

ÉCOLOGIE DU PAYSAGE ET TÉLÉDÉTECTION DES MILIEUX ALLUVIAUX

LANDSCAPE ECOLOGY AND REMOTE SENSING OF FLOODPLAINS : A REVIEW

GARGUET-DUPOINT Bruno ¹ GIREL Jacky ^{1,2}

¹ Université Joseph Fourier, Centre de Biologie Alpine, "Laboratoire Ecosystèmes Alpains", BP 53X - GRENOBLE Cedex France

² URA CNRS 1974, Écologie des Eaux Douces et des Grands Fleuves (Lyon 1).

Résumé : L'utilisation de la télédétection comme un outil d'analyse du paysage dans les domaines de l'environnement, de l'agriculture et de la gestion des ressources renouvelables est largement documentée. Du fait de ses capacités multibandes, la télédétection est une méthode inégalable dans la perception et la mesure de caractéristiques biophysiques. La télédétection permet de collecter des données à des échelles et à des époques différentes. Ces caractéristiques offrent des opportunités d'analyse de phénomènes variés à diverses échelles spatio-temporelles. En outre, elle peut être utilisée comme une source de données pour la construction, l'affinement ou la validation de modèles permettant de prédire les changements de paysage.

Cette revue a pour objectif d'illustrer l'intérêt de la télédétection dans les études d'écologie du paysage et plus particulièrement pour l'étude des hydrosystèmes. Nous présentons tout d'abord le concept de l'écologie du paysage en général et son application aux corridors fluviaux. Ensuite nous présentons le contexte général d'utilisation de la télédétection en écologie du paysage et les concepts de "l'outil télédétection", moyen d'observation et de mesure des éléments constitutifs d'un paysage dans une perspective multidimensionnelle.

Mots clés : Télédétection, écologie du paysage, plaine alluviale, végétation, cartographie

Summary : The use of remote sensing as a landscape analysis tool in the framework of environment, agriculture and management of renewable resources has been widely dealt with. Because of its multibands capacities, remote sensing is incomparable when perception and biophysic characteristics measurement are concerned. Remote sensing permits to collect data at different scales and times. These characteristics give the opportunity to analyse various phenomena at different spatiotemporal scales. In addition, it can be used as a source of data for construction, refinement or validation of models allowing to predict changes in the landscape.

The aim of this review is to show the remote sensing interest in landscape ecology studies and more particularly in the floodplain study. We will first present the general concept of landscape ecology and its application to river corridor. Then we will present the context in which remote sensing in landscape ecology is used and the concepts of the remote sensing tool as a mean of observation and measurements of the different elements which make up a landscape from a multidimensional angle.

Key words: Remote Sensing, Landscape Ecology, Floodplain, Vegetation, Mapping

1. - L'ÉCOLOGIE DU PAYSAGE

1.1 - DÉFINITIONS

Le "paysage" est pour la langue française "la partie d'un pays que la nature présente à un observateur"; le paysage signifie également un site, une vue (Le Petit Robert, 1976). Les termes anglais de "landscape" ou allemand "Landschaft" ont une signification plus fonctionnelle que le terme français "paysage" qui concerne plus spécialement l'aspect esthétique. Le paysage doit donc être mieux défini car il peut avoir des acceptations très différentes selon les spécialités.

Comme l'a bien montré l'écologiste Delpoux (Delpoux, 1972), le paysage géographique qui correspond à une portion de l'écorce terrestre diffère de l'écosystème au sens d'Odum, c'est à dire "une entité ou unité naturelle qui inclut les parties vivantes et non vivantes pour produire un système stable dans lequel les échanges entre les deux parties s'inscrivent dans des cheminements circulaires". Sajaloli dans son étude sur l'évolution des "socio-systèmes paludéens" de Picardie (Sajaloli, 1993) voit la nécessité d'apporter une définition plus fonctionnelle du paysage géographique : "Le paysage est une véritable empreinte, il renvoie à des structures économiques et sociales caduques qu'il faut examiner pour comprendre l'état actuel". Pour les géographes modernes, le paysage est "sécrité" par l'Homme au cours des siècles ; il correspond à un ensemble d'éléments (végétation naturelle, zones agricoles, voies de communication, agglomérations, étangs, cours d'eau...) dont l'organisation spatiale est fortement liée à l'utilisation ancienne et actuelle du milieu.

L'Écologie du paysage prend elle aussi en compte le rôle de l'Homme puisqu'elle est définie comme une branche de l'Écologie moderne qui traite des interrelations entre l'Homme et les paysages qu'il construit (Naveh & Lieberman, 1984 ; Lefeuvre & Barnaud, 1988 ; Schreiber, 1990 ; Zonneveld & Forman, 1990 ; Leser & Rodd, 1991).

Le paysage écologique est encore défini par ces auteurs comme un espace hétérogène composé de groupes d'écosystèmes qui interagissent et se répètent en constituant des formes similaires (Forman & Godron, 1986). Le paysage est un niveau d'organisation des systèmes écologiques; l'impact de l'homme y est omniprésent tant dans la structuration de l'espace que dans les contraintes qu'il exerce, à échelle plus fine, sur l'occupation des sols (Burel, 1994)

Le "paysage" est une notion en fait strictement identique au concept d'écocomplexe développé en France par Blandin et Lamotte (Blandin & Lamotte, 1988) qui offre l'avantage considérable d'éviter toutes les ambiguïtés du terme paysage mais qui, malheureusement, n'a pas été validé par l'usage (Roy, 1990).

L'Écologie du Paysage s'intéresse aux processus écologiques qui se déroulent au sein d'un paysage, donc dans une portion de territoire hétérogène à l'échelle d'étude, où la composante spatiale est primordiale et où le rôle de l'homme impose de prendre en compte une composante temporelle (Burel, 1994). L'Écologie du Paysage accorde une place importante à l'analyse de la structure et du fonctionnement. Comme le note Roy (Roy, 1990), fonctionner, pour un paysage, un écocomplexe, un ensemble d'écosystèmes interactifs c'est faire en sorte qu'il se produise des échanges d'énergie et de matière entre les écosystèmes et le reste de l'univers, entre les écosystèmes et à l'intérieur même des écosystèmes (relations sol-plante, faune-flore...).

1.2 - LE CORRIDOR FLUVIAL

L'écologie des cours d'eau insérés dans le paysage est un champ d'investigation considérable ; le cours d'eau et la vallée inondable qui le borde ont une fonction habitat, une fonction liaison et une fonction barrière des plus intéressantes. De plus, les rivières ont un rôle de révélateur de fonctionnement écologique des paysages: importance des transports solides, forte teneur en nutriments du fait de l'agriculture, phénomènes de pollutions, de crues torrentielles liées à la déforestation, rôle de la ripisylve (couloir migratoire) (Decamps, 1984 ; Decamps & Naiman, 1989). Un ouvrage récent (Malanson, 1993) fait le point sur la dynamique, le fonctionnement et l'importance des paysages alluviaux et sur la nécessité d'y mener des recherches approfondies.

1.2.1.- DÉFINITION DU CORRIDOR FLUVIAL

Le corridor fluvial en tant que composante structurale en Écologie du Paysage est défini par Forman et Godron (Forman & Godron, 1986) comme "la bande de végétation le long d'un cours d'eau qui diffère de la matrice environnante". Les mêmes auteurs donnaient une définition plus étroite en 1981 du corridor fluvial (Forman & Godron, 1981) "Les corridors fluviaux sont des bandes qui bordent les cours d'eau et qui varient en largeur selon la taille du cours d'eau ; ils contrôlent les flux d'eau et de matière, les apports de nutriments minéraux par ruissellement, minimisent les crues, les dépôts et les pertes de fertilité des sols."

Cette définition fait référence à un corridor fluvial pas ou peu influencé par les aménagements et comprenant les principales formes géomorphologiques alluviales et les principaux groupements végétaux qui les colonisent : le chenal, les bancs d'alluvions, la bordure (avec ou sans bourrelet alluvial), la plaine d'inondation (inondée au moins tous les deux ans) et enfin une ou plusieurs terrasses alluviales au niveau desquelles se trouvent les limites du corridor proprement dit. Ce système peut se trouver compliqué par la présence d'îles et de chenaux multiples. Compte tenu de l'impact d'aménagements qui n'ont cessé de s'ajouter depuis la première moitié du 19^{ème} siècle, cette notion de corridor fluvial, réduite à la bande active d'un cours d'eau non aménagé, doit être redéfinie dans son nouveau contexte. Ainsi, dans le cas qui nous préoccupe, nous nous intéresserons à l'ensemble constitué par le lit artificiel de la rivière et la plaine d'inondation maintenue actuellement "hors d'eau" par les digues continues et insubmersibles et la régulation (écrêtement des crues dues aux retenues). Ce corridor fluvial "perturbé" a un fonctionnement particulier depuis les premiers aménagements de 1829 (Girel, 1994). Il n'a pas cessé de se transformer depuis cette date et suit une évolution qui pourra être déviée positivement ou négativement par les aménagements actuels ou futurs.

1.2.2.- L'ORGANISATION SPATIALE DU PAYSAGE ALLUVIAL

Pautou (Pautou, 1988) a montré que la végétation des zones alluviales du système rhodanien étaient en étroite dépendance avec trois grands gradients : (i) un gradient longitudinal amont/aval ; (ii) un gradient transversal allant des bancs d'alluvions inondées plusieurs fois par an aux dépôts anciens soumis aux crues exceptionnelles ; (iii) un

gradient vertical défini par les variations de la nappe souterraine.

