

Les données « Très Haute Résolution Spatiale » et l'étude des milieux forestiers tropicaux

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Mars 2006

Michelle PAIN-ORCET

DOUBLE

UPR 36 « Ressources forestières et politiques publiques »

CIRAD-Dist UNTÉ MULOTEROUS Baillergues



SOMMAIRE

1 - INTRODUCTION	3
2 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	4
3 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS	5
4 - TYPES D'APPLICATIONS THEMATIQUES ET DE DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES	8
4.1 Cartographie et suivi	8
4.2 Caractérisation des milieux boisés et forestiers	9
4.3 Insertion dans une approche multi-capteurs et multi-échelles	10
4.4 Développement de méthodes d'analyse spécifiques aux images THRS	11
5 - ETUDES DE CAS : METHODES ET RESULTATS	14
5.1 Suivi des impacts d'exploitation	14
5.2 Analyse du couvert et mesures des couronnes	14
5.3 Approche multi-capteurs	
6 - CONCLUSION	18
ANNEXE 1 : Revues consultées	20
ANNEXE 2 : Références bibliographiques citées	21
ANNEXE 3 : Capteurs THRS actuels et futurs	
ANNEXE 4: Adresses des distributeurs	25

1 - INTRODUCTION

Parmi les développements technologiques continuels dont le monde de la télédétection s'est habitué depuis plusieurs décennies, la mise sur le marché d'images ayant une résolution spatiale de l'ordre du mètre a provoqué un grand intérêt pour les utilisateurs. Les objets qui sont restitués sur ces images se rapprochent de l'objet vu sur le terrain. Leur taille est souvent supérieure à celle du pixel. Contrairement à l'ancienne génération (dite à « Haute Résolution Spatiale »), ces satellites permettent d'aborder le domaine de l'identification, voire de l'analyse des objets qui jusque là ne pouvaient être individualisés que sur photographies aériennes. Ces données ouvrent donc des perspectives nouvelles pour la connaissance des arbres et des forêts.

Cette concordance entre ce qui est vu directement sur le terrain et ce qui est enregistré sur l'image satellite « Très Haute Résolution Spatiale » (THRS) offre une complémentarité extraordinaire pour les disciplines qui travaillent à l'échelle locale comme les études en milieu urbain ou agricole au niveau de la parcelle. Pour les forestiers, ces images leur permettent d'individualiser les arbres et d'avoir des informations détaillées sur les houppiers, qui se trouvent alors composés de plusieurs pixels. Les applications semblent donc évidentes. Toutefois, la résolution plus fine des données se traduit par une plus grande hétérogénéité et la notion de texture devient importante. L'utilisation de ces images réclame la mise au point de méthodes de traitement adaptées.

A partir de 1995, les satellites indiens, IRS-1C et IRS-1D, rendent disponibles des images avec des résolutions très fines pour des applications civiles.

Ensuite les systèmes Ikonos, Eros, Quickbird, Orbiew prennent le relais de 1999 à 2003 et les données sont rapidement testées et exploitées dans de nombreuses thématiques. Des articles sont publiés.

Cette synthèse fait un point des applications de la THRS pour la description des paysages forestiers, en particulier tropicaux, en abordant les aspects méthodologiques et en évaluant les résultats actuels.

La recherche bibliographique a été réalisée sur la base des questions suivantes :

- A quelles images satellites THRS peut-on avoir accès actuellement?
- Quelles sont les applications actuelles de la THRS pour l'étude des milieux forestiers tropicaux ?
- Quelles variables peut-on extraire de ces images pour l'analyse et le suivi de la dynamique d'un couvert forestier dense ou non ?
- Peut-on estimer le volume ligneux à l'aide de données THRS ?

2 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette recherche a été effectuée à partir des sources documentaires suivantes :

- la base AGRITROP, référentiel bibliographique du CIRAD, base de données sur l'agronomie et la foresterie tropicale qui regroupe la littérature produite et acquise par l'organisme (base uniquement consultable par intranet),
- les revues spécialisées en télédétection et en écologie (voir liste en annexe 1),
- le service documentaire de la Maison de la Télédétection¹.
- Internet

Une vingtaine de revues ont été consultées et plus d'une centaine d'articles sélectionnés.

Cette recherche a aussi permis de retenir des articles sur des applications de la télédétection pas forcément liées aux données THRS mais apportant des informations utiles pour les travaux de l'équipe.

Plus de 90 % des articles sont en anglais et certains ont fait l'objet d'un résumé détaillé en français.

Plus des deux tiers des articles traitent d'applications à partir de données Ikonos.

3 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS

Les 6 capteurs retenus enregistrent des données avec une résolution spatiale égale ou inférieure à 6 m : IRS 1C/1D Ikonos 2, Eros A, Quickbird 2, Spot 5, Orbview 3.

Les satellites IRS-1C/1D² ont été mis en orbite en 1995 et 1997. Les instruments installés fournissent des images avec des résolutions spatiales de 5,8 m et 5,2 m (PAN instrument) en mode panchromatique. La largeur de la zone enregistrée (fauchée) est de l'ordre de 70 km. Avec un angle d'acquisition qui peut aller jusqu'à 26 °, un même site peut être enregistré tous les 3-5 jours.

Lancé en septembre 1999 par la Société Space Imaging, **Ikonos-2** a été le premier satellite commercial d'observation terrestre à fournir des images avec une résolution de 1 mètre. Le radiomètre embarqué enregistre des images couvrant un champ d'observation de 11 km x 11 km, avec une résolution spatiale de 1 m en mode panchromatique et de 4 m en mode multispectral³.

Le satellite Ikonos décrit, tout comme la très grande majorité des satellites d'observation de la Terre, une orbite héliosynchrone. La mission ayant pour objectif l'acquisition d'images à très haute résolution, l'altitude du satellite est relativement basse (680 km). A chaque révolution, le satellite survole les régions de même latitude à l'ouest du passage précédent et la distance séparant deux traces consécutives (2700 km à l'équateur) est très supérieure à la largeur du champ d'observation du satellite (11 km). Du fait de la faible largeur de la fauchée, un point particulier de la surface terrestre n'est survolé que tous les 35 jours, mais la possibilité de dépointage du capteur (51° maximum) permet de ramener ce délai à 3 jours. Il y a donc une grande probabilité d'avoir des images obliques qui devront être ensuite corrigées géométriquement.

Le satellite **EROS-1A**, mis en orbite depuis décembre 2000 par la Société ImageSat International⁴ ⁵acquiert des images panchromatiques noir et blanc d'une surface de 13,5 km x 13,5 km avec une résolution de 1,8 m. Sa possibilité de dépointage jusqu'à 45 ° dans toutes les directions permet l'acquisition d'images en stéréoscopie (même orbite et recouvrement de 90 %).

