

# Dégradation des pâturages amazoniens

## Description d'un syndrome et de ses déterminants

Th. Desjardins<sup>(1)</sup>, P. Lavelle<sup>(1)</sup>, E. Barros<sup>(2)</sup>, M. Brossard<sup>(3)</sup>, L. Chapuis-Lardy<sup>(1)</sup>, A. Chauvel<sup>(1)</sup>, M. Grimaldi<sup>(4)</sup>, F. Guimarães<sup>(5)</sup>, P. Martins<sup>(6)</sup>, D. Mitja<sup>(7)</sup>, M. Müller<sup>(5)</sup>, M. Sarrazin<sup>(8)</sup>, J. Tavares Filho<sup>(5)</sup> et O. Topall<sup>(9)</sup>

(1) IRD, LEST, 32, avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

(2) INPA, CPCA, CP478, Aleixo, 69011-970 Manaus, AM, Brésil

(3) IRD/EMBRAPA Cerrados, CP7091, 71619-970 Brasília, DF, Brésil

(4) IRD/USARQ/INRA, 65, rue de St-Brieuc, 35042 Rennes cedex, France

(5) UEL, CCA-Dept. de Agronomia, CP 6001, 86051-990 Londrina, PR, Brésil

(6) UFPa, CAP/NEAF, Campus Universitário do Guamá, Av. Augusto Corrêa, S/N, 66.075-620 Belém, PA, Brésil

(7) IRD - LER, B.P. 5045, 911 Avenue Agropolis, 34032 Montpellier, cedex 01, France

(8) IRD, BP165, 97323 Cayenne cedex, Guyane française

(9) INRA-Agronomie, BP 27, 31-326-Castanet-Tolosan cedex, France

**Cette étude a bénéficié du soutien financier (1996-1999) de l'Action Incitative Interinstitutionnelle**

### RÉSUMÉ

En Amazonie brésilienne, la presque totalité des zones déforestées depuis une trentaine d'années a servi à l'installation de pâturages dont une moitié a été depuis abandonnée dans un état de dégradation souvent avancé. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer cette dégradation, parmi lesquelles la détérioration de certaines propriétés physiques et chimiques des sols, le développement incontrôlé des adventices, l'effet des changements des peuplements de la macrofaune du sol, les attaques parasitaires, les effets de la gestion des parcelles. Afin de vérifier ces hypothèses, une étude comparative de plusieurs pâturages a été réalisée, associant leur historique, l'analyse de leur végétation (graminée plantée et végétation secondaire), de leur macrofaune et de quelques propriétés des sols. Deux groupes de pâturages ont été sélectionnés en fonction de leur état apparent de dégradation, sur des Oxisols en Amazonie centrale et des Ultisols en Amazonie orientale.

La dégradation des pâturages, caractérisée par une diminution de la phytomasse de la graminée introduite et l'augmentation de celle des adventices, n'apparaît pas directement liée à l'âge du pâturage ni à une dégradation marquée des sols. La déforestation et le brûlis qui la suivent provoquent généralement un tassement des horizons superficiels, une augmentation du pH, de la somme des bases et du taux de saturation. Au cours des années qui suivent l'installation du pâturage, ces caractéristiques évoluent très peu, indépendamment de l'état de dégradation des pâturages. La quantité de phosphore extractible et les teneurs en carbone organique et azote total n'évoluent pas de façon sensible en fonction de l'âge et de la dégradation des pâturages. Les peuplements de la macrofaune du sol sont en général fortement modifiés par la mise en pâturage. Dans un cas, nous avons pu mettre en évidence des changements de fonctionnement du sol liées à ces modifications de peuplements.

Il apparaît que les pratiques de gestion, comme le choix des graminées introduites, le contrôle de la pression exercée par le bétail, l'uti-

lisation des feux ou de la coupe pour contrôler les espèces adventices exercent une influence considérable sur l'évolution des pâturages.

#### Mots clés

Ecologie du sol, Ecologie végétale, Gestion durable, Brésil

#### SUMMARY

##### HYDRAULIC CONDUCTIVITY MEASUREMENT BY THE DISC INFILTRMETER: PRACTICAL AND THEORETICAL ASPECTS

During the last 30 years, pastures become the main land use following deforestation in Brazilian Amazonia. About 50 % of these areas are now abandoned and degraded. Several assumptions were advanced to explain degradation : changes in some chemical and physical properties of soils, variations in soil macrofauna populations, parasitic attacks, and management practices.

Vegetation (graminaceous planted and secondary species), soil macrofauna and soil characteristics of different pastures were studied to verify the accuracy of these assumptions. Two groups of pastures were selected according to their apparent state of degradation in central and eastern Amazonia (respectively, on oxisols and ultisols).

The phytomass of the planted graminaceous decreased in degraded pastures whereas those of secondary species increased. No correlation was observed between these changes and the age of pasture or a marked soil degradation. Slash and burn induced a compaction of the soil surface layer, an increase of soil parameters such as pH, sum of bases and saturation degree. During the years following installation of pastures, these characteristics remained rather stable in all pasture types, degraded or not. The contents of total carbon and nitrogen and extractable phosphorus remained also quite stable. The populations of soil macrofauna were largely modified by the installation of pasture, but without visible effects on soil functioning, except in one case.

Pasture management, i.e. choice of the graminaceous species, control of the carrying capacity, use of fire or cut to control the secondary vegetation strongly influenced the evolution of pastures.

#### Key-words

Soil ecology, Vegetal ecology, Sustainable management, Brazil

#### RESUMEN

##### DEGRADACIÓN DE LOS PASTOS DE AMAZONA: DESCRIPCIÓN DE UN SÍNDROME Y DE SUS DETERMINANTES

En la Amazonia brasileña, la casi totalidad de las zonas deforestadas desde hace una treintena de años ha servido para la instalación de pastizales de los cuales, la mitad han sido luego abandonados en un estado de degradación a menudo avanzado. Varias hipótesis han sido emitidas para explicar esta degradación, entre ellas la deterioración de ciertas propiedades físicas y químicas de los suelos, el desarrollo incontrolado de adventicias, el efecto de los cambios en las poblaciones de la macrofauna del suelo, los ataques parasitarios, los impactos de la gestión de las parcelas. Con el fin de corroborar estas hipótesis, se ha realizado un estudio comparativo de varios pastizales, asociando su historial, el análisis de su vegetación (gramíneas plantadas y vegetación secundaria), de su macrofauna y de algunas propiedades del suelo. Dos grupos de pastizales han sido seleccionados en función de su estado aparente de degradación, en oxisoles en la Amazonia central y en ultisoles en la Amazonia oriental.

La degradación de los pastizales, caracterizada por una disminución de la fitomasa de la gramínea introducida y el aumento de las adventicias, no aparece directamente relacionado con la edad del pastizal ni con una degradación marcada del suelo. La deforestación y la quema que la siguen, provocan generalmente una compactación de los horizontes superficiales, un aumento del pH, de la suma de bases y de la tasa de saturación. A lo largo de los años que siguen a la instalación del pastizal, estas características evolucionan muy poco, independientemente del estado de degradación de los pastizales. La cantidad de fósforo extraíble y la

L'Amazonie brésilienne, qui couvre une superficie de  $4,2 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>, est soumise à des dynamiques de peuplement humain et d'occupation des terres très variables selon les régions. Depuis la fin des années soixante-dix, la conversion de la forêt amazonienne en pâturages s'est poursuivie à un rythme rapide, soutenue durant de nombreuses années par une législation favorable. Aujourd'hui, le rythme de déforestation s'est légèrement ralenti, mais il est encore de l'ordre de 17 000 km<sup>2</sup>/an (INPE, 2000). En 1998, la surface totale déforestée pour l'Amazonie brésilienne était estimée à plus de 551 000 km<sup>2</sup> (INPE, 2000). Plus de 90 % de ces surfaces ont servi à l'installation de pâturages dont la moitié environ est actuellement utilisée (Fearnside et Barbosa, 1998). L'autre moitié est constituée de pâturages abandonnés, dans des états de dégradation variables mais globalement avancés.

La dégradation est définie ici comme une diminution de la capacité du pâturage à produire le fourrage utilisé par le bétail. L'observation visuelle permet souvent une rapide estimation de l'état de dégradation. L'étendue et la nature des modifications de l'écosystème liées à cette dégradation sont bien plus difficiles à évaluer et les causes en restent largement inexplicées. S'agit-il du remplacement de la graminée implantée par des espèces natives plus compétitives, d'une détérioration de la fertilité chimique ou des propriétés physiques du sol, ou encore d'une modification du fonctionnement du sol lié à l'appauvrissement de la biodiversité épigée ou endogée, ou d'une interaction de ces divers facteurs ? Les données actuelles de la littérature ne fournissent, dans le meilleur des cas, que des observations partielles. Une description précise des pâturages dégradés et une identification des facteurs à l'origine de cette dégradation sont nécessaires pour proposer des méthodes de réhabilitation efficaces.

L'objectif de notre travail était de caractériser l'état de pâturages de différents âges suivant divers critères, floristiques, pédologiques et biologiques, et d'identifier ainsi les mécanismes possibles de leur dégradation. Le travail est basé sur la mesure synchronique d'un vaste ensemble de critères destinés à caractériser globalement l'état des pâturages et proposer un ou des modèle(s) hypothétique(s) de leur dégradation. Les pâturages choisis ont été caractérisés par leur composition floristique, leur phytomasse, les caractéristiques chimiques du sol, certaines de ses caractéristiques structurales et physiques, et par la composition et l'abondance des peuplements de

macroinvertébrés.

## HYPOTHÈSES SUR LES CAUSES DE LA DÉGRADATION

Quatre hypothèses principales ont été formulées pour expliquer la dégradation des pâturages.

### H1. Modifications des propriétés chimiques du sol

La forêt primaire amazonienne se développe essentiellement sur des sols ferrallitiques (Oxisols et Ultisols) chimiquement très pauvres (Cochrane et Sanchez, 1982). Les graminées exotiques utilisées pour les pâturages peuvent être plus exigeantes en nutriments que les espèces natives et disparaître rapidement si la disponibilité en nutriments dans le sol diminue en dessous de seuils critiques. Le phosphore est souvent considéré comme étant l'élément le plus limitant dans ces sols (Teixeira *et al.*, 1996). Toutefois l'évolution des caractéristiques chimiques des sols diverge selon les situations étudiées en Amazonie. Ainsi les stocks de carbone du sol peuvent se maintenir stables (Choné *et al.*, 1991), diminuer faiblement (Desjardins *et al.*, 1994) ou fortement (Falesi, 1976), ou bien augmenter (Neill *et al.*, 1996). En Amazonie occidentale, Moraes *et al.* (1996) mettent en évidence une augmentation des quantités de bases échangeables dans les pâturages, quel que soit leur âge.

### H2. Détérioration des propriétés physiques et hydrauliques du sol

La structure du sol joue un rôle essentiel sur sa fertilité en contrôlant la disponibilité pour les plantes de l'eau, de l'air et des éléments nutritifs en solution. Les sols des pâturages sont soumis à des contraintes mécaniques qui peuvent en détériorer les propriétés physiques, et avoir des effets négatifs sur la croissance des graminées. Les perturbations physiques sont importantes lors du défrichage, et sont plus marquées si celui-ci est mécanique que s'il est manuel (Grimaldi *et al.*, 1993). Le piétinement par le bétail compacte les horizons de surface entraînant des perturbations de la dynamique hydraulique du sol. Finalement, une utilisation différente des réserves en eau du sol par la végétation herbacée peut entraîner l'engorgement périodique et le déclenchement de processus d'hydromorphie (Chauvel *et al.*, 1991).

### H3. Effets des changements de la biodiversité sur le fonctionnement de l'écosystème

La structure et l'abondance du peuplement de macroinvertébrés du sol sont très sensibles à la nature de la couverture végétale (Lavelle et Pashanasi, 1989; Lavelle *et al.*, 1992; Decaëns *et al.*, 1994). La forte réduction de la richesse spécifique de la végétation et des organismes du sol, particulièrement les macroinvertébrés comme les vers de terre et les termites, connus

comme "ingénieurs de l'écosystème", peut entraîner des dysfonctionnements de l'écosystème. Ce sont par exemple la perte par lessivage de nutriments en l'absence d'une synchronisation entre leur disponibilité et les besoins de la plante (Myers *et al.*, 1994), ou une modification des propriétés hydrauliques sous l'effet d'un déséquilibre entre invertébrés à effets "compactants" et "décompactants" (Blanchart *et al.*, 1997).

#### H4. Effets de la gestion des parcelles

L'installation d'un pâturage après brûlis de la forêt constitue une perturbation majeure de l'écosystème qui, en fonction de sa résilience, va développer ou non divers mécanismes permettant le retour à un écosystème proche de l'écosystème naturel (Uih *et al.*, 1988). Dès l'installation de la monoculture de graminée destinée à nourrir le bétail, un processus de successions commence, qui peut permettre à terme le rétablissement de la forêt (Loker *et al.*, 1997) ou d'une autre couverture végétale. L'évolution des pâturages dépend des potentiels de reconstitution de la végétation naturelle et de la capacité de la graminée introduite à éliminer les éléments de la succession qui se met en place (Mitja *et al.*, 1998). La dominance de la graminée dépend également du degré de consommation par le bétail, du contrôle des adventices herbacées et ligneuses par le feu ou leur élimination par des coupes et arrachages réguliers. Le choix des graminées plantées est également important, toutes n'ayant pas la même résistance aux attaques parasitaires, notamment celles de la « **cigarrinha-das-pastagens** » appellation qui regroupe plusieurs espèces d'insectes homoptères mais principalement **Deois incompleta** (Silva, 1986).

Les pâturages de **Panicum maximum** et de **Brachiaria humidicola**, sont fréquemment attaqués (Cosenza *et al.*, 1989), alors que l'espèce **Andropogon gayanus** est résistante aux attaques de ce parasite (Valério et Koller, 1992).

## SITES D'ÉTUDES ET MÉTHODES

### Choix et caractérisation des sites

Le paysan, comme le chercheur, perçoit la dégradation à travers la production primaire et l'invasion par les adventices. S'il est aisé de distinguer un pâturage en bon état d'un système très dégradé, l'évaluation des situations intermédiaires ne peut se faire que sur des critères quantitatifs propres à chaque intervenant: la croissance du bétail pour l'un, la biomasse herbacée ou les caractéristiques du sol pour l'autre. Les situations ont été choisies suivant ces critères visuels, en concertation avec l'exploitant. Les séquences choisies partent de la forêt et considèrent des pâturages implantés sur les mêmes sols, dans des situations topographiques identiques, et plantés avec la même graminée à

l'origine, avant intervention de phases de dégradation, d'abandon, ou de régénération avec une autre graminée.

### Les pâturages de la région de Marabá

La région de Marabá, située en bordure orientale de l'Amazonie, est un front pionnier qui reçoit depuis plus de 20 ans un important flux de petits producteurs venus principalement du Nordeste, à la recherche de terres à cultiver. La surface des exploitations varie de 100 à 200 ha. Il s'agit d'exploitations familiales dans la mesure où la main d'œuvre est fournie par les membres de la famille, sans que soit exclue la possibilité d'aides extérieures temporaires. Il existe dans certaines exploitations des fragments de forêt de dimensions variables allant de la moitié de la surface totale à des surfaces réduites à moins de 1 ha. Généralement, les paysans défrichent chaque année une portion de forêt sur laquelle ils installent une culture de riz pluvial. Cette culture est souvent associée à du maïs ou à du manioc. La récolte du riz a lieu après 5 à 6 mois et le manioc se maintient durant 2 ans à 2 ans et demi. Quand le riz est planté seul ou avec du maïs, la graminée est introduite environ 1 mois après l'installation du maïs. Quand le riz est associé au manioc, la graminée est semée ou plantée après la récolte du manioc.

Les situations retenues sont situées en zone plane ou de faible déclivité, sur la partie élevée du relief. Les sols sont relativement peu profonds (de 1 à 2 m), sableux en surface et argilo-sableux en profondeur, et fortement désaturés (CEC inférieure à 10 cmol.kg<sup>-1</sup>).

