



Laboratoire d'*E*tude des *R*essources *FO*rêt-*B*ois
Unité Mixte de Recherches INRA-ENGREF 1092



Prédiction de l'engorgement hydrique de surface par les cortèges floristiques en forêt tropicale humide (Guyane française)

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies mention « biologie
forestière » de l'Université Henri Poincaré (Nancy)

Lisa CANTET

Encadrants : Bruno FERRY
Eric MARCON

Rapporteurs : Jean-Luc DUPOUEY
Daniel EPRON



RESUME

La cartographie de l'engorgement hydrique de surface des parcelles témoins du dispositif de recherche de Paracou (Guyane française) a été réalisée à l'aide d'une méthode originale basée sur des critères objectifs (couleurs du sol à 20 cm de profondeur, gradient d'engorgement hydrique du sol établi à partir d'une analyse factorielle des correspondances sur les espèces d'arbres, topographie). Une relation assez précise entre la couleur du sol et quatre classes d'engorgement définies par la végétation a été établie, permettant d'envisager une prise en compte de l'engorgement hydrique plus précise qu'avec les méthodes habituelles. Toutefois, cette relation présente une variation spatiale à l'intérieur du domaine d'étude dont le déterminisme reste à approfondir.

A partir des cartes d'engorgement réalisées ou pré-existantes et d'un inventaire forestier (dbh > 10cm), nous avons cherché à évaluer la possibilité de prédire l'engorgement uniquement à l'aide des cortèges floristiques. Notre méthode de prédiction utilise l'analyse factorielle des correspondances (AFC), puis l'analyse discriminante appliquée aux premiers axes de l'AFC. L'optimisation de la méthode montre que l'utilisation des seules espèces contribuant de façon non négligeable aux axes factoriels améliore les résultats, et que le rayon de placette le plus pertinent est de l'ordre de 16m. Si la zone de calibration du modèle de prédiction est bien répartie sur la zone d'étude, elle permet de faire une prédiction satisfaisante en ne représentant qu'un quart de la surface totale.

SUMMARY

The cartography of surface waterlogging was carried out in six plots of the Paracou experimental site (French Guiana) using an original method based on objective criteria (colors of the soil at 20 cm of depth, gradient of waterlogging determined by a correspondence analysis on the species of trees, topography). A relationship between the color of the ground and four classes of waterlogging defined by the vegetation was established, allowing to consider waterlogging more precise than with the usual methods. However, this relationship presents a spatial variation inside the field of study whose determinism remains to be better understood.

From the charts of waterlogging carried out or existing and a forest inventory (dbh > 10cm), we sought to evaluate the possibility of predicting waterlogging only using the floristic data. Our method of prediction uses correspondence analysis (CA), then the discriminant analysis applied to the first axes of the CA. The optimization of the method shows that the use of the only species contributing in a considerable way to the factorial axes improves the results, and that the most relevant ray of small square is about 16m. If the calibration zone of the model prediction is well distributed on the zone of study, it doesn't need to exceed one quarter of total surface for providing a satisfactory prediction.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de l'étude présentée dans ce rapport :

- Bruno Ferry pour m'avoir guidé tout au long de ce travail et fait part de ses connaissances, de la découverte du terrain aux dernières phases de l'analyse. Merci pour ses conseils avisés et pour sa disponibilité.
- Eric Marcon pour l'aide apportée en statistiques et l'initiation aux logiciels utilisés. Merci aussi pour l'accueil à Kourou et pour avoir contribué à rendre mon séjour agréable.
- François Morneau, pour sa bonne humeur lors des longues journées passées à Paracou et pour l'aide qu'il m'a apportée sur l'étude en général. Merci aussi pour les bons moments passés à Kourou et pour m'avoir fait découvrir quelques jolis coins de la Guyane.
- Vincent Freycon pour ses explications et ses conseils en pédologie et en statistiques.
- Jean-Claude Gégout pour s'être montré disponible lorsque j'en avais besoin.
- Tous les membres de l'UMR EcoFog de Kourou et du LerFob de Nancy pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur quotidienne.
- Tout ceux qui ont contribué à rendre ce stage agréable, à Kourou et à Nancy : Gregory, Nathalie, Mélanie, Mailys, Yvan, Mathieu, Julien, Sabrina, Gaëlle et les autres.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
1 Matériel et méthodes	4
1.1 Contexte de l'étude	4
1.1.1 Contexte géographique	4
1.1.2 Climat	4
1.1.3 Sous-sol et sol de Paracou	4
1.1.4 Données floristiques sur Paracou	4
1.2 Cartographie de l'engorgement du sol	5
1.2.1 La couleur du sol, indicateur de l'engorgement	5
1.2.2 Prospection pédologique	7
1.2.3 Analyse des données	7
2 Résultats	10
2.1 Cartographie de l'engorgement	10
2.1.1 Mise en évidence du gradient d'engorgement	10
2.1.2 Choix du meilleur rayon	11
2.1.3 Regroupement des couleurs par classe d'engorgement	11
2.2 Prédiction de l'engorgement par les cortèges floristiques	12
2.2.1 Sélection des variables	12
2.2.2 Effets du choix de la zone de calibration :	13
3 Discussion	16
3.1 Relation espèces engorgement	16
3.2 La couleur du sol comme indicateur de l'engorgement	16
3.3 Prédiction de l'engorgement	18
CONCLUSION	19
BIBLIOGRAPHIE	20
ANNEXES	22

INTRODUCTION

L'étude des relations entre la végétation et les facteurs du milieu est à la base de la plupart des études de typologie des stations forestières (Gégout et Houiller, 1993). L'objectif est de comprendre quelles sont les variables du milieu qui influencent la répartition des espèces, la composition des communautés ou encore la croissance des individus, et de quelles façons.

De telles études sont à l'origine des méthodes d'estimation des variables environnementales à partir des bio-indicateurs de la végétation. Leurs applications s'étendent à la reconstruction du paléoclimat, à la classification des sites forestiers, à l'étude des changements des conditions édaphiques et climatiques (Gégout et *al.*, 2003).

Actuellement, la prédiction des variables écologiques à partir des cortèges floristiques est une approche qui suscite beaucoup d'intérêt en milieu tempéré (Diekman 1995 ; Gégout et *al.*, 2003 ; Hawkes et *al.*, 1997 ; Wierda et *al.*, 1997). Trois raisons principales sont à l'origine de cet engouement (Diekman, 2003) :

- Cette méthode permet une estimation des variables écologiques à faible coût, les mesures directes prenant plus de temps et coûtant cher ;
- Dans le cas de relevés floristiques anciens sans mesures physiques correspondantes ou avec des mesures physiques non fiables ou erronées, c'est souvent la seule méthode permettant de reconstituer les conditions écologiques de l'époque (palynologie) ;
- Les mesures physiques directes caractérisent de façon partielle les contraintes du milieu et présentent souvent la difficulté méthodologique d'être variables dans le temps (avec les saisons par exemple) et l'espace. La plante a donc l'avantage de représenter l'expression intégrée des variables environnementales dans l'espace, dans le temps et selon divers facteurs écologiques : elle permet donc d'estimer certaines variables qui ne pourraient pas être obtenues à partir d'une seule mesure.

Ainsi, à partir de la description de la végétation d'une placette, il est possible d'estimer les facteurs environnementaux et notamment les facteurs édaphiques. Les espèces ainsi utilisées sont appelées espèces bio indicatrices.

En forêt tropicale humide, la distribution des espèces se fait grâce aux trouées, à la compétition des espèces, aux variations édaphiques et topographiques, ces facteurs agissant à différentes échelles (Pélissier et *al.* 2002). Il existe de nombreuses études visant à comprendre le déterminisme édaphique de la distribution des espèces en milieu tropical (Sollins, 1998) mais il semble que personne n'ait encore cherché à envisager le problème dans l'autre sens, c'est à dire prédire les variables de l'environnement à l'aide de données floristiques. Pourtant, de telles méthodes pourraient être utiles en forêt tropicale humide, ce milieu étant caractérisé par un grand manque d'informations écologiques fiables (Couteron et *al.* 2002). Ainsi, les inventaires forestiers existants pourraient être utilisés pour estimer des variables écologiques.

Cette démarche apparaît toutefois dans l'étude de Pélissier et *al.* (2002) qui vise à distinguer les structures spatiales floristiques induites par les facteurs édaphiques de celles qui sont dues à d'autres facteurs. La possibilité d'établir une carte pédologique approximative apparaît clairement dans cet article même si les auteurs n'ont pas tenté d'évaluer quantitativement la validité de cette prédiction.

L'objectif de ce stage était d'approfondir cette approche avec des méthodes quantitatives inspirées de ce qui se fait en milieu tempéré. La variable que l'on souhaite prédire est l'engorgement hydrique du sol, facteur écologique majeur de la distribution des espèces en milieu tropical (Clark et *al.*, 1998, Pyke et *al.*, 2001), notamment en Guyane Française (Ferry et *al.*, 2003). Elle présente des effets importants sur la présence de nombreuses espèces forestières (Freycon et *al.*, 2003 ; Sabatier et *al.*, 1997 ; Sabatier et Prévost, 1990). Il doit donc être possible d'élaborer des fonctions de prédiction de l'engorgement à partir de la présence / absence d'espèces indicatrices bien choisies, pour un contexte géographique donné.

L'étude s'est déroulée dans un dispositif sylvicole majeur de Guyane française, où la cartographie des sols est toutefois très incomplète. Notre travail a compris deux étapes :

- établissement de cartes d'engorgement hydrique à la surface du sol sur un tiers du dispositif, en mettant en œuvre pour cela une méthode originale, utilisant la couleur du sol, la topographie et la végétation,
- mise au point d'une méthode de prédiction de l'engorgement à partir de la présence-absence d'un nombre d'espèces limité, et étude de ses performances en fonction de diverses modalités de mise en œuvre.

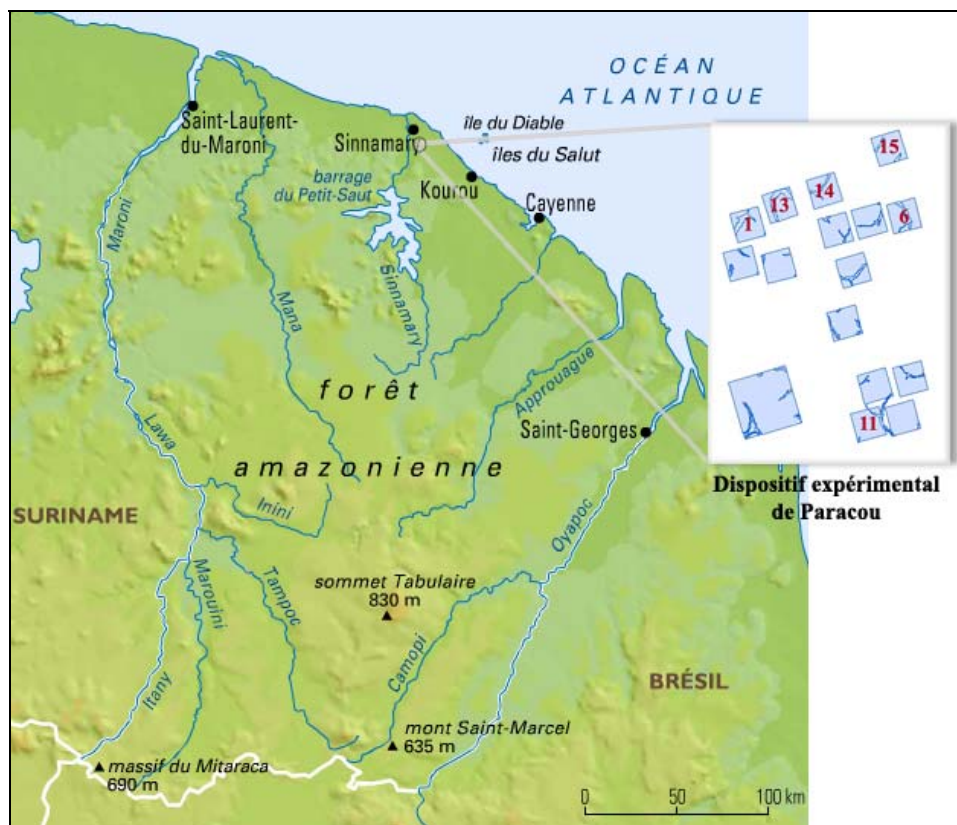


Figure 1 : Situation géographique du dispositif expérimental de Paracou

<i>Carré</i> 1	<i>Carré</i> 2
<i>Carré</i> 3	<i>Carré</i> 4

Figure 2 : Numérotation des carrés sur les parcelles

1 MATERIEL ET METHODES

1.1 Contexte de l'étude

1.1.1 Contexte géographique

Cette étude s'est déroulée en Guyane française (Amérique du sud), sur le dispositif de recherches forestières de Paracou, appartenant au CIRAD forêt, à environ 15 km au SSE de Sinnamary et à 50 km au nord ouest de Kourou (5°15'42"N, 52°55'41"W) (fig. 1).

Le dispositif est constitué de 16 parcelles (15 de 250 x 250m, 1 de 500 x 500m) ayant subi différents traitements sylvicoles (T0 : parcelles témoins ; T1, T2, T3 : traitements sylvicoles d'intensité croissante). Chaque parcelle est constituée de 4 carrés numérotés (fig. 2). Sur l'ensemble de ces parcelles, tous les arbres dont le diamètre est supérieur à 10 cm sont numérotés, identifiés, positionnés (coordonnées X, Y) et mesurés en circonférence tous les ans.

Pour cette étude, seules les parcelles non traitées de 250 m x 250 m ont été considérées, soit les parcelles 1, 6, 11, 13, 14 et 15 (fig. 1).

1.1.2 Climat

Le climat guyanais est un climat tropical chaud et humide caractérisé par deux saisons :

- une saison sèche de la mi-août à la mi-novembre ;
- une saison humide durant le reste de l'année, avec une pluviométrie un peu plus faible en mars.