Quickbird 2, développé par DigitalGlobe, et lancé en octobre 2001, acquiert à la fois des données panchromatiques et multispectrales, avec des résolutions spatiales respectives de 0,61 m et 2,44 m au nadir. Les images, fournies avec un angle d'acquisition pouvant aller jusqu'à 45 °, couvrent une surface de 16,5 x 16,5 km au nadir.

SPOT 5, mis sur une orbite héliosynchrone quasi-polaire en mai 2002, embarque, entre autres, des capteurs Haute Résolution qui travaillent de manière indépendante ou couplée. Le capteur HR géométrique (HRG) possède un angle de visée qui peut aller jusqu'à 27 ° de part et d'autre de la verticale. Il enregistre pour les bandes panchromatiques des données à 5 m de résolution et peut fournir des images à 2,5 m (supermode) réalisées à partir de deux images à 5 m décalées de 0,5 pixel. La surface couverte par une scène est beaucoup plus importante que pour les capteurs précédents : 60 km x 60 km, ce qui en fait un système mieux adapté pour les zones plus importantes.

² Indian Remote Sensing

³ au nadir la résolution est de 0,82 m en mode panchromatique et de 3,26 m en mode multispectral.

⁴ www.imagesatintl.com

⁵ company's offices in Tel Aviv

Le satellite **ORBVIEW** 3, développé par Orbimage⁶, et lancé en juin 2003, enregistre des données panchromatiques (1 m) et multispectrales (4 m) sur une bande de 8 km. Ce capteur ayant un angle de visée tout azimut jusqu'à 45 °, un même site peut être observé tous les 3 jours.

Le tableau de la page suivante récapitule les principales caractéristiques techniques de ces satellites ainsi que le coût des images.

Les capteurs peuvent être classés en deux groupes, ceux qui ne fournissent que des données THRS en mode panchromatique, et ceux qui proposent ces données dans les deux modes : panchromatique et multispectral comme Ikonos, Quickbird et Orbiew. Ces trois systèmes peuvent donc offrir aux utilisateurs des produits « pan-sharpened » plus riches en informations combinant à la fois la résolution spatiale du panchromatique et les valeurs multispectrales. Ikonos, Quickbird et Orbiew possèdent la même profondeur radiométrique avec des pixels codés sur 11 bits (2048 niveaux).

Le système Quickbird est actuellement celui qui fournit des images avec les résolutions les fines, 0,61 et 2,5 m.

REMARQUES:

- L'augmentation de la résolution spatiale entraîne une réduction des autres informations en particulier l'information spectrale. Le nombre de bandes spectrales est plus limité que sur les capteurs HR actuels. Les 4 bandes disponibles sont celles du vert, du rouge, de l'infrarouge et du proche infrarouge.
- La dimension des scènes est réduite, ce qui limite leur utilisation soit à de petites zones soit comme sites échantillons représentatifs de surfaces plus importantes.
- Il y a une forte probabilité d'acquérir des images obliques et d'avoir à les recaler géométriquement pour les exploiter, en particulier s'il s'agit de faire des mesures d'objets. Un angle de visée trop grand rend néanmoins les images inutilisables.
- Le nombre plus important de détails perçus joue sur l'hétérogénéité de l'image. La notion de texture devient essentielle et le traitement de ces images doit faire appel à des procédures particulières.

courant.

⁶en janvier 2006 la société Orbimage (Orbiew) a acquis Space Imaging (Ikonos). La nouvelle société **GeoEye** possède désormais la première banque d'images satellitales commerciales au monde. Elle prévoit le lancement du satellite Orview 5 début 2007 qui offrira une résolution de 0,41 m.

SATELLITES OPTIQUES THRS (< 6 m)

	IRS 1C/1D	IKONOS 2	EROS 1 A	QUICKBIRD 2	SPOT 5	ORBVIEW 3
Pays	NRSA- Inde	USA-Space Imaging	Israel Aircraft Industries	USA Digital Globe	France	USA Orbimage
Date de lancement	1995-1997	1999	2000	2001	2002	2003
Altitude (km)	816	681	480	450	830	. 470

Bandes spectrales	Panchromatique V, R, NIR, MIR	Panchromatique B, V, R, IR	Panchromatique	Panchromatique B, V, R, IR	Panchromatique V, R, IR, MIR	Panchromatique B, V, R, IR
Résolution apatiale		P = 1m MS= 4 m	P = 1,8 m	P = 0,62 m MS = 2,5 m	P = 5 m et 2,5 m Xi = 10 m MIR = 20 m	P=1 m MS = 4 m
Dimension d'une scène (km)	P = 70 km, MS = 141 km	11 x 13	13,5 x 13,5	16,5 x 16,5	60 x 60	8 x 8
Profondeur radiométrique	6 bits	11 bits	8 bits	11 bits	8 bits	11 bits
Stereoscopie	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Période de revisite	5 jours	1,5 à 3 jours	1,8 à 4 jours	1 à 3,5 jours	1 fois par jour	3 jours
Angle de dépointage maximum	26 °	51 °	45 °	45 °	27 °	45 °

Prix/km² en euros	P:0,5	niv.GEO / P+MS: 8 (arch) et 20 (prog)				
Surface minimum fournisseur	530km ²	121 km²	156 km2	25 km² (arch) 64 km2 (prog)	1/8 de scène : 400 km²	64 km ²

4 - TYPES D'APPLICATIONS THEMATIQUES ET DE DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES

Les articles consultés poursuivent différents objectifs thématiques ou méthodologiques. Ainsi, quatre catégories ont pu être identifiées, (i) les articles traitant de la cartographie et du suivi de l'occupation du sol, mais à des échelles plus fines, (ii) ceux qui examinent les nouvelles possibilités de caractérisation des milieux boisés, (iii) ceux qui insèrent les données THRS dans une approche multicapteurs et multi-échelles et enfin (iv) toutes les études décrivant les nouvelles caractéristiques de ce type de données et les méthodes spécifiques d'analyse qu'elles requièrent.

4.1 Cartographie et suivi

L'imagerie THRS acquise par les nouveaux capteurs, comme Ikonos 2 ou Quickbird a provoqué un grand intérêt à l'intérieur de la communauté scientifique car elle permet d'obtenir des données cartographiques à des échelles comparables à celles obtenues à partir de méthodes basées sur l'interprétation des photographies aériennes (Kayitakire *et al*, 2002). Le pixel d'1m avec Ikonos rend possible une carte au 1/10 000 et celui de 0,61 m de Quickbird une carte au 1/6 000 (Jacobsen, 2003).