Nous n'avons retenu pour la présente étude que des pâturages défrichés manuellement et initialement plantés en **Panicum maximum**. Cette graminée a très fréquemment été l'objet des attaques parasitaires de la « **cigarrinha das pastagens** ». Pour cette raison notamment, l'utilisation de cette graminée a fortement diminué ces dernières années, et notre séquence de dégradation ne comporte pas de pâturage jeune. Toutes les parcelles comportent dans leur histoire des phases de culture plus ou moins longues. Aucun des pâturages étudiés n'a reçu de fertilisation chimique lors de son installation. Situés dans la même exploitation, ils ont été soumis au passage annuel de feux et au passage régulier du bétail par rotation.

Les situations retenues comprennent:

- la forêt primaire (FJ).
- un pâturage de 11 ans, peu envahi par les adventices, installé après deux années de manioc (JP1).
- un pâturage de 16 ans, moyennement envahi par les adventices, installé après une année de riz (JP2).
- un pâturage de 8 ans, complètement envahi par les adventices, précédé durant 8 ans par une alternance de culture de manioc et de jachère (JP3). **P. maximum** a pratiquement disparu et **Andropogon gayanus** qui a été récemment intro-

duit n'est présent que sous forme de plantules.

- un pâturage de 2 ans d'**Andropogon gayanus**. Ce pâturage est une tentative de récupération d'un pâturage de 14 ans complètement envahi par les adventices (JPA). Un essai d'implantation de **Brachiaria brizantha** en association avec **A. gayanus** n'a pas réussi.

### Les pâturages de la région de Manaus

La région de Manaus, beaucoup plus isolée géographiquement que l'Amazonie orientale, est restée relativement à l'écart des grands flux migratoires. Cependant, au cours des années soixante-dix et 80, le gouvernement brésilien a favorisé, notamment par des avantages fiscaux, l'implantation de pâturages. Les pâturages sont majoritairement installés le long des rares routes et occupent une faible proportion de la surface totale. La taille des exploitations varie de quelques dizaines d'hectares pour les petits propriétaires jusqu'à plusieurs milliers d'hectares pour les grands exploitants. La plupart de ces pâturages sont dégradés et sont aujourd'hui partiellement ou complètement abandonnés. Contrairement aux pâturages de la région de Marabá, l'implantation des pâturages a eu lieu immédiatement après la coupe de la forêt, sans culture intermédiaire de plantes vivrières. Bien que l'on puisse trouver des pâturages dans toutes les positions topographiques, les situations étudiées sont localisées sur les plateaux constituant la partie haute du relief. Sur ces plateaux se développent des sols ferrallitiques jaunes très profonds (de 7 à 10 m), très argileux (plus de 80 % d'argile, kaolinite exclusivement). Ce sont des sols fortement désaturés ( $CEC < 10 \text{ cmol.kg}^{-1}$ ) et qui ne présentent pas, sous forêt, de problème de drainage en raison de leur structure microagrégée.

Près de Manaus, **Brachiaria humidicola** est pratiquement la seule graminée fourragère utilisée dans les pâturages. Tous les pâturages retenus pour cette étude ont été défrichés manuellement et plantés avec **B. humidicola**, qui comme **P. maximum** est sensible aux attaques de la "**cigarrinha das pastagens**". Localisés dans plusieurs exploitations, ils ont été soumis à des passages du feu, mais la fréquence de ces feux nous est méconnue. Les pâturages n'ont jamais reçu de fertilisation chimique, à l'exception du pâturage abandonné, fertilisé durant plusieurs années.

Les situations retenues pour la région de Manaus comprennent :

- la forêt primaire (FM),
- un pâturage de 4 ans, assez fortement envahi par les adventices (MP1),
- un pâturage de 8 ans, fortement envahi par les adventices (MP2),
- un pâturage d'une quinzaine d'année, très fortement envahi

par les adventices (MP3),

- un pâturage d'une quinzaine d'année, très peu envahi par les adventices (MP4),

- un pâturage d'une dizaine d'années, abandonné (alors qu'il n'était pas dégradé) depuis 6 ans, moyennement envahi par les adventices (MPab).

## Méthodes

### Phytomasse épiquée

Les mesures de phytomasse épiquée ont été réalisées en juin 1996 à Marabá et en juin 1997 à Manaus, en fin de saison des pluies, période pendant laquelle la phytomasse est normalement maximale. Les parcelles dans lesquelles les mesures ont été effectuées n'avaient pas été pâturées dans les semaines précédant les mesures.

**A. gayanus** et **P. maximum**, présentes à Marabá sont des graminées cespitueuses dont le diamètre de la touffe mature peut varier de 0,5 à 1,5 m. Nous avons donc choisi d'utiliser une maille de prélèvement de 2 m x 2 m incluant plusieurs touffes et intertouffes. En raison de diverses contraintes il n'a pas été possible d'effectuer de répétitions et les résultats obtenus doivent être considérés comme une simple caractérisation des sites. **Brachiaria humidicola**, plantée près de Manaus, est une graminée rampante dépassant rarement 50 cm de haut. Dans chacun des pâturages, les mesures ont été effectuées sur 10 carrés de 1 m<sup>2</sup> (sauf MPab, 8 carrés).

La phytomasse est triée **in situ** pour séparer la graminée plantée des autres herbacées et des jeunes individus ou des plantules de ligneux. La biomasse est séparée de la nécromasse dressée, la litière est ensuite prélevée. La phytomasse est séchée à 80 °C puis pesée.

### Description des peuplements végétaux

Les mesures ont été faites sur un transect de 5 m de large et 50 m de long pour les individus ligneux de plus de 2 m de haut et sur une bande de 1 m de large et 50 m de long pour les individus ligneux inférieurs à 2 m de haut et les herbacées. Un coefficient d'abondance-dominance-recouvrement de type Braun-Blanquet mais calibré de 1 à 9 (Braun-Blanquet, 1932), est donné à chaque espèce herbacée rencontrée (1: espèce très rare, recouvrement de moins de 1 %; 2: espèce rare, recouvrement compris entre 1 et 4 %; 3: recouvrement compris entre 4 et 9 %; 4: recouvrement compris entre 9 et 16 %; 5: recouvrement compris entre 16 et 25 %; 6: recouvrement compris entre 25 et 36 %; 7: recouvrement compris entre 36 et 49 %; 8: recouvrement compris entre 49 et 64 %; 9: recouvrement supérieur à 64 %). Pour les individus ligneux, après identification des espèces, les individus ont été comptés et leurs hauteurs et diamètre ont été mesurés.

### Profil cultural et propriétés physiques du sol

La description du profil cultural a été réalisée selon la méthode de Gaupronneau et Manichon (1987), adaptée par Tavares Filho *et al.* (1997). Deux profils représentatifs ont été étudiés sur chaque parcelle sur une profondeur de 50 à 60 cm, à la même époque que les mesures de phytomasse.

La densité réelle du sol a été déterminée à l'aide de pycnomètres. La densité apparente a été déterminée par la méthode du cylindre. Pour les deux mesures, entre 3 et 10 répétitions ont été réalisées. La porosité a été calculée à partir des densités apparentes et réelle.

### Carbone et azote totaux et fractionnement granulométrique

Dans toutes les situations étudiées, de cinq à dix échantillons de sol ont été prélevés dans les couches 0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm, séchés à l'air et tamisés à 2 mm. Une aliquote broyée à 100 µm est utilisée pour l'analyse élémentaire du carbone organique et de l'azote total, effectuée en combustion par voie sèche avec un autoanalyseur "CHN Fisons NA 1500".

Les quantités de carbone et d'azote ont été calculées pour chaque couche en multipliant la concentration de l'élément ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) par la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) et l'épaisseur de la couche (dm). Les stocks de C et N des sols de pâturage ont été calculés en considérant la masse de sol équivalente à la couche 0-20 cm des sols sous forêt.

Le fractionnement granulométrique de la matière organique a été réalisé sur trois échantillons de l'horizon de surface des sols étudiés. La dispersion des sols a été faite par les résines sodiques et les fractions séparées par tamisage et sédimentation. Trois fractions ont été séparées: 20-2000 µm (sables et limons grossiers), 2-20 µm (limons fins) et 0-2 µm (argiles). Elles ont été successivement séchées, pesées et dosées pour leurs teneurs en carbone et en azote.

### Acidité, bases et phosphore

Pour toutes les parcelles étudiées, cinq à dix échantillons des couches 0-5, 5-10 et 10-20 cm ont été collectés et analysés. Le pH a été mesuré par la méthode électrométrique avec un rapport terre/eau de 2,5.  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{H}^+$  ont été extraits par du KCl 1 N. L'acidité totale a été titrée par NaOH 0,25 N en présence de phénolphtaléine. L'aluminium a été ensuite dosé par titrage de la soude par HCl 0,25 N après addition de fluorure de sodium. Le calcium et le magnésium ont été extraits avec du KCl 1 N, et après filtration, titrés par l'EDTA ou dosés par absorption atomique. Le potassium ( $\text{K}^+$ ) a été extrait avec une solution d'acide chlorhydrique 0,05 N et d'acide sulfurique (0,025 N) et, après filtration, dosé avec un spectrophotomètre de flamme ou absorption atomique. La somme des bases échangeables (S) a été calculée en sommant le calcium, le magnésium et le potassium, sans le sodium. La capacité d'échange cationique (T) a été calculée en sommant S et l'acidité

totale. Les ions phosphate ont été extraits par un mélange acide (HCl 0,05 N et  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 N, rapport sol/solution 1/10) d'après Mehlich (1954).

### Macrofaune du sol

L'étude de la macrofaune du sol a été faite selon la méthode "Tropical Soil Biology and Fertility [TSBF]" (Anderson et Ingram, 1993). Dans chaque parcelle, 10 monolithes de sol (25x25x30 cm) ont été prélevés tous les 5 mètres le long d'un transect déterminé au hasard. Chaque monolithe est séparé en 4 strates, litière, 0-5 cm, 5-10 cm et 10-25 cm. Dans chaque strate, la macrofaune est triée à la main et fixée dans du formol à 4 %. Les animaux sont ensuite déterminés, comptés et pesés. La macrofaune a été étudiée à la fin de la saison des pluies, en juin 1996 à Marabá et juin 1997 à Manaus.

## RÉSULTATS

### La phytomasse épigée

A Marabá, la phytomasse épigée totale varie de 660 à 1760  $\text{g.m}^{-2}$  (**figure 1**). La phytomasse épigée de la graminée cultivée varie considérablement selon les situations, en relation inverse avec la phytomasse des adventices. Dans les pâturages JP1 et JPA, qui possèdent les phytomasses les plus élevées, la graminée cultivée représente 85 % de la phytomasse épigée totale. Dans le pâturage JP2, la phytomasse de *P. maximum* ne représente plus que 57 % de la phytomasse épigée totale, et dans la parcelle JP3, *P. maximum* n'est que très faiblement représenté, à tel point qu'il n'apparaît pas dans les données de phytomasses. La dégradation de la graminée fourragère a pour conséquence une baisse de la phytomasse totale des parcelles JP2 et JP3. En revanche l'implantation d'*Andropogon gayanus* deux années auparavant restaure dans la parcelle JPA une phytomasse totale élevée.

Dans la région de Manaus, la phytomasse épigée totale varie fortement selon les pâturages, de 360 à 1640  $\text{g.m}^{-2}$ . La présence des adventices est considérable dans les pâturages MP1, MP2 et MP3, où la graminée cultivée ne représente respectivement que 27 %, 9 % et 2 % de la phytomasse épigée totale (**figure 1**). Dans les deux autres pâturages étudiés, la graminée constitue encore l'essentiel de la phytomasse épigée: 75 % dans le MP4, 63 % dans MPab.

### La végétation secondaire dans les pâturages

#### Les adventices dans les pâturages

A Marabá, le nombre d'espèces herbacées varie de 24 à 35 dans les 4 pâturages (**figure 2**). Dans le pâturage le plus récent (JP1) où le *Panicum maximum* est vigoureux, les nom-

Figure 1 - Phytomasse épigée des pâturages étudiés dans les régions de Marabá et Manaus

Figure 1 - Aboveground phytomass of the studied pastures in the Marabá and Manaus areas

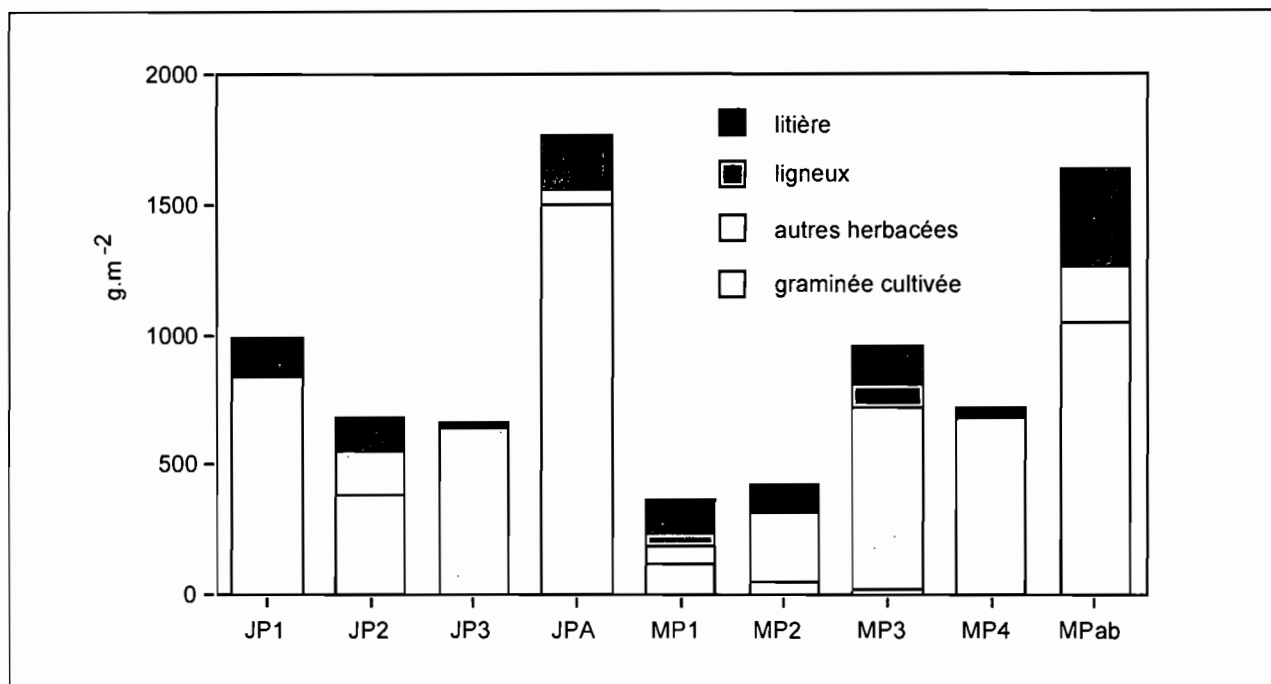
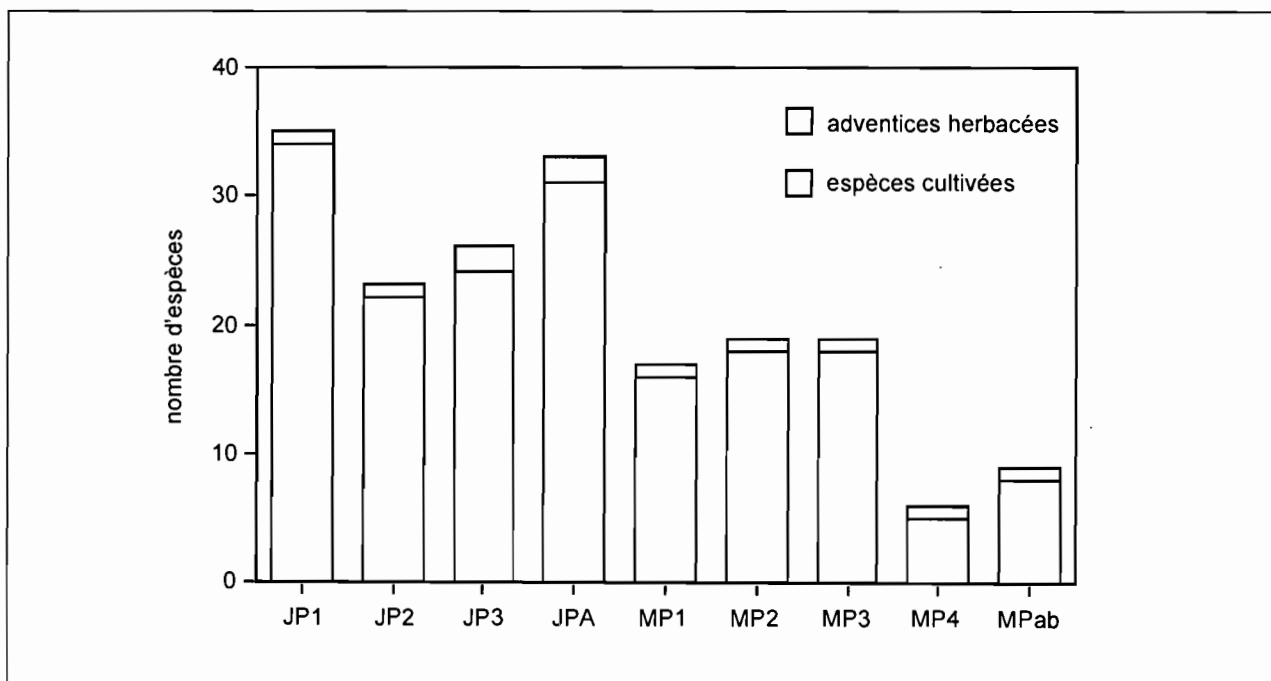


Figure 2 - Richesse floristique des espèces herbacées présentes dans les pâturages étudiés dans les régions de Marabá et Manaus

Figure 2 - Floristic richness of the herbaceous species in the studied pastures in the Marabá and Manaus





**Tableau 1** - Coefficients d'abondance-dominance-recouvrement de type Braun Blanquet des principales espèces herbacées des pâturages étudiés dans la région de Marabá.