La moyenne annuelle des précipitations sur le site de Paracou entre 1979 et 1995 est de 3153 mm. La température moyenne annuelle de l'air est de 26°C avec une amplitude faible (de l'ordre de 2°C) malgré de fortes variations journalières (jusqu'à 12°C).

1.1.3 Sous-sol et sol de Paracou

Le bouclier guyanais est essentiellement formé de roches précambriennes. A Paracou, les roches sont de type migmatitique et surtout schisteux à filons de pegmatites ; il s'agit de la série de Bonidoro. Les reliefs sur cette zone sont peu élevés (altitude maximale : 41m) et les modelés ont des formes en demi-orange caractéristiques des zones tropicales humides.

A Paracou comme partout en Guyane, les conditions climatiques anciennes à actuelles ont favorisé une altération poussée de tous les minéraux primaires et déterminé la formation de sols ferrallitiques sur la grande majorité du dispositif (Gourlet-Fleury *et al.*, 2004). La plupart des horizons supérieurs ont ainsi les caractéristiques générales des vieilles couvertures ferrallitiques : de bonnes propriétés physiques (macro et microporosité importantes), dues à une structure microagrégée des constituants élémentaires (kaolinite, hématite, goethite, quartz), et une fertilité chimique en revanche très limitée : faible capacité d'échange cationique, acidité, abondance de l'aluminium échangeable, forte rétention du phosphore sur les oxydes de fer. L'épaisseur de ces très vieux horizons est toutefois plutôt faible à Paracou (entre 50 et 100 cm, d'après Barthès, 1991a). Les horizons sous-jacents sont des altérites moins bien structurées, donc moins perméables, qui peuvent conduire à la formation de nappes perchées qui s'écoulent latéralement, lors d'épisodes très pluvieux. On parle alors de

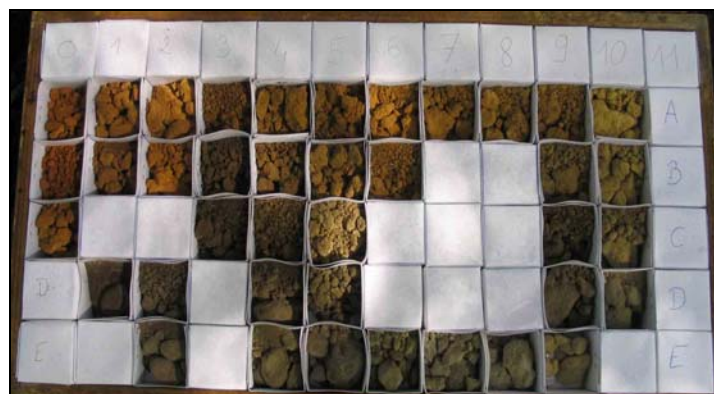


Figure 3 : Echantillons de référence utilisés sur le terrain

sols à drainage latéral. De telles conditions de drainage interne, et/ou certaines conditions topographiques favorables à un excès d'eau (bas de pente, sommet aplani), entraînent l'engorgement hydrique des horizons supérieurs en période pluvieuse. D'après les cartes de Barthès (1991a) établies sur 3 parcelles, les zones hydromorphes (donc soumises à des engorgements hydriques sensibles), couvrent une bonne moitié de la surface.

L'engorgement hydrique a une intensité et des durées maximales dans les bas-fonds. Ces zones particulières, tant du point de vue des sols que de la végétation, et caractérisées par la persistance d'une nappe peu profonde tout au long de l'année (Janet *et al.*, 1999), ont été cartographiées sur l'ensemble du dispositif ; elles couvrent 8,5% de la surface.

1.1.4 Données floristiques sur Paracou

Cet écosystème est caractérisé par une forte richesse d'espèces d'arbres, entre 150 et 200.ha⁻¹ pour les arbres de dbh supérieur à 10 cm (Gourlet-Fleury *et al.*, 2004). Parmi les 75 familles et environ les 1500 espèces (dbh > 10cm) identifiées en Guyane française (Sabatier et Prévost, 1990), aucune n'est réellement dominante. Pour tous les inventaires réalisés au même dbh, les 5 familles les plus abondantes représentent à peine 60% de l'ensemble des arbres.

La base de données utilisée lors de cette étude correspond à l'inventaire de tous les arbres d'au moins 10 cm de diamètre réalisé en 2001. Cependant, l'identification des espèces présente un certain nombre d'incertitudes et d'erreurs. Au début du projet en 1984, 58 espèces ou groupes d'espèces se sont vu attribuer un nom commercial (15 d'entre elles incluent 2 espèces ou plus) à cause du manque de connaissance taxonomique (Gourlet-Fleury *et al.*, 2004). Actuellement, certains arbres de la base de données sont présents sous le nom d'une espèce qui n'est pas la leur et certaines espèces sont répertoriées sous un même code. Depuis 1992, de nouvelles identifications tentent d'améliorer la détermination des espèces. Ainsi, certaines espèces telles que *Iryanthera hostmannii* (code 226) et *Iryanthera sagotiana* (code 227) qui présentent des préférences écologiques très différentes puisqu'*Iryanthera hostmannii* est surtout présent sur les sols engorgés des bas fonds tandis qu'*Iryanthera sagotiana* préfère les sols de terre ferme, étaient regroupées sous le même code 222. Aujourd'hui, elles sont identifiées sous leur code respectif mais, à ce jour, on est sûr de l'identification d'une soixantaine d'espèces seulement (com. pers. Baraloto C.).

1.2 Cartographie de l'engorgement du sol

1.2.1 La couleur du sol, indicateur de l'engorgement

La couleur du sol est liée à la présence de quelques éléments principaux, principalement les oxydes-hydroxydes de fer (hématite rouge, goethite brun-jaune) et la matière organique (coloration noire ou grise) (Legros, 1996).

A Paracou, les changements de couleur sont dus en grande partie à des changements d'état du fer induits par la circulation de l'eau (Ferry *et al.*, 2003), mais pas seulement. Le sous-sol est constitué de schiste et de filons de pegmatites, dont les altérites sont respectivement rouge/violet et blanche. *A priori*, il y aurait peu de pegmatite, mais on ne dispose pas de données précises. La pédogenèse ancienne des sols de Paracou a toutefois entraîné un important remaniement des horizons de surface (érosion, activité biologique, etc.), qui a homogénéisé les couleurs vers une teinte brun-jaune relativement uniforme, caractéristique de tous les horizons supérieurs (jusqu'à 40-60 cm de profondeur), en dehors des zones de bas-fonds ou de bas de pente. Deux mécanismes de la pédogénèse actuelle altèrent cette coloration brun-jaune des horizons supérieurs : (i) l'apport et l'humification de matière organique, qui

donne une couleur sombre, brun à noir, aux horizons de surface, (ii) l'engorgement hydrique qui réduit et déplace le fer, avec pour conséquences visibles possibles :

- la décoloration (départ du fer) ;
- la couleur gris noir des horizons de surface (présence de mat organique / absence de fer) ;
- l'apparition de taches rouille due à la reprécipitation du fer après ressuyage.

Dans les horizons de surface, les effets de l'engorgement hydrique sur la mobilisation du fer sont renforcés par la présence de molécules organiques solubles, libérées par la décomposition de la litière, et dont certaines ont un fort pouvoir complexant vis-à-vis du fer et de l'aluminium (Thomas, 1994). Il en résulte que la décoloration due au départ du fer est maximale en surface, ce à quoi se combine la coloration gris/noir due aux matières organiques humifiées.

Barthès (1991a) a utilisé la couleur du sol pour cartographier l'hydromorphie de surface sur 3 parcelles de Paracou divisée en 5 classes : du brun homogène au gris homogène (Barthès, 1991b). Ces classes ont ensuite été regroupées en 2 ensembles pour la cartographie. Cependant, la profondeur de prélèvement n'est pas spécifiée et Barthès (1991b) souligne : « On notera que cette appréciation de l'hydromorphie reste largement qualitative, voire empirique, en l'absence d'estimateur plus précis ». De plus, le faible nombre de sondages réalisés (22 pour la parcelle 11, 39 pour la parcelle 6) induit des problèmes de précision spatiale. Il était donc nécessaire d'affiner cette cartographie de l'engorgement et de l'étendre aux parcelles 13, 14 et 15 étudiées ici avant de procéder à la phase de prédiction de l'engorgement.

Nous avons choisi d'élaborer un indice d'engorgement du sol à partir de sa couleur à 20 cm de profondeur. Le choix de cette profondeur de référence permet à la fois de ne pas être gêné par l'influence de la matière organique (près de la surface), qui rend difficile la détermination de la teinte, et de limiter les effets des éventuels filons de pegmatite sur la couleur des horizons profonds. En outre, une étude de la couleur du sol de 67 profils en bas-fonds ou bas de pente à Paracou (Cantet et *al.*, 2003), où l'on disposait d'un suivi de l'engorgement saisonnier à l'aide de piézomètres (Salvado, 2002), a montré que les meilleures relations entre couleur et régime d'engorgement étaient obtenues en ne considérant que la couleur à 20 et 40 cm de profondeur, et à 20 cm seulement dès qu'on s'éloigne des bas-fonds.

La couleur des échantillons de sol humides a été définie à l'aide de la version révisée du code Munsell (Oyama et Takahara, 1989). Lors de la première campagne de terrain, tous les échantillons ont été prélevés et stockés dans un pédocomparateur ; leur couleur a été déterminée ensuite (utilisation d'un brumisateuse pour humidifier les échantillons). Un échantillon de chaque couleur (code Munsell) a alors été conservé pour constituer des échantillons références. Ces échantillons étaient emmenés sur le terrain permettant une identification rapide de la couleur du sol par comparaison (fig. 3). Lorsque la couleur de certains sols ne semblait pas être représentée par ces échantillons, le sol était prélevé et sa couleur était définie ensuite à l'aide du code Munsell. Si cette couleur s'avérait réellement différente des autres, l'échantillon était alors ajouté aux échantillons de référence.

Ainsi, chaque échantillon a été caractérisé par trois variables :

- la teinte (hue) qui est la couleur dominante : jaune, rouge, brun ou gris ;
- la clarté (value) qui caractérise l'aspect sombre ou clair de la couleur ;
- la saturation (chroma) qui détermine la vivacité de la teinte.

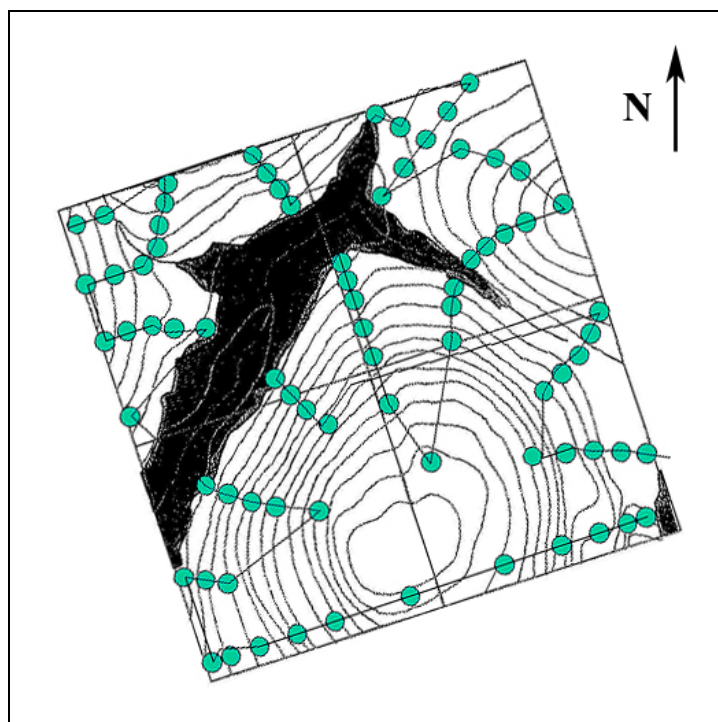


Figure 4 : Emplacement des sondages préalablement définis, parcelle 1

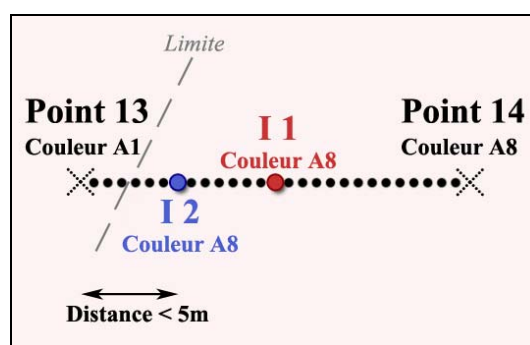


Figure 5 : Placement des points intermédiaires

Notons que la détermination de la couleur se fait à une valeur près de hue, value, chroma soit 8 couleurs très voisines (Legros, 1996).

1.2.2 Prospection pédologique

La cartographie de l'engorgement du sol des parcelles non traitées de Paracou a été effectuée selon la méthode « de cartographie raisonnée », c'est à dire que le cartographe reste tout à fait libre du choix de l'emplacement de ses sondages à la tarière. L'avantage de cette méthode est sa grande souplesse mais le cartographe doit être spécialement averti puisque le territoire n'est pas prospecté de façon systématique : il peut y avoir des problèmes de biais (Legros, 1996).

Chaque parcelle a fait l'objet de deux campagnes de sondages. Pour la première, nous positionnions environ 70 sondages le long d'une quinzaine de transects topographiques répartis sur la parcelle (fig. 4). Nous ajoutions ultérieurement une quarantaine de sondages (appelés « points intermédiaires »), pour améliorer la précision des limites entre les unités d'engorgement que nous avons choisi de cartographier, l'objectif étant de situer toutes ces limites avec une précision inférieure à 5 m sur chacun des transects (fig. 5). De plus, certains sondages présentant des couleurs étonnantes étaient vérifiés, et de nouveaux sondages étaient réalisés sur les zones insuffisamment prospectées.

Sur le terrain, la position de chaque sondage était mesurée systématiquement, par référence aux arbres voisins. Cela nous a permis d'en calculer les coordonnées, qui ont été exprimées selon le système WGS 1984 UTM de la zone 22N pour les intégrer dans le Système d'information Géographique du dispositif, géré avec ArcView 8.3.