Les exemples trouvés dans le domaine de la cartographie des peuplements forestiers sont situés en Europe. En particulier, Kayitakire *et al* (2002) ont mené une recherche en Belgique sur une zone de 12 000 ha de forêt pour évaluer le potentiel de ces données pour réaliser une cartographie précise à l'échelle des peuplements sur une grande région.

Au Panama, Wang et al (2004) ont testé les performances des capteurs Ikonos et Quickbird pour cartographier la distribution de différents types de mangrove. La discrimination de certaines espèces, présentes sur de petites superficies, n'est possible qu'avec des données THRS. Si l'image Ikonos possède une meilleure définition multispectrale, la résolution plus fine de Quickbird permet de mieux distinguer la rugosité du couvert. Dans cet exemple, les auteurs soulignent que la bande panchromatique n'apporte pas d'amélioration pour les classifications.

Dans le domaine plus général de la **cartographie de l'occupation du sol**, Kumar et Castro (2001) présentent un projet réalisé aux Philippines dans la province de Sorsogon. Des images Ikonos panchromatiques (1m) ont été acquises sur toute la zone, soit sur 1 400 km², doublées par des images multispectrales (4m) sur trois sites.

La carte distingue, les surfaces côtières, les mangroves, les surfaces cultivées, les villes, les plantations, les surfaces couvertes de forêt dense.

La résolution des images est adaptée à la précision des cartes à grande échelle de l'ordre de 1/5 000 et 1/10 000. A ces échelles, la diversité d'un territoire est parfaitement lisible et Imbernon (2002) a exploité la précision d'images Ikonos pour les utiliser lors d'une expérience de **cartographie participative** dans un projet de développement communal en Haïti.: L'imagerie satellitale THRS a offert des informations détaillées, lisibles et analysables par les populations locales et a permis de réaliser en peu de temps une cartographie participative à très haute résolution sur l'ensemble de la commune de Marmelade, soit sur une superficie d'environ 150 km². (Imbernon, 2002).

4.2 Caractérisation des milieux boisés et forestiers

Les travaux réalisés soit à l'échelle du peuplement, soit à l'échelle de la couronne cherchent à accéder directement à des paramètres habituellement collectés sur le terrain ou extraits de photographies aériennes. Dans l'ensemble l'utilisation des données THRS est souvent présentée comme « test » de comparaison par rapport aux images des autres capteurs déjà existants.

L'apport d'images THRS a été évalué sur des dispositifs de recherche installés en forêt tropicale. En particulier, une étude réalisée au Costa Rica, sur la Station Biologique de La Selva (Clark *et al*, 2004) a cherché à **mettre en relation les mesures de couronnes** délimitées sur les images Ikonos et les **variables récoltées sur le terrain** (identification et localisation des émergents, taille des couronnes, surface terrière, mortalité,...). La méthode et les résultats sont décrits dans le chapitre 5.

La **variabilité locale d'une forêt** assez homogène d'Afrique centrale (Dzanga-Sangha-RCA) a été analysée par Thenkabail *et al* (2003) en traitant deux scènes Ikonos (saison sèche, saison humide) prises le long d'un transect topographique. Des différences de végétation sont visibles sur les images Ikonos en fonction des conditions d'altitude et d'humidité.

Pour améliorer les **méthodes d'inventaires forestiers**, une recherche a été menée en Indonésie, dans l'Est Kalimantan (Nugroho *et al*, 2002) pour extraire, à partir d'images de résolutions métriques (Ikonos et Radar SAR), des informations sur la structure de la forêt et évaluer l'état des peuplements (mature, dégradé, en reconstitution, ...).

La détection des perturbations d'un couvert forestier, liées à l'exploitation forestière, est un domaine où les données THRS ont un rôle important à jouer. Au Brésil, dans l'état de l'Amazonas, une zone de 127 000 ha est exploitée selon des techniques d'exploitation à faible impact. Read (2003) étudie le potentiel des images satellites Landsat et Ikonos pour estimer l'impact des activités d'exploitation récentes (< 1 an) sur la forêt.

Les couverts végétaux peuvent aussi être caractérisés par le biais d'indices de végétation, calculés sur les images, et mis en relation avec des mesures de LAI (*Leaf Area Index*) faites au sol. Une expérience a été menée sur une zone de mangrove au Mexique, le long de la côte du Pacifique (Kovacs *et al*, 2004), pour mettre en corrélation les indices de végétation calculés sur une image Ikonos et les mesures de LAI sur des parcelles choisies dans des types de mangroves plus ou moins perturbées. L'objectif était de pouvoir **prédire le LAI à partir des indices de végétation**, et de réduire le nombre de mesures quand il s'agit de travailler sur des surfaces plus étendues.

L'étude des **arbres hors forêt** a vraisemblablement beaucoup à attendre des données THRS. Avec les capteurs précédents, les objets identifiés avaient des dimensions de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres et les arbres isolés ou regroupés dans des haies ou des bosquets n'avaient pas pu être étudiés avec précision. Peu d'articles ont été trouvés sur ce sujet. Le Forest Survey of India (Rawat 2004) intègre des images IRS PAN (5,8 m) dans les méthodes d'inventaire des types d'arbres hors forêt (arbres isolés, haies, bosquets).

4.3 Insertion dans une approche multi-capteurs et multi-échelles

La précision des images THRS les rapproche tellement des observations pouvant être faites directement sur le terrain qu'elles peuvent être qualifiées de « réalités de terrain virtuelles ». Elles sont alors combinées avec des images de capteurs à résolution plus grossière (Landsat, Spot, Terra Modis, ...) et apportent le niveau de détail caractéristique de l'échelle locale.

Cette complémentarité des images doit cependant être évaluée techniquement par rapport aux performances des capteurs utilisés.

Goward *et al* (2003) ont comparé, sur une douzaine de sites répartis aux USA selon un gradient est-ouest, des mesures sur des images Landsat ETM + et Ikonos et étudié leur équivalence et la **relation entre les pixels de ces deux types d'images** pour utiliser les données Ikonos comme « vérité terrain virtuelle ».

Ils ont insisté sur la nécessité des corrections géométriques, en particulier pour bien faire coïncider les pixels par rapport au terrain. La superposition des images Landsat et Ikonos présente des difficultés dues aux alignements de pixels (IFOVs⁷).

Les radiométries dépendent de critères liés à chaque capteur et chaque prise de vue (largeur des bandes spectrales, calibrations, atmosphère, ...) et réclament des traitements spécifiques pour pouvoir être comparées. Un autre article (Thenkabail *et al*, 2003) rend compte d'une démarche similaire et compare les données Ikonos (capteur hyperspatial), Landsat ETM+, ALI (capteurs multispectraux) et Hyperion (capteur hyperspectral) sur une région forestière du Cameroun. L'équipe s'attache plus particulièrement à étudier l'incidence de la largeur des bandes spectrales sur l'estimation de la biomasse et la détermination des types de forêt.

