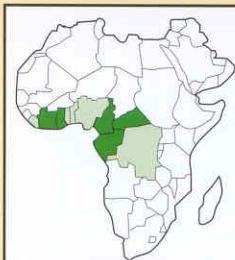


Les cartes, la télédétection et les S.I.G., des outils pour la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale



Série
FORAFRI
1998

Document
12



Les cartes, la télédétection et les SIG,
des outils pour la gestion et l'aménagement
des forêts tropicales d'Afrique Centrale .

Rapport rédigé par :

*Michelle PAIN-ORCET, Danny LO SEEN, Nicolas FAUVET,
Jean-François TREBUCHON*, Barthélémy DIPAPOUNDJI**.*

* CIRAD-Forêt, ** ICRA-RCA

- 1998 -

CIRAD-Forêt
Campus International de Baillarguet
BP 5035
34032 Montpellier cedex 1

PREFACE

L'accès aux connaissances liées au patrimoine national comme international peut accélérer le processus de développement. De même, l'échange des savoirs rassemble ses acteurs et renforce l'organisation des travaux. Pour toutes ces raisons, synthétiser et diffuser l'information relève du mandat des actions de coopération.

Depuis près de trente ans, le département forestier du Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) a réalisé de nombreuses recherches sur les écosystèmes forestiers humides de l'Afrique centrale et occidentale. Le projet Forafri, financé par le Fonds d'aide et de coopération (France), a été lancé en 1996 pour capitaliser ces acquis et les valoriser en les transmettant aux acteurs de la filière dans cette zone. Le Cifor (Center for international forestry research), responsable d'une action identique dans les pays anglophones, est associé à Forafri.

La phase de capitalisation et de synthèse s'est concrétisée notamment par la rédaction de différents ouvrages, synthèses et publications. Un comité scientifique et technique, qui réunit des représentants du Cirad, du Cifor, de la Fao (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), de l'Uicn (Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources), de l'Atibt (Association tropicale internationale des bois tropicaux) et des de systèmes nationaux de recherche africains (Cameroun, Congo, Côte d'Ivoire et Gabon), a assuré la validation des documents.

Les auteurs se sont attachés à rassembler les divers éléments épars des connaissances scientifiques, techniques et bibliographiques, ceci dans le but de les mettre à la disposition des utilisateurs, qu'ils soient enseignants, développeurs, chercheurs, industriels ou gestionnaires. Ce travail de synthèse a abouti à la réalisation d'une série d'ouvrages, traités par pays ou par thème.

Le bilan général des dispositifs expérimentaux concerne notamment la dynamique de croissance des peuplements arborés en Centrafrique, en Côte-d'Ivoire et au Gabon. Plusieurs thèmes sont aussi approfondis, tels que l'évaluation de la ressource, la sylviculture, l'aménagement, les méthodes statistiques d'analyse et d'interprétation de données et les caractéristiques technologiques des bois commerciaux africains.

La transmission des connaissances et des savoir-faire passe aussi par la formation dont tous ces documents pourront être des supports. C'est avec cette volonté de capitaliser, synthétiser et diffuser que ces publications sont réalisées. Nous espérons qu'elles profiteront aux recherches et actions de développement futures concourant ainsi à la gestion durable des forêts tropicales africaines.

Jacques Valeix
Directeur du Cirad Forêt

INTRODUCTION

La dernière décennie aura été marquée par une évolution très rapide des moyens basés sur la technologie numérique, nous obligeant constamment à re-situer la pertinence de ces nouvelles possibilités par rapport aux besoins émanant de nos activités.

La télédétection et les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) font déjà l'objet d'une importante bibliographie scientifique et technique. Cependant, les applications étant possibles dans des domaines très divers, les documents disponibles sont souvent trop généralistes, ou alors, traitent de la recherche de méthodologie d'utilisation de ces outils pour des applications particulières.

Sur la problématique de l'aménagement des forêts tropicales humides, la présente note a pour but de traduire notre savoir-faire actuel dans les domaines de la télédétection et des SIG et d'indiquer les axes de recherche à privilégier dans le futur, compte tenu des possibilités qu'offrent ces nouveaux outils, ainsi que de leurs limites souvent négligées. Cette note se base essentiellement sur notre expérience pratique acquise dans les forêts tropicales humides d'Afrique Centrale.

RÉSUMÉ

La première partie de ce document traite de l'importance des cartes dans les projets d'aménagement forestier. L'élaboration de ces cartes nécessite souvent l'utilisation de données de télédétection, aussi bien acquises à partir d'avions qu'à partir de satellites.

La deuxième partie du document montre l'apport de la télédétection pour l'aménagement des forêts tropicales humides.

Ensuite, le rôle que peut jouer les SIG comme outil d'aide à la décision, de gestion et d'aménagement est décrit dans la troisième partie.

Enfin, pour illustrer la mise en oeuvre de ces outils, l'exemple d'un projet situé en République Centrafricaine est développé dans la quatrième partie.

Table des matières

Introduction

Résumé

1. Les cartes dans un projet d'aménagement	4
2. La télédétection, son apport pour l'aménagement des forêts tropicales	6
2.1 - Les données aéroportées	6
2.11 - Les photographies aériennes "classiques" sous forme analogique	6
2.12 - Prises de vue à basse altitude	8
2.13 - L'orthophotographie numérique	9
2.14 - Photographies aériennes numériques	9
2.15 - La vidéographie aérienne	10
2.16 - Données radar aéroportées	11
2.2 - Les données satellitales	11
2.21 - Domaine optique	11
2.22 - Les spatiocartes	13
2.23 - Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)	14
2.24 - Domaine des micro-ondes	15
2.25 - Développements futurs	16
3. Le Système d'Information Géographique (SIG) comme outil de gestion et d'aménagement d'une forêt tropicale humide	17
3.1 - Caractéristiques des SIG	17
3.2 - Leur utilisation dans un projet d' aménagement forestier	18
3.21 - Acquisition des données	18
3.22 - Quelques fonctionnalités du SIG	19
3.23 - Restitutions cartographiques	19
4. Exemple de mise en oeuvre de ces outils dans un projet d'aménagement forestier en Afrique Centrale : aménagement pilote de la Sangha-Mbaéré en République Centrafricaine.	20
4.1 - Conclusion	25

Conclusions

Principaux documents consultés

1. Les cartes dans un projet d'aménagement

Les documents cartographiques tiennent une grande place à chacune des étapes d'un projet d'aménagement forestier. De l'étude de faisabilité au suivi des impacts des actions entreprises, en passant par la spatialisation des données de l'inventaire, les cartes s'avèrent des outils indispensables pour l'aménagiste.

- Lors de la préparation du projet (phase préliminaire), il est nécessaire de repérer géographiquement et de délimiter la zone qui doit faire l'objet d'un aménagement.

Les **cartes topographiques** sont utilisées à cet effet. Elles permettent en plus d'appréhender, de façon exhaustive, la physionomie du terrain (planimétrie, orographie, toponymie).

Actuellement la majorité de ces cartes n'est plus disponible sur le marché, mais, l'Institut Géographique National peut les mettre à disposition sous forme de photocopies.

Leur mise à jour, souvent ancienne, pose des problèmes pour leur utilisation comme cartes de base et surtout pour leur intégration ultérieure dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Les cartes topographiques les plus utilisées pour l'Afrique Centrale sont, en général, à l'échelle du 1/200 000; Il existe très rarement des cartes au 1/50 000. Pour travailler à des échelles plus grandes que le 1/200 000, et c'est presque toujours le cas pour des aménagements, la solution adoptée couramment consiste à utiliser des agrandissements. Néanmoins, la précision reste insuffisante, notamment au niveau de l'orographie.

En complément, le projet consulte tous les autres documents cartographiques déjà existants sur la région et traitant des thématiques physique, biogéographique, humaine et économique. L'échelle de ces **cartes thématiques** est très variable. Les cartes géologiques, pédologiques ou même biogéographiques disponibles se présentent souvent à de petites échelles comme le 1/500 000 ou le 1/1 000 000, non compatibles avec la précision d'une cartographie d'aménagement. L'hétérogénéité de ces documents (sources dates, projections, ...) est toutefois une information non négligeable qui doit être prise en compte avant leur utilisation.

