Outils pour la gestion durable

La dernière décennie a été marquée par une évolution très rapide des moyens fondés sur la technologie numérique appliquée à la télédétection, la cartographie, les systèmes d'information géographique (SIG) et les bases de données. La pertinence de cette nouvelle technologie doit être sans cesse réévaluée au regard des besoins dans le domaine des aménagements forestiers.

Photo A. Bertrand, 1999.

Photo 1. Région des Lacs du Sud, au Gabon. Permis forestier de la Compagnie Forestière des Abeilles.
Southern Lake District, in Gabon. Forestry permit of the Compagnie Forestière des Abeilles.

L'expérience de télédétection et de cartographie mentionnée dans le premier article a été acquise en forêt dense humide, au travers de plusieurs projets d'aménagement menés notamment en République centrafricaine.

Parallèlement, les données de nombreuses recherches du CIRAD-Forêt, en particulier en Afrique de l'Ouest, en Afrique centrale, en Guyane et en Indonésie sont maintenant structurées en base de données pour être exploitées par les chercheurs.

Simultanément, sur le terrain, des conditions favorables à l'exploitation à faible impact (EFI) sont réunies avec la volonté de nombreuses entreprises de s'engager dans un processus d'éco-certification.

Les cartes, la télédétection et les SIG, des outils pour la gestion durable des forêts tropicales d'Afrique centrale

Concernant l'aménagement des forêts tropicales humides, cet article présente une synthèse du savoir-faire en matière de télédétection et de système d'information géographique (SIG). Il propose des axes de recherche à privilégier, compte tenu des possibilités offertes par ces nouveaux outils et de leurs limites actuelles.

LES CARTES ET LE PROJET D'AMÉNAGEMENT

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

PRÉPARATION

Lors de la préparation du projet, 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 la physionomie du terrain (planimétrie, orographie). En Afrique centrale, la majorité des cartes n'est plus disponible sur le marché. Cependant, l'Institut Géographique National, en France, peut fournir ces cartes sous la forme de photocopies ou de fichiers numériques. 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 documents disponibles 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 couramment adoptée consiste à utiliser des agrandissements. Des problèmes de précision en découlent, notamment pour l'orographie.

Les cartes thématiques ont des échelles très variables. Les cartes géologiques, pédologiques ou même biogéographiques disponibles se présentent souvent à de petites échelles – 1/500 000, 1/1 000 000 – non compatibles avec la précision d'une cartographie d'aménagement. Malgré leur hétérogénéité (sources, dates, projections...), tous ces documents doivent être absolument pris en compte comme sources de données dans le SIG.

EXÉCUTION

Pendant la phase d'exécution du projet d'aménagement, de nouvelles cartes sont réalisées : d'abord pour actualiser ou compléter les cartes existantes, ensuite pour visualiser les données récoltées pendant l'inventaire. Ces cartes sont des outils de travail indispensables pour l'aménagiste. Elles l'aident à répondre aux questions posées, par exemple :

- Quels sont les types de peuplement rencontrés ?
- De quelle nature sont les contraintes pour l'exploitation de la ressource ?
- Quelle est l'importance des activités humaines à la périphérie du massif ?

Les cartes thématiques, appelées parfois « cartes de traitement » ou « cartes d'analyse », permettent d'étudier visuellement et de façon dynamique toutes les composantes de la zone, indispensables à l'élaboration des propositions d'aménagement.

Des cartes montrant la répartition spatiale de la ressource forestière sont réalisées à partir des données relevées lors de l'inventaire de terrain. A chaque parcelle (ou groupe de parcelles) est associée une valeur correspondant aux données récoltées (volumes, effectifs, essences, groupes d'essences commercialisables...).

En fin de projet, les propositions d'aménagement – synthèse de toutes les informations recueillies –

sont illustrées sous la forme d'une série de cartes : 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...

MISE EN ŒUVRE

Pendant la mise en œuvre de l'aménagement, la cartographie constitue également un des outils de suivi pour le contrôle régulier et l'impact des mesures entreprises :

· carte des dégâts d'exploitation ;

· carte de l'avancement des travaux et de leur impact sur le développement rural...

LA TÉLÉDÉTECTION

La télédétection, actuellement opérationnelle dans de nombreux domaines, trouve une place de choix en foresterie et notamment en aménagement forestier. Si l'inventaire de terrain reste toujours la source première d'informations, l'utilisation des photographies aériennes, puis celle des données satellitales permet une analyse à la fois plus globale et plus dynamique du milieu forestier.

Le principe de base sur lequel repose la télédétection, définie 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. Cette possibilité autorise toutes les études fondées sur la dynamique des 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 acquises à partir des satellites, a fait la preuve de sa capacité au travers de nombreuses applications dans le domaine forestier tropical.

LES DONNÉES AÉROPORTÉES

□ Les photographies aériennes traditionnelles

Avant le début des années 70, les photographies aériennes étaient les seuls documents qui fournissaient une « vision aérienne » des paysages. Actuellement, elles conservent toute leur efficacité, en particulier pour les études détaillées. L'utilisation de clichés à des échelles égales ou supérieures au 1/20 000 donne de très bons résultats.