1.2.3 Analyse des données

a - Analyse des relations entre flore et engorgement

Les analyses multivariées sont communément utilisées pour la détermination des principaux gradients responsables de la structure de la végétation ainsi que pour établir le caractère indicateur des espèces. L'application de telles analyses suppose qu'il existe un ou plusieurs facteurs du milieu auquel les espèces sont sensibles et que les espèces réagissent à ce facteur selon un modèle logistique à optimum. Ainsi, on suppose que la distribution des espèces est unimodale, approximativement une gaussienne, pour toutes les courbes des espèces (Peet, 1998).

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) est une méthode qui permet d'ajuster un modèle par rapport aux facteurs écologiques les plus importants de la région étudiée. L'absence de référence dans la littérature concernant la relation entre la couleur et l'engorgement du sol en milieu tropical humide nous a contraint à réaliser plusieurs AFC afin de déterminer la méthode la plus performante.

Les AFC ont été effectuées à partir des présences / absences des espèces ligneuses dans un rayon R déterminé autour des sondages : 8, 10, 12, 15 et 20m (S PLUS 2000, programmes : JC Hervé). Les occurrences des espèces ont été préférées à leurs abondances pour deux raisons :

- Les coordonnées d'une espèce dans une AFC correspondent à son optimum pour le milieu, ce résultat ne peut être obtenu si l'on utilise les abondances dominances.

Tableau 1 : Espèces dont la répartition est considérée comme hétérogène sur les parcelle témoin.

Code Espèce	Espèce	Code Espèce	Espèce	Code Espèce	Espèce
112	<i>Pterocarpus rohrii</i>	604	<i>Qualea rosea</i>	710	<i>Licania cf hypoleuca</i>
114	<i>Brosimum guianense</i>	622	<i>Dendrobangia boliviana</i>	712	<i>Couepia cf guianensis</i>
405	<i>ind</i>	664	<i>Hyeronima alchorneoides</i>	715	<i>Licania spp</i>
501		687	<i>Sagotia racemosa</i>	803	<i>Inga sp</i>
603	<i>Cordia nodosa</i>	696	<i>Tachigali paniculata</i>		

- Le fait qu'une espèce soit systématiquement plus abondante qu'une autre sur une placette ne veut pas dire qu'elle est plus indicatrice.

Seules les espèces ayant un effectif minimum de 20 arbres dans le tableau floristique ont été prises en compte dans les analyses puisqu'une faible abondance et une distribution géographique limitée réduit l'utilisation des espèces en tant que bio-indicateurs. De même, la répartition de certaines espèces étant non homogène sur les 6 parcelles (présentes par exemple en grand nombre sur les parcelles 1, 6, 11 et quasiment absente sur les 3 autres), elles ont été supprimées en utilisant le critère suivant : si le rapport ci-après est strictement inférieur à 0,10 sur au moins trois parcelles, leur répartition sur les parcelles est considérée comme non homogène (tableau 1).

$$\frac{\text{Effectif de l'espèce sur la parcelle } P}{\text{Effectif maximum de l'espèce sur une parcelle}} < 0.10$$

Enfin, pour éviter la surpondération de certaines espèces due au recouvrement des cercles autour des sondages (redondance de l'information), deux méthodes ont été appliquées :

- les « sondages intermédiaires » n'ont pas été considérés, il reste alors 600 sondages ;
- les arbres se trouvant dans les cercles de plusieurs sondages ont été affectés au sondage le plus proche. Dans le cas d'une équidistance, l'arbre a été affecté de façon arbitraire au sondage qui a la cordonnée X (utm) la plus faible. Ajoutons que l'analyse a été faite sans tenir compte de cette modification, les résultats sont sensiblement les mêmes.

b – Relation entre couleur de sol et engorgement

Nous avons utilisé le gradient d'engorgement défini par la végétation pour évaluer le degré d'engorgement caractéristique des différentes couleurs de sol rencontrées. Pour que cette démarche soit valide, il faut que chaque couleur soit représentée par un nombre de sondages suffisamment élevé, ce qui n'était pas le cas d'un grand nombre de couleurs rencontrées.

Pour pallier cette difficulté inévitable, des regroupements de couleurs ont été effectués en prenant en compte leur similarité (valeurs voisines de teinte, clarté ou saturation) et les coordonnées moyennes de ces couleurs sur l'axe d'engorgement défini par la végétation. Soient A et B deux couleurs de sol très proches d'après le code Munsell, respectivement rencontrées sur n_A et n_B sondages. On calcule les coordonnées moyennes sur l'axe d'engorgement des n_A et n_B sondages, et des $n_A + n_B$ sondages rassemblés, ainsi que les intervalles de confiance associés. Si l'intervalle de confiance des sondages rassemblés est plus petit que chacun des 2 autres, on considère qu'il est pertinent de faire le rassemblement.

Une démarche similaire a été appliquée en utilisant l'altitude relative de chaque point (relative au bas-fond de chaque parcelle) à la place du gradient d'engorgement défini par la végétation.

c – Tracé des cartes

Les cartes d'engorgement ont alors pu être réalisées pour les 6 parcelles étudiées à l'aide d'ArcView 8.3. Les limites entre les classes d'engorgement ont été tracées de façon à suivre, autant que possible, les lignes de niveaux.

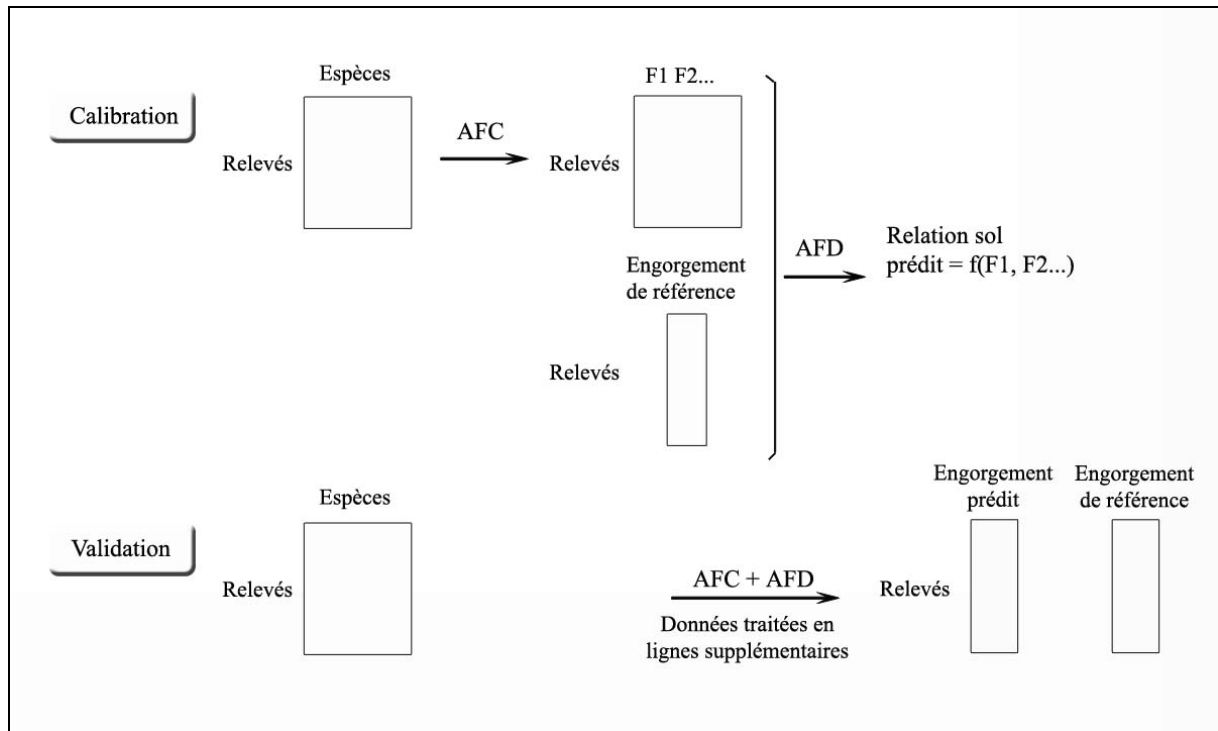


Figure 6 : Principe général de la méthode de prédiction de l'engorgement hydrique du sol

d - Prédiction de l'engorgement du sol à partir des cortèges floristiques

L'objectif était de prédire l'engorgement du sol à partir des cortèges floristiques des parcelles témoins en calibrant un modèle de prédiction sur une partie de la zone d'étude appelée zone de calibration et en vérifiant le modèle sur le reste de la zone appelée zone de validation.

➤ Principe général de la méthode (fig. 6) :

Dans un premier temps, une AFC est réalisée sur le tableau floristique de la zone de calibration fournissant de cette façon les coordonnées des espèces et des relevés sur les axes factoriels (Statistica 6.0). Notons que les espèces sont sélectionnées selon les mêmes critères que pour l'étape précédente. Puis, une analyse discriminante sur les coordonnées factorielles des relevés et leur classe d'engorgement permet d'établir une fonction de prédiction de l'engorgement du sol à partir des axes factoriels pris en compte (Statistica 6.0).

Ensuite, les relevés de la zone de validation sont traités en lignes supplémentaires : leurs coordonnées factorielles sont calculées à l'aide des coordonnées factorielles des espèces obtenues sur la zone de calibration. Le modèle de prédiction réalisé est alors utilisé pour déterminer les classes d'engorgement des relevés de la zone de validation.

Les classes d'engorgement prédites sont ensuite comparées aux classes d'engorgement de référence pour la zone de calibration et la zone de validation afin de vérifier la pertinence du modèle.

De cette façon, les valeurs indicatrices des espèces ne sont pas utilisées de façon directe mais de façon indirecte : en calculant les coordonnées des points de la zone de validation à partir des coordonnées factorielles des espèces obtenues sur la zone de calibration qui correspondent à leur valeur indicatrice.

➤ Mise en place de la méthode :

Afin d'utiliser un maximum d'information, des grilles régulières de points ont été créées sur chaque parcelle, chaque grille correspondant à un rayon R défini autour des points. De cette façon, l'analyse prend en compte un maximum d'information (surface des parcelles couverte par les cercles) sans qu'il y ait recouvrement (les cercles sont « bord à bord ») pour la calibration. En revanche, pour la validation, les mailles des grilles étaient de 5m, les rayons des cercles étant inchangés.

Les arbres ne devant pas être affectés à deux points différents, ils ont été sélectionnés lorsqu'ils étaient situés dans un rayon strictement inférieur à R autour des points des grilles (requête sous ACCESS 2000). La classe d'engorgement de ces points a ensuite été déterminée à l'aide ArcView 8.3 grâce aux cartographies établies au cours de l'étape précédente.

➤ Optimisation de la méthode :

Dans un premier temps, il s'agissait de définir le rayon R qui permet d'obtenir les résultats les plus satisfaisants et le nombre d'axes factoriels (fournis par l'AFC) nécessaires à l'analyse discriminante. Les rayons suivants ont été considérés : 10, 12, 16 ou 21m et l'utilité des trois premiers axes de l'AFC a été testée.

Ensuite, nous avons étudié l'effet du nombre d'espèces prises en compte et du choix de la zone de calibration sur la qualité de la prédiction de l'engorgement.

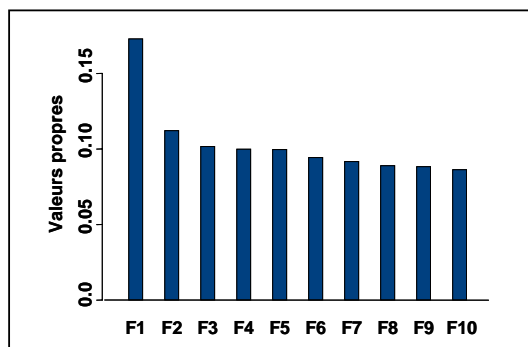


Figure 7 : Valeurs propres des 10 premiers axes factoriels de l'AFC pour R = 12m sur 71 espèces.

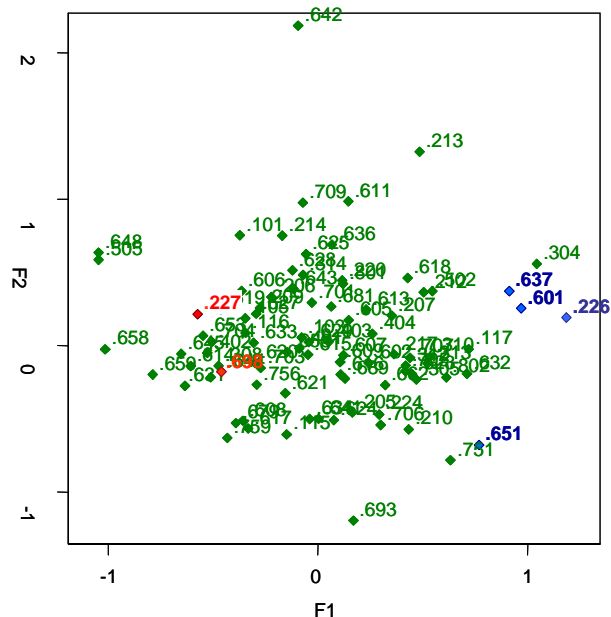


Figure 8 : Répartition des 71 espèces selon les deux premiers axes de l'AFC pour R = 12m.