Malanson (Malanson, 1993) note que les milieux alluviaux sont organisés dans deux grands ensembles spatiaux qu'on peut considérer comme des gradients : (i) un gradient longitudinal allant de cours d'eau de premier ordre aux cours d'eau d'ordre de plus en plus élevé, caractérise la localisation de la zone d'étude ; (ii) un gradient transversal (qui regroupe les gradients transversal et vertical au sens de Pautou) perpendiculaire au chenal principal et étroitement dépendant de conditions locales.

Ces ensembles structuraux sont liés aux aspects fonctionnels des milieux dans la mesure où ils jouent un rôle sur les transferts des flux d'énergie, de matières et d'espèces. Le gradient longitudinal est influencé par le climat; dans notre cas d'étude nous passons d'un climat alpin à un climat montagnard puis à un climat tempéré de plaine. Ce gradient est marqué par la présence d'un continuum d'espèces adaptées aux conditions climatiques locales. Les conditions hydrologiques vont changer aussi le long de ce gradient : les flux d'eau et d'énergie croissent de l'amont vers l'aval. Des changements géomorphologiques coïncident avec ces changements hydrologiques : on passe d'une section d'érosion à une zone de transport puis à une section de dépôt.

Le gradient transversal est lié aux conditions hydrologiques. Leur variabilité va entraîner l'existence de secteurs plus favorables à certaines espèces en ce qui concerne la vitesse de colonisation, la croissance et le développement. On notera par exemple l'existence de gradients concernant la colonisation des milieux neufs, de gradients concernant la résistance à l'inondation (durée, fréquence et variations d'amplitudes de la mise en eau) : certaines espèces sont réellement avantagées lors des compétitions.

Les interactions entre Hydrologie, Géomorphologie et Écologie des espèces permettent la reproduction des paysages; les interactions entre microclimat, cycle des nutriments, cycle des matières (érosion, sédimentation) couplés avec une pression anthropique omniprésente entraînent des complexités qui expliquent que chaque cas peut apparaître comme unique (Decamps & Fortuné, 1991).

1.2.3.- INSERTION DU CORRIDOR FLUVIAL DANS UN SCHEMA ÉVOLUTIF CARACTÉRISTIQUE DU PIEDMONT ALPIN

Ellenberg (Ellenberg, 1987) a brossé dans leurs grandes lignes les changements spatio-temporels des plaines alluviales alpines d'Europe centrale; il a montré que le paysage végétal naturel s'est converti en un paysage agricole aux cours des deux derniers millénaires. Deux niveaux, dans le sens longitudinal amont aval sont distingués :

- *une section de vallée correspondant au cours supérieur* et qui est marquée d'abord faiblement par les activités humaines puis qui est soumise à une importante déforestation. Cette section est alors le théâtre de crues dévastatrices provoquées par une forte érosion (de l'an mil à la fin du 17^{ème} siècle). A partir de 1800, on note une certaine stabilité hydromorphologique à mettre en relation

avec la revégétalisation des versants d'altitude (reboisements naturels et artificiels sur des zones pâturées abandonnées).

- *une section de vallée de piedmont "inférieur"*, montrant avant l'an mil des traces de colonisations (défrichements) ponctuelles. On pouvait y rencontrer des marais d'aune glutineux dans d'anciens bras morts colmatés, des fourrés bas de saules sur divers dépôts jeunes ainsi que des forêts de bois dur à chênes pédonculés sur les dépôts plus anciens des terrasses stabilisées. Jusqu'à l'an mil on va assister à une sédimentation des éléments fins en provenance de l'amont, à une augmentation des surfaces soumises au pâturage et donc à une augmentation des flux de crue ainsi qu'à un abaissement général et naturel de la nappe souterraine. Jusqu'au début du 19^{ème} siècle la sédimentation progresse, les bras morts et les lits secondaires se comblent, les prairies fauchées se développent en même temps que les pâturages aux dépens des groupements forestiers. Les premiers travaux de corrections et de protection font leur apparition tandis que la nappe continue à s'enfoncer. Enfin, au cours du 19^{ème} siècle, commencent et s'achèvent les grands travaux d'endiguement. L'ancienne plaine d'inondation est devenue labourable mais ne peut plus être naturellement fertilisée par les dépôts de crue. L'érosion à l'intérieur du cours chenalisé s'accélère.

1.3 - ÉCOLOGIE DU PAYSAGE ET TÉLÉDÉTECTION

Les échanges entre écosystèmes sont d'une nature et d'une intensité qui dépendent de la structure du paysage. L'étude de la manière dont ces flux (d'énergie, d'eau, de nutriments, de sédiments, d'espèces) se répartissent dans la structure spatiale, font "fonctionner le paysage", en modifiant la structure est l'essence même de l'Écologie du paysage. La situation relative des éléments du paysage, leur arrangement général dans une mosaïque et le type de frontières établies entre eux deviennent des axes prioritaires d'étude. Les arrangements spatiaux des éléments ne correspondent pas toujours à des modèles généraux car l'histoire peut rendre chaque cas unique (Malanson, 1993).

Le principe fondamental de l'Écologie du paysage est que "*la structure des paysages affecte les processus*" (Forman & Godron, 1986 ; Malanson, 1993). La structure des paysages demande donc à être étudiée de manière quantitative; il faut faire une délimitation nette des éléments du paysage et les cartographier de façon précise. La télédétection apparaît comme l'outil efficace permettant d'analyser ces paysages, de les cartographier, de les quantifier puis même de les inclure dans des systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) (Hewitt, 1990).

2. - TÉLÉDÉTECTION

La télédétection est un outil présentant trois avantages pour les études environnementales : (i) l'absence de contact direct entre le capteur et l'objet étudié ; (ii) la répétition de mesures globales ou régionales ; (iii) la diversité de capteurs permettant d'obtenir des données dans des bandes spectrales allant du visible aux micro-ondes en passant par le proche infrarouge avec des résolutions spatiales différentes (Lulla & Mausel, 1983).

Du fait de ces propriétés spécifiques la télédétection est diversement utilisée en écologie du paysage. Nous présentons ci-dessous les principaux domaines d'application,

les problématiques écologiques concernées, le mode d'intervention de la télédétection dans ces problématiques et enfin les perspectives d'utilisations de la télédétection dans l'étude des corridors fluviaux.

2.1 - LES DOMAINES D'APPLICATION

La télédétection est utilisée pour l'étude des ressources renouvelables et non renouvelables ainsi que dans le cadre d'applications environnementales liées à la gestion du territoire (tableau I).

La liste des domaines d'applications soumise dans le tableau I n'est pas exhaustive et de nombreux autres exemples peuvent s'inclure dans les différentes catégories présentées.

On peut remarquer que le point commun de la plupart de ces exemples est que chacun d'eux est soit la cause soit l'effet d'un processus d'évolution du paysage. La détermination du sens et de la validité des données de télédétection nécessite une bonne connaissance de l'écosystème étudié ainsi qu'une compréhension de base des relations énergie matière qui se manifestent dans les données télédéteectées (Jensen, 1986).

Les trois catégories principales de recherches écologiques particulièrement compatibles avec l'utilisation des techniques de télédétection sont : (i) les inventaires et la cartographie des caractéristiques environnementales ; (ii) la description des relations spatiales des flux d'énergie et de matières dans les écosystèmes ; (iii) l'évaluation des solutions alternatives pour la gestion des écosystèmes. A partir de ces différents domaines d'application on peut saisir plus précisément l'implication de l'outil télédétection dans les problématiques d'écologie.

2.2 - PROBLÈMES ÉCOLOGIQUES ET TÉLÉDÉTECTION

Le tableau II présente des séries de problèmes écologiques qui peuvent être étudiés par télédétection. Ce tableau illustre les différents emplois de la télédétection en matière d'acquisition d'informations écologiques pertinentes à différents niveaux de l'analyse.

L'information au niveau de la communauté est essentielle aux études de l'écosystème (Odum, 1976). La télédétection offre la capacité d'identifier les caractéristiques de la communauté (ex : les grands ensembles, les extensions, la vigueur, les perturbations...) à partir d'une perspective synoptique. Une des qualités les plus intéressantes de la télédétection est sa capacité à détecter et observer les changements temporels dans les conditions d'habitats. Les données acquises par télédétection correspondent à une information multidimensionnelle se répartissant selon trois axes : espace, temps et dynamique.

2.3 - LES TROIS AXES ESPACE, TEMPS ET DYNAMIQUE

Le tableau III présente quelques pistes de recherche qui s'inscrivent dans l'application de la télédétection à l'écologie du paysage. Elles n'incluent pas tout et peuvent servir de point de départ pour déterminer l'utilisation de l'outil télédétection dans les problématiques d'écologie du paysage.

Les questions individuelles associées à l'espace, au temps et aux dynamiques (tableau III) sont interdépendantes. De ce fait la structure spatiale pour l'analyse par télédétection doit être étudiée en référence aux conditions

temporelles et aux dynamiques. Ces dynamiques sont associées aux processus d'évolution du paysage observés et mesurés. Il est aussi évident qu'un certain nombre de types différents de données de télédétection peuvent être employés dans le cadre d'une recherche afin de fournir des réponses aux questions spécifiques concernant le paysage dans la problématique. De cette façon on peut alors utiliser un ensemble de données de télédétection provenant de différents capteurs.