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

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 servent souvent à actualiser certaines informations comme les limites de massif, le tracé des pistes, les villages et les zones cultivées.

Un autre avantage, et non des moindres, est de pouvoir analyser d'anciennes missions aériennes afin de reconstituer la dynamique de la végétation.

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

□ Les prises de vues à basse altitude

Les prises de vues à basse altitude constituent un excellent compromis entre les missions aériennes classiques et les données acquises par satellites.

Actuellement, le matériel photographique et les émulsions utilisées pour ces prises de vues offrent une qualité de clichés parfaitement exploitable. Un choix doit être fait de l'altitude, de l'objectif photographique en liaison avec 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 km^2.

Si on ne peut pas faire appel à une société spécialisée et 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

* Le coût d'une prise de vues 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, calculée pour une superficie de 2 000 000 ha).

28 mm), soit des appareils plus perfectionnés, type Hasselblad 70 mm (objectif 100 mm).

Cependant, les sociétés spécialisées proposent souvent un plus grand choix d'appareils de prises de vues, équipés de focales différentes (88, 152, 300 mm...). Elles peuvent travailler avec tous les types d'émulsions. On est donc en droit d'espérer une meilleure qualité des produits. Ces prises de vues requièrent un investissement financier moindre et sont plus facilement mises en œuvre. Elles permettent donc d'obtenir des documents 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 la forme de transects systématiques.

Des survols de reconnaissance au-dessus des massifs forestiers sont souvent pratiqués lors des projets mais les renseignements relevés par les personnes à bord manquent de précision et sont très difficilement utilisables par d'autres. A l'inverse, les prises de vues à basse altitude sont riches en informations et les objets identifiés peuvent être géoréférencés lorsqu'un GPS* est couplé aux appareils de prise de vues durant le vol.

Ces missions constituent des « vérités-terrain » supplémentaires, notamment dans les zones difficiles d'accès.

□ Les photographies aériennes numériques

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

Les images sont obtenues directement sous forme numérique, ce qui facilite leur vérification en temps réel et leur transfert électronique sur des supports d'enregistrement réutilisables. De plus, ce type d'appareil, qui s'appuie sur un système électro-optique sans éléments mobiles, est généralement plus robuste que les appareils photographiques classiques.

Les appareils numériques sont aujourd'hui utilisés plutôt pour la prise de vues à basse altitude. Ils ne sont pas encore techniquement en mesure de concurrencer les appareils à chambre photogrammétrique aérienne, tel qu'un Hasselblad, pour deux raisons principales :

· les appareils numériques ont un champ de vue relativement restreint. Ils ne permettent pas facilement la perception stéréoscopique du terrain observé ;

· les matrices CCD les plus denses ont à l'heure actuelle environ 5 000 × 5 000 détecteurs, alors qu'il en faudrait environ seize fois plus (20 000 × 20 000) pour avoir une résolution spatiale comparable à celle des appareils analogiques.

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

□ 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, alors qu'actuellement leur fabrication est entièrement automatisée. Dans un premier temps, les photographies aériennes analogiques sont scannées. 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, rectification des images, production de courbes de niveau – sont réalisées par un logiciel. L'Institut géographique national, par exemple, 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, avantage très apprécié notamment pour les études en zone de relief. Les fichiers sont transférables dans des logiciels de traitement d'image ou des SIG.

L'orthophotographie numérique peut être utilisée 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 !

□ La vidéographie aérienne

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

La vidéographie ne fournit cependant pas des informations de la qualité de celle des photographies aériennes mais elle est très utile lorsqu'il s'agit d'obtenir rapidement des données le long de transects. Cette technique bénéficie 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 interfaçage simple avec un GPS donne la localisation en temps réel des acquisitions, permettant 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. La vidéographie constitue un outil de

* GPS : *global positioning system.*

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 satellitales.

□ Les données radar aéroportées

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

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

Un autre particularité des images radar, qui intéresse le forestier, tient au 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. Elle 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. Cependant, plusieurs systèmes radar interférométriques aéroportés récents (TOPSAR, DOSAR, AeS-1) fournissent 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.

□ Les autres systèmes

A cette liste qui n'est pas exhaustive, on peut ajouter néanmoins d'autres capteurs intéressants pour l'étude du couvert forestier. Signalons le CASI *(compact airborne spectral imager)*, système d'acquisition d'image qui utilise un grand nombre de canaux, ainsi que les instruments fonctionnant avec des lasers, dans le but d'obtenir une « topographie » fine de la canopée.

LES DONNÉES SATELLITALES

□ Le domaine optique

Jusqu'à ce jour, les images satellitales utilisées dans les études à l'échelle d'un massif forestier, proviennent généralement des satellites Landsat et Spot (figure 1).

Leurs capteurs fonctionnent dans les domaines « visible-infrarouge » ou le domaine « optique », avec des récepteurs sensibles aux rayonnements électromagnétiques de longueurs d'onde allant de 0,4 à 12,5 microns.

Leurs images sont qualifiées de haute (10-30 m) ou de moyenne (80 m) 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.