En République centrafricaine Thenkabail *et al*, 2003 poursuivent la comparaison entre les caractéristiques de Landsat ETM + et d'Ikonos pour la détection des changements de structure en forêt tropicale.

Asner *et al*, 2002, utilisent un système laser de terrain (handled laser range finder) sur un site de 50 ha en forêt tropicale amazonienne (Etat du Para, Brésil) **pour estimer la qualité de mesures dendrométriques** (diamètre et surface des couronnes) obtenues par délimitation manuelle des couronnes **sur des images panchromatiques Ikonos.**

Les cartes du couvert végétal réalisées à petite échelle avec des données satellites basses et moyennes résolutions peuvent être validées à la fois par des observations de terrain mais aussi par l'interprétation de données satellites plus précises. Pour déterminer la fiabilité de ces cartes, les images HRS et THRS sont utilisées comme des zones échantillons, sur lesquelles se superposent différentes échelles d'observation.

Cette procédure a été mise en oeuvre par Hansen et al , 2002 pour la validation d'une carte globale du couvert arboré réalisée avec des données Modis⁸ (250 et 500 m de résolution spatiale) sur une région de Zambie. Une quarantaine de sites sur transects ont été visités sur le terrain. Cinq images Ikonos, sélectionnées sur des zones représentatives, ont été analysées selon différents traitements : classifications, analyses de texture, calculs d'indices,.... Des données Landsat ETM+ et TM, de saisons différentes, ont constitué le niveau intermédiaire entre les données Modis et Ikonos.

Cette étude met l'accent sur l'intérêt d'utiliser une gamme d'images de résolutions différentes mais aussi sur le besoin d'appuyer cette validation sur un dispositif d'échantillonnage statistique rigoureux pour la sélection de ces images.

Même si l'échelle de travail des grands programmes internationaux reste souvent globale, l'utilisation des données THRS peut servir à caractériser avec plus de précision les sites de

⁸ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

⁷ IFOV : Instantaneous field of view : champ de vision instantané.

recherche. Hurtt et al ont incorporé des images Ikonos dans le programme intitulé « Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia » (LBA). L'objectif de ce programme est d'étudier les changements d'utilisation du sol et de suivre la dynamique des écosystèmes à partir de sites de terrain et de tours à flux. Pour ce projet, les images Ikonos sont sensées améliorer à la fois l'estimation des stocks et des flux de carbone, ainsi que les estimations des changements d'occupation et d'utilisation du sol. La compréhension de l'importance de l'hétérogénéité locale sur de grandes régions est un enjeu important. Le coût de ces données étant prohibitif sur les superficies observées, la recherche d'un échantillonnage efficace est indispensable.

4.4 Développement de méthodes d'analyse spécifiques aux images THRS

Toute une série d'articles traitent des caractéristiques des capteurs, de leurs performances techniques et de la qualité des produits proposés.

Par rapport aux approches déjà bien établies pour analyser les données de télédétection optiques classiques, les données THRS possèdent un ensemble de particularités (Kayitakire et al, 2002).

Ryan *et al*, 2003, étudient **la qualité spatiale** des images Ikonos, à partir de plusieurs types d'applications différentes. L'évaluation de cette qualité spatiale se base sur plusieurs critères⁹. Dial *et al*, 2003, complètent cette étude par l'observation de **la qualité radiométrique** des produits en tenant compte du maintien de cette qualité aussi bien dans la durée que sur toute la surface de la scène.

Chaque système d'acquisition produit des distorsions géométriques particulières aux capteurs et à sa configuration dans le plan focal, ainsi qu'à la géométrie globale de prise de vue (capteur + plateforme + Terre) (Toutin, 2004).

Ces caractéristiques doivent être connues quand il s'agit d'utiliser les images THRS avec des données provenant d'autres capteurs. Après avoir fait l'expérience de combiner des images Ikonos et Landsat ETM+ sur plusieurs sites, Goward *et al*, 2003, insistent sur les précautions à prendre par rapport aux différences entre les capteurs et sur la façon dont les données fournies ont été traitées. Par exemple, pour que les pixels aient la même localisation sur le terrain, il est nécessaire de traiter les déformations dues au relief par une procédure d'orthorectification.

Les utilisateurs des images THRS ont besoin de produits ayant une grande précision géométrique. Or Toutin et Cheng, 2000, constatent que la précision inférieure au pixel qui pouvait être acquise avec les capteurs SPOT HRV et Landsat TM/ETM+ n'est pas obtenue avec les données Ikonos-2, même en terrain plat. Les images Ikonos « Geo product » ne prennent pas en compte les déformations du terrain (Kumar *et al*, 2001). Toutin et Cheng, 2000, proposent aux utilisateurs d'acquérir des données « Geo product ¹⁰ » et de les corriger géométriquement avec le relevé de points de contrôles sur le terrain.

Wang *et al*, 2004, obtiennent (en excluant le facteur terrain) une précision ¹¹ de 15 m (à 90 %) pour Ikonos *Geo products* et 23 m (à 90 %) pour Quickbird *Standard products*. Avec la prise de points GPS sur une zone de mangrove, ils arrivent à une précision inférieure au mètre. En revanche, Kayitakire *et al*, 2002, sur une zone forestière des Ardennes, obtiennent avec un image Ikonos-2 (fusion panchromatique-multispectrale) une précision ¹² de 6,3 m (95 %). Ils ont pourtant utilisé des orthophotos numériques (résolution à 0,40 m), un modèle numérique

⁹ NIIRS (National Imagery Interpretability Rating Scale), MTF (Modulation Transfer Function), stability,

¹⁰ corrections géométriques sans contrôle terrain

¹¹ Erreur circulaire

¹² Erreur circulaire

de terrain (résolution 30 m), et des relevés de terrain pris au GPS. Cette erreur est jugée raisonnable pour une cartographie au 1/10 000, selon les spécifications standards de l'USGS (Kayitakire *et al* , 2002).

Pour localiser des houppiers il est indispensable d'obtenir un bon géoréférencement de l'image. Ce qui signifie que la précision géométrique (RMSE¹³) des images, après le relevé de points GPS, devrait être inférieure à la taille des houppiers. Relier les images THRS aux données de terrain, demande d'utiliser des GPS « performants » étant donné les difficultés de travailler sous couvert forestier (Read *et al.* 2003).

Les capteurs THRS enregistrent les données dans un **nombre réduit de bandes spectrales** (bleu, vert, rouge, infrarouge), en particulier **l'absence de la bande moyen infrarouge** limite la séparation spectrale des types de végétation (Thenkabail P.S. *et al*, 2003).