**Table 1 - Coefficients of abundance-dominance-recovering (Braun-Blanquet type) of the most common herbaceous species of the studied pastures in the Marabá area**

|                                   | Famille              | JP1 | JP2 | JP3 | JPA |
|-----------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| <b>Espèces cultivées</b>          |                      |     |     |     |     |
| <b>Panicum maximum</b>            | <b>Poaceae</b>       | 7   | 6   | 1   |     |
| <b>Brachiaria brizantha</b>       | <b>Poaceae</b>       |     |     |     | 3   |
| <b>Andropogon gayanus</b>         | <b>Poaceae</b>       |     |     | 1   | 8   |
| <b>Espèces non cultivées *</b>    |                      |     |     |     |     |
| <b>Andropogon bicornis</b>        | <b>Poaceae</b>       | 2   | 6   | 7   | 1   |
| <b>Pterocaulon alopecuroideum</b> | <b>Asteraceae</b>    | 1   | 4   | 3   | 2   |
| <b>Paspalum melanospermum</b>     | <b>Poaceae</b>       | 1   | 3   | 2   | 4   |
| <b>Sida rhombifolia</b>           | <b>Malvaceae</b>     | 1   | 2   | 2   | 4   |
| <b>Panicum laxum</b>              | <b>Poaceae</b>       | 1   | 2   | 3   | 2   |
| <b>Desmodium canum</b>            | <b>Fabaceae</b>      | 1   | 3   | 2   | 1   |
| <b>Fimbristylis cf annua</b>      | <b>Cyperaceae</b>    | 2   | 3   | 1   | 1   |
| <b>Orthopappus angustifolius</b>  | <b>Asteraceae</b>    | 2   | 2   | 3   |     |
| <b>Phyllanthus cf niruri</b>      | <b>Euphorbiaceae</b> | 2   | 2   | 1   | 1   |
| <b>Borreria verticillata</b>      | <b>Rubiaceae</b>     | 2   | 1   | 1   | 1   |
| <b>Borreria latifolia</b>         | <b>Rubiaceae</b>     | 1   | 1   | 2   | 2   |

\* Seules les espèces dont la somme des coefficients des parcelles est supérieur à 4 sont présentées.

breuses espèces herbacées présentes ont de faibles coefficients d'abondance-dominance-recouvrement, toujours inférieurs ou égaux à 2 (**tableau 1**). Par contre, dans la parcelle plus âgée (JP2), certaines espèces ont des coefficients de recouvrement nettement supérieurs et ont tendance à devenir envahissantes. L'une d'entre-elles, **Andropogon bicornis**, assez rare (coeff. 2) dans le pâturage le plus récent (JP1), devient envahissante dans le pâturage le plus dégradé (JP3), avec un coefficient de 7. Deux ans après l'implantation d'**Andropogon gayanus**, sur un pâturage très dégradé de **Panicum maximum** (JPA), la richesse spécifique des adventices herbacées est toujours élevée, en revanche leurs coefficients de recouvrement sont faibles, notamment celui de l'espèce **Andropogon bicornis**. Alors que la richesse spécifique ne semble pas subir de modifications notables, la densité des adventices varie considérablement selon l'espèce cultivée et l'état de dégradation des pâturages.

A Manaus, le nombre d'espèces herbacées varie de 6 à 19 dans les 5 pâturages (**figure 2**). **Borreria verticillata** est l'adventice la plus envahissante, atteignant des indices d'abondance-dominance-recouvrement de 8 et 9 dans les pâturages MP3 et MP2 (**tableau 2**). D'autres espèces comme **Lantana camara**, **Rolandra argentea** ou **Clidemia rubra** suivent la même tendance, avec cependant des abon-

dances relatives moins élevées.

Alors que les trois premiers pâturages représentent une série de dégradation aboutissant à la disparition presque complète de **B. humidicola** (MP3), le quatrième pâturage (MP4) pourtant installé depuis une quinzaine d'années, se caractérise par la large dominance de l'espèce cultivée s'opposant à une faible richesse spécifique et une faible densité d'adventices herbacées. Dans le pâturage MPab, abandonné alors qu'il n'était pas dégradé, la graminée plantée domine malgré la concurrence de **Borreria verticillata** et de **Stachytarpheta cayennensis**. Cette parcelle ayant été abandonnée depuis plusieurs années, **B. humidicola** émet des tiges verticales atteignant de 80 cm à 1 m de haut et couvre parfaitement le sol, ce qui limite l'installation de la plupart des espèces herbacées.

Globalement il y a moins d'espèces herbacées à Manaus qu'à Marabá (**figure 2**). Dans les deux cas, une de ces espèces envahit progressivement le pâturage et domine ensuite largement les pâturages dégradés. Il s'agit d'**Andropogon bicornis** à Marabá et de **Borreria verticillata** près de Manaus. Cette dernière espèce est également présente et fréquente à Marabá bien que faiblement représentée (coefficients 1 ou 2).



**Tableau 2** - Coefficients d'abondance-dominance-recouvrement de type Braun Blanquet des espèces herbacées des pâturages étudiés dans la région de Manaus.**Table 2 - Coefficients of abundance-dominance-recovering (Braun-Blanquet type) of the most common herbaceous species of the studied pastures in the Manaus area.**

|                                   | Famille                | JP1 | JP2 | JP3 | JPA |
|-----------------------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
| <b>Espèces cultivées</b>          |                        |     |     |     |     |
| <b>Brachiaria humidicola</b>      | <b>Poaceae</b>         | 5   | 4   | 29  | 8   |
| <b>Espèces non cultivées *</b>    |                        |     |     |     |     |
| <b>Borreria verticillata</b>      | <b>Rubiaceae</b>       | 4   | 9   | 81  | 5   |
| <b>Fimbristylis cf annua</b>      | <b>Cyperaceae</b>      | 2   | 2   | 32  | 2   |
| <b>Rolandra argentea</b>          | <b>Asteraceae</b>      | 1   | 3   | 5   | 2   |
| <b>Stachytarpheta cayennensis</b> | <b>Verbenaceae</b>     | 1   | 2   | 2   | 3   |
| <b>Clidemia cf rubra</b>          | <b>Melastomataceae</b> | 1   | 1   | 3   | 2   |
| <b>Homolepis aturensis</b>        | <b>Poaceae</b>         | 3   | 2   | 3   |     |
| <b>Lantana camara</b>             | <b>Verbenaceae</b>     | 1   | 1   | 3   |     |
| <b>Dichromena ciliata</b>         | <b>Cyperaceae</b>      | 1   | 1   | 3   |     |
| <b>Borreria cf alata</b>          | <b>Rubiaceae</b>       | 3   | 2   |     |     |
| <b>Clidemia hirta</b>             | <b>Melastomataceae</b> | 2   |     | 2   | 1   |
| <b>Scleria cf pterota</b>         | <b>Cyperaceae</b>      |     | 2   | 2   | 1   |

\* Seules les espèces dont la somme des coefficients des parcelles est supérieur à 4 sont présentées.

### Les recrûs ligneux dans les pâturages

Dans les pâturages, la plupart des espèces ligneuses forestières présentes sont originaires de la forêt initiale. Leur présence, sous forme de rejet de souche ou de drageon, est donc liée non seulement à leur résistance aux perturbations anthropiques, mais surtout et en premier lieu, à leur présence initiale dans la zone forestière qui a été défrichée pour installer le pâturage. Du fait de la grande hétérogénéité et richesse floristique de la forêt Amazonienne, nous constatons que les espèces ligneuses des pâturages d'origine forestière sont pour la plupart peu fréquentes et présentes dans un seul pâturage (tableaux 3 et 4).

A Marabá, le nombre d'espèces ligneuses varie de 2 à 8 suivant les pâturages (figure 3). Dans ces pâturages défrichés depuis 13, 16 ou 17 ans, le potentiel ligneux s'est considérablement réduit. Globalement 29 % des individus ligneux appartiennent à 10 espèces de forêt primaire et 65 % à 3 espèces de milieux ouverts perturbés, installées après le défrichement (figure 3, tableau 3). Parmi ces 3 espèces, la sous-ligneuse **Solanum subinerme** représente à elle seule 58 % des individus. Dans ces 4 pâturages, tous les individus ligneux ont moins de 2 m de haut et 89 % d'entre eux ont moins de 50 cm de haut.

A Manaus, le nombre d'espèces ligneuses varie de 1 à 23 (figure 3). C'est le pâturage le plus récent (MP1) qui a la richesse spécifique la plus élevée (23 espèces). La richesse spécifique

des ligneux diminue dans un premier temps dans le pâturage de 8 ans (MP2; 9 espèces) et augmente dans celui de 15 ans (MP3; 15 espèces) où la graminée fourragère est pratiquement inexistante. **Solanum subinerme** envahit les deux pâturages les plus récents (MP1) et (MP2). Globalement 17 % des individus appartiennent à 19 espèces forestières et 77 % à 9 espèces de milieux secondarisés. Seul le pâturage MP3 a 2 individus de plus de 2 m et 77 % des individus ligneux ont moins de 50 cm de haut.

Au cours du temps les ligneux, originaires de la forêt et qui ont résisté au défrichement/brulis initial deviennent de plus en plus rares dans les pâturages. En revanche la même espèce de sous-ligneux de milieux secondaires, **Solanum subinerme** est susceptible d'envahir les pâturages dans les deux régions.

### La richesse spécifique totale de la végétation des pâturages

Mises à part les pâturages MP4 et MP5 qui ont une faible richesse spécifique totale (herbacées + ligneux), les autres parcelles de Manaus (MP1=40 espèces, MP2=27 espèces, MP3=34 espèces) et les pâturages de Marabá (JP1=44 espèces, JP2=28 espèces, JP3=34 espèces et JPA= 35 espèces) ont une diversité spécifique élevée et comparable. C'est la répartition entre espèces ligneuses et espèces herbacées qui différencie les pâturages de Manaus plus riches en

**Tableau 3** - Densité des espèces ligneuses des pâturages étudiés dans la région de Marabá.**Table 3** - Density of the ligneous species of the studied pastures in the Marabá area

| Ligneux   | Famille       | Nombre d'individus (50 m <sup>2</sup> ) |          |          |          |
|---|---------------|---|----------|----------|----------|
|   |               | JP1                                     | JP2      | JP3      | JPA      |
| <b>Espèces forestières n = 10</b>                             |               |   |          |          |          |
| <i>Memora magnifica</i>                                       | Bignoniaceae  | 4                                       | 1        | 1        |          |
| <i>Tabernaemontana angulata</i>                               | Apocynaceae   | 1                                       |          |          |          |
| <i>Astrocaryum</i> sp.  | Arecaceae     | 1                                       |          |          |          |
| <i>Manaosella platidactyla</i>                                | Bignoniaceae  | 1                                       |          |          |          |
| <i>Virola</i> cf <i>elongata</i>                              | Myristicaceae | 1                                       |          |          |          |
| <i>Talisia cupularis</i>                                      | Sapindaceae   | 1                                       |          |          |          |
| <i>Memora flavida</i>   | Bignoniaceae  |   |          | 2        | 2        |
| <i>Trigonia</i> sp.   | Trigoniaceae  |   |          | 3        |          |
| <i>Pœcilanthe effusa</i>                                      | Fabaceae      |   |          | 1        |          |
| <i>Swartzia ingifolia</i>                                     | Fabaceae      |   |          | 1        |          |
| <b>Espèces de milieux secondaires ou esp. cultivées n = 3</b> |               |   |          |          |          |
| <i>Solanum subinerme</i>                                      | Solanaceae    | 8                                       | 15       | 11       | 6        |
| <i>Solanum rugosum</i>  | Solanaceae    | 2                                       | 2        |          |          |
| <i>Psidium guajava</i>  | Myrtaceae     | 1                                       |          |          |          |
| <b>Espèces non identifiées ou d'origine non connue n = 4</b>  |               |   |          |          |          |
| <b>Nombre total d'espèces</b>                                 |               | <b>9</b>                                | <b>5</b> | <b>8</b> | <b>2</b> |

espèces ligneuses, de ceux de Marabá à richesse supérieure en espèces herbacées.

### Le profil cultural

A Marabá, le profil sous forêt est caractérisé par une absence de transition marquée entre les différents horizons. Sous une litière abondante, l'horizon A1 est constitué essentiellement d'agrégats centimétriques arrondis, dont la juxtaposition crée une forte porosité d'empilement. On y observe une grande quantité de matière organique en décomposition ainsi que de nombreuses racines. Entre 3 et 5 cm s'effectue la transition vers un horizon légèrement plus clair, constitué principalement d'agrégats anguleux et sub-anguleux. La porosité y est forte (empilements d'agrégats et cavités biologiques), les turricules de vers de terre sont fréquents, les racines abondantes, et la présence de matériel en décomposition diminue progressivement. L'horizon B, qui débute entre 12 et 15 cm, est constitué essentiellement d'agrégats anguleux et sub-anguleux centimétriques. La porosité d'empilement d'agrégats et les cavités biologiques y sont encore abondantes, alors que les racines diminuent progressivement avec la profondeur.

Dans les pâturages, les modifications des caractères morphologiques et structuraux du sol ne sont visibles que dans les

premiers centimètres superficiels. A la place d'une structure grumeleuse bien développée, se développe un horizon composé de quelques agrégats arrondis au milieu d'une structure particulière sans cohérence, mais où les racines sont abondantes. Sous cet horizon superficiel, les caractères morphologiques des sols sous pâturages sont très semblables à ceux du sol sous forêt. On n'observe pas de différences notables dans les profils culturaux des différents pâturages, indépendamment de leur âge et de leur état de dégradation.