Les satellites Landsat 4 et 5, lancés respectivement en 1982 et 1984, toujours en opération actuellement, abritent les instruments MSS *(multi - spectral scanner)* et TM *(thematic mapper)*. Le capteur MSS a quatre bandes dans le visible et le proche infrarouge et il possède une résolution spatiale d'environ 80 m. Le capteur TM présente une résolution spatiale de 30 m, et il offre surtout une information spectrale plus riche avec sept canaux 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 × 85 km^2.

Landsat 7, en activité depuis plusieurs mois, fournit les mêmes pro-

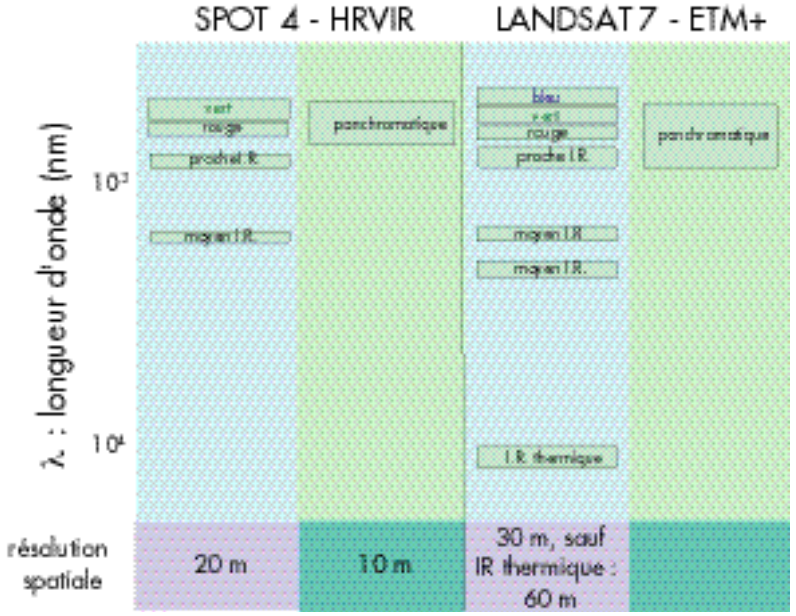

Figure1. Caractéristiques spectrales et spatiales des capteurs satellitaires Spot4-HRVIR etLandsat 7-ETM +.
Spectral and spatial features of Spot 4-HRVIR and Landsat 7-ETM + satellite sensors.

duits que les systèmes précédents avec toutefois un capteur TM amélioré (ETM + : *enhanced thematic mapper plus*) : une nouvelle bande panchromatique (large bande couvrant tout le domaine visible) de 15 m de résolution spatiale et un canal infrarouge thermique ayant une résolution spatiale améliorée (60 m).

Le programme Spot bénéficie lui aussi actuellement de plusieurs satellites en orbite, avec notamment Spot 4 lancé en 1998, assurant ainsi une pérennité d'acquisition de données depuis 1986. Le système Spot présente des qualités particulières, comme la possibilité de dépointage latéral de la visée permettant la stéréoscopie ou la résolution spatiale de 10 m en mode panchromatique et de 20 m en mode multispectral (quatre bandes dans le vert, le rouge, le proche infrarouge et le moyen infrarouge). Spot 4 abrite un instrument supplémentaire, Végétation (résolution spatiale 1 km), possédant des bandes spectrales adaptées à la caractérisation de la couverture végétale et à son suivi à une échelle globale (90 % des zones équatoriales sont couvertes chaque jour).

L'intérêt de travailler avec les données satellitales est d'abord d'avoir une image récente et globale de la zone du projet pour un coût très abordable.

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 fait actuellement plus finement avec Landsat, puisqu'il fournit à l'utilisateur davantage de bandes spectrales.

Quant à la résolution spatiale en mode multispectral, elle est sensiblement équivalente pour les deux systèmes : 30 m pour Landsat-TM et 20 m pour Spot.

Le nombre d'images à commander et à traiter est également un critère de choix. Pour de 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. Les données sont enregistrées sur un support numérique mais l'utilisateur peut les acquérir également sous la forme de tirages photographiques et les exploiter à la fois numériquement et visuellement.

Par rapport aux photographies aériennes, les images satellitales – en donnant une vision globale d'une région – constituent un excellent support pour les projets qui s'inscrivent dans une démarche intégrée. Il a été constaté que les meilleurs résultats étaient obtenus en combinant les données satellitales, les photographies aériennes et les mesures au sol. Chaque échelle d'observation apporte une vision différente mais complémentaire du milieu étudié.

C'est probablement pour le suivi de phénomènes que les données satellitales sont le plus fréquemment utilisées (photo 2). La possibilité de les acquérir de façon régulière permet la mise à jour des documents cartographiques produits et de suivre l'évolution de la zone du projet. Enfin, 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.