Les images satellites pluri-décamétriques (Landsat, SPOT) étaient codées sur 8 bits. La plupart des nouveaux capteurs disposent d'une « précision » radiométrique améliorée avec un codage sur 11 bits. Thenkabail, 2004, dans son étude sur la végétation de trois écorégions africaines, précise que les caractéristiques qui contribuent à une meilleure sensibilité dans la dynamique des indices de végétation NDVI issus d'images Ikonos par rapport à celle des NDVI issus d'images ETM+ ont été attribuées à : la résolution radiométrique qui améliore sa précision d'un facteur 8 (11-bit Ikonos / 8-bit ETM +) et à la résolution spatiale qui a permis de séparer les propriétés spectrales des unités de paysage à une échelle micro.

Une autre particularité à considérer, pour l'utilisation de l'imagerie THRS, est **l'importance** des ombres, notamment celles des houppiers qui se retrouvent au niveau de la canopée forestière (Goetz, S., J. et al, 2003), et la qualité radiométrique des images est utile pour améliorer la vision d'éléments situés sous les nuages et dans les zones d'ombres (Kumar M. et al, 2001).

L'interprétation de ces images peut faire appel à des **méthodes visuelles traditionnelles**, en délimitant les objets directement à l'écran ou sur des supports imprimés. Pour rechercher les relations entre les mesures des couronnes faites sur le terrain et sur Ikonos, Clark *et al*, 2004, ¹⁴ ont numérisé manuellement les couronnes sur les images.

Les traitements numériques mis au point pour les images haute et moyenne résolution ne sont plus adaptées à ces nouvelles données et la recherche de nouvelles méthodes fait l'objet de plusieurs articles.

La difficulté de l'interprétation de ces images s'est accrue en partie à cause du grand nombre de détails qui les caractérisent (Voorons et al, 2003). La résolution spatiale augmente la variabilité spectrale à l'intérieur des classes. Par conséquent, les approches traditionnelles de classification basée uniquement sur la valeur du pixel, comme la méthode du maximum de vraisemblance ne prennent pas en compte l'agencement des pixels voisins puisque les classes sont construites sur la base des homogénéités de l'information spectrale uniquement (Schiewe et al, 2001). Pour discriminer les objets, l'information texturale devient souvent l'élément fondamental et pour tenir compte à la fois des propriétés spectrales et spatiales des images, il est nécessaire de faire appel à d'autres traitements.

Comme préalable à la classification, la **segmentation de l'image** devient de plus en plus fréquente dans le domaine de l'analyse d'image de télédétection, en particulier du fait de l'augmentation de la résolution spatiale de l'imagerie (Meinel et Neubert, 2004). Cette méthode consiste à regrouper des pixels voisins en régions (ou segments) en utilisant des critères d'homogénéité basés sur des caractéristiques telles que l'uniformité, la réflectance, la

¹⁴ Dispositif de recherche de la Station Biologique de La Selva au Costa Rica

¹³ Root Mean Square Error

texture, la température, etc. (Bonn et Rochon, 1993). Elle extrait les objets par détection de leurs contours, par seuillage, ou par reconnaissance de régions homogènes du point de vue de certains critères (Andréfouet *et al,* 2000). Ensuite les segments (régions) obtenus sont classés en fonction des thèmes recherchés. La qualité de la segmentation est un facteur important. Meinel et Neubert, 2004, comparent les résultats de plusieurs méthodes de segmentation en relation avec les logiciels utilisés.

Il existe plusieurs méthodes pour analyser la texture d'une image, matrice de co-occurrence, variogrammes, reconnaissance d'objets (Thong-Chane, 2002). La méthode basée sur les matrices de co-occurrence semble être la plus simple à mettre en œuvre et la plus flexible (Thong-Chane, 2002). La matrice de co-occurence caractérise la dépendance spatiale des tons de gris. Les statistiques dérivées de ces matrices permettent de calculer des paramètres comme le contraste, l'entropie, la variance, la moyenne, l'homogénéité, Ces images des divers paramètres texturaux sont ensuite combinées avec des bandes spectrales dans un processus conventionnel de classification, comme s'il s'agissait de bandes spectrales additionnelles (Bonn et Rochon, 1993).

Pour cartographier les changements, dus à l'extension de cultures, sur une région côtière de Turquie, Berberoglu *et al*, 2003, testent plusieurs procédures et évaluent la précision des classifications obtenues. Après avoir réalisé une classification classique (supervisée, maximum de vraisemblance) ils utilisent l'information texturale de l'image Ikonos d'après la matrice de co-occurrence et la méthode du variogramme. L'addition de l'information de texture augmente à chaque fois la précision de la classification.

5 - ETUDES DE CAS : METHODES ET RESULTATS

Plusieurs articles présentent un intérêt particulier car ils abordent des thèmes de recherches actuelles ou futures de l'Unité de Recherche. Il a donc semblé utile de les sélectionner et d'analyser plus précisément les méthodes mises en oeuvre et les résultats obtenus.

5.1 Suivi des impacts d'exploitation

Spatial Analysis of Logging Impacts in Amazonia using Remotely Sensed Data Jane M. Read

L'article présente les résultats d'une recherche de méthodes pour caractériser les impacts de l'exploitation récente (moins d'un an) dans un projet « d'exploitation à faible impact » en Amazonie brésilienne (Mil Madeireira Itacoatiara Ltda.).

Données satellites utilisées : Landsat 7 ETM + : bandes P, B, V, R, NIR.et NDVI, Ikonos : bandes P, B, V, R, NIR et NDVI,

3 intensités d'exploitation : importante, modérée, sans exploitation,

Site étudié: 15 parcelles de 10 ha et 8 parcelles de 335 ha.

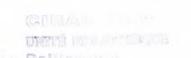
Analyses statistiques et géostatistiques testées sur les parcelles (chaque bande spectrale et NDVI) :

- moyenne et coefficient de variation (%)
- autocorrélation spatiale I de Moran 1
- texture : (3X3, écart type), uniquement pour Ikonos
- dimension fractale, uniquement pour Ikonos

Résultats:

- Les signatures spectrales, seules, ne permettent pas de caractériser un gradient d'exploitation.
- Le coefficient de variation calculé sur les valeurs des pixels ne donne pas un résultat très significatif comparé aux autres méthodes.
- Les méthodes spatiales sont efficaces pour distinguer les perturbations de la canopée suite à l'exploitation à faible impact. Quand l'exploitation s'intensifie les indices de corrélation spatiale et de texture augmentent.
- Les données Ikonos permettent d'identifier :
 - les pistes principales : 20-25 m
 - les pistes secondaires : 10-20 m
 - les parcs à bois : 0,10 à 0,30 ha
 - les trouées < 20 m2
- Les méthodes sont comparables aux deux échelles de travail (10 ha et 335 ha) et les résultats sont stables.