A Manaus, le profil sous forêt se caractérise également par une absence de transition marquée entre les différents horizons. L'horizon A1 est essentiellement constitué d'agrégats sub-anguleux et arrondis, autour et au sein desquels se développent de nombreuses racines. La porosité fissurale et de cavités est abondante. L'activité biologique est forte (nombreux turricules de vers de terre). Vers 15 cm environ, l'on passe à un horizon plus clair, où les racines sont moins nombreuses. On observe des agrégats arrondis centimétriques et des blocs sub-anguleux qui se défont (2-5 cm) ainsi qu'une forte porosité d'empilement d'agrégats et de cavités. Jusqu'à 60 cm, ces caractères morphologiques se maintiennent, avec une diminution progressive de la quantité de racines et une évolution très progressive de la couleur, qui devient plus rosâtre. Des traces

**Figure 3 -** Richesse floristique (a) et densité d'individus (b) des espèces ligneuses présentes dans les pâturages étudiés des régions de Marabá et Manaus

**Figure 3 - Floristic richness (a) and density (b) of the ligneous species species in the studied pastures in the Marabá and Manaus areas**

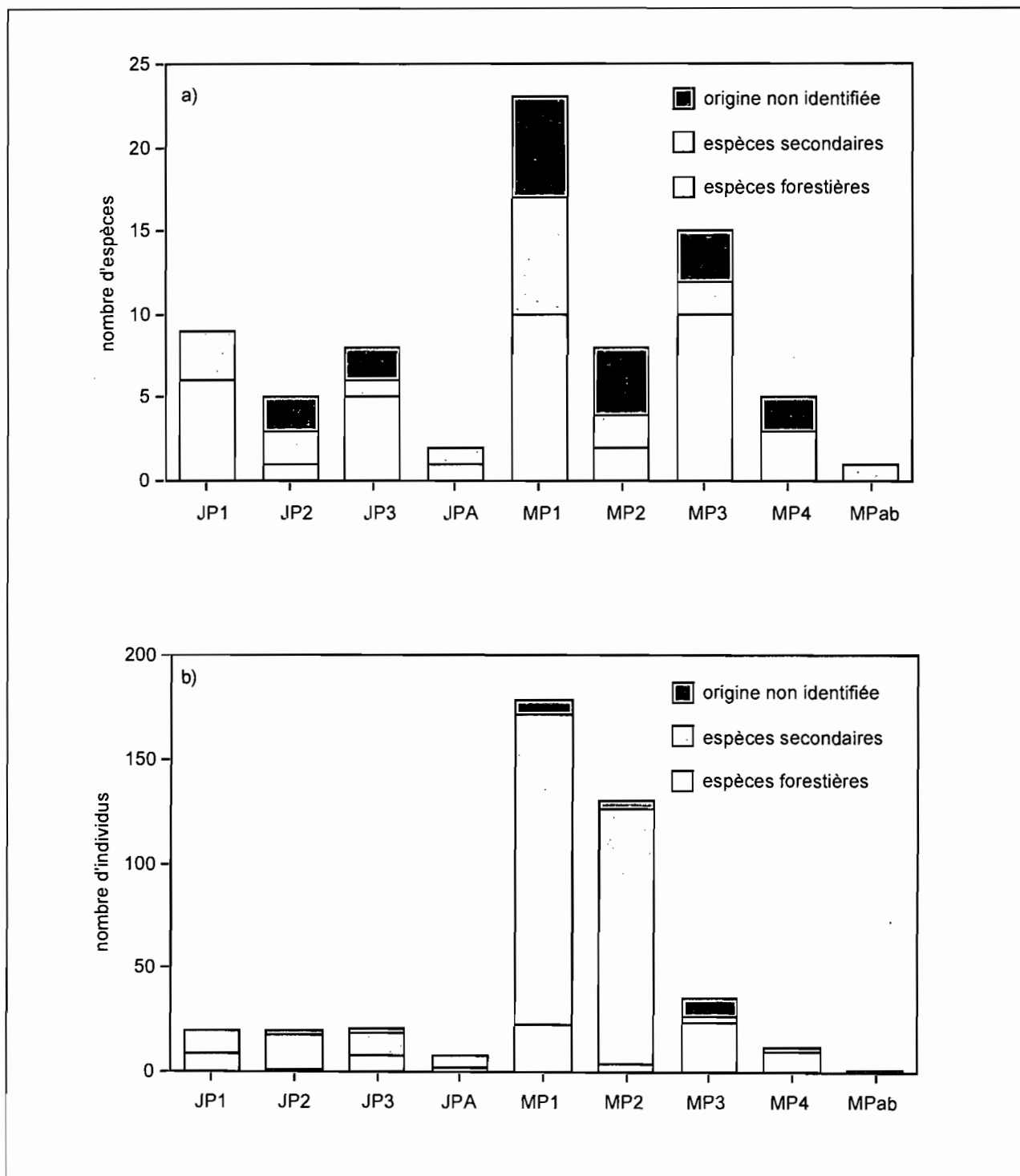


Tableau 4 - Densité des espèces ligneuses des pâturages étudiés dans la région de Manaus

Table 4 - Density of the ligneous species of the studied pastures in the Manaus area

| Ligneux   | Famille         | Nombre d'individus (50 m <sup>2</sup> ) |          |           |          |          |
|---|-----------------|---|----------|-----------|----------|----------|
|   |                 | MP1                                     | MP2      | MP3       | MP4      | Mpab     |
| <b>Espèces forestières n = 19</b>                             |                 |   |          |           |          |          |
| <i>Tetracera cf willdenoviana</i>                             | Dilleniaceae    | 3                                       |          | 10        | 7        |          |
| <i>Leucocalantha aromatica</i>                                | Bignoniaceae    |   | 3        | 5         | 2        |          |
| <i>Piper cf hostmannianum</i>                                 | Piperaceae      | 4                                       |          | 1         |          |          |
| <i>Gustavia cf pulchra</i>                                    | Lecythidaceae   | 4                                       |          |           |          |          |
| <i>Laetia procera</i>   | Flacourtiaceae  | 3                                       |          |           |          |          |
| <i>Machaerium cf fröesii</i>                                  | Fabaceae        | 3                                       |          |           |          |          |
| <i>Humirianthera rupestris</i>                                | Icacinaceae     | 2                                       |          |           |          |          |
| <i>Eschweilera cf parviflora</i>                              | Lecythidaceae   | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Machaerium inundatum</i>                                   | Fabaceae        | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Oxandra euneura</i>  | Annonaceae      | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Sciadotenia duckei</i>                                     | Menispermaceae  | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Casearia cf javitensis</i>                                 | Flacourtiaceae  |   | 1        |           |          |          |
| <i>Mascagnia sepium</i>                                       | Malpighiaceae   |   |          | 1         | 1        |          |
| <i>Picramnia cf sellowii</i>                                  | Simaroubaceae   |   |          | 2         |          |          |
| <i>cf Leucocalantha aromatica</i>                             | Bignoniaceae    |   |          | 1         |          |          |
| <i>Guatteria chrysopetala</i>                                 | Annonaceae      |   |          | 1         |          |          |
| <i>Memora flavida</i>   | Bignoniaceae    |   |          | 1         |          |          |
| <i>Rinorea cf racemosa</i>                                    | Violaceae       |   |          | 1         |          |          |
| <i>Tabernaemontana angulata</i>                               | Apocynaceae     |   |          | 1         |          |          |
| <b>Espèces de milieu secondaire n = 9</b>                     |                 |   |          |           |          |          |
| <i>Solanum subinerme</i>                                      | Solanaceae      | 126                                     | 121      |           |          |          |
| <i>Solanum rugosum</i>  | Solanaceae      | 16                                      |          |           |          |          |
| <i>Vismia cayennensis</i>                                     | Guttiferae      | 2                                       | 1        |           |          |          |
| <i>Cecropia sp.</i>   | Cecropiaceae    | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Miconia cf myriantha</i>                                   | Melastomataceae | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Rollinia exsucca</i>                                       | Annonaceae      | 1                                       |          |           |          |          |
| <i>Vismia cf latifolia</i>                                    | Guttiferae      | 1                                       |          | 1         |          |          |
| <i>Piper cf hispidinervum</i>                                 | Piperaceae      |   |          | 2         |          |          |
| <i>Cecropia sp.</i>   | Cecropiaceae    |   |          |           |          | 1        |
| <b>Espèces non identifiées ou d'origine non connue n = 15</b> |                 | <b>7</b>                                | <b>4</b> | <b>8</b>  | <b>2</b> | <b>0</b> |
| <b>Nombre total d'espèces</b>                                 |                 | <b>23</b>                               | <b>8</b> | <b>15</b> | <b>5</b> | <b>1</b> |

d'activité biologique sont visibles au long du profil.

Les modifications des caractères morphologiques et structuraux des sols sous pâturages sont limitées aux 5 à 10 centimètres superficiels, sauf dans le pâturage abandonné (MPab). Dans les pâturages de 4 ans (MP1), 8 ans (MP2) et le pâturage

de 15 ans peu envahi par les adventices (MP4), la structure grumeleuse présente en forêt est remplacée par une structure à tendance lamellaire, mais avec encore la présence d'agrégats subanguleux à anguleux, de déjections de vers de terre, et une poro-

sité fissurale et de cavités. Dans le pâturage de 15 ans fortement envahi par les adventices (MP3), on n'observe pas cette structure à tendance lamellaire, mais de nombreux agrégats arrondis et sub-anguleux. Dans le pâturage abandonné (MPab), les modifications morphologiques sont beaucoup plus nettes. La couche superficielle est essentiellement composée de turricules de vers de terre, sa coloration est grisâtre, avec de nombreuses taches jaune et rouille traduisant une hydromorphie assez prononcée. Ces taches sont présentes aussi dans les horizons inférieurs (au moins jusqu'au fond de la tranchée étudiée, soit 60 cm) mais leur intensité diminue progressivement.

**Les propriétés physiques**

A Marabá, les sols ont une texture sableuse en surface, mais la teneur en argile augmente nettement avec la profondeur (tableau 5). Sous forêt, la densité apparente, voisine de l'unité en surface, augmente avec la profondeur. Dans tous les pâturages, la densité apparente de l'horizon de surface est supérieure à celle qui est mesurée sous forêt. On observe la même tendance dans l'horizon sub-superficiel. Plus en profondeur, seuls deux des 4 pâturages présentent une densité apparente significativement supérieure à celle de la forêt. Entre les pâturages, les densités apparentes ne sont pas significativement différentes, sauf en surface, où la densité du pâturage le

plus dégradé (JP3) est plus élevée que celle des autres pâturages. La porosité est toujours plus élevée en surface que dans les horizons sub-superficiels. Dans les pâturages, en surface et dans l'horizon sous-jacent, la porosité est inférieure à celle de la forêt. En revanche entre les différents pâturages, on n'observe pas de variations significatives de la porosité, en fonction de l'âge ou de l'état de dégradation.

A Manaus, les sols possèdent une texture très argileuse (tableau 6), ce qui explique pourquoi la densité apparente de ces sols est plus faible que celle des sols de Marabá, dans les horizons sub-superficiels principalement. Dans les pâturages, l'horizon de surface a une densité apparente supérieure à celle du sol sous forêt. On n'observe en revanche pas de variations significatives entre les pâturages. La porosité des sols de Manaus est plus élevée que celle des sols sableux de Marabá. La porosité des horizons de surface sous pâturage est inférieure à celle du sol sous forêt, mais il n'y a pas de différence de porosité entre les pâturages. Dans les horizons sub-superficiels, les porosités des pâturages et de la forêt ne sont pas différentes.

**La matière organique du sol**

**Carbone et azote totaux**

**Tableau 5** - Texture, Densité réelle (Dr), Densité apparente (Da) et Porosité des sols des situations étudiées dans la région de Marabá

| Parcelle | Horizon | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) | Dr (g.cm <sup>-3</sup> ) | Da (g.cm <sup>-3</sup> ) | Porosité (%) |
|----------|---------|------------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| FJ       | A1      | 12         | 14        | 74        | 2,65                     | 0,98 Cb                  | 63,0         |
|          | AB      | 14         | 15        | 71        | 2,67                     | 1,31 Ba                  | 50,9         |
|          | B       | 18         | 15        | 67        | 2,67                     | 1,36 Ca                  | 49,1         |
| JP1      | A1      | 14         | 9         | 77        | 2,64                     | 1,18 Bb                  | 55,3         |
|          | AB      | 24         | 8         | 68        | 2,67                     | 1,53 Aa                  | 42,7         |
|          | B       | 38         | 6         | 56        | 2,68                     | 1,58 Aa                  | 41,0         |
| JP2      | A1      | 10         | 11        | 79        | 2,65                     | 1,22 Bb                  | 54,0         |
|          | AB      | 22         | 10        | 68        | 2,67                     | 1,60 Aa                  | 40,1         |
|          | B       | 28         | 9         | 63        | 2,68                     | 1,52 ABa                 | 43,3         |
| JP3      | A1      | 20         | 9         | 71        | 2,63                     | 1,36 Ab                  | 48,3         |
|          | AB      | 28         | 9         | 63        | 2,67                     | 1,52 Aa                  | 43,1         |
|          | B       | 32         | 10        | 58        | 2,68                     | 1,44 BCab                | 46,3         |
| JPA      | A1      | 14         | 8         | 78        | 2,65                     | 1,20 Bb                  | 54,7         |
|          | AB      | 18         | 13        | 69        | 2,68                     | 1,52 Aa                  | 43,3         |
|          | B       | 26         | 2         | 72        | 2,68                     | 1,47 ABCa                | 45,1         |

(1) Les moyennes suivies de la même lettre ne diffèrent pas entre elles, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey. Les lettres majuscules se réfèrent aux comparaisons entre traitements pour chaque horizon et les minuscules aux comparaisons entre horizons pour chaque

**Tableau 6** - Texture, Densité réelle (Dr), Densité apparente (Da) et Porosité des horizons des sols des situations étudiées dans la région de Manaus

**Table 6** - Soil texture, solid density (Dr), bulk density (Da) and porosity of the soils of the studied situations in

| Parcelle | Horizon | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) | Dr (g.cm <sup>-3</sup> ) | Da (g.cm <sup>-3</sup> ) | Porosité (%) |
|----------|---------|------------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| FM       | AB      | 62         | 22        | 16        | 2,57                     | 0,95 Aa                  | 63,0         |
|          | B1      | 70         | 22        | 8         | 2,61                     | 1,14 Ab                  | 56,3         |
|          | B2      | 83         | 12        | 5         | 2,64                     | 1,14                     | 56,8         |
| MP1      | AB      | 78         | 17        | 5         | 2,54                     | 1,12 Ba                  | 55,9         |
|          | B1      | 80         | 15        | 5         | 2,61                     | 1,02 Aa                  | 60,9         |
|          | B2      | 89         | 9         | 2         | 2,64                     | 1,03                     | 61,0         |
| MP2      | AB      | 75         | 17        | 8         | 2,52                     | 1,20 Ba                  | 52,4         |
|          | B1      | 84         | 12        | 4         | 2,61                     | 1,14 Aa                  | 56,3         |
|          | B2      | 86         | 11        | 3         | 2,63                     | 1,04                     | 60,5         |
| MP3      | A1      | 75         | 11        | 14        | 2,53                     | 1,17                     | 53,9         |
|          | AB      | 80         | 13        | 7         | 2,61                     | 1,27 Ba                  | 51,3         |
|          | B1      | 80         | 16        | 4         | 2,64                     | 1,20 Aa                  | 54,5         |
| MP4      | A1      | 77         | 13        | 9         | 2,55                     | 1,15                     | 54,9         |
|          | AB      | 75         | 19        | 6         | 2,62                     | 1,16 Ba                  | 55,7         |
|          | B1      | 86         | 12        | 2         | 2,65                     | 1,13 Aa                  | 57,4         |
| MPab     | A1      | 69         | 15        | 16        | 2,59                     | 1,12                     | 56,8         |
|          | AB      | 76         | 16        | 8         | 2,60                     | 1,23 Ba                  | 52,7         |
|          | B1      | 81         | 14        | 5         | 2,64                     | 1,27 Aa                  | 51,9         |

(1) Les moyennes suivies de la même lettre ne diffèrent pas entre elles, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey. Les lettres majuscules se réfèrent aux comparaisons entre traitements pour chaque horizon et les minuscules aux comparaisons entre horizons pour chaque traitement. C.V % (Densité) = 10,46

A Marabá, sous forêt, la teneur en carbone (C) en surface est de 16,1 mg.g<sup>-1</sup> et elle diminue régulièrement avec la profondeur (**tableau 7**). Ces teneurs sont assez faibles, mais sont communes pour des sols à texture sableuse. Les teneurs en C dans l'horizon superficiel des sols sous pâturage sont légèrement supérieures (entre 16,1 et 21,6 mg.g<sup>-1</sup>) à celle du sol de forêt, mais ces différences ne sont pas significatives. Les teneurs en C des couches 5-10 et 10-20 cm sont nettement moins variables, et les sols sous pâturages (sauf la parcelle JPA) ne présentent pas des teneurs en C significativement différentes de celles du sol sous forêt. Les teneurs en C des sols des pâturages ne sont pas significativement différentes. Les teneurs en azote (N) sous forêt sont assez faibles et la distribution en fonction de la profondeur est similaire à celle du carbone (**tableau 7**). Les teneurs en N de la couche superficielle des sols de forêt et de pâturage ne présentent pas de différences significatives. Dans les deux couches sub-superficielles, les teneurs en N des sols sous pâturage sont légèrement plus faibles que celle du sol de forêt, parfois signifi-

cativement (parcelles JP1 et JPA). Cependant, les teneurs en N des parcelles sous pâturage ne présentent pas de différences significatives entre elles.