□ Le domaine des micro-ondes

Depuis le début des années 90, le développement marquant de la télédétection spatiale concerne l'utilisation d'images radar. Les images fournies par les instruments radar se

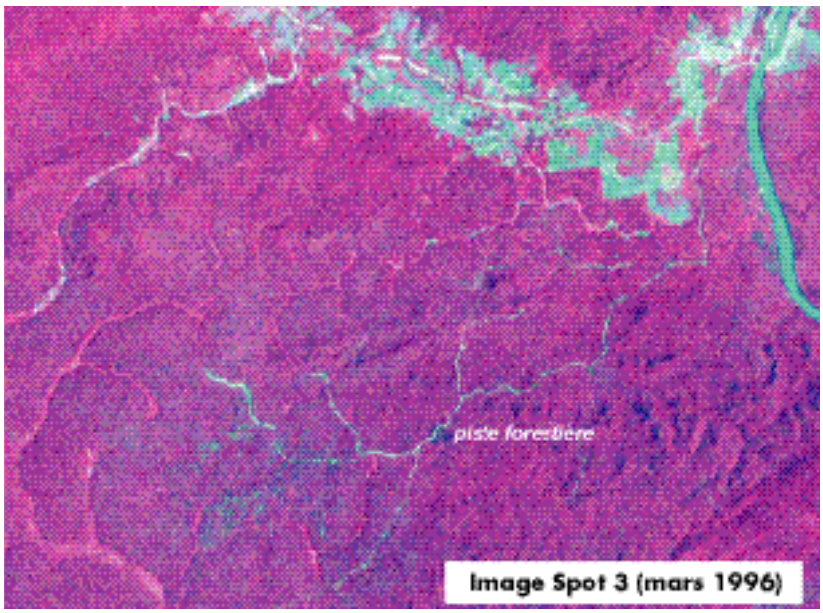

Photo2. Composition colorée à partir d'une image infrarouge de la région de Sangha-Mbaéré (République centrafricaine), prise depuis Spot 3, le 2 mars 1996.
Colour composition, based on an infrared image of the Sangha-Mbaere region (Central African Republic), taken from Spot 3, on 2 March 1996.

différencient principalement par leurs configurations :

· de longueur d'onde : bande L (23 cm), bande C (6 cm) ;

· de polarisations* transmises et reçues, horizontales (H) ou verticales (V) ;

· de résolution spatiale allant de 10 à 100 m ;

· d'angle d'incidence allant de 20 à 60°.

A ce jour, les images radar sont acquises de manière opérationnelle à partir de deux satellites seulement : le satellite européen ERS-2 et le satellite canadien Radarsat (le satellite japonais JERS-1 étant hors service depuis octobre 1998). 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 dernier en orbite, Radarsat fonctionne en bande C, en polarisation HH, et il a l'avantage de fournir des données avec différents angles d'incidences (20 à 60°) et différentes 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 radars SAR** actuellement en orbite n'ont qu'une configuration mono-canal (une seule combinaison de fréquence et de polarisation).

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. Les images radar contiennent un bruit caractéristique, nommé *speck - le*, 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 rapport de canaux, ou en effectuant des corrections complètes fondées sur un MNT***.

La principale utilisation d'images radar satellitales en forêt dense humide concerne la cartographie de l'occupation du sol à moyenne échelle (voisine du 1/100 000). 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, 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.

L'utilisation des images radar est cependant loin de se généraliser. Les premières images satellitales optiques posaient peu de problèmes d'interprétation aux utilisateurs habitués aux photos aériennes. En revanche, les nouveaux utilisateurs d'images radar sont désemparés 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 n'étaient pas adaptés au traitement des images radar, et les utilisateurs étaient souvent obligés de développer eux-mêmes leurs outils d'analyse. Cependant, et depuis peu, les STI les plus connus (ERDAS Imagine, PCI ou ER Mapper) commencent à proposer des modules spécifiques pour le traitement d'images radar.

□ Les produits dérivés

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 la 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 de plusieurs thèmes sur un fond image discret.

Les spatiocartes permettent d'alimenter en informations « à jour » les SIG et les bases de données, et elles 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.

A propos des fonds topographiques disponibles sur les zones forestières d'Afrique centrale, nous avons

* 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.

** SAR : *synthetic aperture radar* (radar à synthèse d'ouverture).

*** MNT : modèle numérique de terrain.

évoqué précédemment le problème de leur précision, en particulier pour 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 et de pouvoir ensuite géoréférencer les informations thématiques.

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

La technique la plus répandue pour le calcul des altitudes s'appuie sur la notion de stéréoscopie. Les photographies aériennes, les images Spot et les 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 MNT, 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.

Dans le cadre de l'amélioration des images Spot, les MNT 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 permet d'afficher une image du paysage en trois dimensions.

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

SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

La principale limite de la cartographie traditionnelle résidait dans son caractère relativement figé. Les cartes étaient souvent longues à réaliser, difficiles à archiver ou à diffuser, et elles nécessitaient des opérations assez lourdes pour leur mise à jour. 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, avec les logiciels de CAO (cartographie assistée par ordinateur).

· Ensuite, pour faciliter la gestion des informations relatives aux objets géographiques d'une carte, avec les SGBD*.

Il est vite apparu que l'articulation de ces deux systèmes pouvait engendrer une nouvelle façon de manipuler l'information géographique à des fins d'analyse statistique ou spatiale. Plus qu'un regroupement, c'est l'intégration complète de plusieurs types d'outils qui fait la grande utilité des systèmes d'information géographique (SIG).