- Pendant sa phase d'exécution, le projet réalise ses propres cartes. D'abord pour actualiser ou compléter les cartes existantes, ensuite pour visualiser les données récoltées pendant l'inventaire.

Ces cartes permettent de répondre aux questions que se pose l'aménagiste ; par exemple sur les types de peuplements composant le massif à aménager, sur les contraintes à l'exploitation, sur la pression humaine... Les données peuvent provenir de sources différentes, photographies aériennes, images satellitales, inventaires ou enquêtes diverses.

Cette catégorie de cartes thématiques appelées “**cartes de traitement**” ou “cartes d’analyse” permet d’étudier visuellement et de façon dynamique toutes les composantes de la zone, utiles à l’élaboration de l’aménagement.

Une catégorie de cartes plus “techniques” est réalisée à partir des résultats de l’inventaire du massif pour montrer la répartition spatiale de la ressource. A chaque parcelle (ou groupe de parcelles) est associée une valeur correspondant aux données récoltées (volumes, effectifs, essences, groupes d’essences commercialisables,...).

Ensuite une autre série de cartes sert à illustrer les propositions d’aménagement : carte de la répartition des blocs et des unités d’aménagement pour l’exploitation, cartes des zones mises en réserve, des zones de reboisement, carte des régions à vocation rurale, ...

- Enfin, tout au long de la mise en oeuvre de l’aménagement, la cartographie constitue un des outils de suivi pour le contrôle régulier des actions entreprises.
 - carte des dégâts d’exploitation
 - carte de l’avancement des travaux
 - impact sur le développement rural, ...

2. La télédétection, son apport pour l'aménagement des forêts tropicales

La télédétection, actuellement opérationnelle dans de nombreux domaines, trouve une place de choix en foresterie et notamment en aménagement forestier.

En effet la mise en place d'un aménagement sur une forêt tropicale réclame comme préalable une connaissance approfondie de l'écosystème forestier concerné.

Si l'inventaire reste toujours la source première d'informations, l'utilisation des photographies aériennes, puis celle des données satellitales permettent d'analyser le milieu forestier de manière exhaustive et surtout plus dynamique.

Le principe de base sur lequel repose la télédétection au sens large, photographies aériennes comprises, est la mesure de l'énergie électromagnétique réfléchie ou émise par les objets.

La fréquence d'acquisition des données peut varier de quelques heures à quelques semaines, en fonction des capteurs utilisés, et cette possibilité autorise toutes les études basées sur la dynamique de phénomènes et l'analyse des mécanismes de l'évolution.

On obtient également une information exhaustive, globale et instantanée sur de grandes surfaces permettant par conséquent une meilleure approche de l'espace.

Les utilisateurs ont à leur disposition une importante gamme d'informations fournie dans différentes bandes de longueur d'onde (visible, infrarouge, thermique, micro-ondes).

Il en résulte une grande variété de produits disponibles (supports, échelles, dates, longueurs d'onde, documents stéréoscopiques,...) qui peuvent être combinés entre-eux pour mieux répondre aux objectifs recherchés.

Cet outil, largement utilisé depuis une cinquantaine d'années pour les photographies aériennes et depuis 1972 pour les données satellitales, a fait preuve de sa capacité pour l'étude du domaine forestier tropical.

2.1 - Les données aéroportées

2.11 - Les photographies aériennes "classiques" sous forme analogique

Avant le début des années 70, les photographies aériennes étaient les seuls documents utilisés pour obtenir une "vision aérienne" des paysages. Actuellement, elles conservent toute leur efficacité, en particulier pour les études détaillées, et l'utilisation de clichés à des échelles égales ou supérieures au 1/20000 donne de très bons résultats. Les objets sont facilement identifiables et l'observation stéréoscopique d'un massif forestier est actuellement le seul moyen d'obtenir des informations correctes sur la physionomie de la canopée, sur l'état des peuplements ou sur la présence de phénomènes d'anthropisation.

L'information donnée par les photographies dépend de l'émulsion photographique sélectionnée. L'utilisateur a le choix entre quatre émulsions :

L'émulsion panchromatique noir et blanc (P) est la plus utilisée. Elle couvre l'étendue du spectre visible en reproduisant des niveaux de gris. Elle possède une bonne définition et sa bonne conservation est un avantage non négligeable dans les pays tropicaux.

L'émulsion infrarouge noir et blanc (IR) possède une forte réaction dans la partie infrarouge du spectre. Elle est sensible à l'humidité et à la fonction chlorophyllienne.

La forêt tropicale riche en chlorophylle aura une forte réflectance et donnera une image claire sur la photo. Cette émulsion permet de séparer facilement certains peuplements spécifiques (mangroves, parasoliers,...).

Lorsque le budget d'un projet permet la réalisation d'une prise de vues, il y a possibilité de doubler une mission aérienne panchromatique par une mission infrarouge.

L'émulsion couleur enregistre les longueurs d'onde du spectre visible et, si les conditions météorologiques sont favorables, donne une grande richesse d'informations avec des tons proches des couleurs naturelles. Son coût plus élevé est néanmoins une contrainte à son utilisation ¹.

L'émulsion infrarouge couleur (IRC) combine les avantages de l'infrarouge et de la couleur. Les photos présentent une gamme très étendue de nuances qui mettent en évidence des phénomènes n'apparaissant pas sur les autres émulsions comme les dégâts sanitaires de certains peuplements.

Dans le cadre d'un projet d'aménagement, les photographies aériennes sont principalement utilisées pour réaliser la stratification du massif forestier. Si l'échelle est adaptée, la physionomie de la canopée, la densité et la taille des houppiers, la hauteur des peuplements sont des critères parfaitement identifiables sur des clichés.

Elles permettent également de préciser le relief qui, compte tenu de l'échelle de travail, se trouve souvent simplifié sur les cartes topographiques.

Toujours par rapport aux cartes topographiques, les photographies récentes sont souvent utilisées pour mettre à jour certaines informations comme les limites du massif, le tracé des pistes, les villages et les zones cultivées.

¹ Coûts approximatifs des quatre émulsions ramenés pour comparaison à l'émulsion panchromatique (indice 100)

Panchromatique Noir et Blanc	100
Infrarouge Noir et Blanc	120
Couleurs naturelles	275
Infrarouge couleur	300

Source : Télédétection, Technique et Applications cartographiques, Forhom, BDPA.

Un autre avantage, et pas des moindres, est de pouvoir analyser d'anciennes missions aériennes afin de connaître l'histoire de la région sur le plan de l'occupation du sol. Une comparaison avec la situation actuelle permet de mettre en évidence certains phénomènes tels que la progression de la forêt sur la savane ou au contraire son appauvrissement après l'exploitation de certains massifs.

La commande d'une prise de vues aériennes classiques en zone équatoriale constitue un pari (météo) et son coût toujours assez élevé² est un sérieux handicap qui contraint à utiliser des photographies déjà existantes. Le choix des dates, de l'échelle et de l'émulsion s'en trouve, par conséquent, limité.

2.12 - Prises de vue à basse altitude

Elles constituent un excellent compromis entre les missions aériennes classiques à la mise en action trop lourde et les données satellitaires.

Réalisées par des sociétés commerciales ayant leur base technique en Afrique, elles requièrent un investissement financier moindre.

Ces prises de vue à basse altitude permettent de travailler à des échelles et à des dates plus appropriées aux besoins de l'étude.

Elles sont utilisées avec succès pour des suivis écologiques, notamment sous forme de transects systématiques.

Bien que les survols de reconnaissance soient souvent pratiqués lors de projets forestiers, l'acquisition de clichés à basse altitude est encore sous-exploitée.

Ceci est dommage car lors d'un survol les observations relevées par les personnes à bord manquent souvent de précision et surtout sont difficilement utilisables par d'autres.

Pourtant cet outil, assez facile à mettre en oeuvre, constitue une sorte de "vérité-terrain" supplémentaire, notamment dans les zones difficilement accessibles.

C'est aussi un niveau de perception intermédiaire entre le terrain, les photographies aériennes classiques, si elles existent, et les données satellitaires.

Actuellement le matériel photographique et les émulsions utilisées offrent une qualité de clichés parfaitement exploitables.

Un choix doit être fait entre l'altitude, l'objectif photographique et les possibilités d'identification des objets au sol. A titre d'exemple avec une focale de 70 mm, à une altitude de 300 m, on obtient des clichés au 1/20 000 couvrant chacun 1,5 km².