A Manaus, sous forêt, la teneur en C du sol en surface est de 40,4 mg.g<sup>-1</sup> et elle diminue régulièrement avec la profondeur (**tableau 8**). Ces teneurs sont nettement plus élevées que celles des sols de Marabá, ce qui s'explique par leur texture très argileuse. Dans les pâturages les teneurs en C en surface sont légèrement supérieures à celle du sol sous forêt, sauf pour MPab, mais ces différences ne sont pas significatives. Les teneurs en carbone des couches 5-10 et 10-20 cm des sols sous pâturage sont très proches de celles du sol sous forêt, et les différences ne sont pas significatives. Les teneurs en azote en surface varient de 2,5 à 3 mg.g<sup>-1</sup> et la distribution en fonction de la profondeur est similaire à celle du carbone (**tableau 8**). Dans les trois couches analysées, les teneurs en azote des sols sous pâturage ne sont pas significativement différentes des teneurs mesurées sous forêt.

Le calcul des quantités de C et de N contenues dans la

**Tableau 7** - Teneurs en carbone et azote des sols de la région de Marabá. L'écart type est indiqué entre parenthèses. Pour une profondeur donnée, des lettres différentes indiquent une différence significative entre les situations étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 7 - Carbon and nitrogen content of the studied soils in the Maraba area. The standard deviation is in brackets. For the same depth, different letters indicate a significant difference between the studied**

|                            | Profondeur | Forêt           | JP1             | JP2             | JP3              | JPA             |
|----------------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| <b>C mg.g<sup>-1</sup></b> | 0-5 cm     | 16,1 a<br>(5,6) | 19,5 a<br>(7,4) | 16,1 a<br>(7,2) | 21,6 a<br>(11,3) | 16,4 a<br>(5,6) |
|                            | 5-10 cm    | 10,8 a<br>(1,6) | 9,2 a<br>(1,6)  | 10,1 a<br>(4,3) | 9,3 a<br>(0,9)   | 8,3 a<br>(1,5)  |
|                            | 10-20 cm   | 9,3 a<br>(1,2)  | 7,4 ab<br>(1,2) | 8,3 ab<br>(3,1) | 8,0 ab<br>(0,9)  | 6,8 b<br>(1,0)  |
| <b>N mg.g<sup>-1</sup></b> | 0-5 cm     | 1,2 a<br>(0,4)  | 1,3 a<br>(0,4)  | 1,1 a<br>(0,4)  | 1,3 a<br>(0,6)   | 1,0 a<br>(0,3)  |
|                            | 5-10 cm    | 0,8 a<br>(0,1)  | 0,6 b<br>(0,1)  | 0,7 ab<br>(0,2) | 0,7 ab<br>(0,1)  | 0,6 b<br>(0,1)  |
|                            | 10-20 cm   | 0,7 a<br>(0,1)  | 0,5 b<br>(0,1)  | 0,6 ab<br>(0,2) | 0,6 ab<br>(0,10) | 0,5 b<br>(0,1)  |

**Tableau 8** - Teneurs en carbone et azote des sols de la région de Manaus. L'écart type est indiqué entre parenthèses. Pour une profondeur donnée, des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 8 - Carbon and nitrogen content of the studied soils in the Manaus area. The standard deviation is in brackets. For the same depth, different letters indicate a significant difference between the studied**

|                            | Profondeur | Forêt            | MP1              | MP2              | MP3              | MP4              | MPab             |
|----------------------------|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>C mg.g<sup>-1</sup></b> | 0-5 cm     | 40,4 a<br>(11,3) | 47,6 a<br>(9,4)  | 54,0 a<br>(17,9) | 52,0 a<br>(10,1) | 46,1 a<br>(9,5)  | 33,6 a<br>(4,4)  |
|                            | 5-10 cm    | 27,6 a<br>(4,8)  | 28,4 a<br>(4,4)  | 28,2 a<br>(4,7)  | 27,3 a<br>(7,0)  | 26,1 a<br>(6,5)  | 31,0 a<br>(1,6)  |
|                            | 10-20 cm   | 19,8 a<br>(3,5)  | 19,8 a<br>(1,2)  | 20,8 a<br>(2,5)  | 18,2 a<br>(2,8)  | 17,3 a<br>(3,1)  | 19,4 a<br>(3,7)  |
| <b>N mg.g<sup>-1</sup></b> | 0-5 cm     | 2,67 a<br>(0,64) | 2,80 a<br>(0,39) | 3,03 a<br>(0,69) | 3,03 a<br>(0,36) | 3,04 a<br>(0,40) | 2,52 a<br>(0,35) |
|                            | 5-10 cm    | 1,93 a<br>(0,33) | 1,71 a<br>(0,24) | 1,93 a<br>(0,30) | 1,89 a<br>(0,36) | 1,95 a<br>(0,32) | 2,08 a<br>(0,14) |
|                            | 10-20 cm   | 1,43 a<br>(0,19) | 1,23 a<br>(0,14) | 1,43 a<br>(0,19) | 1,37 a<br>(0,15) | 1,38 a<br>(0,16) | 1,44 a<br>(0,29) |

couche 0-20 cm confirme les faibles variations des réserves organiques dans les sols des pâturages étudiés (**tableau 9**). Ainsi à Marabá, la quantité de carbone présente dans la couche 0-20 cm du sol sous forêt est relativement faible (29,7 Mg.m<sup>-2</sup>), et les pâturages présentent des quantités de carbone

assez semblables. Dans les pâturages, les quantités d'azote sont très légèrement inférieures ou semblables à celles de la forêt. Dans les sols argileux de Manaus, la quantité de carbone contenue dans la couche 0-20 cm du sol sous forêt est nettement supérieure à celle des sols de Marabá (54,4 Mg.m<sup>-2</sup>).



**Tableau 9** - Quantités de carbone organique et d'azote total présents dans la couche 0-20 cm des sols de forêt et l'équivalent en masse de cette couche 0-20 cm des sols sous pâturage.

**Table 9 - Organic carbon and total nitrogen stocks in the 0-20 cm layer of the forests soils and the mass equivalent of this 0-20 cm layer in the pastures soils**

| Marabá   |                      |                      | Manaus   |                      |                      |
|----------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|----------------------|
| parcelle | C Mg.m <sup>-2</sup> | N Mg.m <sup>-2</sup> | parcelle | C Mg.m <sup>-2</sup> | N Mg.m <sup>-2</sup> |
| FJ       | 29,7                 | 2,2                  | FM       | 54,4                 | 3,8                  |
| JP1      | 30,6                 | 2,1                  | MP1      | 58,1                 | 3,5                  |
| JP2      | 29,0                 | 2,1                  | MP2      | 63,4                 | 4,0                  |
| JP3      | 29,8                 | 2,2                  | MP3      | 55,3                 | 4,0                  |
| JPA      | 26,7                 | 1,8                  | MP4      | 59,8                 | 4,0                  |
|          |                      |                      | MPab     | 53,7                 | 3,9                  |

Dans les pâturages, les quantités de C et de N sont légèrement supérieures à celles du sol de forêt

#### Répartition granulométrique des matières organiques du sol

A Marabá, dans les horizons superficiels des sols, la fraction grossière constitue de 78 à 83 % du poids du sol, la fraction 2-20 µm de 4 à 6 % et la fraction argileuse de 11 à 17 %. La teneur en C de la fraction argileuse est élevée (**tableau 10**) et varie remarquablement peu d'une situation à l'autre: de 55 à 58 mg.g<sup>-1</sup> de fraction. La fraction intermédiaire (2-20 µm) est plus riche en C que la fraction argileuse (58-105 mg.g<sup>-1</sup>) sauf pour la parcelle JP3

où la teneur en C de cette fraction est significativement plus faible (21 mg.g<sup>-1</sup>). La teneur en C de la fraction grossière est faible, elle varie peu selon les situations (de 4 à 8 mg.g<sup>-1</sup>). Les rapports C/N diminuent des fractions grossières vers les fractions fines, ce qui indique un degré d'humification croissant de la matière organique contenue dans celles-ci (**tableau 10**). Les résidus organiques associés à la fraction grossière constituent de 23 à 30 % du C total de l'horizon superficiel, sans différence significative entre les situations étudiées. La fraction intermédiaire contient de 23 à 28 % du C total, sauf dans la parcelle JP3, où cette fraction ne contient que 6 % du C total. La fraction argileuse, bien que peu importante pondéralement, contient de 41 à 51 % du C total, sauf

**Tableau 10** - Teneurs en carbone et rapport C/N des fractions granulométriques de la couche 0-5 cm des sols étudiées dans la région de Marabá. L'écart type est indiqué entre parenthèses. Pour une fraction donnée, des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 10 - Carbon and nitrogen content and C/N ratio of the particle-size fractions of the 0-5 cm layer the studied soils in the Marabá area. The standard deviation is in brackets. For the same fraction, different letters indicate a significant difference between the studied situations, at the level of 5 %, after Tukey test.**

|                                  | Profondeur | Forêt             | JP1               | JP2               | JP3              | JPA               |
|----------------------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| C mg.g <sup>-1</sup><br>fraction | 20-2000 µm | 5,4 a<br>(1,6)    | 8,0 a<br>(1,9)    | 4,0 a<br>(0,7)    | 5,0 a<br>(1,9)   | 4,5 a<br>(1,7)    |
|                                  | 2-20 µm    | 84,9 ab<br>(16,5) | 105,7 a<br>(5,7)  | 74,1 ab<br>(25,4) | 21,0 c<br>(8,1)  | 58,5 bc<br>(11,0) |
|                                  | 0-2 µm     | 55,8 a<br>(8,41)  | 57,0 a<br>(11,34) | 58,0 a<br>(6,06)  | 56,3 a<br>(6,32) | 55,2 a<br>(11,04) |
| C/N                              | 20-2000 µm | 16,1 a<br>(2,9)   | 22,2 a<br>(3,5)   | 19,7 a<br>(1,6)   | 20,9 a<br>(5,2)  | 21,8 a<br>(3,1)   |
|                                  | 2-20 µm    | 15,2 a<br>(0,6)   | 14,6 a<br>(0,5)   | 16,7 a<br>(1,2)   | 7,6 b<br>(1,1)   | 14,7 a<br>(4,4)   |
|                                  | 0-2 µm     | 11,5 a<br>(0,7)   | 11,5 a<br>(0,6)   | 12,5 a<br>(0,8)   | 13,3 a<br>(1,0)  | 11,8 a<br>(1,4)   |

**Tableau 11** - Teneur en carbone et rapport C/N des fractions granulométriques de la couche 0-5 cm des parcelles étudiées dans la région de Manaus. L'écart type est indiqué entre parenthèses. Pour une profondeur donnée, des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 11 - Carbon and nitrogen content and C/N ratio of the particle-size fractions of the 0-5 cm layer the studied soils in the Manaus area. The standard deviation is in brackets. For the same fraction, different letters indicate a significant difference between the studied situations, at the level of 5 %, after Tukey test.**

|   | Fraction   | Forêt             | MP1               | MP2               | MP3                | MP4               | MPab              |
|---|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| <b>C mg.g<sup>-1</sup><br/>fraction</b> | 20-2000 µm | 38,9 a<br>(13,23) | 103,7 a<br>(30,0) | 132,0 a<br>(96,0) | 103,8 a<br>(1,79)  | 64,1 a<br>(8,61)  | 29,7 a<br>(2,1)   |
|   | 2-20 µm    | 108,7 a<br>(23,3) | 162,5 a<br>(15,6) | 141,9 a<br>(49,9) | 130,5 a<br>(19,65) | 149,6 a<br>(22,0) | 100,5 a<br>(28,7) |
|   | 0-2 µm     | 32,3 a<br>(4,9)   | 33,6 a<br>(3,6)   | 32,0 a<br>(5,7)   | 32,7 a<br>(4,1)    | 33,1 a<br>(4,5)   | 30,6 a<br>(1,6)   |
| <b>C/N</b>                              | 20-2000 µm | 18,9 a<br>(1,3)   | 25,6 a<br>(5,3)   | 29,2 a<br>(10,7)  | 25,6 a<br>(4,1)    | 24,7 a<br>(1,5)   | 19,6 a<br>(4,3)   |
|   | 2-20 µm    | 12,3 a<br>(2,0)   | 16,3 ab<br>(1,9)  | 17,4 ab<br>(2,7)  | 18,8 ab<br>(1,9)   | 15,4 ab<br>(0,9)  | 19,9 b<br>(5,0)   |
|   | 0-2 µm     | 14,7 a<br>(1,0)   | 13,6 ab<br>(0,9)  | 12,7 ab<br>(0,8)  | 13,3 ab<br>(0,4)   | 12,5 b<br>(0,7)   | 14,1 ab<br>(0,7)  |

dans la parcelle JP3 (66 %).

A Manaus, la fraction 0-2 µm représente de 72 à 82 % du poids du sol, la fraction 2-20 µm de 5 à 12 % et la fraction 20-2000 µm de 10 à 16 %. La teneur en C de la fraction argileuse est faible et ne varie pratiquement pas entre les situations étudiées (**tableau 11**) : elle est comprise entre 30 et 34 mg.g<sup>-1</sup>. La fraction 2-20 µm est très riche en carbone : les teneurs varient de 100 à 163 mg.g<sup>-1</sup> selon les situations. Les teneurs en C de la fraction grossière sont très variables (de 30 à 132 mg.g<sup>-1</sup>), mais les différences entre les différentes situations ne sont pas significatives. Comme dans les sols de Marabá, les rapports C/N diminuent des fractions grossières vers les fractions fines. Malgré la faible teneur en C de la fraction 0-2 µm, l'essentiel du C lui est associé, en raison de son importance pondérale : sous forêt, 60 % du C se trouve dans la fraction fine. Seulement 15 % du C est associé à la fraction grossière, sous forme de résidus organiques peu décomposés. Dans les 4 pâturages, la proportion de C associée à la fraction argileuse (46 à 57 %) diminue légèrement. En contrepartie, la quantité de C présent dans la fraction grossière augmente légèrement (21 à 29 %). Toutefois ces différences ne sont pas significatives. Dans le pâturage abandonné (MPab), la tendance est inversée, avec une plus grande quantité de C associée aux argiles (72 %) et une faible proportion du C sous forme de résidus grossiers (12 %) ; mais les différences par rapport au sol sous forêt ne sont pas significatives.