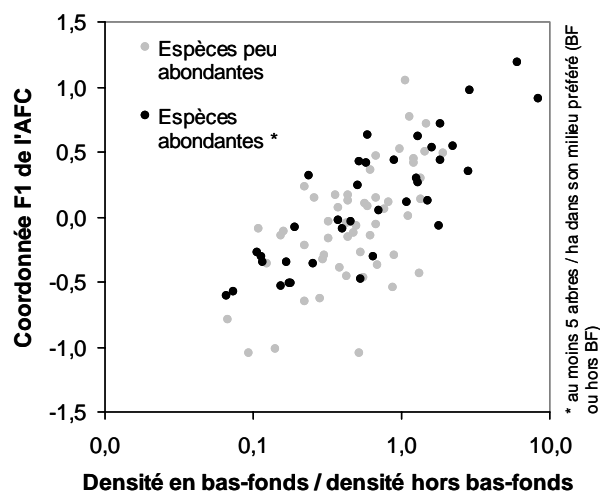


Figure 9 : Relation entre la coordonnée F1 des espèces et leurs abondances relatives en bas-fonds

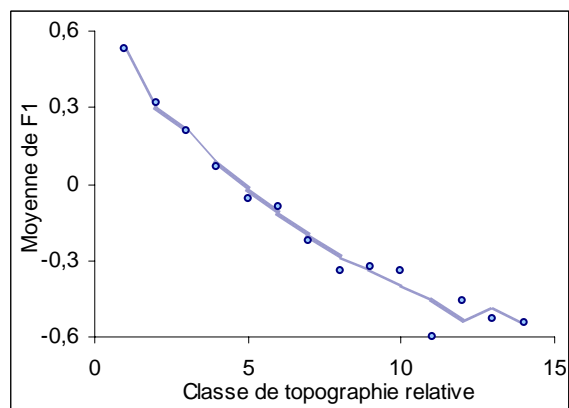


Figure 10 : Valeur moyenne sur F1 des classes de topographie relative. La courbe représente les valeurs de F1 lissées, calculées comme suit (où CT est la classe considérée, n est un entier, pour les classes 1 et 14 : la valeur moyenne sur F1 est conservée tel quel) pour chaque classe :

$$\frac{\sum_{CT=2}^{CT=13} \sum_{n=-1}^{n=1} \text{Valeur moyenne } (CT+n) * \text{Effectif } (CT+n)}{\sum_{CT=2}^{CT=13} \sum_{n=-1}^{n=1} \text{Effectif } (CT+n)}$$

2 RESULTATS

2.1 Cartographie de l'engorgement

2.1.1 Mise en évidence du gradient d'engorgement

Les espèces utilisées pour les AFC de rayon 8, 10, 12, 15, 18 et 20m sont celles qui répondaient aux critères de sélection (paragraphe 1.2.3 a) pour le rayon $R = 8m$. De cette façon, toutes les AFC ont porté sur les mêmes espèces (71 au total), leurs résultats peuvent donc être comparés.

Pour toutes les analyses, la valeur propre du premier axe de l'AFC (F1) se détache de façon remarquable des valeurs propres des autres axes (fig. 7).

La répartition des espèces sur les cartes factorielles (F1 – F2) est homogène, elle ne présente pas d'effet Guttman ou d'agrégats. Nous avons cherché la signification écologique de ces axes à l'aide des coordonnées factorielles des espèces et des relevés.

Le premier axe s'interprète très bien comme un gradient d'engorgement. En effet, *Iryanthera hostmannii* (code 226) essentiellement présent sur les zones de terre ferme se trouve être opposé à *Iryanthera sagotiana* (code 227) qui occupe surtout les bas fonds selon F1 (fig. 8). De même pour *Conceveiba guianensis* (code 601), *Poecilanthe hostmanii* (code 637) et *Mabea piriri* (code 651) qui occupent préférentiellement les bas fonds contrairement à *Eperua Grandiflora* dont la densité est sensiblement plus importante sur les sols bien drainés (Sabatier et Prévost, 1990).

Afin d'étayer cette observation sur l'ensemble des espèces, nous avons étudié la corrélation entre leur coordonnée sur F1 et le rapport de leurs densités respectives dans les bas-fonds et hors des bas-fonds. Ce rapport a été calculé à partir d'inventaires réalisés avant tout traitement sylvicole, et en utilisant l'ensemble des parcelles. La figure 9 montre que cette corrélation est très nette, et d'autant meilleure que l'espèce est abondante (c'est à dire qu'elle présente au moins 5 arbres.ha⁻¹ dans son milieu préféré). Notons que ces rapports de densités bas fonds / densité hors bas fond ont été comparés aux travaux effectués par Pélissier et al. (2002) sur la piste de Saint Elie, en Guyane française. Les résultats sont concordants, ce qui permet d'utiliser ces classes sans trop de réserves (comm. pers. Morneau F.).

Pour que l'interprétation de l'axe F1 soit complète, nous avons comparé par ailleurs les coordonnées des relevés à leur altitude relative, sachant que l'engorgement a tendance à être d'autant plus élevé que l'on se trouve près des bas-fonds. Pour cela, une classe de topographie relative a été affectée à chaque sondage selon sa position par rapport aux courbes de niveaux, ces dernières étant déterminées à partir du point 0 de chaque parcelle. Ainsi, les sondages présents en dessous de la première courbe de niveau (altitude relative inférieure à 2,5m) appartiennent à la classe 0, entre la 1^{ère} et la 2^{ème} courbe (altitude relative comprise entre 2, 5 et 5m) à la classe 1 et ainsi de suite jusqu'à la classe 14. Comme le montre la figure 10, les valeurs moyennes de F1 par classe de topographie relative diminuent de façon continue des plus basses altitudes aux plus hautes, ce qui concorde bien avec les résultats obtenus avec la tolérance aux bas-fonds des espèces.

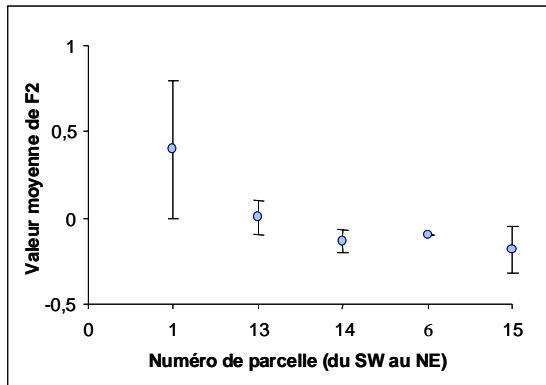


Figure 11 : Valeur moyenne de F2 sur les parcelles témoins

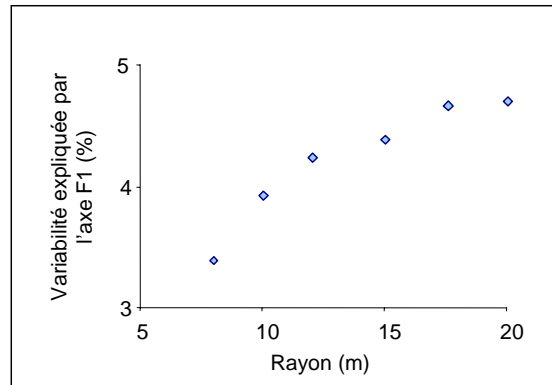


Figure 12 : Pourcentage de variabilité expliquée par le premier axe de l'AFC en fonction du rayon choisi autour du sondage

La relation entre la tolérance à l'engorgement et les coordonnées factorielles des axes 2 et 3 a été étudiée mais aucune relation avec l'engorgement n'a été mise en évidence. La répartition des espèces suivantes influe fortement sur le deuxième axe des AFC : *Eperua falcata* (code 224), *Protium heptaphyllum* (code 642) et *Licania hypoleuca* (code 709). La répartition des espèces 224 et 709 est remarquable puisque *Eperua falcata* est fortement présente sur la terre ferme de toutes les parcelles sauf pour la parcelle 1, cette absence est alors compensée par une présence importante de *Licania hypoleuca* (annexe 1). L'axe 2 semble donc être induit par la répartition de certaines espèces à l'échelle de l'ensemble du dispositif. Cela est confirmé par la figure 11, qui met en évidence un gradient de la coordonnée F2, de la parcelle 1 vers la parcelle 15, que l'on peut qualifier approximativement de gradient WSW-ENE.

L'interprétation de l'axe F3 est qualitativement proche de celle de l'axe F2. Les espèces ayant une forte influence sur cet axe sont *Manilkara bidentata* (code 205), le code 220 dont l'espèce n'est pas déterminée, et *Apeiba echinata et sp* (code 689) ; les coordonnées factorielles des relevés conduisent à remarquer une opposition entre la parcelle 11 et les parcelles 13 et 14, que l'on peut qualifier approximativement de gradient NNW-SSE.

2.1.2 Choix du meilleur rayon

Il s'agissait de trouver le rayon (R) qui donne les résultats les plus pertinents afin de les utiliser pour regrouper les couleurs des sols en classes d'engorgement. Le pourcentage de variabilité expliquée par l'axe F1, soit l'axe d'engorgement, augmente de façon continue de 3,39% pour R = 8m à 4,72% pour R = 20m, avec un léger décrochement à 15m (fig. 12). La courbe s'infléchit à partir de R = 12m : l'augmentation de la variabilité expliquée est alors plus faible. R = 12m a été considéré comme étant le rayon qui donne les meilleurs résultats pour les raisons suivantes :

- Un rayon supérieur ne permet pas d'améliorer de façon conséquente les résultats ;
- Plus le rayon est grand et plus les arbres pris en compte se trouvent sur des sols d'engorgement différents, ce qui induit un biais dans l'analyse, et plus nous serons gênés pour utiliser des relevés indépendants.

2.1.3 Regroupement des couleurs par classe d'engorgement

A chaque sondage, nous pouvons associer un indice d'engorgement hydrique, égal à la coordonnée sur l'axe F1 du relevé floristique au même point. On s'attend toutefois à ce que cet indice floristique d'engorgement ne soit valable qu'en tendance, donc en moyenne sur un nombre important de sondages.

Sur les 6 parcelles prospectées (hors bas-fonds), 39 couleurs de sol différentes ont été trouvées (à 20 cm de profondeur), dont 14 représentées par moins de 5 sondages (les effectifs figurent dans l'annexe 2). Les regroupements effectués selon la méthode explicitée dans le § 1.2.3 ramènent le nombre de couleurs à 24, dont 4 représentées par moins de 5 sondages. Nous avons ainsi regroupé systématiquement les clartés 4 et 5, les saturations 1, 2 et 3, et les teintes 5 YR (rares) avec 7,5 YR, et 5Y (rares) avec 2,5Y. Les moyennes de F1 calculées sur cet ensemble simplifié de couleurs font clairement apparaître plusieurs relations :

- (i) 1) les sols de la teinte la plus jaune (2,5Y + 5Y) sont plus engorgés que les sols brun jaune (10YR) à brun rouge (7,5YR + 5Y)
- (ii) 2) plus la saturation en couleur est faible, plus l'indice d'engorgement est élevé
- (iii) 3) plus la clarté est forte, plus l'indice d'engorgement est élevé

Tableau 2 : Classement des couleurs par la flore

Saturation					
1	2	3	4	6	8

7,5YR (& 5YR)					
Clarté	6	0,56		0,18	-0,07
	5	0,26	-0,45	-0,31	-0,23
	4				

10YR					
Clarté	7			0,12	
	6	0,23	0,11	-0,03	-0,18
	5	0,23	-0,04	-0,18	-0,19
	4				

2,5Y (& 5Y)					
Clarté	7	0,61		0,37	
	6	0,31	0,25	0,18	
	5	0,27	0,17	0,12	
	4				

F1 Afc	
0,3 / 0,7	
0,1 / 0,3	
-0,1 / 0,1	
-0,4 / -0,1	

Tableau 3 : Classement des couleurs par la topographie

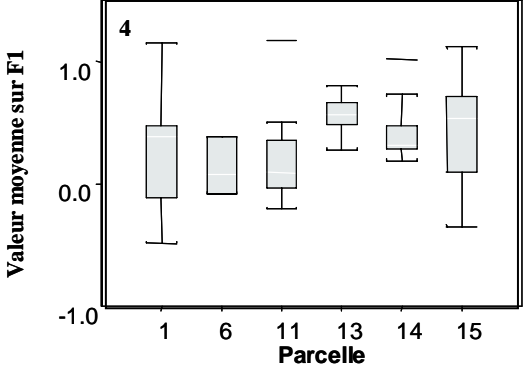
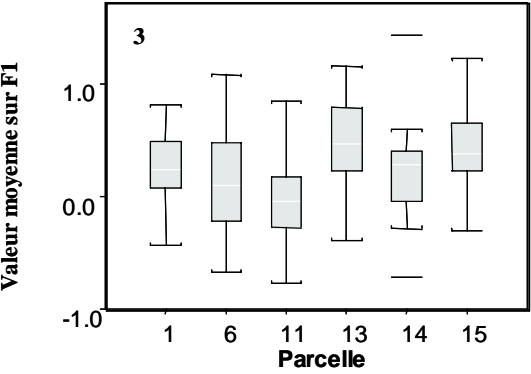
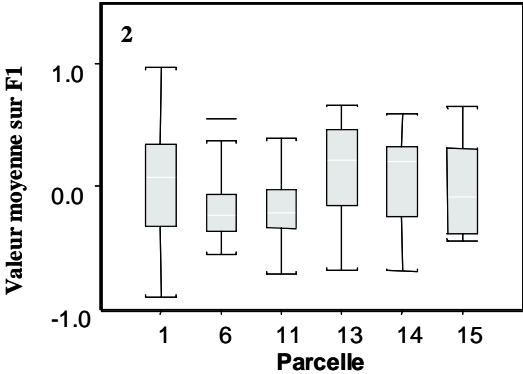
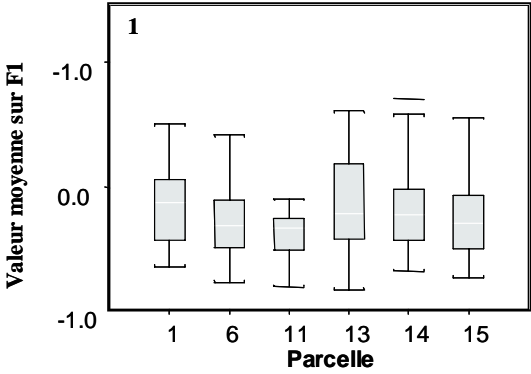
Saturation					
1	2	3	4	6	8

7,5YR (& 5YR)					
Clarté	6	1,50		4,56	5,50
	5	1,67	5,00	7,33	6,63
	4				

10YR					
Clarté	7			4,26	0,00
	6	2,44	4,04	5,67	6,31
	5	3,38	4,83	6,27	6,94
	4				

2,5Y (& 5Y)					
Clarté	7	2,36		3,00	
	6	2,13	2,87	3,00	
	5	2,58	2,90	3,76	
	4				

C. topo	
1 - 2,4	
2,4-4,7	
4,7 - 6	
6-8	



De façon arbitraire, nous avons défini 3 seuils de F1 équidistants, qui délimitent 4 classes d'engorgement. La correspondance entre ces 4 classes d'engorgement et les couleurs du code Munsell est représentée dans le tableau 2.