Si on ne peut pas faire appel à une société spécialisée équipée, il est toujours possible de réaliser soi-même le survol en utilisant soit des appareils de prises de vues standard 35 mm (objectifs 70 mm ou 28 mm), soit des appareils plus perfectionnés, type Hasselblad 70 mm (objectif 100 mm). Ce dernier présente le gros avantage de pouvoir photographier une surface 3,5 fois plus grande.

² Le coût d'une prise de vue comprend la mobilisation de l'avion et dans les régions équatoriales les conditions climatiques peuvent immobiliser l'avion et son équipage pendant une longue période. Ce coût est donc très variable suivant les situations (environ 0,45 F/ha pour une couverture au 1/40 000 sur une superficie de 2 000 000 ha).

Les sociétés spécialisées proposent souvent un plus grand choix d'appareils de prises de vues, équipés de focales différentes (88, 152, 300,...) et pouvant travailler avec tous les types d'émulsions. On est donc en droit d'espérer une meilleure qualité des produits.

Le repérage des clichés, qui a longtemps posé des problèmes, est maintenant facilité par le couplage d'un GPS³ aux appareils de prises de vues durant le vol.

2.13 - L'orthophotographie numérique

Une orthophotographie numérique est une image couleur ou noir et blanc, obtenue par numérisation et orthorectification (mise en projection) des photographies aériennes.

Auparavant les orthophotographies étaient produites en utilisant des instruments opto-mécaniques très coûteux, actuellement leur fabrication est entièrement automatisée.

Dans un premier temps les photographies aériennes analogiques sont scannérisées.

Pour leur recalage, un certain nombre de points d'appui sont relevés sur le terrain avec un GPS.

Ensuite toutes les opérations de traitements, aérotriangulation, Modèle Numérique de Terrain, rectification des images, production de courbes de niveau, sont réalisées par un logiciel. L'IGN a mis au point son propre logiciel, Orthomat.

Le produit final combine donc la valeur informative de la photographie aérienne et la qualité géométrique de la carte.

Il peut être utilisé pour remplacer ou actualiser une carte topographique. La précision est excellente : au 1/40 000 on obtient un pixel terrain de 1 m et au 1/10 000 de 25 cm !

Les fichiers sont également récupérables dans des logiciels de traitement d'image ou des SIG.

Le coût est d'environ 3000 F pour un couple photo. Ce produit est souvent apprécié notamment pour les études en zone montagneuse.

2.14 - Photographies aériennes numériques

Les appareils photos numériques utilisent à la place d'une pellicule photosensible une matrice CCD (*charge coupled devices*) fixe, constituée de détecteurs élémentaires dont le nombre détermine la résolution spatiale de l'appareil.

Les images sont obtenues directement sous forme numérique, et font ainsi profiter de la facilité d'utilisation liée à ce format de données : vérification des images en temps réel et transfert électronique des images sur des supports d'enregistrement réutilisables.

De plus, ce type d'appareil étant basé sur un système électro-optique sans éléments mobiles, est généralement plus robuste que les appareils photo classiques.

³ GPS : Global Positioning System

Les appareils numériques sont aujourd'hui utilisés plutôt pour la prise de vue basse altitude et ne sont pas encore techniquement au niveau de pouvoir concurrencer les appareils à chambre photogrammétrique aérienne tel que le Hasselblad ; et ce pour deux raisons principales :

- les appareils numériques ont un champ de vue relativement restreint, et ne permettent pas facilement la perception stéréoscopique du terrain observé,
- les matrices CCD les plus denses ont à l'heure actuelle environ 5000 x 5000 détecteurs, alors qu'il en faudrait environ seize fois plus (20000 x 20000) pour avoir une résolution spatiale comparable aux appareils analogiques.

Néanmoins, la photographie numérique fait d'énormes progrès depuis quelques années, et il est probable qu'à terme, elle offrira une alternative intéressante à la photographie aérienne classique.

2.15 - La vidéographie aérienne

L'enregistrement vidéo à partir d'avions ou d'hélicoptères commence aussi à devenir une pratique répandue en raison principalement de son faible coût d'utilisation par rapport à la photographie aérienne, tout en présentant la plupart des avantages de la prise de vue à basse altitude mentionnés précédemment.

Cette technique qui, il y a quelques années encore, souffrait d'un inconvénient majeur avec une résolution spatiale médiocre, a récemment profité des avancées technologiques dues aux produits de grande consommation tels que l'appareil photo et le caméscope numériques. Cette tendance ira en s'accroissant avec l'arrivée de la télévision haute définition (TVHD).

La vidéographie ne fournit cependant pas des informations de la qualité de celle des photographies aériennes. Elle est toutefois fort utile lorsqu'il s'agit d'obtenir rapidement des données le long de transects, notamment dans les zones d'accès difficile. Elle peut compléter également une prise de vues aériennes quand cette dernière n'offre pas la précision et la qualité attendues.

Cette technique jouit avant tout d'une grande flexibilité d'utilisation, avec la possibilité de suivi en vol des zones observées au travers d'un écran embarqué. De plus, un interface simple avec un GPS donne la localisation en temps réel des acquisitions, permettant ainsi le repérage de zones intéressantes à étudier plus précisément au sol.

Les relevés GPS peuvent être soit enregistrés sur la bande sonore de la vidéo, soit simplement incrustés dans l'image.

Souvent lorsque le temps est défavorable, la mission peut quand même avoir lieu si l'avion arrive à voler sous les nuages.

Ces avantages font de la vidéographie un outil de choix dans deux applications courantes: le survol de reconnaissance d'un massif, et l'acquisition ciblée de données supplémentaires utiles à l'analyse d'images satellitaires.

2.16 - Données radar aéroportées

Les systèmes radar fonctionnent avec des ondes du domaine électromagnétique des micro-ondes, alors que les appareils photo ou vidéo fonctionnent dans le domaine optique.

Cela permet à l'instrument radar d'acquérir des images de nuit comme de jour et quelle que soit la couverture nuageuse. C'est un avantage appréciable lorsqu'on sait que la probabilité d'obtenir des images optiques sans nuages est très faible pour les zones de forêts tropicales denses humides.

Un autre avantage des images radar qui peut intéresser le forestier concerne le pouvoir de pénétration de l'onde radar dans la canopée. En fonction de la longueur d'onde, l'onde émise par le radar pénètre plus ou moins la canopée, et est sensible dans une certaine mesure à la biomasse, à la structure et à l'état hydrique du couvert. C'est donc une information différente et complémentaire de celle fournie par les images optiques.

La plupart des radars aéroportés actuels sont des systèmes expérimentaux servant à la mise au point de radars spatiaux. L'exploitation de ces images radar se fait donc essentiellement dans les laboratoires de recherche, et ne connaît encore que peu d'applications opérationnelles. Cependant, plusieurs systèmes radar interférométriques aéroportés récents (TOPSAR, DOSAR, AeS-1) peuvent fournir des images à très haute résolution spatiale (jusqu'à 1 m) et des modèles numériques de terrain (MNT) précis. Ce sont des systèmes très sophistiqués qui devraient devenir rapidement opérationnels. En outre, une société commerciale canadienne (Intermap) exploite un radar aéroporté à des fins cartographiques qui peut produire par radargrammétrie le modèle numérique (MNT) de la surface observée.

Les images radar utilisées de nos jours proviennent pour la plupart de capteurs satellitaires. Elles sont présentées dans la partie suivante.

2.2 - Les données satellitaires

2.21 - Domaine optique

Jusqu'à ce jour les images satellitaires utilisées dans les études à l'échelle d'un massif forestier, proviennent presque exclusivement des satellites SPOT et LANDSAT.

Ces capteurs fonctionnent dans les domaines "visible-infrarouge" ou domaine "optique", avec des récepteurs sensibles aux rayonnements électromagnétiques de longueurs d'onde allant de 0,4 à 2,4 microns.

Leurs images sont qualifiées de haute (10-30m) ou de moyenne (80m) résolution spatiale, par rapport aux images des satellites météorologiques NOAA de résolution spatiale d'environ 1 km, qui ne sont utiles que pour des études à l'échelle d'un grand pays ou d'un continent.

L'ère de la télédétection spatiale a vraisemblablement débuté avec le lancement de LANDSAT 1 en 1972.