5.2 Analyse du couvert et mesures des couronnes



Estimating Canopy Structure in an Amazon Forest from laser range Finder and Ikonos satellite Observation

G. P. Asner and al

Cette étude teste, en forêt tropicale humide, des méthodes pour comparer des mesures de couronne estimées au sol avec un laser et les mesures des diamètres. Elle rapproche aussi ces mesures de terrain avec celles extraites des images Ikonos.

Le site de l'expérience couvre 50 ha de forêt dense tropicale humide dans l'état du Para au Brésil.

Dispositif et données :

- transects de 500 m de long et de 10 m de large espacés de 50 m.
- tirage de 14 transects pour mesures des arbres au laser :
- mesure des diamètres pour 2171 arbres (d>20 cm)
- mesure d'un échantillonnage de 300 couronnes (hauteur de la partie haute et basse de la couronne, plus grande largeur)
- Image Ikonos, panchromatique (résolution à 0,80 m : 675 couronnes ont été identifiés et digitalisées manuellement.

Résultats:

- Les relations sont significatives entre les diamètres des arbres, leur hauteur et la taille des couronnes,
- L'interprétation de l'image Ikonos :
 - sur-estime le nombre des couronnes les plus grandes,
 - sous-estime le nombre des couronnes les plus petites.
 - donne une bonne précision pour les gros arbres de l'étage dominant.

Quantifying Mortality of Tropical rain Forest Trees using High Spatial Resolution Satellite Data

D.B. Clark and al

Cet article décrit les méthodes utilisées pour évaluer la mortalité en forêt tropicale humide avec des images THRS.

Site: 600 ha de forêt tropicale mature à Selva Biological Station - Costa Rica

Données : Image panchromatique Ikonos (1m) : 16 août 2000 Image panchromatique Quickbird (0,70 m) : 6 juin 2002 27 couronnes identifiées sur Ikonos, Quickbird et au sol.

Méthodes:

- Digitalisation manuelle des couronnes sur les images Ikonos et Quickbird et calcul d'un indice de surface de couronne (Crown Area Index : CAI) construit à partir des deux plus grands axes perpendiculaires.

- Comparaison des images Quickbird (2002) et Ikonos (2000) pour détecter les trouées et les comparer aux arbres morts sur le terrain (2003).

Résultats:

Géolocalisation: Pour 17 émergents le décalage de localisation entre l'image Quickbird et le terrain est en moyenne de 2,7 m (précision < taille des couronnes)

Relations couronnes mesurées sur le terrain et au sol :

Ikonos: $r^2 = 0.46$ n = 27Ouickbird: $r^2 = 0.59$ n = 27

Relations allométriques couronnes-diamètre :

Sur le terrain : $r^2 = 0.77$ n = 27

Ikonos: $r^2 = 0.63$ n = 27Quickbird: $r^2 = 0.77$ n = 27

Mortalité:

<u>Dans les parcelles inventoriées annuellement</u>: Sur 27 arbres morts (d>30 cm) entre 2000 et 2002, 12 trouées sont détectées sur les images (12/27 = 44,40 %)

La comparaison des images Ikonos et Quickbird montre que 17 arbres sur 27 ont disparu entre les deux dates (63 %).

Validation sur le terrain (parcelles) de la mortalité détectée sur image satellites :

25 / 27 ont pu être validées sur le terrain (0,926).

Estimation du taux de mortalité annuelle à l'échelle du paysage :

Images satellites: 2,8 %

Inventaire : arbres de diamètre ≥ 10 cm : 2,3 %

arbres de diamètre ≥ 30 cm : 2,8 %

5.3 Approche multi-capteurs

Empirical comparison of Landsat 7 and Ikonos multispectral measurements for selected Earth Observation System (EOS) validation sites.

Goward S.N. and al

Cette étude compare, sur plusieurs sites d'observation, les mesures faites avec les données des capteurs Landsat 7 ETM+ et Ikonos. Elle cherche, en outre, à voir si les informations du pixel 4 m d'Ikonos peuvent servir de « réalité terrain virtuel » pour le pixel 30 m de Landsat.

Localisation: USA-12 sites d'observation le long d'un transect est-ouest (gradient pluviométrique et différents types de végétation)

Données: Images Ikonos et Landsat

Traitements appliqués:

- orthorectification des images

- agrégation spatiale des pixels Ikonos pour une comparaison avec les mesures faites avec les données Landsat
- suppression des nuages et des ombres
- étalonnage radiométrique
- conversion des comptes numériques (enregistrés par les capteurs) en luminances des pixels
- calculs d'indices de végétation
- analyses statistiques des données pour comparaison des potentialités des 2 capteurs

Principaux résultats:

Orthorectification des images: malgré la sélection d'images Ikonos ayant un angle de dépointage $< \pm 30$ °, des problèmes d'alignements de pixels subsistent entre les images des 2 capteurs.

Bandes spectrales: les mesures faites dans les bandes spectrales, rouge et proche infrarouge, des deux capteurs ne sont pas similaires.

Indices de végétation : Sur un même paysage les indices sont différents. Les indices de végétation calculés avec les pixels Ikonos, agrégés à 30 m, ont des valeurs plus faibles.

6 - CONCLUSION

La télédétection à très haute résolution spatiale apporte une nouvelle vision géographique et rend maintenant possible la perception d'objets de taille humaine. Jusqu'à présent leur identification restait plutôt du domaine des photographies aériennes et de leur interprétation. Avec la plupart des nouveaux capteurs, il est devenu possible de combiner la précision de la résolution spatiale et les informations dans quatre bandes spectrales. L'accès rapide aux images est également un atout non négligeable.

A chaque passage des satellites, les surfaces couvertes au sol étant faibles, les capteurs compensent en enregistrant des images obliques avec des angles pouvant aller jusqu'à 50°. Il existe donc une forte probabilité d'acquérir des données qui devront être corrigées. De trop fortes distorsions rendent néanmoins les images inutilisables.

La taille et le coût des images, dans l'ensemble encore élevé, limitent actuellement leur utilisation dans les projets, d'autant plus qu'il faut y ajouter la préparation des données et leurs traitements.

Cette synthèse a été l'occasion de faire un point sur des applications liées en particulier aux milieux forestiers tropicaux et d'évaluer à la fois les apports et les limites de ces nouvelles données.

Par exemple, pour une cartographie à grande échelle (occupation du sol, types de végétation, ...) la précision des images THRS est de toute évidence bien adaptée et les résultats actuels satisfaisants, mais la question de l'extension de la zone est cruciale et orientera le choix des données et des méthodes. Dans le cas d'une validation d'un travail cartographique les images THRS sont parfaitement appropriées et peuvent être utilisées comme « réalité de terrain ». Il est important néanmoins d'appuyer cette démarche sur un dispositif d'échantillonnage rigoureux.