La même démarche a été effectuée en utilisant les classes de topographie à la place des valeurs de F1 (tableau 3). Il s'avère qu'en choisissant bien les seuils des classes d'engorgement, on obtient une correspondance entre couleurs et classes d'engorgement très semblable à celle établie avec F1.

Nous nous sommes demandé si cette relation générale entre couleurs et engorgement était identique sur les 6 parcelles. La figure 13 montre que les moyennes de F1 par classe d'engorgement présentent des fluctuations non-négligeables d'une parcelle à l'autre, et on remarque en particulier que les moyennes de F1 dans les parcelles 6 et 11 sont toujours inférieures à celles des 4 autres parcelles. Une régression de F1 par les classes d'engorgement et une variable valant 1 sur les parcelles 6 et 11 et 0 sur les 4 autres montre que cet effet « P 6-11 » est très significatif, équivalent en moyenne à un décalage d'une classe d'engorgement.

Malgré cet effet important, dont nous discuterons les causes et conséquences, il ne nous a pas paru possible d'élaborer valablement 2 grilles de correspondance entre couleur et engorgement, dont l'une aurait été adaptée aux parcelles 1, 13, 14, 15 et l'autre aux parcelles 6, 11.

Nous avons donc utilisé la même relation couleur-engorgement pour cartographier l'engorgement des 6 parcelles, en dehors des bas-fonds déjà cartographiés. Les cartes ainsi réalisées sont présentées dans l'annexe 3.

La suite de notre étude concerne aussi les bas-fonds, qui constitueront une 5^{ème} classe d'engorgement.

Les classes d'engorgement ne sont pas réparties de façon homogène sur la zone d'étude (fig. 14). La classe 4 est très peu représentée avec seulement 1,9m² par opposition à la classe 1 qui totalise une surface de 12.8m². De même, les proportions des classes d'engorgement sur chacune des parcelles ne sont pas les mêmes (fig. 15). Les parcelles 1 et 15 sont recouvertes en grande partie par la classe 1 contrairement à la parcelle 11 pour laquelle cet engorgement est très peu représenté ; les bas fonds sont bien plus étendus dans la parcelle 11 qu'au sein des autres parcelles.

2.2 Prédiction de l'engorgement par les cortèges floristiques

2.2.1 Sélection des variables

Dans un premier temps, la méthode de prédiction de l'engorgement a dû être optimisée, les questions suivantes ont donc été étudiées :

- Quel rayon de placette choisir pour élaborer les relevés botaniques à partir desquels sera faite l'analyse factorielle des correspondances ?
- Combien d'axes factoriels utiliser dans l'analyse discriminante ?
- Le nombre d'espèces prises en compte peut-il être réduit ?

La prédiction a été considérée comme acceptable lorsqu'elle n'était pas différente de plus d'une classe d'engorgement par rapport à l'engorgement connu. Dans les paragraphes suivants, les termes « bonne prédiction » ou engorgement « bien déterminé » pourront être

Figure 13 : Boîtes à moustaches des coordonnées factorielles des sondage sur le premier axe de l’AFC (rayon = 12m, 90 espèces) de chaque classe d’engorgement (indiquée en haut à gauche sur chacune des représentations) sur les parcelles témoins.

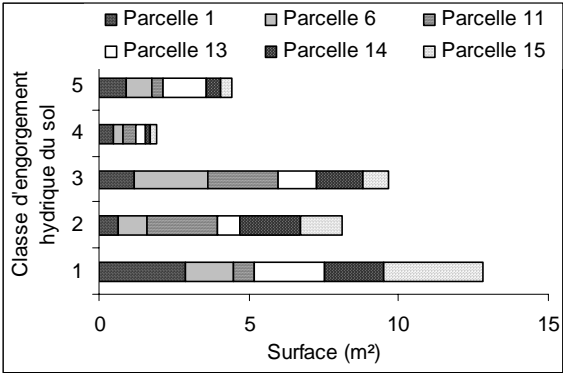


Figure 14 : Surface recouverte par chaque classe d’engorgement (Engorg x) sur les parcelles témoins.

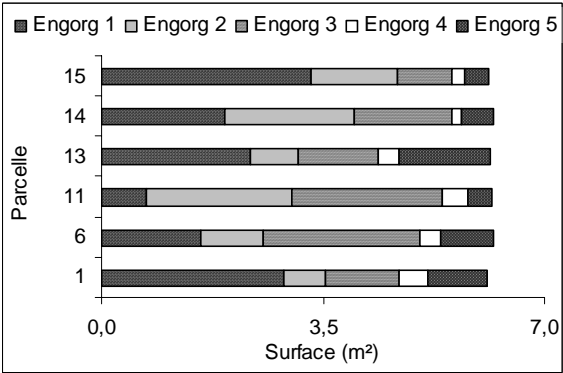


Figure 15 : Surface recouverte par chaque classe d’engorgement (Engorg x) au sein de chaque parcelle

utilisés dans ce cas. Lorsque l'on parlera de la prédiction exacte de l'engorgement, nous le préciserons systématiquement.

➤ Choix du rayon et détermination des axes utilisés

Pour cette étape, la calibration du modèle a été faite sur les carrés 1 et 4 de chaque parcelle et la validation sur les 2 autres carrés. D'après les valeurs prises par F1, F2, F3 dans les 5 catégories d'engorgement (fig. 16), seul l'axe F1 apparaît bien corrélé à l'engorgement. Cependant, il n'est pas exclu que la prise en compte simultanée de plusieurs axes améliore les résultats de l'AD.

D'après le test effectué par le programme d'analyse discriminante (Statistica 6), les 3 axes contribuent significativement à la discrimination des classes d'engorgement (tableau 4). En revanche, la comparaison des performances de la prédiction avec 1, 2, ou 3 axes, combinée avec la comparaison de plusieurs rayons des relevés floristiques, ne fait pas apparaître de façon claire l'intérêt d'en utiliser 3.

Lorsque l'AD prend en compte successivement le 1^{er} axe, les deux premiers axes et les trois premiers axes, il apparaît globalement que les résultats sont légèrement meilleurs avec trois axes (fig. 17). Les résultats sont différents si l'on considère la prédiction exacte. En effet, les courbes des pourcentages de prédiction exacte en fonction du rayon présentent toutes une forme en cloche avec un maximum pour le rayon de 16m (fig. 18).

Finalement, nous avons opté pour l'utilisation systématique des 3 axes, et pour le rayon de 16 m.

➤ Nombre d'espèces :

Les analyses ont été réalisées avec un nombre décroissant d'espèces (78, 41, 38, 29 et 27) en supprimant celles qui ne contribuent pas ou peu aux axes factoriels à l'aide du rapport

suivant :
$$Contrib\ x = \frac{\cos^2 \text{ de l'espèce sur l'axe factoriel } Fx}{|Coordonnée \text{ de l'espèce sur l'axe factoriel } Fx|}$$
 calculé pour chaque axe, x

est successivement égal à 1, 2 et 3. Chaque nombre d'espèces correspond à une valeur seuil de la valeur maximale $Contrib_{max}$ de ($Contrib1$, $Contrib2$, $Contrib3$).

La qualité de la prédiction est similaire pour 78 et 41 espèces puis une forte augmentation est observée avec un maximum pour 29 espèces (fig. 19). Toutes les analyses ont donc été réalisées avec ces 29 espèces, à partir du moment où elles répondaient aux critères de sélection définis pour l'AFC.

2.2.2 Effets du choix de la zone de calibration

➤ Calibration sur une partie de chaque parcelle

Tout d'abord, la calibration a été faite sur les carrés 1 et 4 de chaque parcelle et la validation sur les deux autres carrés. Au total, 86.0% des classes d'engorgement sont bien prédites sur la zone de calibration et 81.7% pour la validation soit environ 5% de plus que lorsque la calibration est faite sur le carré 2 de chaque parcelle (tableau 5, page suivante). En revanche, si l'on considère les prédictions exactes, les résultats sont meilleurs sur la zone de calibration pour la méthode utilisant 1 seul carré et sont à peine moins bons sur la zone de validation.

Les différences entre les deux méthodes concernent la prédiction des classes 1 et 2 (engorgement nul à faible) : le calibrage sur 2 carrés répartit mieux les erreurs sur ces deux

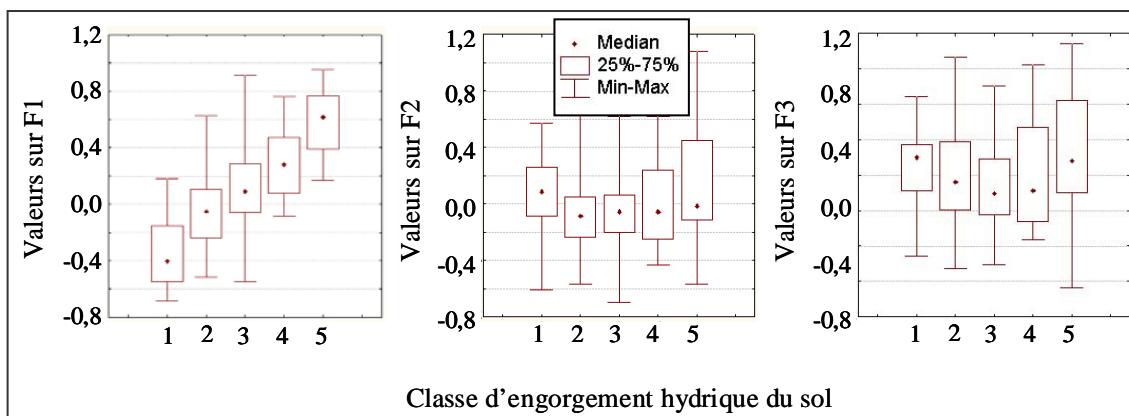


Figure 16 : Relation entre les axes factoriels de l'AFC à 15,625m et les classes d'engorgement hydriques du sol (1 : sol sec, 5 : sol de bas fond).

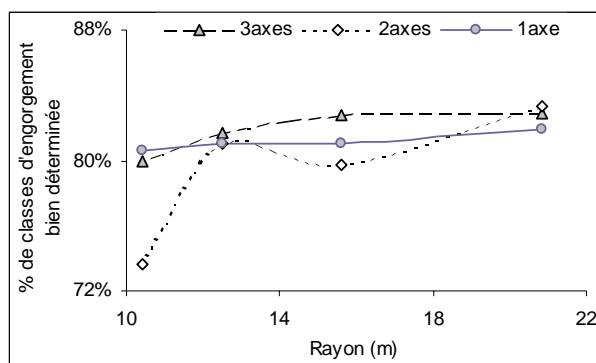


Figure 17 : Pourcentage de prédiction faite à une classe d'engorgement près au minimum en fonction du rayon, l'AFC prend en compte le premier axe factoriel.

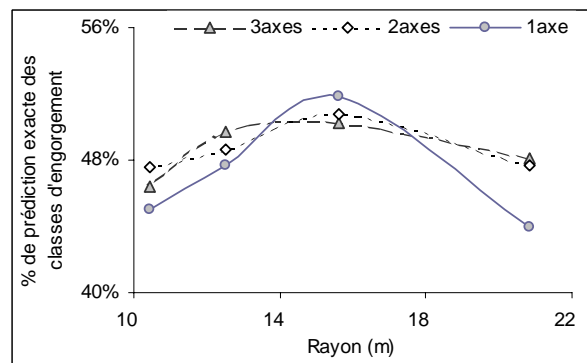


Figure 18 : Pourcentage de prédiction exacte de l'engorgement du sol, l'AFC prend en compte le premier axe factoriel.

Tableau 4 : Significativité des axes dans l'analyse discriminante

	Lambda de Wilks partiel	F-remove	p-level
F1	0,436318	59,75068	0,000000
F2	0,911923	4,46698	0,001809
F3	0,947564	2,55937	0,040130

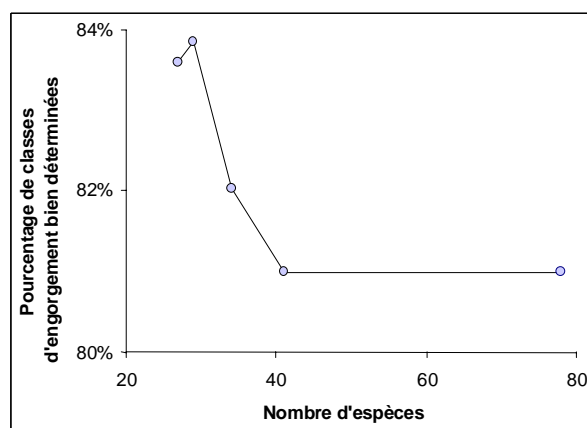


Figure 19 : Qualité de la prédiction en fonction du nombre d'espèces utilisé dans l'AFC, R = 16m

classes (fig. 20). Pour ce qui est de la classe 4, la prédiction est systématiquement mauvaise. En revanche, la prédiction exacte des classes d'engorgement 1, 3 et 5 est toujours supérieure à 50% avec un maximum de 69.3% pour la classe 1 avec la calibration sur les carrés 1 et 4.