Le satellite portait déjà l'instrument MSS (*MultiSpectral Scanner*), qui, relayé par des instruments MSS presque identiques sur les LANDSAT 2, 3, 4 et 5, a fourni des données jusqu'en 1989.

Ce capteur possède quatre bandes dans le visible et le proche infrarouge, et une résolution spatiale d'environ 80 m. La surface couverte par une scène LANDSAT MSS est de l'ordre de 185 x 185 km.

Les LANDSAT 4 et 5, lancés respectivement en 1982 et 1984, toujours en opération actuellement, abritent aussi l'instrument TM (*Thematic Mapper*). Ce nouvel instrument amélioré présente une résolution spatiale de 30 m, et offre surtout sept canaux avec d'étroites bandes spectrales, allant du bleu à l'infrarouge thermique.

Les scènes TM couvrent la même surface que les scènes MSS, mais peuvent être commandées en quarts de scènes séparés de surface 100 x 85 km.

Le satellite SPOT 1 lancé en 1986 présentait de nettes améliorations par rapport aux satellites LANDSAT : une limite de résolution de 10 m, et la possibilité de dépointage latéral de la visée permettant à la fois la stéréoscopie dans le but d'extraire la topographie, et d'augmenter la répétitivité de la couverture d'un même site.

Le système fonctionne soit en mode panchromatique (large bande couvrant tout le domaine visible) avec une résolution spatiale de 10 m, soit en mode multispectral (3 bandes dans le vert, rouge et proche infrarouge) avec une résolution spatiale de 20 m.

La scène SPOT couvre environ 60 x 60 km au sol. SPOT 2 et 3, identiques à SPOT 1 ont été lancés en 1990 et 1993. Les produits cartographiques dérivés des images SPOT sont généralement de bonne qualité géométrique et répondent aux normes cartographiques des échelles inférieures à 1:50 000.

L'intérêt de travailler sur ces données est d'abord d'avoir une image récente de la zone du projet pour un coût très abordable (environ 4 F du km² pour une scène SPOT en mode multispectral). Si les images sont disponibles et de bonne qualité, et ce n'est pas toujours le cas (nuages, saison défavorable, absence de données) le choix entre les systèmes LANDSAT ou SPOT, est guidé par les aptitudes spectrales et spatiales des deux systèmes.

La caractérisation des types de végétation se fera plus finement avec LANDSAT puisque les bandes spectrales sont plus nombreuses.

Quant à la résolution spatiale, en mode multispectral, elle est sensiblement équivalente (30m-20m).

Le nombre d'images à commander et à traiter peut être un critère de choix. Pour des grandes zones il est plus commode d'utiliser LANDSAT qui est équipé d'un système à balayage d'une fauchée de 185 km. Pour une même superficie il faudra neuf fois moins de scènes avec LANDSAT qu'avec SPOT.

Par rapport aux photographies aériennes, les images satellitales donnent une information à la fois globale et non sélective du paysage, et constituent donc un excellent support pour les projets qui s'inscrivent dans une démarche intégrée.

Les données sont enregistrées sur support numérique mais l'utilisateur peut les acquérir également sous forme de tirages photographiques et les exploiter visuellement.

Il a été constaté que les meilleurs résultats étaient obtenus avec la combinaison de données satellitales/photographies aériennes/mesures au sol, chaque échelle d'observation fournissant une vision différente mais complémentaire du milieu étudié.

Par contre la combinaison données satellitales/mesures au sol est souvent décevante notamment en forêt dense humide ; le zonage obtenu reste assez grossier : forêt sur sol ferme, forêt sur sol humide, non forêt, savanes, zones cultivées, jachères, villages, pistes. Parfois certains peuplements se distinguent, en partie à cause de leurs conditions édaphiques, comme les limbalis en forêt dense centrafricaine (scène SPOT). Il ne faut malgré tout pas espérer, pour l'instant, des résultats plus fins en la matière.

C'est probablement pour le suivi de phénomènes que les données satellitales sont le plus fréquemment utilisées. La possibilité de les acquérir de façon régulière permet d'envisager la mise à jour des documents cartographiques produits et de suivre l'évolution de la zone du projet.

En l'absence de cartes très précises les images satellitales fournissent un document géométriquement correct qui peut être amélioré par la prise de points GPS sur le terrain.

2.22 - Les spatiocartes

Pour se rapprocher encore plus de la carte, il est possible de se procurer des documents cartographiques géoréférencés, appelés spatiocartes, sur lesquels l'information planimétrique classique est remplacée par l'image satellitaire.

Ces spatiocartes se présentent sous forme analogique ou numérique, à des échelles allant du 1/25 000 au 1/250 000.

On peut les classer en deux catégories :

- les spatiocartes à vocation topographique sur lesquelles le fond image est prépondérant,
- les spatiocartes à vocation thématique avec une représentation d'un ou plusieurs thèmes sur un fond image discret.

Elles permettent d'alimenter en informations "à jour" les SIG et les bases de données, et constituent les fonds de référence sur lesquels seront calées toutes les autres données.

Leur réalisation, rapide si les données sont disponibles, et leur coût nettement inférieur à celui d'une carte réalisée avec des moyens traditionnels, en font des produits cartographiques opérationnels dans les projets pour lesquels la cartographie est ancienne et peu précise.

2.23 - Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Concernant les fonds topographiques disponibles sur les zones forestières d'Afrique Centrale, nous avons évoqué précédemment le problème de leur précision, notamment au sujet de la représentation du relief. Or, cette information est importante notamment pour bâtir des propositions d'aménagement d'un massif en vue de son exploitation.

Pour pallier cet inconvénient, il est possible, grâce à des MNT, d'obtenir des données plus précises sur le relief.

Un MNT se définit comme une représentation numérique du relief sous forme d'une grille régulière sur laquelle une altitude est donnée pour chaque noeud de la grille.

La technique la plus répandue pour le calcul des altitudes se base sur la notion de stéréoscopie; photographies aériennes, images SPOT, images radar peuvent être utilisées pour la production des MNT.

Il existe sur des images d'une même zone, prises de deux points de vues différents, une disparité entre les couples de points homologues (identifiés par stéréorestitution ou par corrélation automatique). Cette disparité est transformée, pour chaque point de la surface, en une position absolue sur la Terre, à l'aide d'un modèle géométrique de prise de vues.

Les MNT⁴, construits à partir des données SPOT panchromatiques, sont donnés avec une précision altimétrique de l'ordre de 10 m (20 m en mode multispectral).

Les altitudes sont représentées soit par des courbes de niveau, soit par des valeurs dans un maillage de 20 par 20 m (40 m en multispectral).

Dans le cadre de l'amélioration des images SPOT, ils sont utilisés pour éliminer les effets de l'altitude sur la radiométrie et sur la géométrie des images.

L'image SPOT rectifiée à partir d'un MNT permet d'obtenir une orthophoto SPOT dont la précision planimétrique est de l'ordre du pixel.

Enfin, la combinaison MNT-image SPOT peut fournir une image du paysage en trois dimensions.

Certains logiciels de traitement d'image ont des modules dédiés à la construction de MNT à partir de couples images stéréoscopiques (SPOT, RADARSAT ou photographie aérienne).

4

Les fichiers maillés sont fournis par SPOT-IMAGE pour 65 KF en mode multispectral et 71 KF en mode panchromatique.

2.24 - Domaine des micro-ondes

Depuis le début des années 90, le développement marquant de la télédétection spatiale concerne l'utilisation d'images radar qui ne sont pas perturbées par la présence de nuages.

Les images fournies par les instruments radar se différencient principalement par leurs configurations :

- de longueur d'onde : bande L $\sim$ 23 cm, bande C $\sim$ 6 cm
- de polarisations⁵ transmises et reçues, horizontales (H) ou verticales (V),
- de résolution spatiale allant de 10 à 100m,
- d'angle d'incidence allant de 20° à 60°.