LES CARACTÉRISTIQUES

La définition d'un SIG illustre bien son rôle 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* »**.

Le SIG est composé d'une base de données géographiques et d'un ensemble d'outils permettant l'utilisation de celle-ci. La base de données géographiques, élément central du SIG, comprend des données spatiales (position et forme des objets) et des données thématiques dites « attributaires » (informations associées aux objets).

Les outils disponibles actuellement permettent de réaliser quatre types d'activités :

· la saisie numérique, l'entrée et le prétraitement des données ;

· la gestion de la base de données attributaires ;

· l'analyse spatiale fondée sur les données attributaires et spatiales ;

· la représentation et l'édition de cartes.

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

En mode vecteur, les objets sont définis par des points, des arcs ou des polygones. Ils sont ainsi représentés tels qu'on les perçoit dans le monde réel.

Ce n'est pas le cas avec le mode raster (ou matriciel) qui utilise 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

* SGBD : système de gestion de base de données.

** Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 1989.

lignes et colonnes. A chaque pixel, il correspond une valeur unique. Les images satellitales ou les documents scannés 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 données acquises suivant ces deux modes de représentation.

L'UTILISATION DANS UN PROJET D'AMÉNAGEMENT

□ Acquisition des données

Le découpage du massif en types de peuplement, « stratification », obtenu à partir de l'interprétation des photographies aériennes ou d'images satellitales, se restitue sur un fond de carte topographique. Le document est ensuite numérisé (mode vecteur) pour constituer une des cartes de base du projet.

Le dispositif de sondage (layons et placettes) est mis en place sur le terrain, souvent à l'aide d'une boussole, d'un câble et d'un topofil, ou bien il est localisé plus précisément avec des relevés GPS. Il peut être transféré directement dans le SIG.

Les données recueillies au cours de l'inventaire de terrain (floristiques, dendrométriques, environnementales...) à l'intérieur des placettes sont organisées et traitées numériquement dans le SGBD.

Une organisation simple de la base de données peut, par exemple, utiliser deux fichiers attributaires principaux. Le premier est associé aux unités de sondage (fichier « placettes ») et il contient les informations environnementales de chaque placette. Le second est lié aux arbres mesurés (fichier « arbres ») et il contient toutes les données floristiques et dendrométriques recueillies lors de l'inventaire.

Le numéro de la placette (code placette) est la variable qui permet d'établir le lien entre les deux fichiers, « placettes » et « arbres ».

□ Quelques fonctionnalités des SIG

Une des premières fonctions utilisée dans les SIG, dédiés à l'aménagement forestier, concerne le calcul automatique des superficies de toutes les entités numérisées (massif, strates de végétation...).

D'autres fonctions sont couramment utilisées au cours de l'étude :

· La fonction combinaison permet, par exemple, d'enrichir la base de données liée aux parcelles en affectant à chacune d'elles le code de la strate (obtenue en général par photointerprétation) dans laquelle elles se situent. Il devient alors possible de comparer cette nouvelle donnée avec celle recueillie directement sur le terrain (souvent difficile à déterminer), d'établir une table de correspondance entre les deux types de vision, aérienne et au sol, et d'apporter les améliorations nécessaires.

· La fonction éclatement d'une couche géographique par une autre permet de scinder une zone en fonction de contraintes naturelles (route, rivière) pour, par exemple, optimiser le parcellaire d'aménagement. Cette fonction est aussi utilisée pour des placettes localisées sur plusieurs strates afin de calculer la proportion de chacune d'elles.

· La fonction agrégat offre la possibilité d'agréger des données à l'intérieur d'un polygone. Ainsi, en agrégeant les données des unités de sondage des parcelles d'aménagement, on fournit pour chacune d'elles des résultats globaux sur les variables dendrométriques : effectifs à l'hectare, effectifs totaux, volumes à l'hectare...

· La fonction création de zone tampon est utilisée lorsqu'on souhaite, notamment, connaître la ressource exploitable de part et d'autre d'une route ou dans un rayon donné.

Ces fonctions élémentaires d'analyses spatiales peuvent être combinées pour réaliser des opérations plus sophistiquées telles l'optimisation d'un réseau de pistes d'exploitation, le découpage de la forêt aménagée en parcelles de rotation équivolume... Beaucoup d'applications ne sont pas directement obtenues à partir du logiciel SIG utilisé et réclament des développements spécifiques qui font l'objet de recherches.

□ Restitutions cartographiques

Après avoir associé aux éléments géoréférencés (unités de sondage, parcelles d'aménagement, villages) les données issues de l'inventaire ou d'enquêtes réalisées sur le terrain ou déjà existantes, le SIG est utilisé pour restituer visuellement ces informations sur des cartes : répartition des formations végétales, localisation de la ressource forestière (espèces, peuplements d'avenir, ressource exploitable...), extension des activités humaines, localisation et importance des zones brûlées... Le SIG permet de produire « rapidement » un grand nombre de documents cartographiques qui illustrent au fur et à mesure les informations acquises pendant le projet (figures 2 et 3). C'est aussi un excellent outil pour simuler les différents scénarios de parcellaire d'aménagement proposés. Il est toutefois indispensable de bien veiller à la qualité des données représentées.