On peut donc approcher les questions posées au tableau III à partir d'une perspective hiérarchique en utilisant la télédétection comme un moyen pour résoudre les interrelations complexes du paysage.

2.4 - TÉLÉDÉTECTION ET PERSPECTIVES D'ÉTUDE DES CORRIDORS FLUVIAUX

2.4.1.- ANALYSE DE LA STRUCTURE SPATIALE

Selon Forman et Godron (Forman & Godron, 1986) la structure spatiale est le concept de base en Écologie du paysage. Il en résulte que la quantification de descripteurs tels que la porosité (facilité de pénétration ou de "contagion" connectivité (importance des relations établies entre éléments) ou la taille des taches (éléments "isolés" constituant le paysage) qui peuvent être mis en relation avec des variables fonctionnelles et structurelles, constitue une première étape permettant de faire des hypothèses sur les relations existant entre ces variables puis de tester ces hypothèses. Pour illustrer notre propos, on peut dire par exemple, à la suite de Rex et Malanson (Rex & Malanson, 1990), que la taille d'une forêt alluviale relique dépend à la fois de l'activité humaine, de la sinuosité du cours d'eau et de la largeur de la plaine inondable.

En s'appuyant à la fois sur l'Écologie des paysages et sur des techniques relevant de l'analyse des systèmes (Turner & Gardner, 1991) on pourrait mieux comprendre les mécanismes qui assurent la reproductibilité des paysages alluviaux. Divers essais de modélisation ont été faits dans les corridors fluviaux *stricto-sensu* soumis à des variations de régime (Hanson, Malanson, & Armstrong, 1990 ; Pearlstine, McKellar & Kitchens, 1985) mais tout reste à faire sur des corridors fluviaux fortement marqués par les aménagements anciens. Depuis plus de 20 ans le laboratoire "Hydrosystèmes Alpains" du Centre de Biologie Alpine de l'Université Joseph FOURIER accumule des données sur les corridors du système rhodanien : relevés phytoécologiques, relevés pédologiques, mesures diverses concernant les nappes, les inondations, les mises en eau des basses plaines. Des cartes phytoécologiques à grande échelle (1/5000) ont été dressées pour le Haut-Rhône français (Pautou, Girel, Lachet & Ain, 1979), (Pautou & Girel, 1986) ainsi que pour ses principaux affluents comme l'Isère et sous affluents (Girel & Manneville, 1991) On dispose donc actuellement d'une base de données incomparable sur la végétation de l'hydrosystème rhodanien. Celle-ci pourrait être à l'origine d'un Système d'Information Écologique à Référence Spatiale (SIERS) (Garguet-Dupont, Pautou & Girel, 1995) dans lequel on pourrait introduire nos données satellitaires et utiliser des outils statistiques comme l'analyse multivariée (Gurnel, Simmons & Edwards, 1995). Ce type de système

Planche 1 - ORTHO-IMAGES MULTITEMPORELLES SAR ERS-1 ET LANDSAT THEMATIC MAPPER
ROUGE : TM7 25 JUIL 1988 - VERT : SAR ERS-1 23 SEPT 1992 - BLEU : SAR ERS-1 9 MAI

Echelle : 1cm = 1500 m

Les sols nus et les cultures de maïs apparaissent en rose orangé et jaune  . La végétation naturelle apparaît en vert bleu  tandis que les zones humides sont nettement différenciées en rose violet 

Il existe aujourd'hui une grande diversité de capteurs présentant des propriétés spatiales et spectrales très différentes. Ces capteurs permettent de caractériser avec précision les différents éléments constitutifs d'un paysage. Pour identifier ces éléments, il est nécessaire de faire appel simultanément à plusieurs critères de détermination provenant de capteurs différents. Les méthodes utilisant conjointement les informations issues de plusieurs capteurs sont désignées sous le vocable de fusion d'images, elles sont très utiles en Écologie du Paysage.

La vallée du Haut-Rhône à l'extrémité sud du Jura

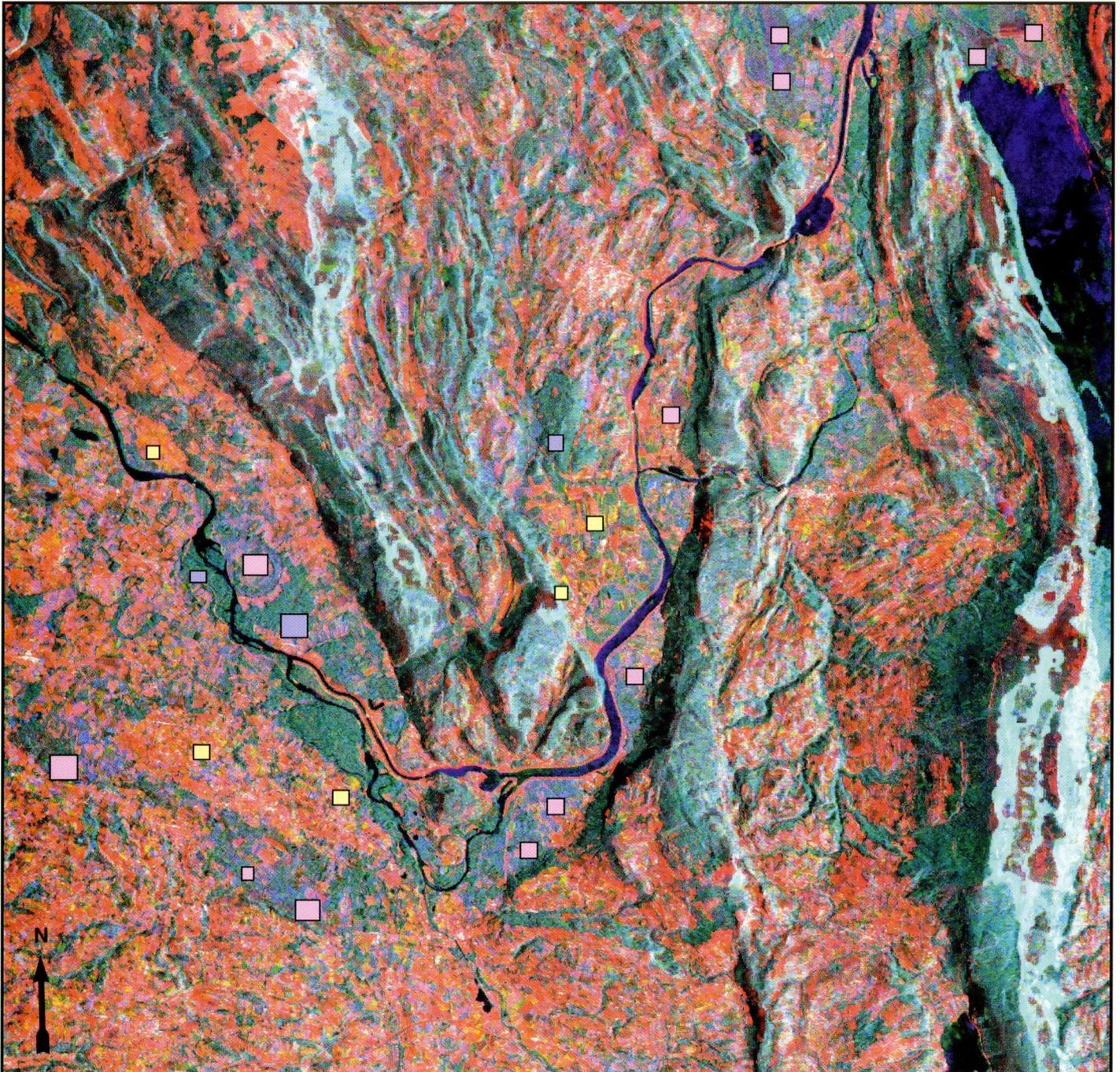


Tableau I. Différents types d'applications de la télédétection

RESSOURCES RENEUVELABLES	RESSOURCES NON RENEUVELABLES	APPLICATIONS ENVIRONNEMENTALES GESTION DU TERRITOIRE
<p>Agriculture production agricole inventaire agricole condition de culture irrigation de culture</p> <p>Forêt inventaire forestier suivi des parcelles</p> <p>Inventaire de la végétation naturelle et de l'habitat</p>	<p>géologie lithologie structure</p> <p>topographie glissements de terrain</p> <p>Champs gravitaires Champs magnétiques</p>	<p>Classification de l'occupation du sol Impact écologique Étude côtière Mesure de pollution Inventaire des ressources en eau Qualité des eaux Condition hydrologique Bilan glaciaire Gestion des marais</p>

Tableau II. Concepts écologiques et implication pour la télédétection.