A ce jour, les images radar sont acquises de manière opérationnelle à partir de trois satellites différents : le satellite européen ERS-2, le satellite japonais JERS-1 et le satellite canadien RADARSAT. Ainsi, les radars d'ERS-1 (actuellement en 'veilleuse') et d'ERS-2 fonctionnent en bande C, polarisation VV, avec une résolution spatiale d'environ 30 m et un angle d'incidence de 23°. Le radar de JERS-1 fonctionne lui en bande L, polarisation HH, avec une résolution spatiale d'environ 25 m et un angle d'incidence de 38°. Le dernier en orbite, RADARSAT fonctionne en bande C, en polarisation HH, et a l'avantage de fournir des données avec différents angles d'incidences (20° à 60°) et résolutions spatiales (10 à 100 m). Ces caractéristiques prédéterminent la qualité et la signification des informations contenues dans les images.

Il existe certaines limitations spécifiques aux images radar qui gênent l'utilisation de celles-ci. Tout d'abord les SARs actuellement en orbite n'ont qu'une configuration mono-canal (une seule combinaison de fréquence, polarisation et angle incidence). Utilisée seule, une image ne contient qu'une information restreinte difficilement exploitable, mais lorsqu'elle est combinée avec plusieurs images de la même zone acquises à des dates différentes, on obtient une information plus riche et suffisante pour bon nombre d'applications. Ensuite, les images radar contiennent un bruit caractéristique nommé '*speckle*' lié à la nature cohérente des ondes radar utilisées. Ce bruit gêne fortement l'interprétation des images. Il est donc nécessaire, soit de diminuer ce bruit par filtrage avant la classification de l'image, soit d'utiliser des algorithmes de classification d'image adaptés à ce bruit. Enfin, les images radar subissent des distorsions dues au relief, qu'il s'agit de diminuer en utilisant des rapports de canaux, ou bien, en effectuant des corrections complètes basées sur un MNT.

La principale utilisation d'images radar satellitaires en forêt dense humide concerne la cartographie de l'occupation du sol à moyenne échelle ($\sim$ 1:100000). Cependant, seules des classes très générales peuvent être discriminées : forêts primaires, forêts fortement dégradées, plantations, forêts marécageuses ou de mangrove, zones urbaines ou agricoles. Par ailleurs,

5

La polarisation d'une onde électromagnétique indique l'orientation privilégiée de son champ électrique. Par exemple VV correspond à une polarisation verticale à l'émission et verticale à la réception.

elles permettent le suivi de la forêt lorsque celle-ci subit des transformations importantes : coupes dues à la culture itinérante, aux exploitations importantes ou aux feux de forêts.

Les inconvénients majeurs qui freinent la généralisation de l'utilisation des images radar sont aussi liées à la nouveauté et la complexité de celles-ci. Les premières images satellitales optiques posaient peu de problèmes d'interprétation aux utilisateurs habitués aux photos aériennes. Par contre, les nouveaux utilisateurs d'images radar peuvent être désarmés par un manque de repères ; les images sont bruitées, les configurations sont multiples et surtout la nature de l'information à analyser est différente. La plupart des systèmes de traitement d'images (STI) de télédétection actuels ne sont pas adaptés au traitement des images radar, et les utilisateurs sont souvent obligés de développer eux-mêmes leurs outils d'analyse. Depuis peu les STI les plus connus (ERDAS Imagine, PCI ou ER Mapper) proposent des modules spécifiques pour le traitement d'images radar.

2.25 - Développements futurs

Les prochains progrès attendus dans le domaine de l'observation de la terre concerne d'une part, l'arrivée 'imminente' des entreprises privées sur le marché de l'imagerie spatiale haute résolution (mais pour laquelle nous ne possédons pas plus d'informations) et d'autre part le lancement de nouveaux satellites des programmes spatiaux en cours, Landsat et SPOT.

Pour assurer la relève de Landsat 5 en opération depuis plus de douze ans (Landsat 6 lancé en 1992 n'a pu être mis en opération), Landsat 7 est prévu pour être mis sur orbite courant 1998. Ce satellite comprendra un capteur TM amélioré (ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus), qui par rapport au TM des Landsat 4 et 5 comprend un canal panchromatique supplémentaire de résolution spatiale 15 m, et dont les canaux 6 et 7 (infrarouge thermique et moyen infrarouge) respectivement ont une résolution spatiale améliorée (60 m et 15 m).

SPOT 4, lancé fin mars 1998 et SPOT 5, prévu pour 2001, présentent des améliorations notables par rapport aux SPOT 1-3. Ils ont tous deux une bande supplémentaire dans le moyen infrarouge, utile pour l'observation de la végétation. SPOT 4 abrite un instrument supplémentaire 'VEGETATION' ayant une résolution spatiale d'environ 1 km, une répétitivité journalière et des bandes de fréquences identiques à celles du capteur haute résolution. Cet instrument sera particulièrement utile pour le suivi de la végétation globale. SPOT-5 fournira des données avec des résolutions spatiales améliorées : 5 m en panchromatique et 10 m en multispectral. La résolution de 5 m sera probablement intéressante pour les forestiers puisqu'on commencera à pouvoir se rapprocher de la dimension des houppiers de taille moyenne.

3. Le Système d'Information Géographique comme outil de gestion et d'aménagement d'une forêt tropicale humide

La principale limite de la cartographie traditionnelle réside dans son caractère relativement figé. En effet, les cartes sont souvent longues à réaliser, difficiles à archiver ou à diffuser, et nécessitent une opération assez lourde pour leur mise à jour. Elles s'avèrent par conséquent assez inadaptées aux besoins actuels. Le développement de l'informatique entraînant celle de la cartographie numérique, de nouvelles possibilités sont apparues durant la dernière décennie. D'abord, pour rendre plus rapides et plus souples les travaux de dessin et de restitution cartographique, à travers les logiciels de CAO (Cartographie Assistée par Ordinateur) ; ensuite, pour faciliter la gestion des informations (attributaires) relatives aux objets géographiques d'une carte, à travers un SGBD⁶. Il est vite apparu que l'articulation de ces deux types d'outils pouvait engendrer une nouvelle façon de manipuler l'information géographique à des fins d'analyse statistique et/ou spatiale. Plus qu'un regroupement, c'est l'intégration complète de plusieurs types d'outils qui fait la grande utilité des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

3.1 - Caractéristiques des SIG

La définition d'un SIG illustre bien le rôle de cet outil dans des projets d'aménagement : "système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace"⁷.

Le SIG est composé, d'une part, de la base de données géographiques, et d'autre part, d'un ensemble d'outils permettant l'utilisation de celle-ci. La base de données géographiques, élément central du SIG, comprend des données spatiales (forme et position des objets géographiques), ainsi que des données thématiques (attributs associées à ces objets). Les outils disponibles permettent de réaliser essentiellement quatre ensembles de tâches :

- la saisie numérique, l'entrée et le pré-traitement des données ;
- la gestion de la base de données attributaires ;
- l'analyse spatiale basée sur les données attributaires et spatiales ;
- la représentation et l'édition de cartes à l'écran et sur support papier.

Les données spatiales sont représentées dans un SIG suivant deux modes : vecteur ou raster.

⁶ SGBD : Système de Gestion de Base de Données

⁷ Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection. 1989

En mode **vecteur**, les objets sont définis par des points, par des arcs ou des polygones. A chaque objet est alors assigné un identifiant unique, à travers lequel lui sont associées des caractéristiques attributaires quantitatives et/ou qualitatives. Le mode vecteur est de ce fait plus adapté à la représentation de variables discrètes. Il permet de représenter les objets tels qu'on les perçoit dans le monde réel.

Ce n'est pas le cas avec le mode **raster** (ou matriciel) qui utilise quant à lui des cellules de taille et de forme identiques pour représenter l'espace, en le découpant de manière régulière. Généralement de forme carrée, les cellules (ou 'pixels') sont organisées en lignes et colonnes. A chaque pixel correspond une valeur unique. Les images satellitales ou scannées sont des exemples de données représentées en mode raster.

Tous les logiciels SIG ne gèrent pas les deux modes de représentation. Traditionnellement construits autour du mode vecteur, de plus en plus de logiciels commencent à proposer des fonctionnalités adaptées à la représentation raster, en particulier, un géoréférencement commun permettant la superposition et l'utilisation simultanée de ces deux types de couches d'informations.