CONCLUSION

La remise à jour constante des moyens de travail est une adaptation nécessaire pour l'amélioration des activités. Chaque projet s'éla-

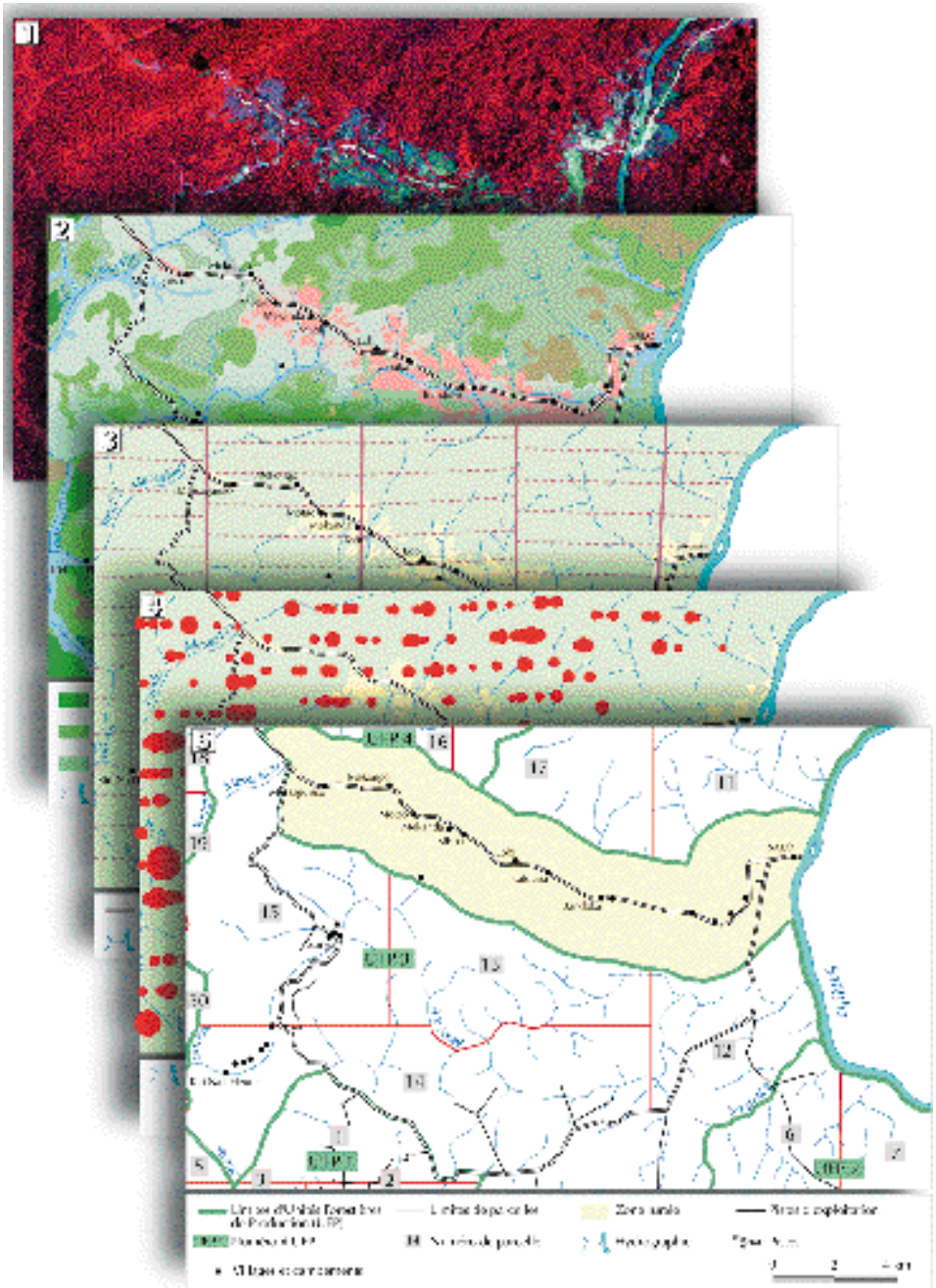

Figure 2. Quelques exemples de restitutions cartographiques de la région de Sangha-Mbaéré (République centrafricaine). Réalisation J.-F. TRÉBUCHON.
Examples of cartographic reconstructions of the Sangha-Mbaere region (Central African Republic). Drawn by J.-F. TRÉBUCHON.

bore dans un contexte particulier. Il s'agit de coordonner l'utilisation des outils, déjà disponibles ou nouveaux, pour répondre au mieux aux objectifs.