CONCEPTS ÉCOLOGIQUES	IMPLICATION POUR LA TÉLÉDÉTECTION
1. Espèces, populations et communautés sont uniquement organisées et ordonnées comme déterminées par leurs niches.	1. La réponse spectrale des formes représente ces communautés / populations / espèces et procure donc des informations pour l'identification, la cartographie et la location des aires des espèces.
2. La viabilité écologique de l'habitat détermine les exigences des semis, des jeunes individus et des plantes matures.	2. La variation spectrale des formes suivant les différents stades phénologiques des plantes est utile pour l'étude phénologique des plantes
3. La biomasse et l'apparence des plantes dans leur habitat sont altérées par plusieurs facteurs comme le "stress" et les "perturbations"	3. Les variations spectrales du spectre en fonction des conditions dues au stress ou à des perturbations
4. Les effets du stress et des perturbations changent en fonction de leur puissance.	4. Les données de télédétection peuvent être utilisées pour estimer la sévérité des dégâts subis.
5. L'amplitude écologique des organismes est déterminée par la loi de la tolérance. Cela a une valeur pratique. Les espèces capables de tolérer des habitats contenant des ressources minérales deviennent des espèces indicatrices	5. La réponse spectrale spécifique des espèces indicatrices peut permettre de localiser des gisements de minerais intéressants.
6. Des perturbations comme les coupes en forêt occasionnent des changements cycliques ou successionnels de l'habitat.	6. L'analyse spectrale multitemporelle comparative peut permettre la mise en évidence de tous ces changements.
7. La dominance en végétation est le processus selon lequel les ressources d'un certain habitat sont monopolisées par une espèce ou par un petit groupe d'espèces	7. Les espèces dominantes contribuent dans la proportion la plus grande à la réponse spectrale rendant ainsi possible l'estimation de paramètres écologiques aussi importants que la biomasse.
8. La végétation de n'importe quelle région est fonction de son environnement physique de ses conditions édaphiques et de son potentiel génétique.	8. la télédétection de la végétation donne donc une estimation précise des conditions d'habitats et de biomasse et permet donc une étude de la vie sauvage.

d'après (Lulla & Mausel, 1983)

Tableau III. Utilisation de la télédétection en Écologie du Paysage selon trois axes : espace , temps et dynamique.

ESPACE
<p>De quel type d'élément s'agit-il :</p> <ul style="list-style-type: none"> - caractéristiques de l'occupation du sol (forêt, champ, ville) - types d'élément du paysage présent (végétation, espèces animales, matériaux de surfaces) - caractéristiques du terrain (rugueux, lisse) <p>Quel est l'arrangement, la distribution et le motif des éléments du paysage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - hétérogène - linéaire - vertical (bâtiments, arbres) - horizontal - matrice <p>Quel est le niveau d'échelle requis pour l'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> - micro - méso - régional - global - multiple
TEMPS
<p>De quelle nature est la dynamique temporelle du paysage</p> <ul style="list-style-type: none"> - discrète - continue - aléatoire - chaotique <p>Quel est le pas de temps nécessaire à l'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> - court (minutes, heures) - moyen (jours, semaines) - long (années) - multitemporel - indéterminé
DYNAMIQUE
<p>Quelle sorte de processus entraîne la création du paysage tel qu'il est :</p> <ul style="list-style-type: none"> - explicite (on peut facilement l'observer) - implicite (pas facilement observable) - naturel - anthropique - stochastique <p>Quelle est la nature de ces processus :</p> <ul style="list-style-type: none"> - statique (stable) - entropique (changement continu) - chaotique - distribuée - non distribuée - constant <p>Quel type de modèle peut être utilisé pour définir, mesurer ou simuler ces processus :</p> <ul style="list-style-type: none"> - descriptif - quantitatif - biophysique - individuel ou au niveau de la population - interactif - redistribué - optimisé - intégré

à référence spatiale offre des perspectives intéressantes pour fournir des informations sur les changements historiques récents (Jean & Bouchard, 1991) et surtout pour le développement de modèles permettant notamment de faire des prévisions et une gestion efficace des vallées alpines. Ce travail est lié également à la mise au point de Modèles Numériques de Terrain adaptés à la topographie des corridors fluviaux (Garguet-Duport, 1994).

Comme le souligne Malanson (Malanson, 1993) les modèles de simulation spatiale font actuellement l'objet de nombreuses recherches ; les efforts des chercheurs sont axés sur une intégration dynamique des simulations écologiques dans un SIRS prenant en compte la distribution des espèces, les microclimats, les transferts de matières, la dispersion et la migration des espèces et l'influence humaine.

Les travaux déjà réalisés sur le système rhodanien, et en particulier tout ce qui concerne l'impact humain, sont susceptibles de fournir les bases nécessaires à ce type de démarche.

Les images de sortie obtenues par le biais de modèles de simulation en Écologie du paysage proposent divers niveaux d'organisation spatiale ou "motifs" (=pattern). Des moyens intéressants ont été proposés par (Turner, Dale & Gardner, 1989) pour analyser ces niveaux d'organisation ou "motifs" du paysage générés par les modèles de simulation et les systèmes de traitements de données numériques fournies par la télédétection, les modèles numériques de terrain (MNT) ou les SIRS. La dimension fractale en particulier peut fournir une mesure intéressante du niveau d'organisation du paysage ; à une simple ligne droite on peut donner la dimension 1, à un plan la dimension 2, à une ligne irrégulière occupant une partie du plan on peut donner une dimension comprise entre 1 et 2 etc... Cette dimension fractale peut ainsi intervenir en tant que variable dépendante (analyse statistique) ou indépendante si l'on émet l'hypothèse que la forme des éléments joue un rôle dans les processus de fonctionnement étudiés (Rex & Malanson, 1990), (Rex & Malanson, 1990 ; Milne, 1991).

La télédétection au sens large est le principal outil permettant d'analyser la structure d'un paysage alluvial ; de plus, l'aspect multitemporel des documents disponibles est un atout important pour apprécier l'évolution des milieux dans le temps (Girel, 1986). Dans les zones humides, de nombreuses études ont prouvé l'efficacité de ces techniques (Jean & Bouchard, 1991). Les données satellitaires sont appelées à remplacer les traditionnelles photographies aériennes grâce aux informations multibandes qu'elles renferment. Malheureusement, pour le cas des minces bandes très hétérogènes que constituent les plaines inondables du piedmont alpin, leur utilisation passe par une amélioration de la précision spatiale.

2.4.2.- GESTION ET CONSERVATION DES CORRIDORS FLUVIAUX

Nilsson (Nilsson, 1991) note 5 points essentiels concernant la pérennité des paysages alluviaux :

1 - la zone ripariale est connectée à son environnement aussi est-il nécessaire d'inclure dans le périmètre protégé le bassin versant en tant qu'élément structural et fonctionnel ;

2 - les zones ripariales sont particulièrement riches en espèces (écotones "terre/eau").

3 - la préservation passe par la constitution d'un réseau de réserves le long d'un hydrosystème.

4- la conservation passe par la maintenance des processus et spécialement par celle des régimes hydrologiques.

5 - les paysages - et non pas les écosystèmes - nécessitent une gestion.

Gérer un paysage c'est en fait gérer les connectivités et les flux entre éléments du paysage. Les crues saisonnières, les variations de nappes doivent être maintenues. Les connectivités entre versants, terrasses hautes et secteurs planitiaires doivent être analysées et prises en considération. Les flux d'eau, d'énergie, de matière et d'espèces doivent se renouveler et fonctionner pour assurer la pérennité du paysage.

- *la gestion des flux d'énergie* : elle touche principalement le corridor endigué, l'élément le plus important étant la zone ripariale *sensu-stricto* c'est à dire les dépôts ripariaux les plus anciens. L'altération de cet écotone peut résulter de curages, terrassements, dragages, coupes à blanc... Ces travaux devront être effectués ponctuellement. La télédétection s'avère alors un excellent outil de surveillance permettant d'apprécier l'évolution du paysage dans le temps.

- *la gestion des flux d'eau et de matériaux* : les flux d'eau sont particulièrement perturbés par les aménagements hydroélectriques situés à l'amont (retenues, sections court-circuitées, écrêtement des crues, lâchers...). Ces perturbations agissent sur le régime du cours d'eau, sur les flux d'eau et de matière dans le chenal endigué et les variations de la nappe dans les terrains adjacents. La télédétection et en particulier l'analyse des réflectances des sols dans les fenêtres de longueur d'ondes mettant en évidence la présence de nappes superficielles (ex : TM 5) est un excellent outil pour suivre l'évolution spatio-temporelle des nappes aquifères. Les activités humaines peuvent entraîner parfois de nouvelles conditions écologiques comme des mises en eau périodiques, des stagnations d'eau de surface (imperméabilisation par tassement des horizons de surface) qui vont être favorables au développement d'espèces nuisibles à l'homme comme les moustiques par exemple. La télédétection par sa répétitivité peut mettre facilement en évidence ces phénomènes.

- *la gestion des flux d'espèces*: les plaines alluviales doivent être considérées comme des corridors permettant le passage d'espèces entre des réserves de faune et de flore situées à l'amont et à l'aval (Nilsson, 1991) Il est évident que la télédétection peut intervenir en permettant le suivi de groupements susceptibles d'héberger des espèces animales ou végétales en voie de raréfaction (zones tourbeuses à orchidacées et drosères...) elle permet aussi d'apprécier la diversité physiologique déterminante pour l'avifaune ou la mise en évidence de nouveaux groupements. Diverses espèces envahissantes colonisent les corridors fluviaux, leur propagation étant rendue particulièrement facile par les flux d'eau et de matières. Ces espèces comme le *Buddleja* et surtout les *Reynoutria* constituent rapidement des groupements monospécifiques qui s'étendent peu à peu au détriment des autres associations végétales (Beerling, 1991). La télédétection peut se révéler rapidement comme un outil efficace pour suivre l'évolution de ces invasions.