3.2 - Leur utilisation dans un projet d' aménagement forestier

3.21 - Acquisition des données

Dans un premier temps la stratification des formations végétales, généralement issue de l'interprétation de photographies aériennes, est restituée sur un fond de carte topographique (IGN) et numérisée par digitalisation en mode vecteur. Elle constitue souvent la carte de base du système d'informations géographiques en élaboration. Cette opération parfois longue et fastidieuse permet d'obtenir directement la superficie et le périmètre des différentes strates, et cela assez rapidement par rapport aux méthodes traditionnelles (grilles de points, planimètre). Ensuite, un inventaire statistique systématique (souvent à faible taux de sondage, inférieur à 5%, pour des raisons évidentes de coût) est mis en oeuvre sur le terrain.

Cette opération consiste à recueillir des informations sur le diamètre et les espèces inventoriées des arbres dans des placettes (unité élémentaire de sondage) mises en place suivant un plan de sondage établi en fonction des objectifs de l'inventaire.

Par exemple, dans le cas de layons parallèles, leurs extrémités doivent de préférence être repérables sur les cartes. Une fois les layons ouverts sur le terrain à l'aide d'une boussole, leur positionnement peut être vérifié par des relevés au GPS.

Les points repérés avec le GPS sont ensuite directement transférés dans le SIG; les layons et placettes y sont intégrés en tenant compte des formations végétales recensées.

Aux placettes ainsi géoréférencées on affecte individuellement un identifiant unique (numéro de layon + numéro de placette). Leurs caractéristiques relevées sur le terrain (incendie, densité de la végétation arbustive/herbacée, code strate, hauteur moyenne, trace d'animaux,...) sont saisies dans le système de gestion de base de données.

Les informations liées aux arbres (espèce, diamètre) recueillies lors de l'inventaire sont également saisies dans un système de gestion de base de données et alors traitées informatiquement.

3.22 - Quelques fonctionnalités du SIG

Une des premières fonctionnalités utilisée dans le SIG concerne le calcul immédiat de la surface des strates végétales. D'autres fonctions, souvent utilisées, sont présentées ci-après.

La fonction combinaison des couches 'unités de sondage' et 'stratification végétale', enrichit la base de donnée liée aux placettes en affectant à chaque placette le code strate correspondant. Il est alors possible de comparer cette nouvelle donnée avec celle recueillie sur le terrain (souvent difficile à déterminer et parfois subjective), d'établir une table de correspondance et d'apporter les corrections nécessaires.

La **fonction d'éclatement** d'une couche géographique par une autre permet de scinder une zone en fonction de contraintes naturelles (route, rivière) pour optimiser le parcellaire d'aménagement par exemple. Cette fonction est aussi employée pour connaître rapidement la proportion de chaque strate végétale par parcelle lors de l'élaboration du parcellaire.

La **fonction d'agrégat** offre la possibilité d'agréger les données au niveau de chaque unité de sondage, d'obtenir une valeur dendrométrique (volume, effectif, surface terrière) par hectare et de calculer au sein d'une parcelle d'aménagement une valeur dendrométrique à partir des données des unités de sondage inclus dans son périmètre.

La **fonction de création de zone tampon** est très utile lorsqu'on souhaite connaître les potentialités exploitables de part et d'autre d'une route dans un rayon donné.

Ces fonctions, élémentaires d'analyses spatiales, peuvent ensuite être combinées pour réaliser des opérations plus sophistiquées telles que l'optimisation du réseau de pistes d'exploitation, le découpage de la forêt aménagée en parcelle de rotation équivalente, Beaucoup d'applications ne sont pas directes et demandent des développements spécifiques basés sur des recherches méthodologiques.

3.23 - Restitutions cartographiques

En associant les données issues de l'inventaire ou d'enquêtes réalisées sur le terrain aux éléments géoréférencés (unités de sondage, parcelles d'aménagement, villages) on restitue visuellement ces informations par des cartes.

Ces restitutions peuvent se rapporter à la stratification, à la localisation de la ressource suivant différents critères (espèces, exploitabilité, peuplements d'avenir), à la densité de population (pression anthropique), à la présence d'incendie ou d'animaux,

Ces documents aident à caractériser le milieu étudié et peuvent parfois expliquer certains phénomènes : absence d'arbres exploitables en raison de fortes pressions anthropiques, régénération faible de certaines essences due à des incendies répétés, ...

4. Exemple de mise en oeuvre de ces outils dans un projet d'aménagement forestier en Afrique Centrale : aménagement pilote de la Sangha-Mbaéré en République Centrafricaine.

Durée du projet : 3 ans

Objectif général du projet : réaliser sur 110 000 ha l'aménagement-exploitation d'un massif forestier.

Après un pré-inventaire sur plusieurs layons, cette zone a fait l'objet d'un inventaire statistique au taux de sondage de 2,5 % avec, en complément pour une comparaison des résultats, un inventaire en plein sur 1500 ha.

Les autres sources d'information utilisées ont été :

■ ***les cartes topographiques IGN au 1/200 000***

Deux cartes sont nécessaires pour couvrir la zone :

- Yokadouma (NA-33-XXII), révisée en 1972.
- Nola (NA-33-XXIII), restitution en 1967.

Leurs dates de mise à jour sont différentes.

Pour obtenir un fond topographique au 1/50 000 il a été nécessaire de procéder à un agrandissement des cartes au 1/200 000, augmentant par la même occasion les imprécisions.

Le fond topographique IGN a été digitalisé au 1/200 000 (logiciel ATLAS-GIS).

■ ***les photographies aériennes panchromatiques de 1989 au 1/50 000***

Cette mission, acquise pour un autre projet en République Centrafricaine, est la plus récente sur cette zone. Une quarantaine de clichés ont été analysés et leur interprétation transférée sur le fond topographique, agrandi au 1/50 000. Ce travail a été réalisé par Barthélémy Dipapoundji de l'ICRA (Institut Centrafricain de la Recherche Agronomique - Bangui - RCA), sous la responsabilité de Michelle Pain-Orcet

Les critères retenus pour réaliser la stratification forestière du massif sont basés essentiellement sur l'aspect global du couvert et la densité des ligneux de la strate dominante. Les unités cartographiées ont été les suivantes :

- forêt dense en trois classes suivant la densité des arbres de l'étage dominant,

- forêt secondaire,
- recrû forestier,
- formations forestières sur relief,
- forêt inondable,
- savanes,
- cultures, jachères,
- peuplements spécifiques : Limbalis, Parasoliers, Ayous.

La maquette de cette carte a ensuite été digitalisée.

■ **Image SIR-C de 1994**

Cette image provenant de la navette spatiale couvre le tiers de la zone. Elle a été acquise en bandes L et C, polarisation HH et HV. Sa résolution spatiale est de l'ordre de 50 m.

L'image fournit une bonne vue d'ensemble de la zone et met en évidence le relief. Le réseau hydrographique ressort nettement même lorsqu'il est caché par le couvert forestier. Les zones de savanes et de cultures/jachères se distinguent également bien de la forêt.

Cette image a été testée sur ce projet pour évaluer l'intérêt des données radar pour une stratification du massif forestier. Quand elle a été acquise nous ne pensions pas avoir la possibilité de travailler sur des "données optiques satellitaires".

La légende obtenue à partir de l'analyse de cette image radar est très simplifiée et donne les thèmes suivants :

- forêt (dense, secondaire, recrû),
- formation forestière sur relief,
- forêt inondable,
- culture-jachère,
- savane,
- réseau hydrographique principal,
- piste.

■ **Image SPOT du 2 mars 1996**

Par chance, une image satellitale SPOT 3 de bonne qualité s'est trouvée disponible sur la zone et le projet a décidé d'en faire l'acquisition. Cette image a été acquise en mode multispectral (XS) avec une résolution spatiale de 20 m.

Dans un premier temps l'image a été utilisée pour améliorer la géométrie du fond topographique et de la stratification.

Ensuite l'analyse de la scène a permis de bien retrouver le tracé des pistes d'exploitation ouvertes depuis 1991. Ces pistes avaient été, au cours de l'inventaire, levées au GPS afin de pouvoir les reporter sur la carte, mais leur tracé manquait de précision.

Il a également été possible de bien délimiter et donc d'actualiser les zones cultivées depuis 1989.

Les parties en relief, le réseau hydrographique et les zones de forêt inondable se discernent très bien et fournissent une bonne vision d'ensemble de la zone d'un point de vue morphologique.

Enfin les taches de limbalis ressortent nettement avec une teinte beaucoup plus foncée que celle de la forêt environnante. La radiométrie de ces unités est en fait la résultante de celle des peuplements de limbalis et de celle du sol sur lequel ils sont situés.