Tous ces outils sont mis au point au sein d'équipes. Leur utilisation est en expansion, en particulier 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

ACQUISITION DE DONNÉES

· cartes topographiques IGN au 1/200 000	*réseau hydrographique, relief, pistes, villages*
· photos aériennes au 1/50 000 de 1989	*stratification du massif en types de peuplements*
· image radar SIR-C de 1994, bandes L et C	*vue d'ensemble, relief, réseau hydrographique*
· image Spot XS de 1996	*amélioration géométrique, actualisation pistes d'exploitation*
· prise de points GPS	*dispositif de sondage (layons parcelles)*
· inventaires de terrain sur 110 000 ha à 2,5 % et sur 1 500 ha en plein	*espèces et données dendrométriques sur 10 000 placettes*

INTÉGRATION DANS LE SIG

Fichiers géographiques	Fichiers attributaires (gérés par un SGBD)
· *réseau hydrographique*	· *placettes (données environnementales)*
· *relief*	· *arbres (données dendrométriques)*
· *pistes*	
· *villages*	
· *types de peuplements (stratification)*	
· *layons, placettes, points GPS*	

TYPES DE PRODUITS OBTENUS

Documents cartographiques	Mise au point de méthode
· *répartition des formations végétales*	· *optimisation d'un réseau de piste d'exploitation*
· *localisation de la ressource forestière*	
· *carte des peuplements d'avenir*	
· *propositions de parcellaires d'aménagement*	

Figure3. Mise en œuvre des outils de gestion durable dans le projet d'aménagement pilote de la Sangha-Mbaéré (110000 ha), en République centrafricaine.
Application of sustainable management tools in the Sangha-Mbaere pilot development/management project (110 000 ha), in the Central African Republic.

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 les 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 elle constitue un moyen de connaissance pour mieux comprendre et mieux gérer les écosystèmes forestiers tropicaux.

▶ Michelle PAIN-ORCET
CIRAD-Forêt, programme forêts naturelles
Campus international de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5, France

▶ Danny LO SEEN
CIRAD-Amis, programme agronomie
Maison de la télédétection
500, rue J.-F. Breton
34398 Montpellier Cedex 5, France

▶ Nicolas FAUVET
CIRAD-Forêt, programme forêts naturelles
Campus international de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5, France

POUR EN SAVOIR PLUS

BEAUDOIN A., LO SEEN D., 1997.
Contribution of radar imagery to tropical forest monitoring and management. Atelier CIFOR/USAID, Bogor (Indonésie), 17-19 novembre, 6 p.

BONN F., ROCHON G., 1993.
Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, AUPELF, 485 p.

BONN F., ROCHON G., 1996.
Précis de télédétection. Volume 2 : Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec, AUPELF, 633 p.

FREYCON V., FAUVET N., BERNARD C., LACLAU J.-P., 1996.
Les SIG appliqués à la forêt. Bois et Forêt des Tropiques 250 : 63-70.

GDTA, 1993.
Les spatiocartes, méthodes et exemples de réalisation. Les cahiers pédagogiques du GDTA, 111 p.

LEO O., DIZIER J.-L., 1987.
Télédétection. Techniques et applications cartographiques. FORHOM, BDPA, 275 p.

PAIN-ORCET M., LO SEEN D., 1997.
La télédétection et les SIG. Apport pour l'aménagement des forêts tropicales. Document technique FORAFRI, CIRAD-Forêt, 7 p.

WILMET J., 1996.
Télédétection aérospatiale. Méthodes et applications. SIDES, 300 p.

RÉSUMÉ

LES CARTES, LA TÉLÉDÉTECTION ET LES SIG, DES OUTILS POUR LA GESTION DURABLE DES FORÊTS TROPICALES D'AFRIQUE CENTRALE

Les cartes, les données aéroportées et satellitales, les systèmes d'information géographique (SIG) font partie de la panoplie d'outils régulièrement utilisés dans les projets d'inventaire et d'aménagement forestiers. Ces outils servent notamment à : localiser la zone forestière et en produire une vision aérienne ; mettre en place et alimenter une base de données forestières, écologiques, socio-économiques... ; élaborer des propositions d'aménagement à partir de ces informations et réaliser un suivi des actions entreprises. Cet article précise la place des documents cartographiques dans les projets d'aménagement. Il analyse, ensuite, l'apport des données acquises sur la canopée et le rôle des SIG comme outils de gestion et d'aménagement. Enfin, la mise en œuvre de ces outils est illustrée par une étude réalisée en République centrafricaine.

Mots-clés : carte, image aérienne, image satellitale, système d'information géographique (SIG), aménagement, exploitation à faible impact, forêt dense humide.

ABSTRACT

MAPS, REMOTE-SENSING AND GIS AS TOOLS FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF TROPICAL FORESTS IN CENTRAL AFRICA

Maps, airborne and satellite data, and Geographical Information Systems (GIS) are all part of the array of tools regularly used in inventory and forest management projects. These tools are used in particular to: pinpoint the forest zone and get an aerial view of it; establish and feed a forestry, ecological and socio-economic database; formulate development proposals based on this information and follow up and monitor programmes undertaken. This article describes the role of cartographic documents in management and development projects. It then analyses the input of data acquired about the canopy, and the role of GIS as management and development tools. Lastly, the application of these tools is illustrated by a study carried out in the Central African Republic.

Key words: map, aerial image, satellite image, geographical information system (GIS), management, low impact logging, rainforest.