Tableau 4. Caractéristiques principales des capteurs MSS et TM du satellite Landsat et du capteur HRV du satellite SPOT.
D'après (Bonn & Rochon G., 1992)

SATELLITE CAPTEUR	LANDSAT MSS	LANDSAT RBV	LANDSAT 4-5 TM	SPOT 1-2 HRV
Bandes spectrale (en μm)	0,5 à 0,6 MSS4 0,6 à 0,7 MSS5 0,7 à 0,8 MSS6 0,8 à 1,1 MSS7 10,5 à 12,4 MSS8 (LANDSAT 3)	0,5 à 0,75	0,45 à 0,52 TM1 0,52 à 0,60 TM2 0,63 à 0,69 TM3 0,76 à 0,90 TM4 1,55 à 1,75 TM5 10,4 à 12,5 TM6 2,10 à 2,35 TM7	0,50 à 0,59 XS1 0,61 à 0,69 XS2 0,79 à 0,90 XS3 0,51 à 0,73 (P)
Tache au sol	80 m 240 m IR therm	80 m	30 m 120 m TM6	20 m XS 10 m (P)
Largeur de Balayage	185 km	185 km	185 km	185 km
Répétitivité	18 jours	18 jours	26 jours	26 jours, tout pts du globe en 5 jours maximum

3.- MODÈLE CONCEPTUEL DE LA TÉLÉDÉTECTION EN ÉCOLOGIE DU PAYSAGE

Les attributs du paysage dépendent du temps et de l'espace et sont une fonction du processus de découpage du paysage (Forman & Godron, 1986). La télédétection est un outil multidimensionnel (horizontal et vertical), intégrateur et multibande. Toutes ces dimensions ou axes existent à l'intérieur du paysage et vont au delà de la notion d'espace, de temps et de dynamique des processus (tableau III). La télédétection est aussi un outil d'acquisition d'informations privilégié pour les SIRS

Pour répondre aux questions posées dans le tableau III, il est utile de considérer un modèle conceptuel de la télédétection du paysage.

3.1.- LE CONCEPT D'OUTIL MULTIDIMENSIONNEL

De l'axe horizontal découle un ensemble d'attributs spatiaux. Ils définissent ou décrivent la composition relative et la position des éléments de couverture du terrain à l'intérieur du paysage.

L'axe vertical est dominé par des facteurs relatifs à la hauteur au dessus de l'axe horizontal et s'étendant dans l'atmosphère. Des caractéristiques verticales importantes sont par exemple, la topographie, la hauteur des arbres, la hauteur des bâtiments et tout autre élément qui s'élance vers le haut à partir de la surface horizontale. La caractérisation de la dimension verticale du paysage, soit au dessus du sol, soit en dessous, procure aussi le moyen de développer et de tester des modèles écologiques tridimensionnels.

Une distinction nette entre les facteurs purement horizontaux et verticaux est la plupart du temps impossible. Cette distinction est le plus souvent assez confuse et dépend étroitement de l'échelle d'observation.

Exemple : les arbustes et l'herbe ont des paramètres horizontaux correspondant à leur distribution le long du paysage. Cependant ils ont aussi un aspect vertical, leur hauteur. De la même manière les arbres peuvent être perçus dans le domaine vertical par leur hauteur, mais ils ont aussi une dimension horizontale correspondant à leur distribution spatiale (c.a.d : agrégation ou dispersion).

Nous voyons donc ici très clairement que l'identification, le classement et la mesure des attributs du paysage dans les dimensions horizontales et verticales sont fonction de l'échelle d'observation (Meentemeyer, 1989 ; Meentemeyer & Box, 1987). Il est capital de prendre en considération les effets de l'échelle spatiale puisqu'ils se retrouvent dans toutes les études du paysage quels que soient leur type et leur origine notamment dans les études qui emploient la télédétection pour observer et mesurer les différents types d'occupation du sol et qui traduisent les caractéristiques du paysage (White & MacKenzie, 1986 ; Woodcock & Strahler, 1987).

3.2.- LE CONCEPT D'OUTIL INTÉGRATEUR

La télédétection apparaît comme un outil permettant d'intégrer spatialement des réponses hétérogènes dans un format plus facilement mesurable par quantification des réponses spectrales à une échelle donnée.

L'élément image ou Pixel¹ représente la plus petite surface au sol pour laquelle les données sont enregistrées par le capteur de télédétection. Le pixel peut avoir une taille variable qui dépend des caractéristiques techniques du capteur. Par exemple le satellite américain Landsat possède un capteur haute résolution, Thematic Mapper, qui permet une résolution spatiale au sol de 30-m. Le satellite français

¹ Picture element

S.P.O.T¹ fournit quant à lui des images à 10 et 20 m de résolution spatiale (tableau IV).

La résolution spatiale du pixel (10, 20, 30 -m ou plus) fait que ce dernier intègre dans sa surface un ensemble d'objets. Le pixel peut donc être constitué d'objets hétérogènes. Chacun de ces objets a une réponse spectrale plus ou moins spécifique. Le pixel étant la plus petite unité de surface mesurée, la réponse spectrale de ce dernier correspondra donc à une mesure moyenne de l'ensemble des réponses émises par chacun des objets. Ainsi, la dimension multibande existe comme axe supplémentaire disponible pour l'analyse et comme facteur d'intégration de phénomènes à une échelle donnée.

3.3.- LE CONCEPT MULTIBANDE

De même que les objets du paysage ont une structure spatiale et horizontale, ils possèdent également une réponse multibande caractéristique correspondant à une signature spécifique qui est fonction de la direction des objets, du phénomène réfléchi ou émis, et de l'énergie électromagnétique transmise (Jensen, 1986). La discrimination d'une signature n'est pas limitée à une simple portion du spectre à un moment donné. En effet le capteur peut enregistrer simultanément toute une gamme de longueurs d'ondes réparties sur toute la largeur du spectre électromagnétique. (Colwell, 1983).

3.3.1.- LES DIFFÉRENTS SATELLITES ET CAPTEURS

Le tableau 4 présente les principales caractéristiques des satellites et capteurs les plus utilisés dans les études environnementales. La plupart des capteurs fournissent des mesures dans la partie visible et proche infrarouge du spectre. Les autres parties du spectre, spécialement les grandes longueurs d'ondes peuvent fournir une mesure caractérisant la dimension verticale. Les hyperfréquences (les ondes radars) ont été utilisées pour déterminer les quantités couchées et dressées des résidus de récolte et l'orientation des rangs dans les champs (Bunfeldt & Ulaby, 1984). Ces données ont aussi été utilisées pour déterminer la macro et microtopographie du paysage (Wu, 1984) ainsi que la densité et la structure de la canopée (Wu & Sader, 1987).

3.3.2.- CALCUL D'INDICES

Les objets possèdent une signature spectrale à l'intérieur du domaine multibande. A partir de cette information, les capteurs de télédétection permettent la quantification de ces réponses dans une mesure. Nous présentons ci-dessous deux exemples de mesure de la biomasse.

Le "Leaf Area Indice (LAI)

L'estimation de la biomasse et de la productivité primaire a été développée par l'utilisation du Leaf Area Indice (LAI) à partir des données de télédétection pour plusieurs type de couverture végétale. (Colwell, 1983 ; Goetz, Rock & Rowan, 1983 ; Lulla & Mausel, 1983 ; Peterson, Aber, Matson, Card, Swanberg, Wessmann *et al.*, 1988 ; Rock, Vogelmann, Williams, Vogelmann & Hoshizaki, 1986 ; Waring, Aber, Melillo & Moore III, 1986). L'indice LAI est basé sur un ratio entre la réponse spectrale dans la bande rouge (R : dans la portion visible du spectre entre 0.6 et 0.7 μm) et la réflectance dans le proche

infrarouge (IR : entre 0.7 et 1.0 μm) (Lo, 1986). Le rapport infrarouge sur rouge exprime l'augmentation de différence entre la réflectance du rouge et du proche infrarouge avec l'augmentation du vert dans le LAI (Lo, 1986).

L'indice de végétation (IV)

Un autre indicateur très utile de la vigueur de la biomasse et de la productivité est l'indice de végétation (IV). Celui-ci représente un rapport de la forme (IR-R) / (IR + R). L'indice de végétation a été utilisé dans de nombreuses études avec de bons résultats (Goward, Tucker & Dye, 1985 ; Jensen, 1983 ; Lillesand & Kiefer, 1987 ; Nemani & Running, 1989 ; Running & Nemani, 1988 ; Tucker & Townshend, 1985)

Les réponses spectrales peuvent aussi être répertoriées en classes spectrales puis utilisées pour la cartographie de l'occupation du sol ou pour la mise en évidence de phénomènes écologiques particuliers (Colwell, 1983; Lo, 1986). Les inventaires et la cartographie de l'occupation du sol sont indispensables pour comprendre l'originalité d'un paysage et pour juger de sa *stabilité* ou de son *évolution*.