D'ailleurs certains peuplements non perçus lors de la photointerprétation ont ainsi pu être rajoutés.

■ **Intégration de toutes ces données dans le SIG**

Ces données qu'elles soient géographiques (fond IGN et stratification, imageries satellitaires, points GPS) ou issues de l'inventaire forestier ont été structurées au sein du SIG. On distingue trois grands types de fichiers :

- * Les **fichiers géographiques** en mode raster (image satellites)
- * La constitution d'un **fichier géographique** en mode vecteur avec le logiciel ATLAS GIS. Il se présente sous la forme de couches numérisées dont les principales sont :
 - réseau hydrographique,
 - topographie,
 - stratification des formations végétales,
 - routes et pistes,
 - points GPS (environ 200),
 - placettes d'inventaire (10 000),
 - villages.

Les relevés GPS ont permis de recalibrer le positionnement des layons d'une part et de localiser le tracé d'une piste d'exploitation récemment ouverte d'autre part. Le tracé de cette piste a pu être également affiné à l'aide des images satellites.

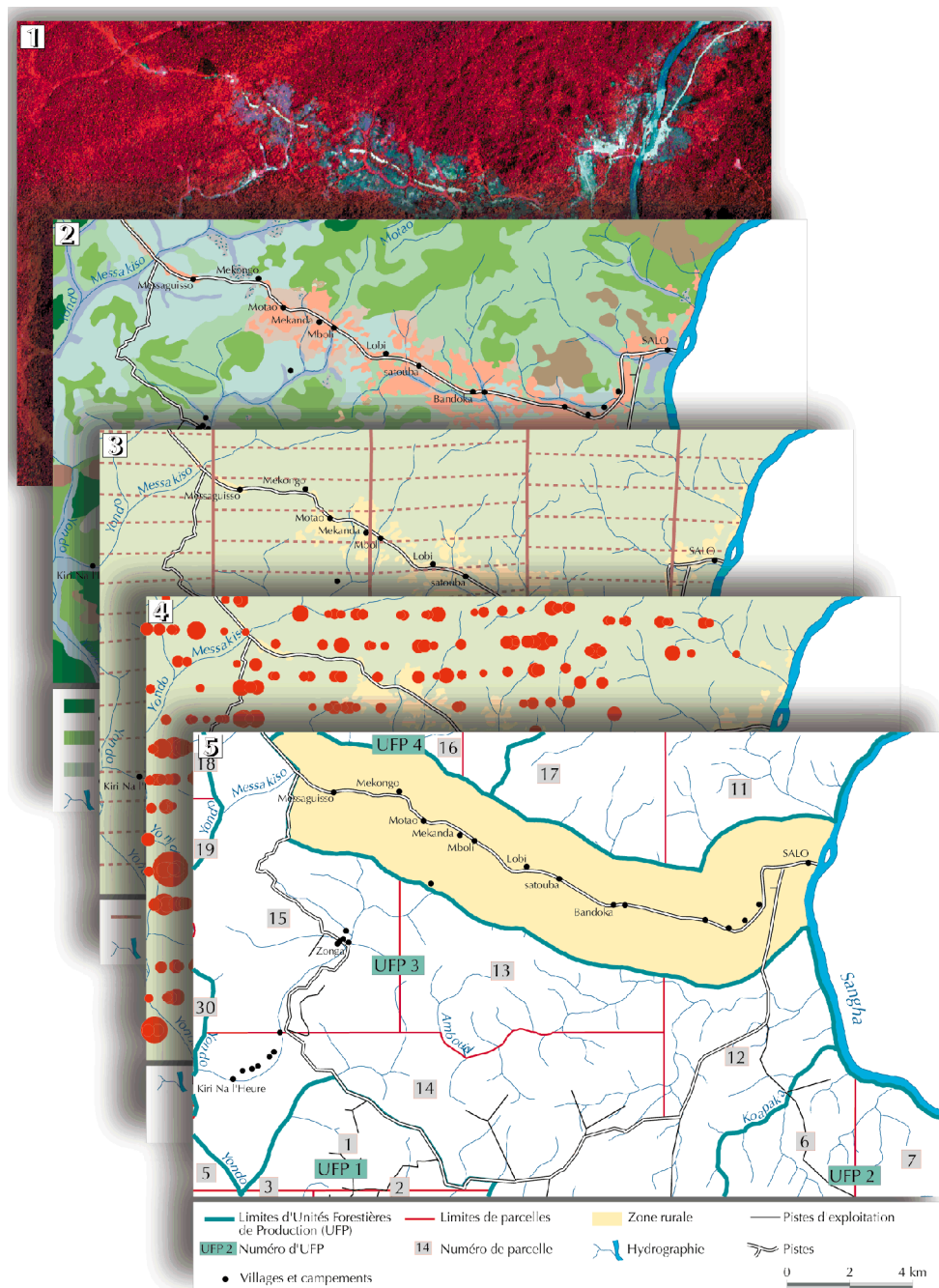
- * La constitution des **fichiers attributaires** avec un SGBD en format Dbase (FOXPRO)
 - . un fichier 'placette' contenant les données descriptives des placettes d'inventaire :
 - numéro de placette,
 - code stratification,
 - état de la végétation arbustive/herbacée,
 - présence/absence de feu,
 - trace d'animaux.

. un fichier 'arbre' donnant pour chaque arbre :

- numéro de placette,
- code espèce,
- diamètre.
- un ensemble de fichiers agrégeant les données dendrométriques (volume, effectif, surface terrière) au niveau de chaque placette ou regroupement de placettes :
- par essence (Sapelli, Ayous)
- par groupe d'essences (cinq principales méliacées, douze essences diverses exploitables).

■ Produits obtenus

- Les **restitutions cartographiques**⁸ ont fourni une série de documents pour l'établissement des propositions d'aménagement. Quelques exemples :

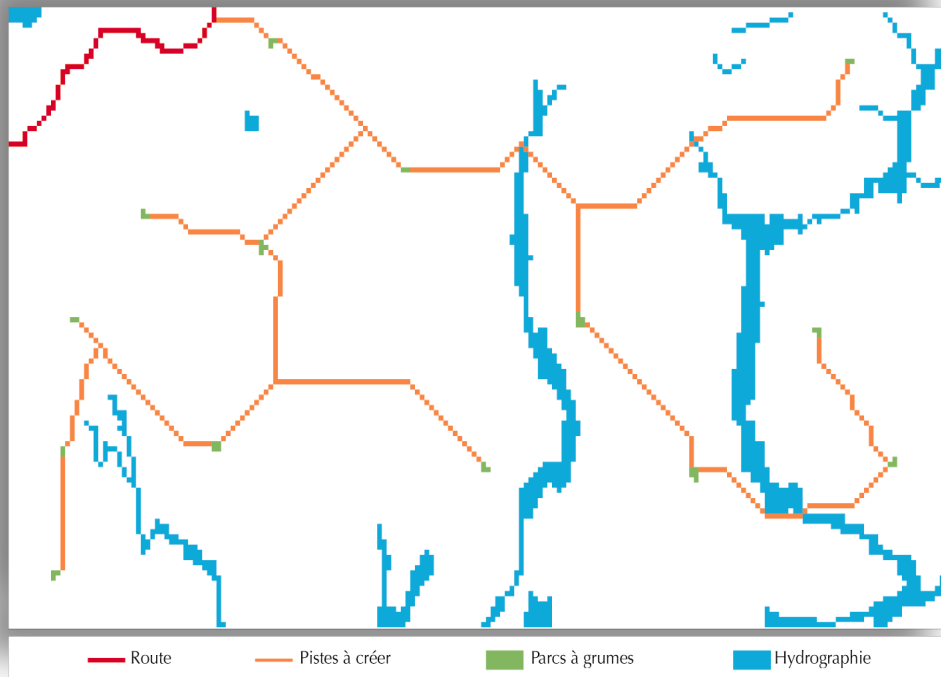


- 1 - image de la zone vue par SPOT 3, d'après une composition colorée.
- 2 - stratification forestière issue de photographies aériennes.
- 3 - schéma du dispositif d'inventaire
- 4 - exemple de répartition de la ressource exploitable
- 5 - proposition d'un parcellaire d'aménagement.