## Les caractéristiques chimiques des sols

### Acidité et Bases

A Marabá, les sols sous forêt sont acides, le pH est proche de 4 (**tableau 12**). Dans tous les pâturages, le pH est significativement plus élevé que sous forêt (sauf pour la couche 10-20 cm de la parcelle JP2) : ils varient entre 4,7 et 5,8. Les teneurs en aluminium échangeable du sol sous forêt varient entre 1 et 1,5 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol. Les sols sous pâturages ont des teneurs en Al<sup>3+</sup> toujours inférieures à celles de forêt. En surface, ces teneurs sont inférieures à 0,5 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol et sont significativement différentes de celle du sol sous forêt. Dans les deux couches sub-superficielles, les teneurs en Al<sup>3+</sup> sont aussi significativement différentes de la teneur du sol sous forêt dans les pâturages JP1, JP2 et JPA. Sous forêt, la somme des bases échangeables (S) est faible en la surface (0,98 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol) et diminue avec la profondeur. Les sols des pâturages quel que soit leur état de dégradation présentent en surface des valeurs de S significativement supérieures à celle de la forêt, comprises entre 3 et 5 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol. Ces valeurs diminuent assez fortement avec la profondeur, mais restent significativement supérieures à celles qui sont mesurées sous forêt. Sous forêt, le taux de saturation en bases est très faible dès la surface (14 %) et diminue avec la profondeur. Dans tous les sols des pâturages, les taux de saturation en bases sont compris entre 35 et 46 %, ils sont significativement plus élevés que sous forêt. Tous les sols des pâturages

**Tableau 12** - Caractéristiques chimiques des sols étudiées dans la région de Marabá. L'écart type est indiqué entre parenthèses. Pour une profondeur donnée, des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 12 - Chemical characteristics of the studied soils in the Marabá area. The standard deviation is in brackets. For the same depth, different letters indicate a significant difference between the studied**

|   | Horizon | Forêt             | JP1              | JP2               | JP3               | JPA               |
|---|---------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>pH</b>                                       | 0-5     | 4,0 a<br>(0,2)    | 5,8 b<br>(0,3)   | 4,8 c<br>(0,4)    | 5,3 d<br>(0,3)    | 5,4 b<br>(0,3)    |
|   | 5-10    | 4,0 a<br>(0,2)    | 5,5 b<br>(0,5)   | 4,7 c<br>(0,5)    | 5,0 bc<br>(0,3)   | 5,2 bc<br>(0,6)   |
|   | 10-20   | 4,1 a<br>(0,1)    | 5,2 b<br>(0,6)   | 4,8 ac<br>(0,6)   | 5,0 bc<br>(0,3)   | 5,0 bc<br>(0,5)   |
| <b>Al<sup>3+</sup><br/>cmol.kg<sup>-1</sup></b> | 0-5     | 1,11 a<br>(0,35)  | 0,06 b<br>(0,13) | 0,19 bc<br>(0,12) | 0,39 c<br>(0,27)  | 0,15 bc<br>(0,11) |
|   | 5-10    | 1,46 a<br>(0,50)  | 0,14 b<br>(0,23) | 0,24 b<br>(0,19)  | 0,96 a<br>(0,54)  | 0,38 b<br>(0,52)  |
|   | 10-20   | 1,38 a<br>(0,18)  | 0,22 b<br>(0,25) | 0,26 b<br>(0,20)  | 1,02 ac<br>(0,69) | 0,57 bc<br>(0,45) |
| <b>S<sup>+</sup><br/>cmol.kg<sup>-1</sup></b>   | 0-5     | 0,98 a<br>(0,24)  | 4,35 b<br>(1,40) | 3,22 b<br>(1,32)  | 4,27 b<br>(2,22)  | 3,25 b<br>(1,05)  |
|   | 5-10    | 0,61 a<br>(0,25)  | 2,41 b<br>(0,66) | 2,11 b<br>(0,96)  | 2,22 b<br>(0,70)  | 1,74 b<br>(0,95)  |
|   | 10-20   | 0,49 a<br>(0,13)  | 2,00 b<br>(0,86) | 2,21 b<br>(1,26)  | 2,14 b<br>(0,77)  | 1,50 ab<br>(0,71) |
| <b>T<sup>+</sup><br/>cmol.kg<sup>-1</sup></b>   | 0-5     | 6,93 a<br>(0,85)  | 9,26 a<br>(1,81) | 7,30 a<br>(2,05)  | 9,45 a<br>(3,88)  | 6,61 a<br>(1,42)  |
|   | 5-10    | 6,21 ab<br>(0,80) | 6,33 a<br>(0,86) | 5,95 ab<br>(1,58) | 6,05 ab<br>(0,58) | 4,87 b<br>(0,72)  |
|   | 10-20   | 5,35 ab<br>(0,46) | 6,25 a<br>(1,00) | 6,04 a<br>(2,07)  | 5,67 ab<br>(0,54) | 4,32 b<br>(0,85)  |
| <b>S/T<br/>%</b>                                | 0-5     | 14 a<br>(3)       | 46 b<br>(8)      | 44 b<br>(14)      | 44 b<br>(11)      | 48 b<br>(9)       |
|   | 5-10    | 10 a<br>(4)       | 39 b<br>(13)     | 38 b<br>(20)      | 38 b<br>(15)      | 36 b<br>(17)      |
|   | 10-20   | 9 a<br>(2)        | 34 b<br>(17)     | 37 b<br>(15)      | 38 b<br>(13)      | 35 b<br>(19)      |

\* S : la somme des bases échangeables correspond ici à la somme des ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>, le sodium n'ayant pas été dosé.

\* T : la capacité d'échange cationique effective correspond ici à la somme des bases échangeables définie ci-dessus plus l'acidité potentielle (Al<sup>3+</sup>+ H<sup>+</sup>)

présentent des taux de saturation semblables.

A Manaus, les sols sous forêt sont également acides, le pH variant de 4,5 à 4,8 (**tableau 13**). Dans la couche superficielle, tous les sols de pâturage ont des pH compris entre 5,3 et 5,8, significativement supérieurs à celui de la forêt. Dans les couches sub-superficielles, les pH des sols sous pâturage ne

diffèrent pas significativement de celui du sol sous forêt. Les teneurs en aluminium échangeable sous forêt sont élevées : elles varient de 1,93 à 1,24 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol. En surface, les teneurs en Al<sup>3+</sup> des sols de pâturages sont toujours inférieures à 0,5 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol et sont significativement différentes de celles du sol sous forêt. Dans les deux couches sub-superfi-

**Tableau 13** - Caractéristiques chimiques des sols étudiées dans la région de Manaus. L'écart type est indiqué entre parenthèses. Pour une profondeur donnée, des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 13 - Chemical characteristics of the studied soils in the Manaus area. The standard deviation is in brackets. For the same depth, different letters indicate a significant difference between the studied**

|   | Horizon | Forêt            | MP1               | MP2               | MP3               | MP4               | MPab              |
|---|---------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| pH  | 0-5     | 4,5 a<br>(0,2)   | 5,4 b<br>(0,4)    | 5,4 b<br>(0,4)    | 5,3 b<br>(0,2)    | 5,8 b<br>(0,2)    | 5,4 b<br>(0,2)    |
|   | 5-10    | 4,8 abc<br>(0,1) | 4,7 ab<br>(0,5)   | 4,6 ab<br>(0,3)   | 5,1 abc<br>(0,2)  | 5,4 c<br>(0,4)    | 5,1 abc<br>(0,1)  |
|   | 10-20   | 4,8 ab<br>(0,1)  | 4,4 b<br>(0,1)    | 4,7 ab<br>(0,4)   | 5,3 a<br>(0,4)    | 5,1 a<br>(0,3)    | 4,9 a<br>(0,1)    |
| Al <sup>3+</sup><br>cmol.kg <sup>-1</sup> | 0-5     | 1,93 a<br>(0,22) | 0,49 b<br>(0,61)  | 0,21 b<br>(0,16)  | 0,44 b<br>(0,41)  | 0,18 b<br>(0,14)  | 0,44 b<br>(0,25)  |
|   | 5-10    | 1,40 a<br>(0,23) | 0,72 ac<br>(0,51) | 0,65 bc<br>(0,28) | 0,54 bc<br>(0,41) | 0,41 bc<br>(0,37) | 0,68 bc<br>(0,19) |
|   | 10-20   | 1,24 a<br>(0,21) | 0,86 ac<br>(0,17) | 0,67 bc<br>(0,31) | 0,49 bc<br>(0,24) | 0,48 bc<br>(0,27) | 0,68 bc<br>(0,08) |
| S <sup>+</sup><br>cmol.kg <sup>-1</sup>   | 0-5     | 0,31 a<br>(0,15) | 3,66 b<br>(2,19)  | 4,37 b<br>(1,80)  | 4,34 b<br>(0,9)   | 4,48 b<br>(1,94)  | 1,99 ab<br>(0,72) |
|   | 5-10    | 0,19 a<br>(0,05) | 1,32 bc<br>(0,66) | 1,21 bc<br>(0,56) | 2,10 bc<br>(0,34) | 1,80 bc<br>(1,12) | 1,30 ac<br>(0,35) |
|   | 10-20   | 0,11 a<br>(0,04) | 0,7 a<br>(0,42)   | 0,71 a<br>(0,32)  | 1,36 b<br>(0,30)  | 0,70 a<br>(0,51)  | 0,74 a<br>(0,14)  |
| T <sup>+</sup><br>cmol.kg <sup>-1</sup>   | 0-5     | 2,86 a<br>(0,38) | 4,30 a<br>(1,83)  | 4,71 a<br>(1,75)  | 4,87 a<br>(0,63)  | 4,94 a<br>(1,81)  | 2,58 a<br>(0,59)  |
|   | 5-10    | 2,07 a<br>(0,28) | 2,17 a<br>(0,28)  | 2,02 a<br>(1,56)  | 2,77 a<br>(0,34)  | 2,47 a<br>(0,75)  | 2,08 a<br>(0,22)  |
|   | 10-20   | 1,78 a<br>(0,26) | 1,67 a<br>(0,35)  | 1,56 a<br>(0,34)  | 1,97 a<br>(0,18)  | 1,49 a<br>(0,23)  | 1,53 a<br>(0,05)  |
| S/T<br>%                                  | 0-5     | 11 a<br>(4,5)    | 80 b<br>(21,3)    | 91 b<br>(6,1)     | 89 b<br>(9,7)     | 88 b<br>(7,7)     | 75 b<br>(12,8)    |
|   | 5-10    | 9 a<br>(1,8)     | 59 b<br>(27,5)    | 58 b<br>(21)      | 77 b<br>(13,9)    | 68 b<br>(25,4)    | 62 b<br>(11,9)    |
|   | 10-20   | 6 a<br>(1,5)     | 40 b<br>(17,3)    | 45 b<br>(21)      | 69 b<br>(13,4)    | 44 b<br>(27,8)    | 48 b<br>(7,7)     |

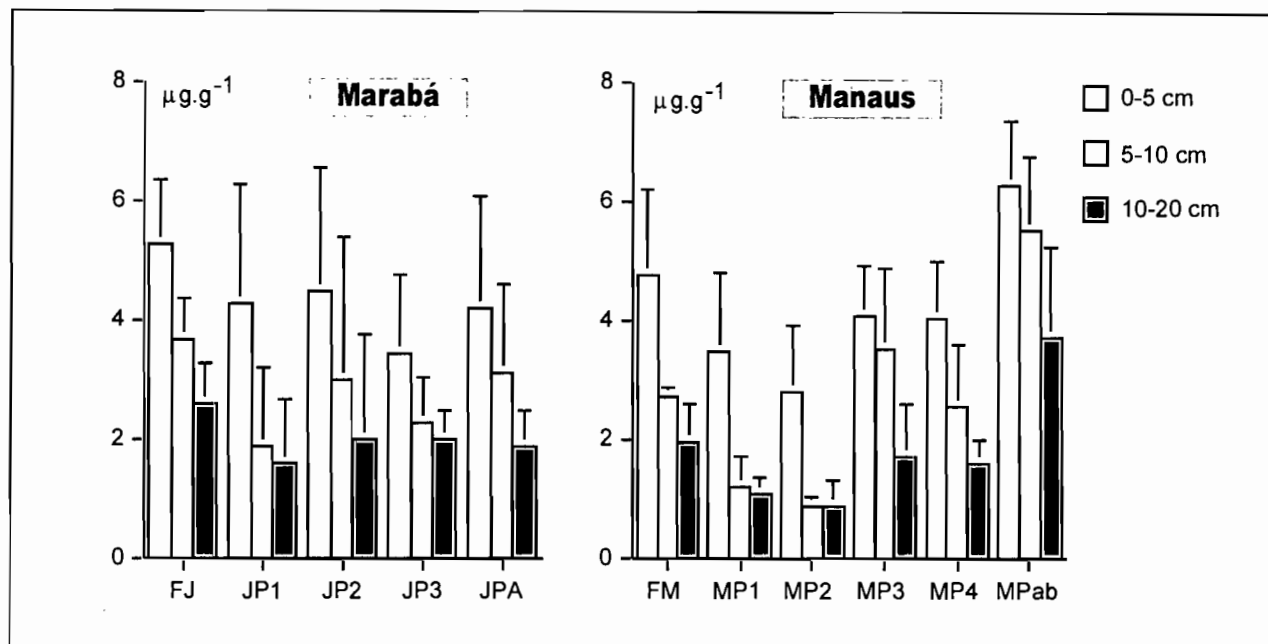
\* S : la somme des bases échangeables correspond ici à la somme des ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>, le sodium n'ayant pas été dosé.

\* T : la capacité d'échange cationique effective correspond ici à la somme des bases échangeables définie ci-dessus plus l'acidité potentielle (Al<sup>3+</sup>+ H<sup>+</sup>)

cielles, ces teneurs augmentent légèrement, mais sont significativement inférieures à celles du sol sous forêt, sauf pour le pâturage le plus jeune (MP1). Sous forêt, la somme des bases échangeables est très faible dans les 3 couches étudiées (0,11

à 0,31 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol). Dans les sols sous pâturage, la somme des bases échangeables est toujours supérieure à celle du sol sous forêt. Dans la couche 0-5 cm, S est supérieure à 3,5 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol, et significativement supérieure à celle de la forêt, sauf pour la parcelle MPab (2 cmol.kg<sup>-1</sup> de sol). Il n'existe pas de différence significative entre les différents pâtu-

**Figure 4 - Teneurs en phosphore extractible dans les sols des situations étudiées dans les régions de Marabá et Manaus**  
**Figure 4 - Extractable phosphorus content in the soils in the Marabá and Manaus areas**



rages. Sous forêt, le taux de saturation en bases est très faible dès la surface (11 %) et diminue avec la profondeur. Dans les sols sous pâturage, les taux de saturation sont significativement plus élevés que sous forêt. En surface, ils sont très élevés, et varient entre 75 et 90 %. Ils diminuent avec la profondeur, mais restent toujours supérieurs à 45 %. Les taux de saturation des sols des pâturages sont semblables.

#### Le phosphore extractible par le réactif Mehlich

A Marabá, les teneurs en phosphore assimilable du sol sous forêt varient de 5,3 mg.kg<sup>-1</sup> en surface à 2,6 mg.kg<sup>-1</sup> dans la couche 10-20 cm. Ce sont des teneurs assez faibles, ce qui est commun à un grand nombre de sols d'Amazonie. Dans les parcelles de pâturage, les teneurs en P assimilables sont toujours légèrement plus faibles que sous forêt, mais ces différences ne sont pas significatives (figure 4).

A Manaus, les teneurs en phosphore assimilable du sol sous forêt sont semblables à celles de Marabá : elles varient de 4,8 mg.kg<sup>-1</sup> en surface à 2 mg.kg<sup>-1</sup> dans la couche 10-20 cm (figure 4). Dans les pâturages MP1, MP2, MP3 et MP4, les teneurs sont presque toujours plus faibles que sous forêt, mais ces différences ne sont pas significatives. Les teneurs de phosphore assimilable sont plus élevées dans le sol sous pâturage abandonné (MPab) que dans le sol sous forêt, ces différences sont significatives pour les couches 5-10 et 10-20 cm.