➤ Calibration sur des parcelles entières :

Les parcelles ne sont pas réparties de façon uniforme dans l'espace : les parcelles 1, 13 et 14 sont proches les une des autres tandis que la parcelle 11 est très éloignée et la parcelle 6 se situe entre ces deux extrêmes. Ainsi, il est possible que le choix des parcelles servant à la calibration puisse avoir un impact sur la qualité des résultats. Cinq modalités ont été étudiées :

- Calibration sur 3 parcelles proches : 1, 13, 14
- Calibration sur 3 parcelles éloignées : 1, 11 et 15
- Calibration sur 5 parcelles et validation sur une parcelle éloignée : la parcelle 11
- Calibration sur 5 parcelles et validation sur une parcelle au centre : la parcelle 6
- Calibration sur une parcelle éloignée : la parcelle 11
- Calibration sur une parcelle au centre : la parcelle 6

Les résultats obtenus à l'issue de la calibration sur les parcelles éloignées et les parcelles proches sont à peu près équivalents (tableau 6). En terme de prédiction exacte, le taux de prédiction sur la zone de calibration est un peu meilleur pour la calibration sur les parcelles proches (59.7%) contre 46.0% pour la calibration sur les parcelles éloignées ; l'effet inverse est observé sur la zone de validation.

Lorsque la calibration est faite dans la seule parcelle 11, éloignée de toutes les autres, on remarque que les prédictions sont beaucoup moins bonnes dans les parcelles de validation que dans la parcelle de calibration (écarts de -18% et -26%). En revanche, lorsque la calibration est faite dans la parcelle 6, qui occupe une position relativement centrale dans le dispositif, les qualités de prédictions sont peu différentes entre les parcelles de validation et la parcelle de calibration (écarts de -1% et -6%).

Lorsque la validation est faite sur la parcelle 11, et donc que la calibration est réalisée sur les 5 autres parcelles, 75.2% des classes d'engorgement sont bien prédites mais seulement 28.9% avec exactitude sur la zone de validation. Les résultats obtenus avec la calibration sur les parcelles 1, 11, 13, 14 et 15 sont un peu meilleurs : le taux de bonnes prédictions est de 78,1 % au total avec 41.5% de prédiction exacte sur la zone de validation.

En considérant la prédiction de chaque classe, on remarque que la prédiction de l'engorgement de type 4 est inférieure à 0,5% pour 5 des 6 modalités étudiées.

La prédiction exacte des classes d'engorgement lorsque la calibration est faite sur les parcelles proches ou les parcelles éloignées est à peu près équivalente.

Lorsque la calibration n'est faite que sur une seule parcelle, les résultats sont corrects pour les classes d'engorgement intermédiaires (2, 3, 4) mais relativement mauvais pour les bas fonds et les sols secs. L'évolution de la qualité de la prédiction est similaire pour la calibration sur la parcelle 6 et celle sur la parcelle 11 (fig. 21). En revanche, si l'on considère les taux de prédiction exacte, les tendances ne sont pas les mêmes (fig. 22). Sur les zones de calibration, les classes 2 et 4 ne sont pas du tout prédites avec la calibration sur la parcelle 6 tandis que les classes 1, 4 et 5 sont très mal prédites avec la calibration sur la parcelle 11. Cette tendance est encore observée sur les zones de validation où la qualité de la prédiction de la classe trois est bien meilleure que ce qui a été vu précédemment.

Tableau 5 : Prédiction de l'engorgement hydrique du sol pour la calibration sur les carrés 1 et 4 et sur le carré 2 de chaque parcelle

Calibration	Validation	% de bonnes prédictions		% de prédictions exactes	
		Calibration	Validation	Calibration	Validation
Carrés 1 et 4	Carrés 2 et 3	86,0%	81,7%	54,9%	51,0%
Carré 2	Carrés 1, 3 et 4	79,0%	76,6%	56,1%	50,4%

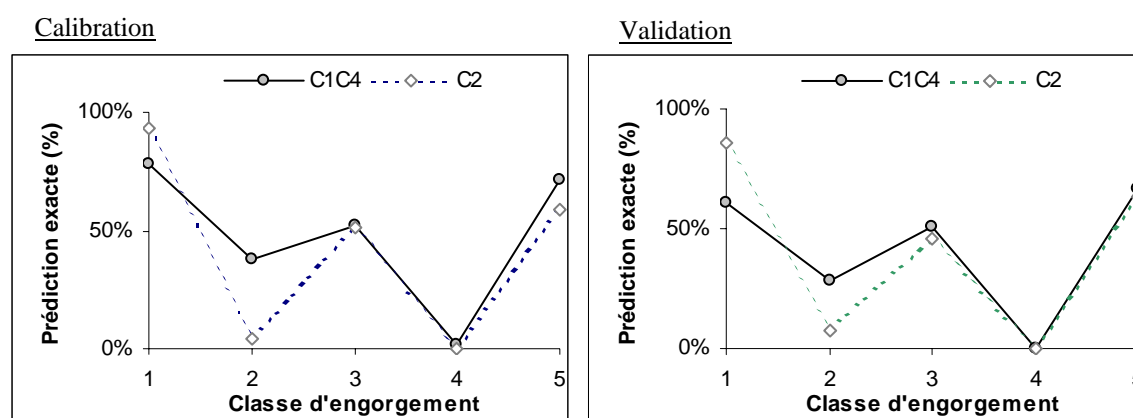


Figure 20 : Taux de prédictions exactes par classe d'engorgement sur la zone de calibration (figure de gauche) et sur la zone de validation (figure de droite) avec : C1C4 : Calibration faite sur les carrés 1 et 4 ; C2 : Calibration faite sur les carrés 2.

Tableau 6 : Prédiction de l'engorgement hydrique du sol pour la calibration sur certaines parcelles

Modalité	Calibration	Validation	% de bonnes prédictions		% de prédictions exactes	
			Calibration	Validation	Calibration	Validation
1	1, 13, 14	6, 11, 15	83,8%	77,0%	59,7%	46,0%
2	1, 11, 15	6, 13, 14	86,3%	75,1%	57,6%	48,6%
3	11	1, 6, 13, 14, 15	95,1%	77,9%	53,1%	26,8%
4	6	1, 11, 13, 14, 15	69,9%	69,2%	48,7%	42,8%
5	1, 6, 13, 14, 15	11	79,6%	70,7%	58,0%	28,9%
6	1, 11, 13, 14, 15	6	84,8%	71,5%	56,2%	41,5%

Quand la validation est faite sur la parcelle 11, la prédiction exacte de l'engorgement 1 est très bonne (supérieure à 80%) mais les classes 2 et 4 sont mal prédites, respectivement 8.9% et 0,5%. La prédiction est meilleure que ce soit sur la zone de calibration ou de validation lorsqu'on ne valide que sur la parcelle 6 avec notamment 24.5% pour la classe d'engorgement 2.

➤ Effets des cortèges floristiques :

L'information floristique a été dégradée : les espèces 226 et 227 ont été regroupées sous le même code 222, comme c'était le cas il y a quelques années dans l'inventaire de Paracou. Les analyses sur la calibration sur deux carrés et sur un seul carré ont été refaites. Pour chacune des deux méthodes, les différences sont faibles lorsque l'on calibre sur 2 carrés (1.4% de moins) tandis qu'une dégradation de la prédiction de 4.0% est observée pour la calibration et la validation sur un seul carré (tableau 7). Les types de sol les plus touchés en terme de prédiction exacte sont les bas fonds avec une diminution de la prédiction de 5.4% pour la calibration sur les carrés 1 et 4.

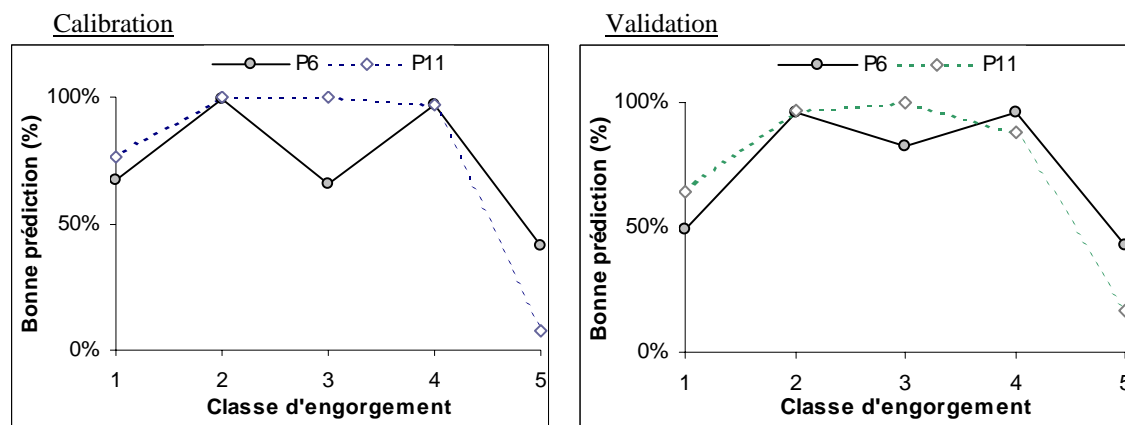


Figure 21 : Taux de bonnes prédictions par classe d'engorgement sur la zone de calibration (figure de gauche) et sur la zone de validation (figure de droite) avec :Calibr P6 : Calibration faite sur la parcelle 6 ; Calibr P11 : Calibration faite sur la parcelle 11.

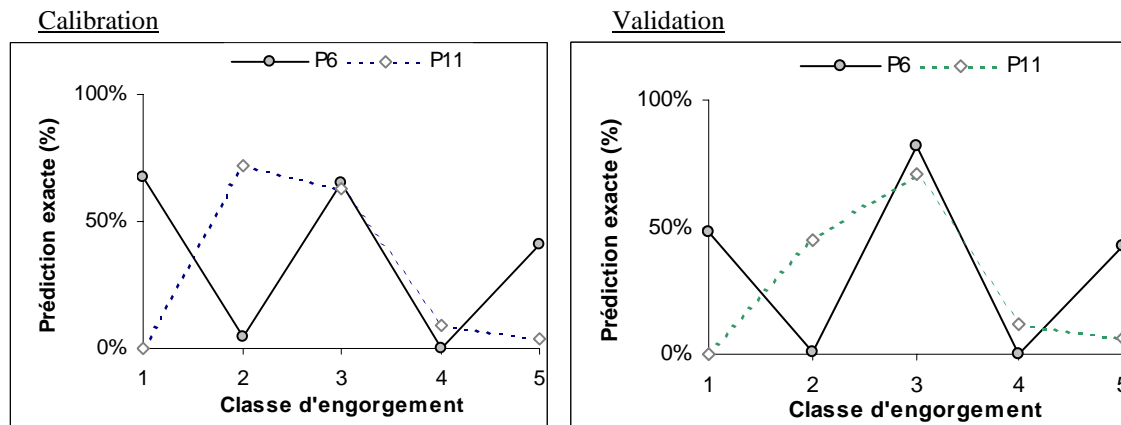


Figure 22 : Taux de bonnes prédictions par classe d'engorgement sur la zone de calibration (figure de gauche) et sur la zone de validation (figure de droite) avec P6 : Calibration faite sur la parcelle 6 ; P11 : Calibration faite sur la parcelle 11.

3 DISCUSSION

3.1 Relation espèces engorgement

En Guyane, les facteurs édaphiques, et notamment hydriques, jouent un rôle déterminant sur la nature des peuplements forestiers (Sabatier et Prévost 1990, Couteron et al., 2002). C'est ce qui ressort encore dans cette étude puisque, pour tous les rayons étudiés, le premier axe de l'AFC est systématiquement l'axe d'engorgement avec une valeur propre qui dénote de celles des autres axes. L'engorgement joue donc un rôle primordial sur la répartition des espèces ligneuses à Paracou.

L'étude de Péliissier et al. (2002) sur la piste de Saint Elie amène à un constat un peu différent. Ils ont en effet identifié deux axes écologiques : le premier correspond à la tolérance aux bas fonds (comme dans notre étude), le second traduit les effets de l'engorgement de surface et du type de drainage. A Paracou, nous ne trouvons qu'un seul axe écologique : la tolérance à l'engorgement des bas fonds prolongé par la tolérance à l'engorgement de surface. Deux raisons peuvent être à l'origine de ce constat :

- Les sols sont plus homogènes à Paracou, avec peu ou pas de drainage vertical libre, tel qu'on en trouve sur la piste de Saint Elie.
- Les cortèges floristiques du dispositif de Paracou sont moins précis : seules 60 espèces sont considérées comme étant identifiées correctement. Nous aurions pu limiter nos analyses à ces espèces mais la prédiction de l'engorgement aurait été moins bonne (résultats non présentés) puisqu'elles n'ont pas systématiquement une préférence marquée pour un type d'engorgement hydrique. De plus, leur effectif peut ne pas être suffisant pour qu'elles apportent quelque chose à l'analyse.

Enfin, rien ne permet d'affirmer que l'axe 1 ne représente que le gradient d'engorgement. Il est en effet possible que ce même axe prenne en compte une autre variable écologique non étudiée ici. En effet, l'AFC présente le désavantage de résoudre difficilement les cas où les gradients exprimés par les premiers axes de l'analyse sont dus à la superposition de facteurs du milieu et de facteurs liés à la dynamique et/ou à la structure de la végétation (Gégout et Houiller, 1993).

3.2 La couleur du sol comme indicateur de l'engorgement

A notre connaissance, il n'existe pas d'étude antérieure établissant une relation précise entre les domaines de variation des 3 paramètres du code Munsell (teinte, clarté et saturation) et des niveaux d'engorgement. C'est une méthode intéressante car facile à mettre en œuvre et basée sur des observations objectives (prélèvement de sol à 20 cm, couleurs de la version révisée du code Munsell, AFC sur des espèces).

Cependant, l'originalité de cette méthode ne nous permet pas de statuer facilement sa validité. Plusieurs éléments sont encourageants :

- Les résultats ont une bonne cohérence interne : les effets de la clarté et de la saturation sont les mêmes quelque soit la teinte observée ;
- On obtient des classements relatifs des couleurs quasiment identiques avec les deux indicateurs indirects et indépendants de l'engorgement que sont l'axe F1 (AFC sur les espèces) et les classes de topographie relative.