⁸ Cartographie J.F. Trébuchon

- L'optimisation d'un réseau de piste d'exploitation

Au sein du périmètre de 1500 hectares inventorié en plein, une méthode a été mise au point à l'aide d'un logiciel SIG en mode raster (IDRISI) pour minimiser le coût de construction d'une piste en fonction de la ressource exploitable, des contraintes de terrain (topographie, réseau hydrographique) et du réseau routier déjà existant.



4.1 - Conclusion

Ce projet "pilote" est un bon exemple de mise en oeuvre d'outils différents et de développement de méthodes qui ont conduit à l'amélioration de notre savoir-faire dans ce domaine. Ce résultat a été obtenu grâce à la participation d'une équipe pluridisciplinaire ayant des compétences de "terrain", des compétences en biométrie, en statistique, en SIG, en télédétection et en cartographie.

CONCLUSIONS

La remise à jour constante de nos moyens de travail est une adaptation nécessaire pour l'amélioration de nos activités. Chaque projet s'élabore dans un contexte particulier et il s'agit de coordonner l'utilisation d'outils, déjà disponibles ou nouveaux, pour répondre au mieux aux objectifs.

Tous ces outils, développés au sein d'équipes, voient leur utilisation se répandre tout particulièrement dans les projets d'aménagement forestier tropicaux.

L'ampleur de l'investissement, tant humain que matériel, n'est pas à sous-estimer. Les travaux à réaliser représentent généralement des chantiers importants et l'emploi de techniques nouvelles ne doit pas occulter le but recherché. Il est nécessaire de faire la distinction entre un outil, même récent, qui est opérationnel, et un outil, même très prometteur dont l'efficacité reste à établir.

Pour approfondir la connaissance du terrain, d'autres développements doivent accompagner nos travaux, notamment les méthodes de sondage, la métrologie, la typologie forestière, l'intégration des données socio-économiques ou l'étude de la régénération.

En aucun cas, l'utilisation de ces outils ne remplace le travail du chercheur sur le terrain mais constitue un moyen de connaissance pour mieux comprendre et mieux gérer les écosystèmes forestiers tropicaux.

PRINCIPAUX DOCUMENTS CONSULTÉS

BEAUDOIN, A. et LO SEEN D. (1997) “Contribution of Radar Imagery to Tropical Forest Monitoring and Management”, Atelier CIFOR/USAID, Bogor (Indonésie), 17-19 novembre, 6 pages.

BONN, F. et G. ROCHON (1993) “Précis de télédétection”, volume 1, Principes et Méthodes, Presses de l’Université du Québec, AUPELF, 485 pages.

BONN, F. et G. ROCHON (1996) “Précis de télédétection”, volume 2, Applications Thématiques, Presses de l’Université du Québec, AUPELF, 633 pages.

FREYCON, V., N. FAUVET, BERNARD, C. et J.P. LACLAU, (1996), “Les SIG appliqués à la forêt”, note technique, Bois et forêt des Tropiques, n° 250, p. 63-70.

GDТА, (1993) “les Spatiocartes, Méthodes et exemples de réalisation”, Les cahiers pédagogiques du GDТА, 111 pages.

LEO, O., DIZIER, J.L.,”Télédétection. Techniques et Applications cartographiques”, FORHOM, BDPA.

PAIN-ORCET, M. et D. LO SEEN, (1997) “La télédétection et les SIG. Apport pour l’aménagement des forêts tropicales”, Document technique FORAFRI, Cirad-Forêt , 7 pages.

WILMET J. (1996) “Télédétection Aérospatiale - Méthodes et Applications”, SIDES, 300 pages.

Série FORAFRI

Document 1.

Dynamique de croissance dans des peuplements exploités et éclaircis de forêt dense africaine. Dispositif de M'Baiki en République Centrafricaine (1982-1995).

1998. Frédéric Bedel, Luc Durrieu de Madron, Bernard Dupuy, Vincent Favrichon, Henri Félix Maître, Avner Bar-Hen, Philippe Narbonni. 72 p.

Document 2.

Croissance et productivité en forêt dense humide : bilan des expérimentations dans le dispositif d'Irobo. Côte d'Ivoire (1978-1990).

1998. Luc Durrieu de Madron, Vincent Favrichon, Bernard Dupuy, Avner Bar-hen, Henri Félix Maître. 69 p.

Document 3.

Croissance et productivité en forêt dense humide : bilan des expérimentations dans le dispositif de Mopri. Côte d'Ivoire (1978-1992).

1998. Luc Durrieu de Madron, Vincent Favrichon, Bernard Dupuy, Avner Bar-Hen, Louis Houde, Henri Félix Maître. 73 p.

Document 4.

Bases pour une sylviculture en forêt dense tropicale humide africaine.

1998. Bernard Dupuy. 328 p.

Document 5.

Quelques méthodes statistiques pour l'analyse des dispositifs forestiers.

1998. Avner Bar-Hen. 110 p.

Document 6.

Aménagement forestier en Guinée.

1998. Nicolas Delorme. 185 p.

Document 7.

Le projet d'aménagement Pilote intégré de Dimako (Cameroun).

1998. Luc Durrieu de Madron, Eric Forni, Alain Karsenty, Eric Loffeier, Jean-Michel Pierre. 158 p.

Document 8.

L'identification des finages villageois en zone forestière. Justification analyse et guide méthodologique.

1998. Alain Pénelon, Luc Mendouga, Alain Karsenty, Jean-Michel Pierre. 30 p.

Document 9.

Estimation de la qualité des arbres sur pied.

1998. Meriem Fournier-Djimbi, Daniel Fouquet. 22 p.

Document 10.

Les G.P.S. De l'acquisition des relevés à leur intégration dans un SIG.

1998. Vincent Freycon, Nicolas Fauvet. 84 p.

Les bibliographies du CIRAD

Gestion des écosystèmes forestiers denses d'Afrique tropicale humide. 1. Gabon

1998. Bernard Dupuy, Catherine Gérard, Henri-Félix Maître, Annie Marti, Robert Nasi. 207 p.

Document 11.

Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains.

1998. Jean Gérard, A. Edi Kouassi, Claude Daigremont, Pierre Détéienne, Daniel Fouquet, Michel Vernay. 185 p.

Document 12.

Les cartes, la télédétection et les SIG, des outils pour la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale.

1998. Michelle Pain-Orcet, Danny Lo-Seen, Nicolas Fauvet, Jean-François Trébuchon, Barthélémy Dipapoundji. 30 p.

Document 13.

Le SIG, une aide pour tracer un réseau de pistes forestières. Méthodes et résultats.

1998. Vincent Freycon, Etienne Yandji. 70 p.

Document 14.

Parcelles permanentes de recherche en forêt dense tropicale humide. Eléments pour une méthodologie d'analyse de données.

1998. Vincent Favrichon, Sylvie Gourlet-Fleury, Avner Bar-Hen, Hélène Dessard. 67 p.

Document 15.

L'analyse de cernes : applications aux études de croissance de quelques essences en peuplements naturels de forêt dense africaine.

1998. Pierre Détéienne, Faustin Oyono, Luc Durrieu de Madron, Benoît Demarquez, Robert Nasi. 40 p.

Document 16.

Dynamique et croissance de l'Okoumé en zone côtière du Gabon.

1998. Marc Fuhr, Marie-Anne Delegue, Robert Nasi, Jean-Marie Minkoué. 60 p.

Document 17.

Les techniques d'exploitation à faible impact en forêt dense humide camerounaise.

1998. Luc Durrieu de Madron, Eric Forni, M. Mekok. 30 p.

Document 18.

Produits Forestiers Autres que le Bois d'œuvre (PFAB) : place dans l'aménagement durable des forêts denses humides d'Afrique Centrale

1999. Mathurin Tchatat – en collaboration avec Robert Nasi, Ousseynou Ndoye. 95 p.

Document 19.

L'aménagement forestier au Gabon – historique, bilan perspectives

1999. Sébastien Drouineau, Robert Nasi – en collaboration avec Faustin Legault, Michel Cazet. 64 p.

Document 20.

Croissance et productivité en forêt dense humide après incendie

Le dispositif de La Téné – Côte d'Ivoire (1978-1993)

1999. Jean-Guy Bertault, Kouassi Miézan, Bernard Dupuy, Luc Durrieu de Madron, Isabelle Amsallem. 67 p.