3.3.3.- L'ANALYSE MULTIBANDE

Tableau V. Bandes spectrales du satellite Landsat Thematic Mapper et description générale de l'utilisation courante de chacune d'elles d'après (Lo, 1986)

TM1 (0,45-0,52 μm)
dans le visible correspond au bleu, utile pour la cartographie des côtes et la discrimination des sols et de la végétation.
TM2 (0,52-0,60 μm)
dans le visible correspond au vert, permet d'avoir une idée de la "vigueur" d'un végétal (teneur en chlorophylle)
TM3 (0,63-0,69 μm)
dans le rouge, c'est-à-dire bande d'absorption de la chlorophylle, donc très intéressante pour l'étude de la végétation
TM4 (0,76-0,90 μm)
proche infrarouge, très utile pour évaluer la biomasse de groupements végétaux. Aussi utile pour la discrimination de l'humidité du sol
TM5 (1,55-1,75 μm)
infrarouge moyen, indique une bonne humidité des horizons superficiels des sols, permet de discriminer des végétaux riches en eau.
TM6 (10,4-12,5 μm)
canal thermique, utile pour l'analyse des stress de la végétation, discrimination de l'humidité des sols, les applications de cartographie thermique
TM7 (2,08-2,35 μm)
infrarouge, utile pour la discrimination des différents types de roche, utile aussi pour la détermination de l'humidité de la végétation

Il est utile de collecter des données recouvrant de multiples parties du spectre électromagnétique (visible, infrarouge ou thermique) pour analyser un phénomène. Les données de télédétection multibandes permettent d'identifier

¹ Système Pour l'Observation de la Terre

et de mesurer des caractéristiques biophysiques impossibles à connaître en utilisant une seule partie du spectre électromagnétique. Le tableau V présente un aperçu de la façon dont les données multibandes peuvent collectivement procurer plus d'informations que l'utilisation d'une seule partie du spectre. Il illustre quelques domaines d'application pour chaque bande spectrale du satellite Landsat TM. On peut ainsi apprécier l'utilité de l'aspect multibande. De nombreux exemples d'utilisation de l'aspect multibande de la télédétection existent dans la littérature (Campbell, 1987 ; Colwell, 1983 ; Jensen, 1983 ; Lillesand & Kiefer, 1987 ; Lo, 1986).

3.4 - TÉLÉDÉTECTION ET SIRS

Le domaine multibande et spatial c'est à dire l'aspect vertical et horizontal font de la télédétection un outil privilégié pour l'intégration des données dans les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS). La combinaison de la télédétection et des SIRS va devenir un outil très important pour l'analyse et la manipulation des données pour les études du paysage et les prévisions écologiques. Les techniques des SIRS offrent la capacité de combiner, d'intégrer et d'analyser des données de types différents à l'intérieur d'un même cadre (de Sède, 1995 ; Ehlers, 1989 ; Gessler, McSweeney, Kiefer & Morrison, 1989 ; Jakubauskas, 1989 ; Krummel, 1986 ; Marble & Peuquet, 1983 ; Parker, 1988 ; Ripple, 1987).

4.- EXEMPLES D'INTERRELATIONS ESPACE, TEMPS ET ÉCHELLE

Nous présentons ci-dessous quelques exemples d'études d'écologie du paysage utilisant l'outil télédétection. Ces exemples illustrent les interrelations espaces, temps et échelles caractéristiques en écologie du paysage.

4.1.- ANALYSE SPATIALE ET TÉLÉDÉTECTION

Une application très importante de la télédétection est l'évaluation spatiale des caractéristiques du paysage (Colwell, 1983 ; Short, 1986).

4.1.1.- CARACTÉRISTIQUES DES SURFACES

En sylviculture et en aménagement, la télédétection permet d'obtenir des renseignements concernant les surfaces boisées et non boisées pour établir des documents utilisés par les gestionnaires (Bockhaus, 1989). Couplées avec des études de terrain, les données de télédétection permettent de déterminer les agents responsables du déclin et de la dégénérescence de la forêt (Rock *et al.*, 1986). La télédétection offre la possibilité de délimiter et de cartographier des phénomènes comme les dégâts provoqués par des insectes ravageurs (Dull, 1988) ou le calcul de surfaces de coupes à blanc (Jones, Hill, Thetford & Sellers, 1988).

4.1.2.- RECONNAISSANCE DES ESPÈCES ET DE LEUR DISTRIBUTION

Les données satellitaires ont aussi démontré qu'elles pouvaient être utiles pour la détermination des espèces et de leur distribution (Walsh, 1980) ainsi que pour la mise en évidence de leur état de santé (Benson & DeGloria, 1985). Franklin a utilisé des simulations d'images Landsat TM (30 m) pour analyser la composition structurale des forêts (Franklin, 1986). Dans une autre étude (Franklin, Logan, Woodcock & Strahler, 1986) il utilise un MNT en

complément des données TM pour la classification de forêts de conifères en zone de montagne. L'intégration de données de terrain avec des données satellitaires a été illustrée très tôt (Cibula & Nyquist, 1987 ; Franck, 1988). Dans ces deux études, les données de télédétection sont utilisées conjointement avec un modèle numérique de terrain afin d'obtenir des détails sur la distribution topographique de la végétation dans une zone de montagne.

4.1.3.- ANALYSE DES PERTURBATIONS

Les perturbations sont reconnues comme ayant une influence dans les motifs du paysage (Turner, 1987). Par exemple la propagation du *Dendroctonus fontalis* peut être considérée comme un phénomène épisodique du paysage (Rykiel, Coulson, Sharpe, Allen & Flamm, 1988). En effet, la télédétection rend observables et facilement quantifiables divers facteurs de perturbation comme le feu ou la défoliation. La défoliation des épicéas à partir de données Landsat a été étudiée dans (Hall, Still & Crown, 1983) et d'une manière plus générale la défoliation des résineux dans (Vogelmann & Rock, 1988). Des phénomènes de dégénérescence de forêts dus à des stress en minéraux ont aussi été mis en évidence par télédétection dans (Rock *et al.*, 1986).

4.1.4.- ANALYSE DES FORMES

L'analyse des taches dans l'écosystème est importante en écologie du paysage (O'Neil, Milne, Turner & Gardner, 1988 ; White & MacKenzie, 1986). La distribution des taches à travers le paysage résulte de gradients naturels, humains (feu) et de gradients environnementaux (altitude, topographie, facteurs climatiques) (White & MacKenzie, 1986). Les enquêtes écologiques et l'évaluation des dynamiques des taches peuvent être réalisées en utilisant la télédétection comme moyen d'analyser des formes du paysage à grande échelle (Rubec, 1983). Une analyse du continuum végétal des zones de plaines à partir de données TM est présentée dans (Wood & Foody, 1989).

Si le satellite procure une vue synoptique et qualitative de la terre il permet, ce qui est encore plus significatif, l'analyse quantitative du paysage à partir des données de télédétection recueillies. La télédétection est donc une méthode permettant de mesurer et de modéliser les causes et les effets qui influent les structures, les fonctions et les changements dans l'évolution et le développement des paysages (Dryer & Crossley, 1986). Ces techniques de modélisations peuvent être appliquées facilement et rapidement à une plus large échelle une fois que les algorithmes ont été développés et validés.

4.2.- ANALYSE TEMPORELLE ET TÉLÉDÉTECTION.

Un deuxième aspect très important de la télédétection est sa capacité à enregistrer les changements temporels du paysage pour une période déterminée et la rapidité d'analyser des données recueillies.

4.2.1.- PÉRIODICITÉ DES ÉCHANTILLONNAGES

Les programmes des satellites opérationnels et commerciaux des USA ont parfaitement identifié des intervalles d'échantillonnages pour l'acquisition de données de n'importe quel point au sol. Ces intervalles vont de quatre fois par jours à partir de NOAA-6 et NOAA-7 à une

fois tous les 16 jours avec MSS et TM. D'autres systèmes aéroportés ou au sol peuvent être employés aussi fréquemment que nécessaire, tout en restant économiquement réalisables. Les données acquises par satellite sont souvent suffisantes pour des analyses saisonnières ou plus longues ou pour une caractérisation écologique de base. Les données peuvent être collectées le jour et la nuit pour obtenir la variation thermique diurne des paysages, à marée haute et basse pour déterminer les mouvements de marée. Les données pour des analyses périodiques moins fréquentes peuvent être acquises de manière hebdomadaire, mensuelle ou saisonnière. Ceci est utile pour contrôler les changements saisonniers concernant la croissance des cultures et de la végétation naturelle, pour évaluer les changements de la couverture neigeuse et des surfaces en eau et ainsi d'en modéliser les conséquences hydrologiques. On peut aussi se servir de ces données pour évaluer l'impact d'une sécheresse ou d'une maladie sur la végétation et de cette façon avoir plus d'éléments permettant d'intervenir plus efficacement. Pour les études de paysage qui nécessitent des analyses temporelles plus limitées, des données peuvent être acquises tous les ans ou tous les deux ans.

Exemple : Pour faire les inventaires phénologiques de culture, pour identifier les nouvelles tendances en matière de production, pour identifier et dans un autre registre, contrôler la croissance urbaine (Bouassida, Aouni, Gouinaud, laurore & Galaud, 1993).

Les données de télédétection peuvent aussi être collectées pour des événements épisodiques induits par l'homme comme les effets sur l'environnement d'une décharge polluante ou des événements naturels comme les proliférations d'algues et les impacts des inondations.

La télédétection permet de suivre la fragmentation des milieux "naturels", c'est à dire leur désintégration (ou leur reconstitution) dans le territoire anthropisé (zones agricoles ou urbaines) (Opdam, van Apeldoorn, Schotman & Kalkhoven, 1993) ou leur mitage par l'exploitation (coupes dans les grands ensembles forestiers ; (Harris, 1984).

Reconnaissance d'espèces caractéristiques (Peuplier noir, Saule blanc, S. cendré, Tamarix...) et analyses de formes par télédétection multitemporelle permettent d'étudier la (dé)colonisation des fragments qui fonctionnent comme des métapopulations et de proposer des modèles (Verboom, Metz, & Meelis, 1993) très utiles pour la gestion et la restauration des milieux naturels (cas des forêts alluviales dépendant de nombreux facteurs influencés par l'homme ; Peterken & Hughes, 1995).