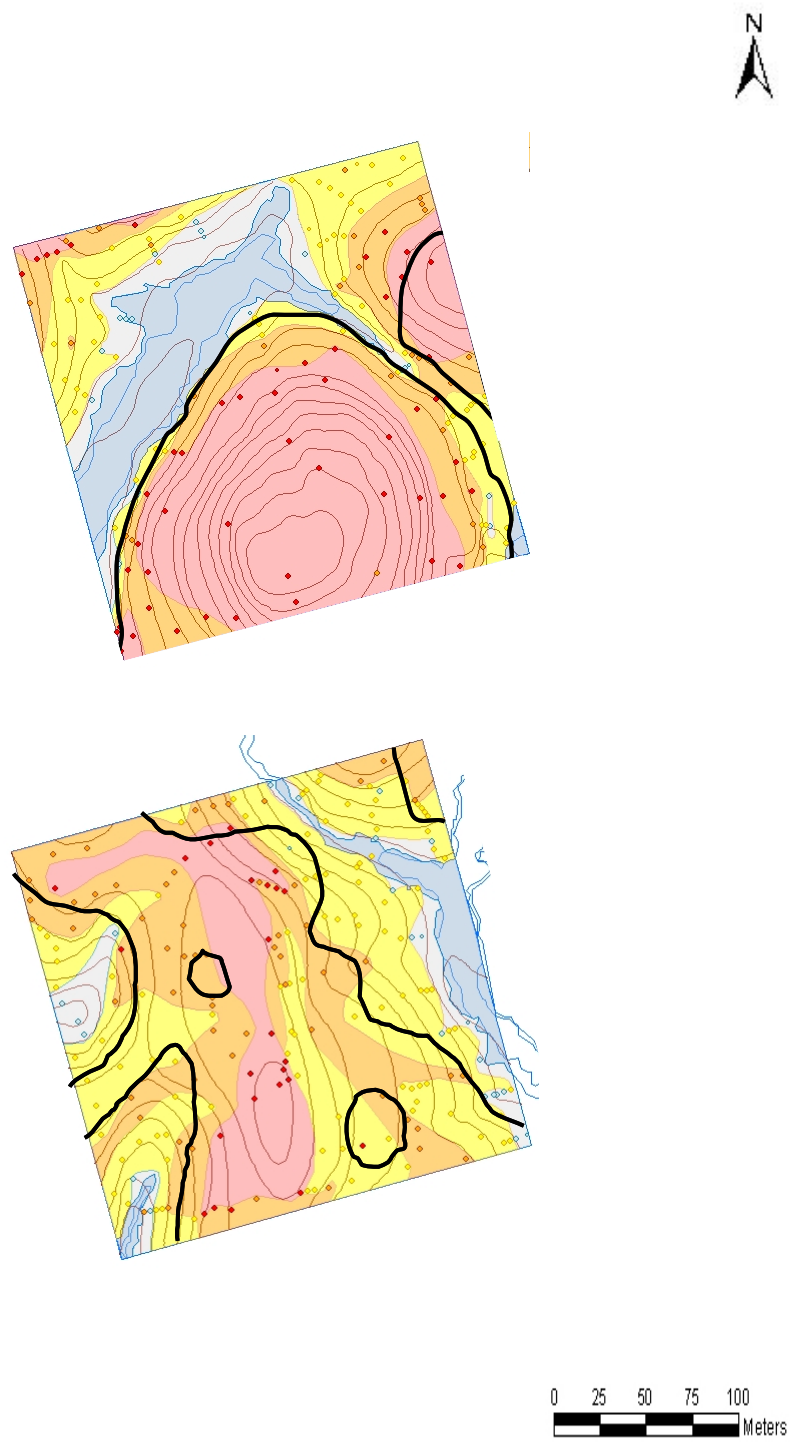


Figure 23 : Cartographies de l'engorgement hydrique du sol des parcelles 1 (en haut) et 11 (en bas). Les traits noirs délimitent les sols hydromorphes des sols non hydromorphes déterminés par Barthès. Les points représentent les sondages réalisées au cours de la présente étude.

- Les classements obtenus sont cohérents avec ceux faits par Cantet et *al.* (2003) qui ont été validés par des mesures d'engorgement sur 67 piézomètres. Une différence doit toutefois être signalée : dans l'étude de Cantet et *al.*, les sols les plus engorgés étaient caractérisés par une teinte très sombre (clarté < 4 sur 20-40 cm de profondeur), tandis que dans la présente étude, on observe au contraire un engorgement plus marqué quand la clarté augmente. Cette apparente contradiction peut *a priori* s'expliquer par des dynamiques différentes de la matière organique : dans les bas-fonds, où l'engorgement est quasi permanent, la décomposition est significativement ralentie, tandis que dans les pentes où l'engorgement est plus limité, il y aurait plutôt un effet de lessivage latéral de la matière organique.

Cependant, nous avons aussi montré que cette relation couleur – engorgement n'avait pas une validité uniforme sur la zone d'étude : à couleur égale, les sols ont un indice d'engorgement plus faible sur les parcelles 6 et 11. Cela peut avoir 2 causes :

- Indépendamment de l'engorgement, les sols de ces parcelles sont moins riches en fer, donc plus faciles à décolorer. Cela serait à relier à des différences de substrat géologique, comme une abondance plus forte des filons de pegmatite, ou à une pédogénèse ancienne qui aurait plus appauvri les sols en fer.
- Pour une même valeur de F1, l'engorgement réel est plus important sur les parcelles 11 et 6 que sur les autres. Cela proviendrait de différences dans les cortèges floristiques, *a priori* vraisemblables puisque la parcelle 11 est isolée par rapport aux autres et la parcelle 6, bien qu'elle soit plus proche des autres parcelles, a une position intermédiaire (entre la parcelle 11 et les autres).

Si la première hypothèse est bonne, il faut adapter la relation couleur-engorgement à des ensembles géologiques ou géomorphologiques. Les connaissances actuelles du dispositif ne nous permettent pas de faire un tel découpage spatial, qui séparerait objectivement les parcelles 6 et 11 des 4 autres. Ainsi, le découpage géomorphologique en 3 ensembles proposé par Le Fol (2002) sépare la P11 des autres, mais inclut les parcelles 6, 14 et 15 dans un même ensemble.

Une étude pédologique est en cours (Freycon, comm. pers.) sur les parcelles 1, 6, 11, qui devrait nous donner des éléments pour conforter ou au contraire rejeter l'hypothèse de différences pédologiques antérieures aux décolorations de surface par engorgement.

➤ Comparaison des cartes

Les cartes d'engorgement réalisées au cours de cette étude ont été comparées aux cartographies l'hydromorphie de surface des parcelles 1, 6 et 11 réalisées à partir de la couleur plus ou moins grise des horizons de surface (Barthès, 1991a).

A première vue, il existe une correspondance entre les deux classes non hydromorphes (classes 1 et 2) et le sol H0 (non hydromorphe) de Barthès. Les limites des sols des parcelles 1 et 6 correspondent assez bien à ce qu'a fait Barthès (fig. 23). En revanche, la parcelle 11 présente de nombreuses différences. Il s'agit de la parcelle qui a posé le plus de difficultés lors de l'interprétation des limites des sols. En effet, on s'est aperçu *a posteriori* que des sondages manquaient sur certaines zones et rendaient certaines limites moins fiables. Cependant, le nombre de sondages effectué par Barthès est inférieur à ce que nous avons réalisé et il évoque lui-même le caractère qualitatif et empirique de sa méthode, notre carte n'est donc pas forcément erronée. De plus, notre critère de détermination ne se limite pas à la

Tableau 7 : Baisse de la qualité de la prédiction de l'engorgement hydrique du sol pour la calibration sur les carrés 1 et 4 et sur le carré 2 de chaque parcelle due au regroupement de *Iryanthera hostmannii* et *Iryanthera sagotiana*

Calibration	Validation	% de bonne prédictions		% de prédictions exactes	
		Calibration	Validation	Calibration	Validation
Carrés 1 et 4	Carrés 2 et 3	- 1.8%	- 1.8%	- 0.9%	- 1%
Carré 2	Carrés 1, 3 et 4	- 2.8%	- 5.3%	- 2.8%	- 5%

couleur plus ou moins grise des horizons de surface : il est possible que ces critères différents engendrent des résultats différents.

3.3 Prédiction de l'engorgement

➤ **Nombre d'espèces :**

L'optimisation de la méthode de prédiction de l'engorgement du sol a montré que l'augmentation du nombre d'espèce ne signifiait pas forcément l'augmentation de la qualité de la prédiction. Ainsi, 29 espèces seulement permettent d'obtenir de bons résultats. Il paraît vraisemblable que les espèces retirées font partie des espèces mal déterminées, leur présence a donc plus tendance à brouiller l'analyse qu'à l'améliorer.

➤ **Zone de calibration :**

A surface de calibration égale, les prédictions sont meilleures lorsqu'une partie de chaque parcelle est prise en compte au lieu de quelques parcelles complètes. De cette façon, la variabilité des cortèges floristiques et de l'engorgement du sol de chacune des parcelles est considérée : l'échantillon sur lequel est établie la calibration est donc plus représentatif, les résultats s'en trouvent améliorés.

Les prédictions à partir des modèles calibrés sur un et deux carrés des parcelles, ce qui correspond à une forte différence de travail, permettent de prédire toutes deux un peu plus de 50% du sol. Il semble donc qu'un quart de la surface suffise pour donner des bons résultats.

Une zone de calibration trop différente des zones de validation (modalités 3 et 5 par exemple) engendre un certain nombre d'erreurs de prédictions. En effet, la parcelle 11, du fait de son éloignement géographique des autres parcelles, présente probablement un certain nombre de singularités, notamment concernant les cortèges floristiques, qui sont gênantes lors de la phase de prédiction. La dégradation de la prédiction est plus faible lorsque l'on considère la parcelle 6 qui se trouve être plus proche des autres parcelles témoins.

➤ **Méthode de prédiction à utiliser :**

Compte tenu des résultats obtenus, le rayon de placette à utiliser est d'environ 16m. La calibration sur une surface répartie de façon homogène dans l'espace (une partie de chaque zone étudiée) implique la prise en compte de la variabilité floristique, édaphique etc. sur la zone considérée et permet d'établir une carte d'engorgement exacte à 50% et bonne (à une classe d'engorgement près) à plus 80%. La surface de calibration ne doit pas être trop petite, sinon certains sols seront mal représentés.

Cependant, suivant la précision des résultats recherchée, ces choix peuvent être modifiés.

A l'aide de cette méthode, une cartographie approximative de l'engorgement peut être réalisée dès maintenant dans les 10 autres parcelles du dispositif. Ces parcelles ayant presque toutes été soumises à des traitements sylvicoles en 1987, il faudra utiliser les inventaires botaniques de 1984 à 1986. Nos calculs montrent que l'on peut raisonnablement espérer une bonne prédiction (i.e. à une unité près) sur 70 à 75% de la surface.

CONCLUSION

Cette étude réalisée sur les parcelles témoins du dispositif de recherche de Paracou (Guyane française) avait pour objectifs la réalisation de la cartographie de l'engorgement des zones étudiées et l'optimisation d'une méthode de prédiction de l'hydromorphie basée sur les méthodes de prédictions des variables écologiques utilisées en milieu tempéré.

La cartographie de l'engorgement réalisée repose sur une méthode originale basée sur la détermination des couleurs du sol et le gradient d'engorgement hydrique du sol (établi à partir d'une analyse factorielle des correspondances sur les espèces d'arbres). Cette méthode présente l'avantage d'être facile à reproduire puisqu'elle s'appuie sur des critères objectifs. L'absence de référence bibliographique rend difficile sa validation mais les résultats observés sont cohérents entre eux et avec d'autres cartes d'engorgements de surface réalisées sur le dispositif de Paracou. L'ensemble des résultats tend à montrer la validité de la méthode, mais il faudrait l'affiner en comprenant mieux l'origine de l'effet « parcelle » observé sur la relation couleur-engorgement, et que nous n'avons pas pris en compte pour tracer les cartes d'engorgement. Dans le même ordre d'idée, il serait intéressant de tester la méthode de cartographie de l'engorgement sur d'autres zones en Guyane afin de pouvoir l'affiner et la valider. Elle pourrait alors permettre une cartographie pédologique facile pour de nombreuses zones d'étude.

La prédiction de l'engorgement hydrique du sol à partir des cortèges floristiques est une démarche qui fournit de bons résultats. L'optimisation de cette méthode a permis de mettre en évidence quelles modifications pouvaient apporter des améliorations et quelles étaient les problèmes qui pouvaient survenir. Ainsi, le rayon de la placette le plus pertinent est de l'ordre de 16m. Seules les espèces contribuant de façon non négligeable au gradient d'engorgement doivent être utilisées : les autres espèces ne font que brouiller l'analyse. De même, la zone de calibration doit être représentative de la surface étudiée (cortèges floristiques, facteurs édaphiques) pour permettre une prédiction correcte. Une difficulté est toutefois rencontrée : elle concerne l'étendue des sols pris en compte : en effet, un sol dont la surface n'est pas très importante sur toute la zone d'étude sera difficilement prédit.

De même, l'intérêt de la méthode de prédiction de l'engorgement du sol par les cortèges floristiques devrait être plus grand lorsque les identifications des espèces de Paracou seront améliorées. Cette démarche pourra alors de nouveau être testée et améliorée, les résultats observés devraient être bien meilleurs.