#### La macrofaune du sol

A Marabá (tableau 14) la densité totale des macroinvertébrés du sol est élevée en forêt (17246 ind.m<sup>-2</sup>) et bien inférieure dans les pâturages (1294 à 4803 ind.m<sup>-2</sup>). Le groupe des termites est dominant dans tous les systèmes et principalement dans la forêt (76 %). Les fourmis sont le deuxième groupe le plus important (20 % dans la forêt, 36 % dans la parcelle JPA). La densité des vers de terre varie entre 100 et 265 ind.m<sup>-2</sup>. Dans les pâturages, les biomasses totales de la macrofaune sont très inférieures à celle du sol sous forêt (tableau 14). Les termites (8 à 45 %) et surtout les vers de terre (36 à 79 %) constituent l'essentiel de cette biomasse. Entre les différents pâturages, les différences de biomasse et de densités totales ne sont pas significatives. De nombreux autres groupes moins abondants sont également présents dans les sols des situations étudiées : Isopodes, Coléoptères, Arachnides, Diploptides, Chilopodes, Hétéroptères. Sous forêt, 21 groupes taxonomiques ont été identifiés alors que dans les différents pâturages, le nombre de groupes varie entre 10 et 13.

A Manaus (tableau 15), la densité totale de macroinvertébrés est de 6670 ind. m<sup>-2</sup>, sous forêt. Les densités varient beaucoup entre les pâturages : elles sont faibles dans les pâturages les plus jeunes et les moins dégradés (de 1060 à 2950 ind. m<sup>-2</sup>) mais voisines de celle de la forêt dans le cas des pâturages anciens et/ou dégradés. Comme à Marabá, le groupe des termites est dominant (41 à 85 % du nombre total d'indi-

**Tableau 14** - Densités totales, des termites et des fourmis et biomasses totales, des termites et des vers de terre dans les sols des situations étudiées dans la région de Marabá. L'erreur standard est indiqué entre parenthèses. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 14 - Total, termites and ants densities and total, termites and earthworms biomass in the studied soils in the Marabá area. The standard error is in brackets. Different letters indicate a significant difference between the studied situations, at the level of 5 %, after Tukey test**

|     | Densité<br>Totale | Densité<br>Termites<br>ind.m <sup>-2</sup> | Densité<br>Fourmis | Biomasse<br>Totale | Biomasse<br>Termites<br>g/m <sup>-2</sup> | Biomasse<br>Versdeterre |
|-----|-------------------|--|--------------------|--------------------|---|-------------------------|
| FJ  | 17246 a<br>(2184) | 13107 a<br>(1778)                          | 3608 a<br>(789)    | 93,1 a<br>(34,5)   | 42,5 a<br>(22,5)                          | 36,2 a<br>(12,7)        |
| JP1 | 1294 b<br>(150)   | 502 b<br>(114)                             | 368 b<br>(130)     | 8,2 b<br>(0,9)     | 0,7 b<br>(0)                              | 6,5 b<br>(1,5)          |
| JP2 | 4803 b<br>(528)   | 3504 b<br>(884)                            | 1035 b<br>(885)    | 19,8 b<br>(2,3)    | 9,0 ab<br>(0,9)                           | 7,1 b<br>(2,0)          |
| JP3 | 2816 b<br>(1495)  | 1653 b<br>(652)                            | 946 b<br>(364)     | 9,4 b<br>(5,6)     | 4,0 ab<br>(1,8)                           | 3,5 b<br>(0,9)          |
| JPA | 2926 b<br>(1439)  | 1573 b<br>(602)                            | 1053 b<br>(423)    | 12,9 b<br>(6,5)    | 3,2 ab<br>(1,3)                           | 6,0 b<br>(1,4)          |

vidus), en forêt et dans les pâturages les plus jeunes. La densité des fourmis diminue fortement après la mise en pâturage, et augmente lors de la dégradation ou l'abandon des pâturages. La biomasse totale des macroinvertébrés est de 53,3 g.m<sup>-2</sup> sous forêt. Les biomasses totales dans les différents pâturages étudiés sont semblables sauf dans le pâturage de 15 ans non dégradé où elle est près de 10 fois plus faible. Plus encore qu'à Marabá, ce sont les vers de terre qui constituent l'essentiel de cette biomasse (de 67 à 97 %).

La diversité est beaucoup plus grande à Manaus qu'à Marabá : plus de 150 groupes ont été dénombrés dans la forêt. Dans les pâturages, le nombre de groupes diminue fortement, il varie entre 28 et 48. Il reste toutefois de 2 à 3 fois plus élevé que dans les pâturages de Marabá.

## DISCUSSION

### Évolution des caractéristiques chimiques des sols

**Les évolutions des réserves organiques** après mise en culture en Amazonie brésilienne sont souvent divergentes. Falesi et Veiga (1986) mentionnent une forte diminution des teneurs en carbone dans des pâturages d'Amazonie orientale, alors que Desjardins *et al.* (1994) observent une diminution de très faible amplitude. Dans le Roraima, Eden *et al.* (1991) ont constaté une relative stabilité après la mise en

pâturage, de même que Bushbacher *et al.* (1988) en Amazonie orientale. En revanche, Koutika *et al.*, (1997) en Amazonie orientale, Choné *et al.* (1991) en Amazonie Centrale ainsi que Feigl *et al.* (1995) et Neill *et al.* (1996) en Amazonie occidentale, mettent en évidence une nette augmentation des teneurs en carbone après installation des pâturages. Ces divergences sont parfois expliquées par les effets des modes de gestion (fertilisation, charge animale, choix de la graminée fourragère), bien qu'on dispose de peu d'informations sur les mécanismes mis en œuvre. L'utilisation des traceurs isotopiques (Ceri *et al.*, 1991, Desjardins *et al.*, 1994) montre que la quantité de carbone du sol héritée de la forêt diminue, d'abord rapidement lors des premières années qui suivent la déforestation puis plus lentement ensuite, tandis qu'augmente le stock de matière organique issue de la décomposition de la graminée fourragère.

Les réserves organiques des sols des deux ensembles de sites étudiées ici sont très inégales : elles sont deux fois plus élevées dans la couche superficielle (0 à 20 cm) du sol très argileux de la région de Manaus que dans celle de sols sablo-argileux de la région de Marabá. Dans chacune de ces régions, les résultats ne mettent en évidence aucune variation significative des teneurs en carbone et azote totaux après déforestation et mise en pâturage. De plus, le fractionnement granulométrique de la matière organique ne fait pas apparaître de variations significatives entre les degrés de transformation et d'humification de la matière organique. Il n'existe pas, dans ces

**Tableau 15** - Densités totales, des termites et des fourmis et biomasses totales, des termites et des vers de terre dans les sols des situations étudiées dans la région de Manaus. L'erreur standard est indiquée entre parenthèses. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les parcelles étudiées, au seuil de 5 %, d'après le test de Tukey.

**Table 15 - Total, termites and ants densities and total, termites and earthworms biomass in the studied soils in the Manaus area. The standard error is in brackets. Different letters indicate a significant difference between the studied situations, at the level of 5 %, after Tukey test.**

|      | Densité<br>Totale | Densité<br>Termites<br>ind.m <sup>-2</sup> | Densité<br>Fourmis | Biomasse<br>Totale | Biomasse<br>Termites<br>g/m <sup>-2</sup> | Biomasse<br>Vers de terre |
|------|-------------------|--|--------------------|--------------------|---|---------------------------|
| FM   | 6752 a<br>(1926)  | 3608 ab<br>(1128)                          | 2519 a<br>(1447)   | 53,3 a<br>(34,1)   | 5,3 ab<br>(2,8)                           | 44,3 a<br>(6,3)           |
| MP1  | 1619 a<br>(618)   | 940 b<br>(465)                             | 321 a<br>(98)      | 50,5 a<br>(14,5)   | 0,6 b<br>(0)                              | 48,9 a<br>(6,9)           |
| MP2  | 2952 a<br>(1367)  | 2504 ab<br>(988)                           | 184 a<br>(85)      | 37,3 a<br>(27,5)   | 2,0 ab<br>(0,6)                           | 34,6 a<br>(5,8)           |
| MP3  | 7952 a<br>(4575)  | 4912 a<br>(1022)                           | 1619 a<br>(754)    | 59,6 a<br>(31,3)   | 12,2 a<br>(5,5)                           | 39,7 a<br>(6,0)           |
| MP4  | 1064 a<br>(430)   | 470 b<br>(189)                             | 189 a<br>(66)      | 5,6 a<br>(1,8)     | 0,5 b<br>(0)                              | 3,9 b<br>(0,6)            |
| MPab | 5223 a<br>(2523)  | 2116 ab<br>(1056)                          | 2174 a<br>(1089)   | 51,9 a<br>(15,0)   | 3,4 ab<br>(0,6)                           | 45,1 a<br>(4,8)           |

situations, de relation entre l'âge des pâturages, leur état de dégradation et l'évolution des réserves organiques.

Les travaux publiés par Neill *et al.* (1996), Morães *et al.*, (1996), Bushbacher *et al.* (1988) montrent que l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques du sol observée à la suite du brûlis se maintient durant de nombreuses années dans les pâturages. Selon Bushbacher *et al.* (1988), la concentration en éléments nutritifs dans des sols de pâturages abandonnés apparaît indépendante de l'âge ou de l'intensité de l'utilisation, avant abandon.

Notre étude des caractéristiques physico-chimiques des sols des pâturages met en évidence des améliorations concernant : - le pH, moins acide - la quantité d'aluminium échangeable significativement plus faible - la somme des bases et le degré de saturation en bases, significativement plus élevés. Ces résultats concernent tous les pâturages, indépendamment de leur âge et de leur état de dégradation.

**Le phosphore** est souvent considéré comme le principal facteur limitant du bon développement des pâturages (Fearnside, 1980). Il est vrai que les teneurs en P extractible sont toujours faibles (sous forêt comme sous pâturage), ce qui peut poser la question de la compatibilité de l'offre du sol en ions phosphate avec les besoins des graminées cultivées. Certaines espèces, comme **Brachiaria humidicola** et **Andropogon gayanus**, sont considérées comme peu exi-

geantes : des teneurs en ions phosphate extractibles par le réactif de Mehlich supérieures à 3,2 mg.kg<sup>-1</sup> pour des sols à texture sablo-argileuse, et à 1,4 mg.kg<sup>-1</sup> pour des sols à texture argileuse ne sont pas considérées comme limitantes (Vilela *et al.*, 1998). D'autres espèces, comme **Brachiaria brizantha** et **Panicum maximum**, sont plus exigeantes et nécessitent des teneurs en ions phosphate extractibles par le réactif de Mehlich supérieures à 5,4 mg.kg<sup>-1</sup> pour des sols à texture sablo-argileuse, et à 1,5 mg.kg<sup>-1</sup> pour des sols à texture argileuse, ceci quand les apports azoté et calcique ne sont pas limitants. Ainsi, l'observation des résultats ne montre pas de limitation en ions phosphate pour les pâturages de Manaus, alors qu'à Marabá, les conditions d'une offre phosphatée satisfaisante ne sont pas réunies.

Cependant, à Marabá comme à Manaus, les teneurs en phosphore extractible des sols sont comparables sous forêt et sous pâturage, comme l'ont par ailleurs observé Eden *et al.* (1991) et Bushbacher *et al.* (1988). La comparaison statistique ne fait pas apparaître de différences significatives, ce qui montre le peu d'effet de la transformation du milieu sur les quantités de phosphore extractible (A Manaus, le sol du pâturage MPab possède des teneurs plus élevées, ce qui indique que, malgré plusieurs années d'abandon, l'effet de l'apport d'engrais phosphaté lors des premières années de son installation est encore sensible). La similarité des teneurs en P extrac-



tible dans tous les pâturages, qu'ils soient en bon état ou devenus improductifs, dans les deux régions étudiées, montre que la teneur en phosphore extractible, même si elle est limitante pour certaines graminées fourragères, n'est pas le principal facteur responsable de la dégradation des pâturages.

### Evolution des propriétés physiques du sol

Les travaux réalisés dans différentes régions d'Amazonie - Morães *et al.* (1996) dans le Rondônia, Edén *et al.* (1991) dans le Roraima, Bushbacher *et al.* (1988) et Koutika *et al.* (1997) dans le Pará - mettent en évidence une faible augmentation de la densité apparente dans la couche superficielle (de 0 à 10-20 cm) des sols sous pâturage. De plus, des mesures au porosimètre au mercure montrent que la perte de porosité mise en évidence par ces mesures résulte essentiellement de l'écrasement d'une partie des pores de dimensions comprises entre 0,1 et 100 µm. Or ce sont précisément les pores de cette dimension qui sont responsables de la rétention de l'eau dans le sol, sous forme disponible pour les plantes (Chauvel *et al.*, 1991; Grimaldi *et al.*, 1993; Koutika *et al.*, 1997).

La description des profils culturaux et l'analyse de certains paramètres physiques mettent en évidence les mêmes effets de la déforestation et de l'installation du pâturage sur les propriétés physiques, le plus souvent limités à la partie superficielle du sol. La dégradation de la structure de l'horizon de surface se manifeste par l'augmentation de la densité apparente. Ces modifications, bien que d'amplitudes modérées, peuvent avoir des conséquences importantes sur le fonctionnement hydrodynamique des sols sous pâturages. Koutika *et al.* (1997) et Barros, (1999) ont ainsi montré que la capacité de rétention d'eau utile, mesurée à partir des courbes de désorption en eau, diminue fortement en passant de la forêt au pâturage.

Dans la région de Manaus, sur certains des sites étudiés dans ce travail, les mesures de conductivité hydraulique et de tensiométrie (Barros, 1999) montrent que la couche superficielle des sols sous pâturages est beaucoup moins perméable que celle des sols sous forêt. Lors des épisodes pluvieux, tandis que, sous forêt, le front d'humectation se propage régulièrement, sous pâturage une nappe perchée plus ou moins durable se développe. Ces modifications des propriétés physiques et du fonctionnement hydrodynamique du sol interviennent après déforestation ou au cours des premières années de pâturage. Elles peuvent avoir des conséquences sur le développement de la graminée fourragère, soit en diminuant la réserve d'eau disponible dans le sol en saison sèche, soit en accentuant les engorgements des horizons superficiels lors des épisodes pluvieux, à l'origine d'un manque d'aération du sol mis en évidence par l'apparition de taches ferrugineuses autour de racines localement nécrosées ou mortes.

Cependant, dans les deux régions étudiées, la comparaison

des différents pâturages ne montre pas de relations claires entre l'âge des pâturages, leur état de dégradation, et l'évolution de la structure et des propriétés physiques du sol. Ainsi dans la région de Manaus, deux pâturages d'une quinzaine d'années, l'un en bon état de conservation (MP4), l'autre, très envahi par les adventices (MP3), présentent des valeurs de densité apparente et de porosité totale très voisines. De la même façon, dans la région de Marabá, les valeurs de densité apparentes et de porosité d'un sol sous un pâturage peu dégradé (JP1) et un pâturage plus ancien très dégradé (JP3) sont semblables. L'étude de la dégradation des caractéristiques physiques des sols de pâturage nécessite l'emploi de méthodes prenant en compte la distribution dimensionnelle des pores, comme l'observation du profil cultural complétée par celle des lames minces, la caractérisation hydrique et la porosimétrie. L'évolution de la porosité de ces sols dépend, pour une grande part, des organismes qui les habitent, en particulier, des invertébrés (Barros, 1999).

### Effet des changements de la biodiversité sur

#### le fonctionnement de l'écosystème

La transformation de la forêt en pâturage est une perturbation majeure qui entraîne des modifications profondes des peuplements de macroinvertébrés du sol. En Amazonie Péruvienne, la conversion de forêt en pâturage modifie fortement la composition et la biomasse moyenne des populations de faune du sol (Lavelle et Pashanasi, 1989). Tandis que sous forêt, la faune est diversifiée, dominée par les espèces épigées et anéciques mangeuses de litière, sous pâturage le nombre d'unités taxonomiques diminue fortement et ce sont les espèces endogées, se nourrissant de la matière organique du sol, qui deviennent dominantes. Une d'elles, le ver de terre **Pontoscolex corethrurus**, constitue alors jusqu'à 95 % de la biomasse totale de faune du sol. L'ingestion du même sol par ce ver de terre a pour effet d'augmenter fortement la quantité d'ions phosphore immédiatement échangeables (Chapuis et Brossard, 1995). Les hypothèses avancées pour expliquer ce résultat attirent l'attention sur les interactions entre les vers de terre et les micro-organismes qu'ils ingèrent et stimulent par des apports de mucus dans leur tube digestif, avant d'utiliser les produits de leur métabolisme (Lavelle *et al.*, 1993).

