sur des zones d'épandages de certains reliefs résiduels. Ces reliefs sont peu nombreux et se détachent nettement dans un paysage qui est dans l'ensemble faiblement ondulé. Ils comprennent des roches de nature variée (filons de quartzite macrocristallin, granito-gneiss) et donnent lieu à des sols lithiques.

Au Nord du Municipio, le long du Rio Sao Francisco, les alluvions occupent une frange très étroite, parfois inexistante. Les îles du fleuve sont de nature sableuse.

Les vallées des affluents du Rio Sao Francisco présentent des sols variés en fonction de la nature des roches traversées : ce sont des sols bruns non calciques dans le Rio Salitre, des régosols planosoliques dans le Riacho T et des vertisols calcaires dans le Riacho C . Les bandes alluviales sont généralement étroites, voire absentes.

(b) Relevés de terrain et variables

Sur le terrain, la démarche est adaptée aux caractéristiques du support graphique qui préside au choix des points de sondage et de la position des parcelles d'entraînement. Elle comporte :

1. une analyse de la structure superficielle du sol, notamment en ce qui concerne la couverture caillouteuse et la couleur.

2. des prélèvements (7 au maximum) effectués à des profondeurs standardisées pour faciliter le traitement statistique. Les profondeurs de prélèvements sont les suivantes : 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 50-70 cm, 70-90 cm, 90-110 cm, 110-130 cm. Les sols sont décrits sur le terrain en discriminant les horizons pédologiques conformément au manuel de prospection des sols en usage au Brésil().

3. une caractérisation physico-chimique et hydrique de tous les échantillons afin de pouvoir classer les sols et utiliser ces données dans une analyse géo-ambientale (). Les caractéristiques prises en compte sont les suivantes (selon les normes en vigueur à l'EMBRAPA)

- granulométrie
- densité réelle, densité apparente
- conductivité de l'extrait saturé
- pH eau
- complexe absorbant
- capacité d'échange
- matière organique
- phosphore

L'ensemble de ces données est réaménagé de façon à mieux cerner l'impact entre ces caractéristiques et celles du domaine géo-ambiental et notamment phytosociologique.

(c) Traitements statistiques

Une démarche en tous points similaire à celle qui a été décrite dans le chapitre consacré à l'étude de la végétation, a été appliquée à l'étude des sols. Le logiciel STEPPE a permis d'étudier l'interaction entre les données géo-ambientales et les signatures spectrales, amenant à des regroupements de parcelles d'entraînement en classes ou plus exactement en thèmes, selon des critères pertinents. Il a été ainsi non seulement possible de dégager celles des unités de paysage susceptibles d'être discriminées, mais encore d'établir des relations étroites entre des paramètres isolés et des réflectances et/ou leurs rapports (par exemple, couverture caillouteuse, teneur en calcium des horizons supérieurs) débouchant ainsi sur de véritables cartes thématiques.

Le tableau de la fig. 8 montre quelles sont les corrélations les plus fortes pour certains types de sols ou d'éléments primaires entrant dans les diverses unités de paysage.