BIBLIOGRAPHIE

- Barthes, B. (1991a). Caractérisation pédologique de parcelles du dispositif "Forêt naturelle" du C.T.F.T. à Paracou (Sinnamary, Guyane). B. B. Cayenne, CTFT.
- Barthès, B. (1991b). "Influence des caractères pédologiques sur la répartition spatiale de deux espèces du genre *Eperua* (Caesalpiniaceae) en forêt guyanaise." *Revue d'Ecologie (La Terre et la Vie)* 46: 303-320.
- Beauchêne, J., Berreau M., Bonal D., Degen B., Ferry B., Fournier M., Fuhr M., Girou D., Gourley-Fleury S., Hansen C., Julliot C., Molino J.F., Paget D., Roggy J.C., Sabatier D., Tellier L., Trichon V. (2000) : Présentation des activités du GIS Silvolab-Guyane, Période 1995 – 2000, Rapport d'activité, 52 p.
- Cantet, L., M. Delattre and G. Guérin (2003). Engorgement hydrique et hydromorphie des sols. Kourou (Guyane française), ENGREF: 22 p.
- Clark, D. B., D. A. Clark and J. M. Read (1998). "Edaphic variation and the mesoscale distribution of tree species in a neotropical rain forest." *Journal of Ecology Oxford* 86(1): 101-112.
- Couteron, P., R. Pelissier, D. Mapaga, J. F. Molino and L. Teillier (2003). "Drawing ecological insights from a management-oriented forest inventory in French Guiana." *Forest Ecology & Management* 172: 89-108.
- Diekmann, M. (1995). "Use and improvement of Ellenberg's Indicator values in deciduous forests of the Borea-nemoral zone in Sweden." *Ecography* 18: 178-189.
- Diekmann, M. (2003). "Species indicator-values as an important tool in applied plant ecology - a review." *Basic and applied ecology* 4: 493-506.
- Ferry, B. (1995). Les grands mécanismes de formation d'un sol sur le socle guyanais, ENGREF: 19 p.
- Ferry, B., V. Freycon and D. Paget (2003). "Genèse et fonctionnement hydrique des sols sur socle cristallin en Guyane." *Revue Forestière Française à paraître(Special Guyane)*.
- Freycon, V., D. Sabatier, D. Paget and B. Ferry, Eds. (2004). Influence du sol sur la végétation arborescente en forêt guyanaise : état des connaissances. *Revue Forestière Française*.
- Gégout, J. and F. Houllier (1993). "Apports de l'analyse factorielle des correspondances sur variables instrumentales en typologie des stations : illustration sur la plaine de la lanterne (Haute-Saône)." *Revue Forestière Française* 45: 539 - 547.
- Gégout, J. C., J. C. Hervé, F. Houllier and J. C. Pierrat (2003). "Prediction of forest soil nutrients with vegetation in the Vosges mountains." *Journal of Vegetation Science* accepté.
- Gourlet-Fleury, S., B. Ferry, J. F. Molino, P. Petronelli and L. Schmitt (2004). Paracou experimental plots : key features. *Ecology and Management of a Neotropical Rainforest. Lessons drawn from Paracou, a long-term experimental research site in French Guiana*. S. Gourlet-Fleury, J. M. Guehl and O. Laroussinie, ECOFOR.
- Hawkes, J. C., D. G. Pyatt and M. S. White (1997). "Using Ellenberg indicator values to assess soil quality in British forests from ground vegetation : a pilot study." *Journal of Applied Ecology* 34: 375-387.

- Janet, B., S. Forestier and J. Touroult (1999). Cartographie pédologique des bas-fonds de Paracou. Kourou (Guyane française), ENGREF: 40 p.
- Le Fol, J. (2002). Etude géomorphologique des sites de Paracou, Crique Plomb, Piste de Saint Elie. Kourou, CIRAD.
- Legros, J. (1996). Cartographie des sols, de l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes. p.1- 95
- Lescure, J. P. and R. Boulet (1985). "Relationships between soil and vegetation in a tropical rain forest in French Guiana." *Biotropica* 17(2): 155-164.
- Malherbe, M. (2002). Etude géomorphologique et pédologique du site de Paracou. Kourou, CIRAD.
- Malhi, Y., O. L. Phillips, J. Lloyd, T. Baker, J. Wright, S. Almeida, L. Arroyo, T. Frederiksen, J. Grace, N. Higuchi, T. Killeen, W. F. Laurance, C. Leano, S. Lewis, P. Meir, A. Monteagudo, D. Neill, P. Nunez Vargas, S. N. Panfil, S. Patino, N. Pitman, C. A. Quesada, A. Rudas-Ll., R. Salomao, S. Saleska, N. Silva, M. Silveira, W. G. Sombroek, R. Valencia, R. Vasquez Martinez, I. C. G. Vieira and B. Vinceti (2002). "An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR)." *Journal of Vegetation Science* 13: 439-450.
- Peet, R. K., R. G. Knox, J. S. Case and R. B. Allen (1988). "Putting things in order : the advantages of detrended correspondence analysis." *American Naturalist* 131: 924-934.
- Pelissier, R., S. Dray and D. Sabatier (2002). "Within-plot relationships between tree species occurrences and hydrological soil constraints: an example in French Guiana investigated through canonical correlation analysis." *Plant Ecology* 162(2): 143-156.
- Pyke, C., R. Condit, S. Aguilar and S. Lao (2001). "Floristic composition across a climatic gradient in a neotropical lowland forest." *Journal of Vegetation Science* 12: 553-566.
- Sabatier, D. and M. F. Prevost (1990). "Quelques données sur la composition floristique et la diversité des peuplements forestiers de Guyane française." *Bois For. Trop.* 219: 31-55.
- Sabatier, D., M. Grimaldi, M. F. Prevost, J. Guillaume, M. Godron, M. Dosso and P. Curmi (1997). "The influence of soil cover organization on the floristic and structural heterogeneity of a guianan rain forest." *Plant Ecology* 131(1): 81-108.
- Salvado, A. (2002). Etude des relations entre sol et végétation en forêt tropicale humide : comparaison de la dynamique forestière selon les profondeurs de nappe en saison sèche (Bas fonds vs Sol drainés) et étude du comportement de la nappe en saison humide. Nancy, ENGREF: 46 p.
- Sollins, P. (1998). "Factors influencing species composition in tropical lowland rain forest: Does soil matter?" *Ecology* 79(1): 23-30.
- Ter Steege, H., V. G. Jetten, A. M. Polak, M. J. A. Werger and H. Ter Steege (1993). "Tropical rain forest types and soil factors in a watershed area in Guyana." *J. Veg. Sci.* 4(5): 705-716.
- Thomas, M. A. (1984). *Geomorphology in the tropics. A study of Weathering and Denudation in Low Latitudes*. Chichester (England), J. Wiley & Sons Ltd.
- Wierda, A., L. F. M. Fresco, A. P. Grootjans and D. van, R. (1997). "Numerical assessment of plant species as indicators of groundwater regime." *Journal of Vegetation Science* 8: 707-716.

ANNEXES

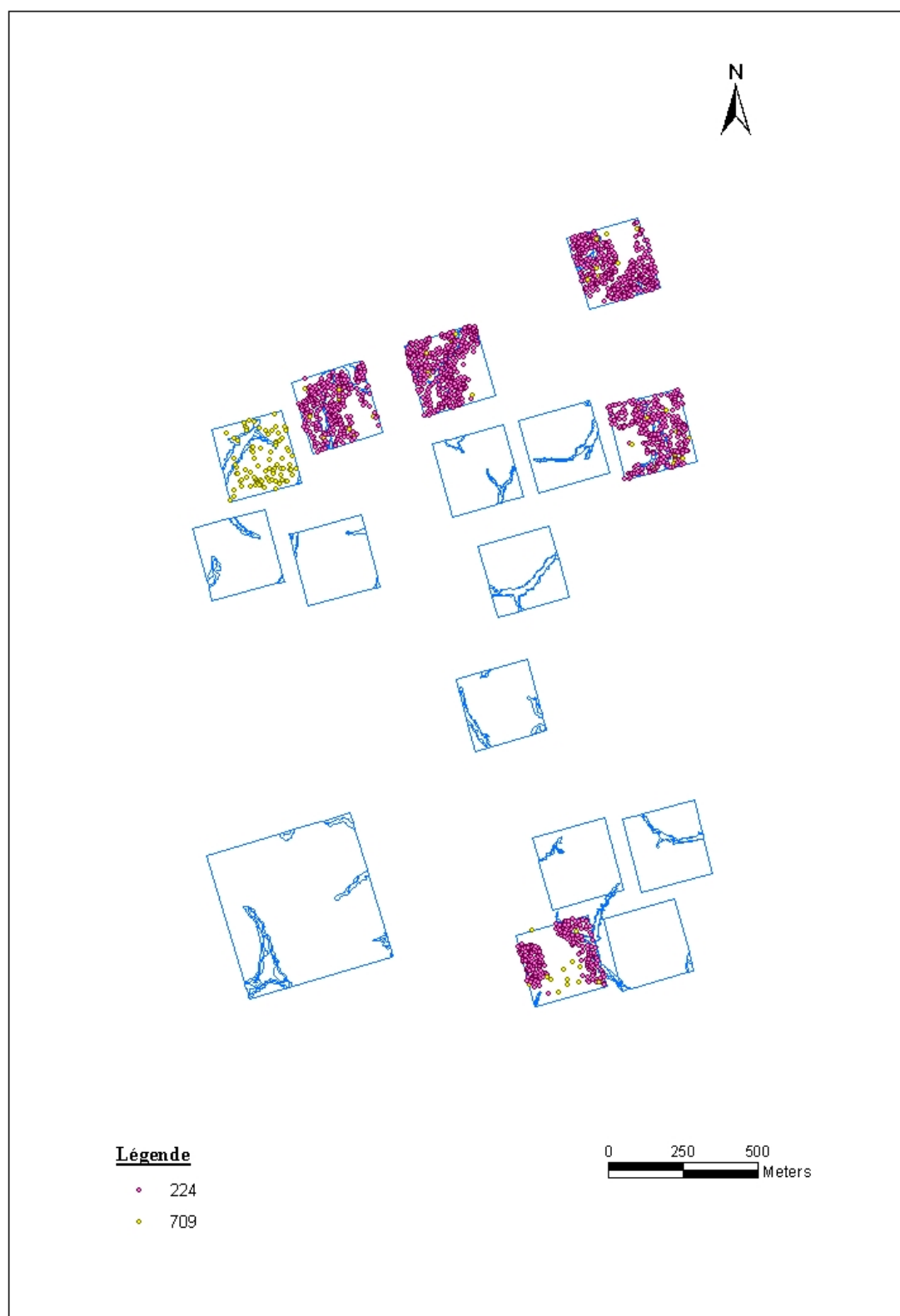
Annexe 1 : Répartitions d'*Eperua Falcata* (code 224) et de *Licania hypoleuca* (code 709)

Annexe 2 : Nombre de sondages pour chaque couleur de sol sur l'ensemble des parcelles

Annexe 3 : Cartographie de l'engorgement hydrique de surface du sol des parcelles témoins du dispositif de Paracou, du sol le plus sec (classe 1) au sol le plus engorgé (classe 5).

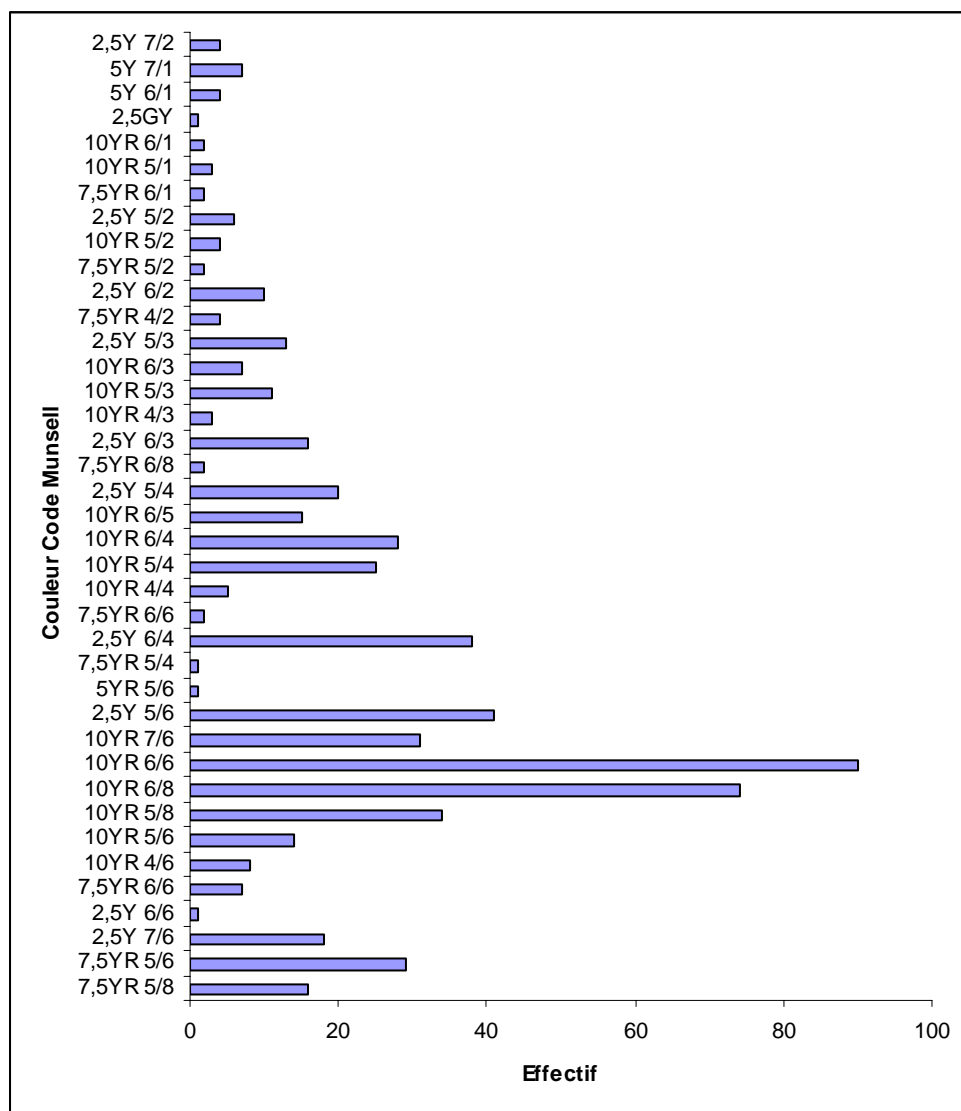
ANNEXE 1

Répartitions d'*Eperua Falcata* (code 224) et de *Licania hypoleuca* (code 709)



ANNEXE 2

Nombre de sondages pour chaque couleur de sol sur l'ensemble des parcelles



ANNEXE 3

Cartographie de l'engorgement hydrique de surface du sol des parcelles témoins du dispositif de Paracou, du sol le plus sec (classe 1) au sol le plus engorgé (classe 5).