4.2.2.- RAPIDITÉ DES TRAITEMENTS

Du fait que les systèmes de télédétection peuvent acquérir de grands volumes de données qui peuvent être rectifiées et traitées spatialement comme nous l'avons vu au paragraphe 4.1, la caractérisation des dynamiques temporelles sur de grandes régions est plus facile par télédétection que par des approches de terrain traditionnelles, même si le travail sur le terrain reste encore nécessaire quand des relations nouvelles et différentes doivent être établies entre données télédéteectées et conditions au sol. Ainsi une grande partie du travail de terrain peut être éliminée ou restreinte à une recherche de sites sélectionnés,

la plupart des types de données de télédétection se prêtant à une analyse sur de grandes zones avec des fréquences temporelles non réalisables par le passé.

Le satellite AVHRR avec sa large échelle et sa couverture répétitive est un outil important pour modéliser des dynamiques de végétation sur de grandes régions géographiques. Il procure une haute résolution temporelle (jusqu'à quatre acquisitions par jour) avec 1 ou 4 km de résolution spatiale qui permet des analyses hebdomadaires des conditions de surface de la terre à travers le globe. Les capacités spatiales et temporelles de ces données pour la cartographie de l'environnement et des grands ensembles végétaux ont été démontrées.

Exemple : les données AVHRR ont facilité le développement des indices de végétation permettant la mesure de la productivité primaire et la mise en relation des variations en CO₂ grâce à la réponse spectrale de la végétation (Tucker, Gatlin & Schneider, 1984 ; Tucker, Vanprest, Boerwinkel & Gaston, 1983).

L'utilisation des données satellites multitemporelles pour mesurer la variabilité spatiale de la végétation à large échelle et l'occupation du sol a aussi été démontrée dans (Ormsby, Choudhury & Owe, 1987).

4.3.- ÉCHELLE DU PAYSAGE ET TÉLÉDÉTECTION

Les structures et les fonctions du paysage sont perçues différemment selon l'échelle. Le choix de l'échelle va déterminer l'observation du paysage selon le concept d'hétérogénéité ou d'homogénéité. (Turner *et al.*, 1989). Il est donc indispensable pour le thématicien de choisir l'échelle en fonction de la problématique (Allen & Hoekstra, 1988).

4.3.1.- LES CONCEPTS D'HÉTÉROGÉNÉITÉ ET D'HOMOGÉNÉITÉ

Ces concepts décrivent l'interdépendance des différentes composantes du paysages et des processus (O'Neil *et al.*, 1988). L'influence de l'échelle dans les études du paysage est discutée en détail dans (Meentemeyer, 1989).

En télédétection, la résolution spatiale (ou la capacité d'un système à reconnaître des éléments sur le sol) est analogue à la notion de taille du grain des photographes. La sélection de la résolution à utiliser est une question concomitante avec celle d'échelle. Cela concerne le problème des pixels mixtes pour lesquels la résolution spatiale du capteur est trop grossière pour distinguer l'hétérogénéité spatiale du paysage. Si la résolution spatiale du capteur est trop grossière, celui-ci combinera la signature spectrale d'objets différents sur le sol en une réponse agrégée pour un pixel particulier. Ainsi un paysage hétérogène peut devenir plus homogène en raison de la résolution spatiale du capteur. Inversement, une résolution spatiale supérieure (c'est à dire un grain plus fin) n'est pas nécessairement meilleure : si la résolution spatiale est trop fine, les objets peuvent apparaître plus hétérogènes qu'ils ne le sont réellement. Cette mauvaise représentation masque leur inhérente homogénéité.

Le challenge de la sélection de l'échelle en télédétection peut être illustré par un exemple pris dans l'étude de (White & MacKenzie, 1986) et résumé ci-dessous.

Exemple : White et MacKenzie ont utilisé des données à différentes résolutions spatiales pour définir les groupements végétaux dans les montagnes du Tennessee et du Nord de la Caroline. Cette zone est sur le plan de la végétation, exceptionnellement complexe car on y trouve des écosystèmes souvent mélangés dans le temps et dans l'espace. L'objectif de cette étude est de déterminer l'échelle donc la résolution optimale permettant de différencier les divers groupements végétaux. L'échelle optimale de télédétection varie suivant les objectifs d'analyse et les caractéristiques inhérentes du paysage en question. Une résolution de 80-m (Landsat MSS) peut être appropriée dans beaucoup de régions de montagne seulement si le type de forêt est homogène et existe sous forme de tâches supérieures à 100 ha. Par contre certains autres types de végétation ne peuvent être discernables qu'avec une résolution spatiale de 30-m (Landsat TM) (White & MacKenzie, 1986). Quelques autres types de végétation n'ont pu être cartographiés qu'avec une résolution spatiale de 13-m.

Les processus du paysage paraissent être hiérarchisés en motifs et structures. La mesure de ces processus est fonction de l'échelle (Urban, O'Neill & Shugart, 1987) et fonction de la "capacité à discerner" des capteurs utilisés pour l'observation des phénomènes du paysage (Nellis & Briggs, 1989).

5.- CONCLUSION

La télédétection du paysage est multidimensionnelle, multitemporelle et multiéchelle. La somme des dimensions verticales, horizontales et multibandes est synergique, l'intégration des trois axes produit davantage d'informations que chacune des dimensions peut en donner individuellement. Cependant, l'application des techniques de télédétection ne peut pas se faire sans considérer certains paramètres à mesurer : l'échelle de mesure pour l'analyse, le pas de temps pour l'observation et une conscience ou compréhension du processus qui affecte le phénomène étudié.

La télédétection apparaît comme un outil d'observation et de mesure important pour l'analyse des relations écologiques dans le paysage. La télédétection offre la possibilité d'enregistrer des données sur les caractéristiques du paysage et les interactions, sans perturber le milieu. Nous avons vu aussi que les attributs multispectraux, multitemporels et multiéchelles des données de télédétection du paysage peuvent mettre en évidence des composantes biophysiques et des composantes de l'occupation du sol qui étaient inaccessibles auparavant. L'identification et la mesure des variables du paysage à partir des données de télédétection impliquent une suite de techniques d'interprétation allant de la simple photointerprétation manuelle jusqu'à des algorithmes de traitement d'images de haut niveau.

En résumé, nous avons fourni une vue générale de nombreux types d'application de la télédétection en écologie du paysage. Un des avantages majeurs de la télédétection en écologie du paysage est sa capacité à mesurer l'état et la dynamique des variables écologiques et des processus qui gouvernent ces variables (Dryer & Crossley, 1986 ; Hall,

Strebel & Sellers, 1988). Dans le cadre d'un système d'information à Référence Spatiale (SIRS), l'extrapolation des informations de la télédétection à partir d'un point de référence jusqu'à une échelle spatiale plus grande peut améliorer les capacités de modélisation des propriétés du paysage et des processus (Krummel, 1986). Les tests des modèles quantitatifs des processus terre-atmosphère (c.à.d les échanges gazeux) et la compréhension du rôle de la végétation (ex : estimation de biomasse et la productivité primaire) à une échelle globale, peuvent s'envisager uniquement par l'utilisation conjointe des techniques de télédétection et l'utilisation des SIRS.

RÉFÉRENCE

- ALLEN, T. F. H. & HOESKSTRA, T. W. (1988). The critical role of scaling in Land modeling. In *Polycience Publications*, (pp. 9-13). Montreal.
- BEERLING, D. J. (1991). The effect of riparian land use on the occurrence and abundance of Japanese knotweed *Reynoutria japonica* on selected rivers in South Wales. *Biological Conservation*, **55**, 329-337.
- BENSON, A. S. & DEGLORIA, S. D. (1985). Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispectral Scanner Data for forest surveys. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **51**, 1281-1289.
- BLANDIN, P. & LAMOTTE, M. (1988). Recherche d'une entité écologique correspondant à l'étude des paysages : la notion d'écocomplexe. *Bulletin d'écologie*, **19**(4), 547-555.
- BOCKHAUS, J. A. (1989). An assesment of remotely sensed imagery for use in hardwood stand density distribution mapping in Central California. *Technical Papers*, **4**(GIS/LSI), 109-117.
- BONN, F. & ROCHON G. (1992). *Précis de Télédétection : Principes et Méthodes*. Québec: Presses de l'Université du Québec.
- BOUASSIDA, L., AOUNI, L., GOUINAUD, C., LAURORE, L., & GALAUD, M. (1993). Etude avec SPOT de la pression urbaine sur les terres agricole dans le grand Tunis et apport de ERS-1. In *De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS*, . Paris : CEPADUES-EDITION, 129-137.
- BUNFELDT, D. R. & ULABY, F. W. (1984). Measured microwave emission and scattering in vegetation canopies. *IEEE Transactions, Geoscience and Remote Sensing*, **GE**(22), 520-552.
- BUREL, F. (1994). Ecologie du paysage et biodiversité. *Bio, sciences de la vie (lettres des départements scientifiques du CNRS)*, **43**(Avril), 9.
- CAMPBELL, J. B. (1987). *Introduction to Remote Sensing*. New York: Guilford Press.
- CIBULA, W. G. & NYQUIST, M. O. (1987). Use of topographic and climatological models ina geographical data base to improve Landsat MSS classification for Olympic National Park. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **53**, 67-75.
- COLWELL, R. N. (1983). *Manual of Remote Sensing*.
- DE SÈDE, M.-H. (1995). Proposition d'approche intégrée pour la mise en place d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion et la planification du