Dans les sites que nous avons étudié en Amazonie brésilienne, une proportion importante des espèces (de 38 à 52 % à Marabá, de 68 à 80 % à Manaus) disparaît dans les 6 mois qui suivent la déforestation, et cette perte de diversité n'est que partiellement compensée par le développement d'espèces exotiques non recensées dans la forêt. La variabilité des peuplements relevés sur l'ensemble des sites étudiés reflète probablement un processus aléatoire de reconstitution des peuplements.

La perte du nombre d'espèces s'accompagne souvent d'une diminution du nombre d'individus ainsi que de la biomasse. C'est le cas dans tous les pâturages étudiés dans la région de Marabá. Près de Manaus, la baisse du nombre d'individus et de biomasse se manifeste dans les pâturages les plus jeunes et dans le pâturage ancien non dégradé. Toutefois dans le pâturage abandonné, le développement d'une abondante phytomasse semble provoquer une augmentation de la densité d'individus et de la biomasse de la macrofaune.

Dans la plupart des situations, les fortes modifications des populations de macro invertébrés du sol ne se manifestent pas, actuellement, par des changements évidents du fonctionnement du sol. C'est seulement dans le pâturage abandonné de la région de Manaus, qu'une étude détaillée de l'évolution synchrone de la macrofaune et des propriétés physiques du sol, a montré qu'une forte modification passagère des peuplements de macro invertébrés peut modifier durablement les propriétés physiques du sol (Barros, 1999). Ainsi, deux ans avant notre étude, l'espèce de ver de terre exotique **Pontoscolex corethrurus** (la même que celle identifiée en Amazonie Péruvienne) constituait plus 90 % de la biomasse totale des invertébrés du sol, avec une densité de 390 ind.m<sup>-2</sup>. Cette espèce a alors produit en abondance des turricules compacts qui, dans les conditions particulières du sol (argileux) et d'humidité (maintenue par la présence d'un mulch de débris végétaux en décomposition), ont formé une couche continue et imperméable de 5 à 20 cm d'épaisseur à la surface du sol. Le fonctionnement hydrodynamique du sol s'en est trouvé modifié (Barros, 1999). Au moment de notre étude, la population de **Pontoscolex corethrurus** avait fortement diminué, et le peuplement d'espèces décompactantes se reconstituait progressivement, retravaillant la couche dense superficielle. Cette espèce de ver de terre est également présente dans les autres pâturages étudiés, en faible quantité: plus que sa présence, c'est son abondance, relative et absolue qui peut expliquer l'évolution des propriétés physiques superficielles du sol.

### Dynamique de la végétation secondaire

Les potentiels de reconstitution de la couverture végétale dans les sites soumis successivement à: - la déforestation - aux brûlis - aux actions mécaniques - au pâturage - puis à l'abandon, varient en fonction des modes d'exploitation. Uhl *et al.* (1988) ont montré en Amazonie orientale que dans les parcelles soumises à l'exploitation la moins intensive (usage modéré du feu, couverture végétale permanente, temps d'exploitation limité, charge adaptée en bétail) les phytomasses sont significativement supérieures à celles mesurées dans d'autres pâturages plus intensivement exploités.

Dans les deux régions étudiées, la dégradation des pâturages se caractérise par un remplacement de la graminée fourragère par des adventices: la biomasse de la graminée fourragère est inversement proportionnelle à celle des adventices herbacées ou

ligneuses. Alors que la richesse spécifique des adventices herbacées est plus élevée dans la région de Marabá (proche du front pionnier et de la zone de transition climatique) que dans celle de Manaus (en Amazonie Centrale), l'invasion par les adventices herbacées se caractérise, dans chaque région, par la nette dominance d'une seule espèce, différente d'une région à l'autre. Dans les premières phases de la dégradation les ligneux provenant de la forêt, qui se maintiennent par rejet de souche, restent nombreux, mais leur nombre diminue ensuite au cours du temps.

Les résultats obtenus montrent que la dégradation du couvert fourragère n'est pas dépendante de l'âge. Ainsi l'envahissement par des adventices peut intervenir au cours des premières années de l'installation des pâturages, comme dans la région de Manaus (MP1 et MP2) où l'on observe aussi des pâturages plus anciens non envahis par les adventices (MP4). Dans la région de Marabá, même si les pâturages les plus anciens apparaissent plus dégradés, la relation n'est pas linéaire: ainsi le pâturage JP3, de même âge que le pâturage JP2, est nettement plus envahi. D'autre part, il apparaît possible de réhabiliter des pâturages dégradés par l'introduction de nouvelles graminées très compétitives (Mitja *et al.*, 1998).

### Effets de la gestion des parcelles

Ces effets apparaissent clairement par comparaison entre des pâturages, semblables par leur situation dans le paysage, leur sol, leur végétation initiale et leur date d'installation, mais soumis à des méthodes de gestion différentes. Dans certains cas, l'utilisation de puissants moyens mécaniques (et chimiques) explique facilement les différences observées. Les modes d'exploitation manuelle, qui ne font appel qu'à des moyens légers (plantations de diverses graminées, systèmes de rotation du troupeau, usages du feu et de désherbages sélectifs) suffisent cependant à orienter l'évolution du pâturage, vers une production fourragère plus ou moins stable ou décroissante. A l'heure actuelle, les effets des modes de gestion sont connus empiriquement par quelques exploitants qui se basent sur de nombreuses années d'expériences retenues. Dans le domaine fondamental, reste à mieux connaître la nature exacte des interactions dépendantes des modes de gestion.

En Amazonie orientale, où de très grandes surfaces ont été déforestées puis plantées, à partir des années 1970, en deux espèces de graminées fourragères importées d'Afrique (**Panicum maximum** puis **Brachiaria humidicola**), la dominance de ces espèces a provoqué l'émergence d'insectes parasites tels que la « **cigarrinha das pastagens** » (Cosenza *et al.*, 1989) qui ont ravagé la plus grande partie des pâturages. La gravité de cette attaque semble avoir été accrue là où une consommation excessive par le troupeau affaiblissait les graminées fourragères et favorisait le dévelop-

pement des adventices (Naves, 1980, Silva, 1986).

D'après des travaux en cours (Topall, communication personnelle) l'augmentation raisonnée et temporaire du chargement en bétail peut cependant limiter l'envahissement par la flore adventice. Une consommation suffisante limiterait aussi l'accumulation de biomasse morte et, par conséquent l'intensité des feux de fin de saison sèche. Ces feux, parfois nécessaire au contrôle des adventices, sélectionnent, lorsqu'ils sont trop fréquents, les espèces qui lui résistent et qui ont un fort potentiel de reproduction végétative. Rappelons aussi que l'accumulation de biomasse morte, formant un mulch sur le sol après l'abandon du pâturage, peut modifier le fonctionnement hydrodynamique du sol et faire évoluer les peuplements de faune.

On constate que les interactions entre les facteurs sont ici nombreuses et complexes. Le sol, la graminée fourragère, les adventices, l'animal et l'homme interagissent, non seulement sur le plan trophique, mais par leurs effets sur l'évolution du système, fortement influencée par le chargement en bétail et par les feux.

## CONCLUSION

L'étude réalisée montre que, sur un même sol, la rapidité et l'ampleur de la dégradation du pâturage peuvent varier considérablement. Le maintien ou la diminution de la biomasse de la graminée, ainsi que le degré d'envahissement du pâturage par les adventices n'est pas un processus linéaire dépendant uniquement de l'âge des parcelles étudiées.

La dégradation des pâturages ne semble pas liée à une dégradation des propriétés chimiques des sols. Les réserves organiques se maintiennent relativement constantes après l'installation des pâturages. Les caractéristiques chimiques des sols, qui sont améliorées à la suite du brûlis, se maintiennent ensuite constantes durant de nombreuses années, indépendamment de l'état de dégradation du pâturage (même si pour certains des sols étudiés, les teneurs en phosphore extractible peuvent être limitantes pour les graminées les plus exigeantes). Une détérioration des caractéristiques physiques de la couche superficielle du sol intervient rapidement pendant et après déforestation. Ensuite, les modifications de la structure de la couche superficielle de sol semblent liées à la dynamique du système (couverture végétale, rotation du troupeau, populations de macro-invertébrés du sol). Il apparaît que les pratiques de gestion des pâturages, comme le contrôle de la consommation par le bétail, le nettoyage des parcelles par le feu ou par la

coupe des espèces adventices exercent une influence considérable sur l'évolution des pâturages, en freinant ou favorisant le développement des attaques parasitaires et d'espèces adventices envahissantes. L'état des pâturages est lié à des équilibres fragiles entre les dynamiques des différentes populations végétales. Ces dynamiques peuvent évoluer très rapidement en fonction des conditions du milieu et plus encore de l'action anthropique.

Les résultats présentés ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble du bassin amazonien car sous l'apparente uniformité de cette région, il existe une grande variété de formations géologiques, pédologiques et végétales. Cependant, ils peuvent aider à comprendre les processus affectant la végétation, le sol et les organismes qui y vivent, à la suite de la déforestation et de l'installation de pâturages. Ces résultats montrent que la dégradation des pâturages est un phénomène complexe qui n'est cependant pas inéluctable (il existe des pâturages anciens non dégradés) ni forcément irréversible (l'introduction de nouvelles graminées peut permettre la réhabilitation de pâturages dégradés). Les pâturages sont des systèmes instables susceptibles d'évoluer rapidement sous l'influence de nombreux facteurs, en partie contrôlés par l'activité humaine.

## BIBLIOGRAPHIE

- Anderson J.-M., Ingram J., 1993 - Tropical soil biology and fertility programme: A handbook of methods. C.A.B. International, Oxford, 221 p.
- Barros E., 1999 - Effet de la macrofaune sur la structure et les processus physiques du sol de pâturages dégradés d'Amazonie. Thèse Doctorat, Univ. Paris 6, 129 p.
- Braun-Blanquet J., 1932 - Plant sociology, the study plant communities. Mc Graw-Hill Book Company Inc, New-York, 439 p.
- Blanchart E., Lavelle P., Braudeau E., Le Bissonais Y. & Valentin C. 1997 - Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Ivory Coast. *Soil Biol. Biochem.*, 29, pp. 431-439.
- Bushbacher R., Uih C., Serrão E.A.S., 1988 - Abandoned pastures in eastern Amazonia. II Nutrient stocks in the soil and vegetation. *Journal of Ecology*, 76, pp. 682-699.
- Cerri C.C., Volkoff B., Andreux F., 1991 - Nature and behaviour of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. *Forest, Ecology and Management*, 38, pp. 247-257.
- Chapuis L., Brossard M., 1995 - Modifications et stabilité du phosphore échangeable d'un Ferralsol ingéré par un ver géophage. *C. R. Acad. Sci Paris*, 320, série Ila, pp. 587-592.
- Chauvel A., Grimaldi M., Tessier D., 1991 - Changes in porespace distribution following deforestation and revegetation. An example from the central Amazon basin, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 38, pp. 259-271.
- Choné T., Andreux F., Correa J.-C., Volkoff B., Cerri C.C., 1991 - Changes in organic matter in an Oxisol from the central Amazonian forest during eight years as pasture, determined by <sup>13</sup>C isotopic composition. In: J. Berthelin (ed.), *Diversity of Environmental Biochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 397-405.
- Cochrane T.T., Sánchez P.A., 1982 - Land resources, soils and management in the Amazon region: a state of knowledge report. In: S.B. Hecht (ed.) *Amazon agriculture and land research*. Cali, CIAT, pp. 137-209.

- Cosenza G.W., Andrade R.P. de, Gomes D.T., Rocha C.M.C., 1989 - Resistência de gramíneas forrageiras à cigarrinha das pastagens. *Pesq. Agropec. Bras.*, 24, pp. 961-968.
- Decaëns T., Lavelle P., Jimenez Jaen J.-J., Escobar G., Rippstein G., 1994 - Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia, 30, pp. 157-168.
- Desjardins T., Andreux F., Volkoff B., Cerri C.C., 1994 - Organic carbon and  $^{13}\text{C}$  contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in Eastern Amazonia. *Geoderma*, 61, pp. 103-118.
- Eden M.J.; Furley P.A., McGregor D.F.M., Milliken W. Ratter J., 1991 - Effect of forest clearance and burning on soil properties in northern Roraima, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 38, pp. 283-290.
- Falesi I.C., 1976 - Ecosistema de Pastagem cultivada na Amazonia Brasileira (Boletim tecnico n° 1) EMBRAPA/CPATU, Belém, Pará, Brazil, 193 pp.
- Falesi I.C., Veiga J.-B., 1986 - O solo na Amazônia e as pastagens cultivadas. In: A.M. Peixoto, J.-C. de Moura, V.P. de Faria (éditeurs). *Pastagens na Amazônia*, FEALQ, Piracicaba, São Paulo, Brasil, pp. 1-26.
- Fearnside P.M. 1980 - The effects of cattle pasture on soil fertility in the Brazilian Amazon: Consequences of beef production sustainability. *Tropical Ecology*, 21, pp. 125-137.
- Fearnside P.M., Barbosa R.I., 1998 - Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 108, pp. 147-166.
- Feigl B.J., Mellilo J., Cerri C.C., 1995 - Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondônia (Brazil). *Plant and Soil*, 175, pp. 21-29.
- Gaupronneau Y., Manichon H., 1987 - Guide méthodique du profil cultural, 71 p.
- Grimaldi M., Sarrazin M., Chauvel A., Luizão F., Nunes N., Rodriguez M.R.L., Amblard P., Tessier D., 1993 - Effets de la déforestation et des cultures sur la structure des sols argileux d'Amazonie brésilienne. *Cahiers Agricultures*, 2, pp. 36-47.
- INPE, Brazil. 2000 - Monitoring of the Brazilian Amazonian Forest by Satellite 1998-1999. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José do Campos S.P., Brazil. Document released via internet (<http://www.inpe.br>).
- Koutika L.-S., Bartoli F., Andreux F., Cerri C.C., Burtin G., Choné Th., Philipp R., 1997 - Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin. *Geoderma*, 76, pp. 87-112.
- Laurent J.-Y., Brossard M., 1991 - Etude comparée de la détermination du phosphore de sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédologie*, XXVI, pp. 281-285
- Lavelle P., Pashanasi B., 1989 - Soil macrofauna and land management in Peruvian Amazonia (Yurimaguas, Loreto), *Pedobiologia*, 33, pp. 283-291.
- Lavelle P., Spain A.V., Blanchart E., Martin A., Martin S., 1992 - The impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In: *Myths and Science of soils of the tropics*, S.S.S.A. Special publication, 29, pp. 157-185
- Lavelle P., Blanchart E., Martin A., Martin S., Spain A., Toutain F., Barois I., Schaefer R., 1993 - A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, 25, pp. 130-150.
- Loker W., Vera R., Reátegui, 1997 - Pasture performance and sustainability in the Peruvian Amazon: Results of long-term on-farm research. *Agricultural systems*, 55(3), pp. 385-408.
- Mehlich, 1954 - Determination of P, Ca, Mg, K and  $\text{NH}_4$ . North Carolina Soil Test Division Mimeo, Raleigh, NC.
- Mitja D., Leal Filho N., Topall O., 1998 - Pour une réhabilitation des pâturages amazoniens dégradés, l'exemple d'*Andropogon Gayanus* Kunth, (Marabá, Pará, Brasil). *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, 53, pp. 39-57.
- Moraes J.F.L. de, V. B., Cerri C.C., Bernoux M., 1996 - Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70, pp. 63-81.