La caractérisation des milieux forestiers à l'échelle de l'arbre semble plus délicate. Plusieurs articles font état de travaux sur la relation entre les mesures des diamètres et des couronnes prises sur le terrain et celles extraites des images. Les résultats sont variables et dépendent de la structure de la forêt et de la taille des couronnes. De toute façon, ces recherches réclament un fort investissement à la fois sur le terrain et pour le traitement des images.

Pour le suivi de l'exploitation forestière, en complément des images HRS qui fournissent déjà de bonnes informations, les images THRS permettent sur des sites représentatifs d'estimer avec plus de précision l'impact des perturbations.

Cette complémentarité entres les capteurs semble très prometteuse car elle met l'accent sur les apports de chacun, en limitant le coût des données. Elle nécessite néanmoins la prise en compte de leurs caractéristiques pour comparer et intégrer les données dans une démarche multi-échelle.

Peu d'articles ont été trouvés sur la détection d'arbres isolés (arbres hors forêt) bien que la taille du pixel soit bien adaptée. Les données THRS et l'utilisation des méthodes orientées objet devraient sans doute faire avancer les recherches actuelles.

La résolution métrique augmente la quantité d'informations de l'image et rend plus complexe son analyse. L'hétérogénéité, donc la texture des images, oblige à repenser les méthodes de traitement. Les classifications basées sur les approches radiométriques « pixel à pixel » ne sont pas satisfaisantes. Les approches actuelles prennent en compte l'information texturale : segmentation, calcul d'indices de texture à partir de la matrice de co-occurrence.... La méthode « orientée objet » utilise des modèles, radiométriques et géométriques, pour délimiter automatiquement les objets

recherchés (parcelles, arbres, villages...). Elle est souvent associée au logiciel eCognition 15 16, qui permet également la combinaison d'images de sources différentes multi-résolutions et multi-dates.

D'autres capteurs avec des résolutions spatiales encore plus fines sont annoncés (annexe 3). Par conséquent, la variété des capteurs existants et futurs va conduire à la coexistence d'une multitude d'images complémentaires en terme de résolutions spatiale, spectrale et temporelle et le développement de méthodes de fusion, panchromatique/multispectal, de combinaisons multicapteurs, multi-échelles, sera indispensable pour pouvoir exploiter cette diversité technologique.

¹⁶ Definiens AG Trappentreustr. 1 80339 Munich, Germany

¹⁵ Premier logiciel de traitement d'images orienté-objet commercialisé

ANNEXE 1: Revues consultées

Acta Oecological: http://www.elsevier.com

Aquatic Botany: http://www.elsevier.com

Biological Conservation: http://www.elsevier.com

Biotropica: http://www.atbio.org/biotropica

Ecological Applications: http://www.esapubs.org

Ecology Letters

Earth Observation Magazine: http://www.eomonline.com

Forest Ecology and Management: http://www.elsevier.com

Geocarto International: http://www.geocarto.com

Geoscience and Remote Sensing: http://www.grss-ieee.org

Indian Society of Remote Sensing: http://www.isrindia.org

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation :

http://www.elsevier.com

International Journal of Remote Sensing: http://www.tandf.co.uk

Journal of Applied Ecology: http://www.blackwellpublishing.com

Journal Canadien de Télédétection

Journal of Forestry

Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection : http://www.sfpt.fr

Photointerprétation

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing: http://www.asprs.org

Remote Sensing of Environment: http://www.elsevier.com

Turkish Journal of Agriculture and Forestry: http://journals.tubitak.gov.tr:agriculture

ANNEXE 2 : Références bibliographiques citées

Andréfouët, S., Maritorena, S., Loubersac, L., (2000), Un bilan de la télédétection appliqué aux milieux corallines. *Océanis, vol.26 n° 3, 2000*, pp. 311-349.

Asner, G.P., Palace, M., Keller, M., Pereira, R., Silva, J.M.N., Zweede, J.C., (2002), Estimating canopy structure in an amazon forest from Laser range finder and Ikonos satellite observations. *Biotropica* 34(4), pp. 483-492.

Berberoglu, S., Alphan, H., Yilmaz, K.T., (2003), A remote sensing approach for detecting agricultural encroachment on the eastern mediterranean coastal dunes of Turkey, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 27 (2003)*,pp. 135-144.

Bonn, G., Rochon, G., (1003) Précis de Télédétection, Principes et Méthodes, vol. 1, p. 370 et p. 383.

Clark, D.B., Castro, C.S., Alvarado, L.D.A., Read, J.M., (2004) Quantifying mortality of tropical rain forest trees using high-spatial-resolution satellite data. *Ecology Letters* (2004) 7, pp 52-59.

Dial, G., Bowen, H., Gerlach, F., Grodecki, J., Oleszczuk, R. (2003) Ikonos satellite, imagery, and products. *Remote Sensing of Environment 88 (2003)*, pp 23-36.

Goetz, S.J., Wright, R.K., Smith, A.J., Zinecker, E., Schaub, E. (2003) Ikonos imagery for resource management: Tree cover, impervious surfaces and riparian buffer analyses in the mid-Atlantic region, *Remote Sensing of Environment 88 (2003)*, pp 195-208.

Goward, S.N., Davis P.E., Fleming, D., Miller, L., Townshend, J.R., (2003) Empirical comparison of Landsat 7 and Ikonos multispectral measurements for selected Earth Observation System (EOS) validation sites, *Remote Sensing of Environment 88 (2003)*, pp 80-99.

Hansen, M.C., DeFries, R.S., Townshend J.R.G., Marufu, L., Sohlberg, R. (2002) Development of a Modis tree cover validation data set for Western Province, Zambia, *Remote Sensing of Environment 83* (2002), pp 320-335

Hurtt, G., Xiao, X., Keller, M., Palace, M.Asner, G.P., and al (2003) Ikonos imagery for the Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). Remote Sensing of Environment 88 (2003), pp 111-127.

Imbernon, J., (2002) Cartographie participative à très haute résolution. Utilisation d'une image Ikonos dans un projet de développement communal en Haïti. Revue Internationale de Géomatique, vol. 12, $n^{\circ}1/2002$, pp 115-128.

Jacobsen, K., (2003) Geometric potential of Ikonos and Quickbird images, in GIS Geo-Informations-System 9/2003, pp 33-39.

Kovacs, J.M., Flores-Verdugo, F., Wang, J., Aspden, L.P. (2004) Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquatic Botany, 80 (2004)* pp 13-22.