RESUMEN

MAPAS, TELEDETECCIÓN Y SIG, INSTRUMENTOS PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE LOS BOSQUES TROPICALES DE ÁFRICA CENTRAL

Mapas, datos aeroportados y de satélites y sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una parte del conjunto de instrumentos que se emplean regularmente en proyectos de inventario y ordenación forestal. Estas herramientas suelen utilizarse para : localizar la zona forestal y disponer de una vista aérea ; crear y alimentar una base de datos forestales, ecológicos, socioeconómicos... ; elaborar proposiciones de ordenación a partir de dichas informaciones y realizar un seguimiento de las acciones emprendidas. Este artículo determina el lugar que ocupan los documentos cartográficos en los proyectos de ordenación y, a continuación, analiza la aportación de los datos obtenidos sobre la canopia y la función de los SIG como instrumentos de manejo y ordenación. Para concluir, un estudio realizado en la República Centroafricana nos muestra el empleo de estos instrumentos.

Palabras clave : mapa, imagen aérea, imagen de satélite, sistema de información geográfica (SIG), ordenación, explotación de impacto reducido, bosque denso húmedo.

SYNOPSIS

MAPS, REMOTE-SENSING AND GIS AS TOOLS FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF TROPICAL FORESTS IN CENTRAL AFRICA

MICHELLE PAIN-ORCET, DANNY LO SEEN, NICOLAS FAUVET

For several decades now, the assessment of forest resources in tropical regions has required methods capable of giving an "aerial view" of the forests to be inventoried. During the development of acquisition techniques, new data become available, but in each instance they need evaluating in relation to projects in order to become operational.

This article summarizes the current state of know-how in the use of these tools, in particular with regard to forest development and management projects, and it describes the various possibilities offered by these new methods. Even if they are used together in these projects, three types of tools are dealt with in turn: cartographic documents marking each stage of the project; remote-sensing data acquired by different sensors; and Geographical Information Systems (GIS) and digital data-processing methods.

MAPS

Cartographic documents have always had a special place in each stage of a project:

· During the preparation of the project, it is important to delimit the zone which will be involved in a development plan, and to describe it on the basis of existing information. This is the role of topographic maps and thematic maps (geological, pedological, biogeographical...). These maps are often on different scales and often use different cartographic projections, and have to be standardized before being used with other tools.

· In their execution phase, "analytical maps" drawn up during the project help to visualize the data gathered during the inventory. Development and management proposals made at the end of the project summarize the information gathered and are presented in the form of a series of maps: map of development units for logging, maps of reserve and deforestation zones...

· During the implementation of the development plan, monitoring of the measures taken is carried out with the production of maps showing the progress of the works in question, logging damage, impact on rural development, etc.

REMOTE SENSING

If the field inventory is still the main source of information, the use of aerial photographs, followed by the use of satellite data makes it possible to make an analysis of the forest environment that is at once more comprehensive and more dynamic.

The "traditional" aerial photographs that have been widely used since the early 1970s are still thoroughly efficient, in particular for detailed studies. They are currently either being replaced, when this is possible, or complemented by photographs that are easier to use (low altitude, digital and video photos), with the possibly of geo-referencing the data acquired. New systems such as interferometric radar, imaging spectrometers and laser altimeters are also starting to be used.

In satellite remote-sensing, it is the Spot and Landsat programmes which provide the most widely used data in forestry projects in Central Africa. The latest satellites, Spot 4 and Landsat 7, have been providing an on-going flow of data for the past dozen years or so, and have improved sensors when compared with previous models in terms of spatial resolution and spectral bands. The advantage of working with satellite data is, above all, the possibility of obtaining a recent image of the project zone at a very affordable cost. In relation to aerial missions, they give an overall view of the region, and thus provide an excellent background for projects that are part of an integrated approach. The best results noted combine satellite data, aerial photographs and ground measurements.

Radar data and their use have a special place of their own. Their particular feature, whereby it is possible to obtain images by day and by night alike, whatever the cloud cover may be, is especially sought after when one is aware of the slight probability of obtaining images without clouds over moist tropical forested regions. The analytical tools for this type of imagery have specific restrictions (just one channel per image, noise, sensitivity to the relief), but are starting to become available in remote-sensed image processing systems.

On the basis of remote-sensing data, it is possible to obtain so-called "derivative" products such as space-maps and Digital Terrain Models. Space-maps may be used when there are no existing topographical maps of the project zone, whereas the DTMs may provide helpful land information for putting development proposals together.

GIS

With possibilities of digital mapping, and geographical database and space analysis management, the GIS has swiftly become a vital tool for managing all the information taken into account in development and management projects. A case study in the Central African Republic is recapitulated in the form of a table and shows three major stages in the GIS implementation for the pilot development of a 110 000 hectare area of the forested zone of Sangha-Mbaere: data acquisition, GIS integration, and products obtained.

CONCLUSION

The constant updating of our working methods is a necessary adaptation for improved activity. Each project is worked out in a particular context, and this involves coordinating the use of tools, be they already available or new, in order to better meet our targets. The scale of investment, human and material alike, should not be underestimated. The works to be carried out usually involve major sites and the use of new techniques and technologies must not get in the way of the goal being sought. Under no circumstances can the use of these tools replace the researcher's fieldwork; rather, it represents an input of knowledge, aimed at both a better understanding and a better management of tropical forest ecosystems.