Kayitakire, F., Giot, P., Defourny, P. (2002) Discrimination automatique de peuplements forestiers à partir d'orthophotos numériques couleur : un cas d'étude en Belgique. *Journal Canadien de Télédétection, vol 28, n*°5, pp 629-640

Kayitakire, F., Farcy, C., Defourny, P., (2002) Ikonos -2 imagery potential for forest stands mapping. ForestSAT Symposium, Heriot Watt University, Edinburgh, August 5-9, 2002.

Kumar M., Castro, O. (2001) Practical aspects of Ikonos imagery for mapping. Asian Conference of Remote Sensing, nov. 2001.

Neubert, M., Meinel , G., A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data, International Archives of the ISPRS, *in volume XXXV, Part B, Commission 4, S.1097-1105 (isprs_istanbul).*

Mugroho, M., Hoekman, D.H., de Kok, R.,(2002) Analysis of the forests spatial structure using SAR and Ikonos data. *Symposium Heriot Watt University, Edinburgh*. 2002, 5-8 août

Rawat, J.K., Dasgupta, S., Kumar R. (2004) Assessment of tree resources outside forest based on remote sensing satellite data. *Map India Conference 2004, Proceedings*

Read, J.M. (2003) Spatial analyses of logging impacts in Amazonia using remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering § Remote Sensing, vol.69, n° 3, mars 2003,* pp 275-282.

Read, J.M., Clark, D.B., Venticinque, E.M., Moreira, M.P. (2003) Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*, 2003-40, pp.592-600.

Ryan, R., Baldridge, B., Schowengerdt, R.A., Choi, T., Helder, D.L., Blonski, S. (2003) Ikonos sparial resolution and image interpretability characterization, *Remote Sensing of Environment 88 (2003)*, pp 37-52.

Stoney, W.E. (2005) Guide to Land Imaging Satellites, Global Priorities in land Remote Sensing, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), October 23-27 2005, Sioux Falls S.D. 13 p.

Schiewe, J., Tufte, L., Ehlers, M., (2003) Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing, *Geo-Informations-Systeme*, *6/01*, pp. 34-39.

Thenkabail, P.S., (2004) Inter-sensor relationships between Ikonos and Landsat 7 ETM+ NDVI data in the three ecoregions of Africa. *International Journal of remote Sensing, vol. 25, n° 2,* pp 389-408.

Thenkabail, P.S., Enclona, E.A., Ashton, M.S., Legg, C., De Dieu, M.J. (2004) Hyperion, Ikonos, Ali, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment 90 (2004)*, pp 23-43.

Thenkabail, P.S., Hall, J., Lin, T., Ashton, M.S., Harris, D., Enclona, E.A. (2003) Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using Ikonos and Landsat-7 ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 4 (2003)*, pp 255-270.

Thong-Chane, A., (2002) Apport de la très haute resolution spatiale pour la cartographie par télédétection multispectrale du verger caféier en Ouganda. *Mémoire de fin d'études*, *oct.2002*. ENSA-Montpellier-CIRAD.

Toutin, T. (2004) Photogrammétrie satellitale pour les capteurs de haute résolution : Etat de l'art. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n°175 (2004-3), pp 57-68.

Toutin, T., Cheng, P., (2000) Demystification of Ikonos, Earth Observation Magazine, vol. 9 n°7.

Voorons, M., Bénié, G.B., Fung, K. (2003) Classification d'images à très haute résolution spatiale de foresterie à l'aide de l'analyse multifractale, 25 ème Symposium Canadien sur la Télédétection et 11 ème Congrès de l'Association Québéquoise de Télédétection, oct. 2003, Montréal.

Wang, L., Sousa, W.P., Gong, P., Biging, G.S. (2004) Comparison of Ikonos and Quickbird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment 91* (2004), pp 432-440.

ANNEXE 3: Capteurs THRS actuels et futurs

Satellites	Pays	Opératio	nnalité	Caractéristiques			
			08 2009 20	0 Résoli	Fauchée (km)		
			-	panchromatique	multispectral		
ALOS	Japon			2,5	10	35-70	
CBERS-3	Chine/Brésil	166		5	20	60-120	
CBERS-4	Chine/Brésil		. 100	5	20	60-120	
ErosA1	Israël			1,8		14	
Eros B1	Israël			0,7		7	
Eros C	Israël			0,7	2,5	16	
Ikonos-2	USA			1	4	11	
IRS-cartosat-1	Inde			2,5		30	
IRS-cartosat-2	Inde			1		10	
IRS-ResourceSat-2	Inde			6	6-23-56	24-140-740	
Kompsat-2	Corée		32233	1	4	15	
Orbiew 5	USA			0,41	1,64	15	
Pleiades-1	France	18.6		0,7	2,8	20	
Pleiades-2	France			0,7	2,8	20	
RazakSat	Malaisie			2,5	5		
Resurs DK-1	Russie			1	3	28	
SPOT 5	France	Carried and		2,5	10	120	
Theos	Thaïlande	No.		2	15	22-90	
WorldView-2	USA			0,5	1,8	16	

D'après "Guide to Land Imaging Satellite. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) oct 2005"

ANNEXE 4: Adresses des distributeurs

DISTRIBUTEURS et ADRESSES des CATALOGUES EN LIGNE des IMAGES THR et THRS

Distributeurs	Satellites/Capteurs	Adresses Internet				
SPOT IMAGE	SPOT	http://www.spotimage.fr/automne modules files/standard/public/p335 ba582c667a21f3b7d1108ad9773629fdListePrix Fr0705.pdf				
	QUICKBIRD	http://www.spotimage.fr/html/ 54 103 104 106 .php				
	IKONOS	http://www.spotimage.fr/html/ 54 103 104 105 .php				
	IRS	http://www.spotimage.fr/html/ 54 103 109 .php				
EURIMAGE	QUICKBIRD	http://www.eurimage.com/products/docs/eurimage price list.pdf				
SPACE IMAGING	IKONOS	p://carterraonline.spaceimaging.com/cgi-bin/Carterra/phtml/login.phtml				
LAND INFO	IKONOS QUICKBIRD IRS	http://www.landinfo.com/products_satellite.htm				
INTEC Americas	IKONOS QUICKBIRD IRS	http://www.intecamericas.com/products.htm				
ImageSat International	EROS A	http://www.imagesatintl.com/?catid={32CE1D0B-1897-477B-B397-0CA3453F629E}				
GEOEYE	Orbiew	http://www.geoeye.com				

IMAGES	ADRESSES CATALOGUE EN LIGNE
QUICKBIRD	http://archivetool4.digitalglobe.com/ot/Map.isp;jsessionid=svtokogdz1
IKONOS	http://carterraonline.spaceimaging.com/cgi-bin/Carterra/phtml/login.phtml S'inscrire gratuitement sur le site du catalogue

D'après Christine Brognoli