- territoire. In *Base de données et systèmes d'information pour l'environnement*, 1 (pp. 70-86). Versaille.
- DECAMPS, H. (1984). Towards a landscape Ecology of river valleys. In *Trends in ecological research for the 1980s* (pp. 163-178). PLENUM PRESS.
- DECAMPS, H. & FORTUNÉ, M. (1991). Long-term Ecological research and Fluvial Landscapes. In *Long-term Ecological Research* New-York : JOHN WILEY & SONS.
- DECAMPS, H. & NAIMAN, J. (1989). L'écologie des fleuves. *La Recherche*, 20(208), 310-319.
- DELPOUX, M. (1972). Ecosystème et Paysage. *Revue de géographie des Pyrénées du Sud-Ouest (Toulouse)*, 43(2), 157-174.
- DRYER, M. I. & CROSSLEY, D. A. (1986). Coupling of ecological studies with remote sensing : potentials at four biosphere reserve in the United States. *U.S. Dept. of State Publ. 9504*.
- DULL, D. D. (1988). Forest insect and disease activity assessment utilizing geographic information systems and remote sensing technology. In *Proceedings of the Second forest Service Remote Sensing for Ressource Inventory, Planning, and Monitoring* (pp. 355-359). Falls Church : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- EHLERS, M. (1989). The potential of multisensor satellite remote sensing for geographic information systems. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 4(GIS/LIS), 40-45.
- ELLENBERG, H. (1987). Vegetation und Mikroclima in einen Waldbachtal der Alpen. *Botanische Jahrbücher für Systematik*, 108, 499-514.
- FORMAN, R. T. T. & GODRON, M. (1981). Patches and structural components for a Lanscape Ecology. *BioScience*, 31, 733-740.
- FORMAN, R. T. T. & GODRON, M. (1986). *Landscape Ecology*. New-York : John Wiley and Sons.
- FRANCK, T. D. (1988). Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain front range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1727-1734.
- FRANKLIN, J. (1986). Thematic Mapper analysis of coniferous forest structure and coposition. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1287-1301.
- FRANKLIN, J., LOGAN, T. L., WOODCOCK, C. E. & STRAHLER, A. H. (1986). Coniferous forest classification and inventory using Landsat digital terrain data. *IEEE Transactions, Geoscience and Remote Sensing*, GE(24), 139-144.
- GARGUET-DUPORT, B. (1994). *Fusion d'images et télédétection en écologie du paysage. Application à l'étude structurale d'un corridor fluvial alpin*. Thèse Informatique appliquée - Biologie, Université : Univ. Joseph FOURIER, Grenoble.
- GARGUET-DUPORT, B., PAUTOU, G. & GIREL, J. (1995). Cartographie appliquée à la gestion des espaces protégés dans les grandes plaines d'inondations: l'exemple de la vallée du Haut-Rhône entre Genève et Lyon. In *La cartographie pour la gestion des espaces naturels*, 1 (pp. 1-9). Saint-Etienne.
- GESSLER, P., MCSWEENEY, K., KIEFER, R. & MORRISON, L. (1989). Analysis of contempory and historical soil/vegetation/Landuse pattern in southwest Wisconsin utilizing GIS and remote sensing. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 4(GIS/LIS), 85-92.
- GIREL, J. (1994). Old distribution procedure of both water and matter fluxes in floodplains of western europe : impact on present vegetation. *Environmental management*, 18(2), 203-221.
- GIREL, J. & MANNEVILLE, O. (1991). Évolution de la végétation ripariale et palustre : les petits affluents rhodaniens du jura méridional. *Bulletin Mensuel de la Société Linéenne de Lyon*, 60, 112-127.
- GIREL, J., (1986). Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale. *Documents de Cartographie Ecologique*, 29, 45-74.
- GOETZ, A. F. H., ROCK, B. N. & ROWAN, L. C. (1983). Remote sensing for exploration : an overview. *Economic Geology*, 78, 573-590.
- GOWARD, S. N., TUCKER, C. J. & DYE, D. (1985). North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio*, 77, 3-14.
- GURNEL, A. M., SIMMONS, D. & EDWARDS, P. J. (1995). Integrating River Corridor Environment Information through Multivariate Ecological Analysis and Geographic Information Systems. In *The Ecological Basis for River Management* (pp. 251-267). London : John Willey & Sons.
- HALL, F. G., STREBEL, D. E. & SELLERS, P. J. (1988). Linking knowledge among spatial and temporal scales : vegetations, atmospheres, climate and remote sensing. *Landscape Ecology*, 2, 3-22.
- HALL, R. J., STILL, G. N. & CROWN, P. H. (1983). Mapping the distribution of Aspen defoliation using Landsat colour components. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 9, 86-91.
- HANSON, J. S., MALANSON, G. P. & ARMSTRONG, M. P. (1990). Modelling the effects of dispersal and fragmentation on forest dynamics. *Ecological modelling*, 49, 277-296.
- HARRIS, L. D. (1984). *The Fragmented Forest: Island Biogeography Theory and the Preservation of the Biotic Biodiversity* - The University of Chicago Press(Chicago, Illinois).
- HEWITT, M. J. (1990). Synoptic inventory of riparian ecosystems : the utility of Landsat Thematic Mapper data. In *Forest. Ecol. and Manage.*, 33/34 (pp. 605-620).
- JAKUBAUSKAS, M. E. (1989). Utilizing a geographic information system for vegetaion change detection. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 4(GIS/LIS), 56-64.
- JEAN, M. & BOUCHARD, A. (1991). Temporal changes in wetland landscapes of a section of St Laurence River, Canada. *Environmental management*, 15(2), 241-250.
- JENSEN, J. R. (1983). Biophysical remote sensing. *Annals of the Association of American Geographers*, 73, 111-132.
- JENSEN, J. R. (1986). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. N.J. : Prentice Hall: Englewood Cliffs.

- JONES, W. C., HILL, C., THETFORD, W. & SELLERS, R. (1988). Identifying and mapping forest clearcut areas from Landsat Thematic Mapper transparencies. In *Proceedings of the Second forest Service Remote Sensing for Ressource Inventory, Planning, and Monitoring* (pp. 186-188). Falls Church : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- KRUMMEL, J. R. (1986). Lanscape Ecology: Spatial data and analytical approches. In *Coupling of Ecological Studies with Remote Sensing* (pp. 125-132). Washington D.C : U.S. Dept. of State.
- LESER, H. & RODD, H. (1991). Landscape Ecology: fundamentals, aims and perspectives. In *Modern Ecology. Basic and applied aspects* Amsterdam: Elsevier.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (1987). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York : John Wiley and Sons.
- LO, C. P. (1986). *Applied Remote Sensing*. Burnt Mill, Harlow : Longman.
- LULLA, K. & MAUSEL, P. (1983). Ecological applications of remotely sensed multispectral data. In *Introduction to Remote Sensing of Environment* (pp. 354-377). Dubuque, Iowa : Kendall-Hunt.
- MALANSON, G.-P. (1993). *Riparian Landscapes*. New-York: Cambridge university Press.
- MARBLE, D. F. & PEUQUET, D. J. (1983). Geographic information systems and remote sensing. In *Manual of remote sensing*
- MEENTEMEYER, V. (1989). Geographical perspective of Space, Time and Scale. *Landscape Ecology*, 2, 163-173.
- MEENTEMEYER, V. & BOX, E. O. (1987). Scale effects in landscape studies. In *Landscape Heterogeneity and Disturbance* (pp. 15-34). New-York : Springer-Verlag.
- NELLIS, M. D. & BRIGGS, J. M. (1989). The effect of spatial scale on konza landscape classification using textural analysis. *Landscape Ecology*, 2, 93-100.
- NEMANI, R. R. & RUNNING, S. W. (1989). Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and termal-IR AVHRR data. *Journal Applied Meteorology*, 28, 276-284.
- NILSSON, C. (1991). Conservation management of riparian communities. In *Ecological Principles of Nature Conservation* (pp. 352-372). Amsterdam : Elsevier Science.
- O'NEIL, R. V., MILNE, B. T., TURNER, M. G. & GARDNER, H. R. (1988). Ressource utilisation scales and landscape pattern. *Landscape Ecology*, 2, 63-69.
- ODUM, E. (1976). *Ecologie*. Paris : Doin Editeurs.
- OPDAM, P., VAN APELDOORN, R., SCHOTMAN, A. & KALKHOVEN, J. (1993). Population responses to landscape fragmentation. In *IALE Studies in Landscape Ecology 1, Landscape Ecology of a Stressed Environment* (pp. 147 - 171). London : Chapman & Hall.
- ORMSBY, J. P., CHOUDHURY, B. J. & OWE, M. (1987). Vegetation spatial variability and its effects on vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1301-1306.
- PARKER, H. D. (1988). The unique qualities of a geographic information system: a commentary. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1547-1549.
- PAUTOU, G. (1988). Perturbations anthropiques et changements de végétation dans les systèmes fluviaux - L'organisation du paysage fluvial rhodanien entre Genève et Lyon. *Documents de Cartographie Ecologique*, XXXI, 73-96.
- PAUTOU, G. & GIREL, J. (1986). La végétation de la basse plaine de l'ain : organisation spatiale et évolution. *Documents de Cartographie Ecologique*, XXIX, 75-96.
- PAUTOU, G., GIREL, J., LACHET, B. & AIN, G. (1979). Recherches écologiques dans la vallée du Haut Rhône français. *Doc. Cartogr. Ecol.*, XXII, 1-63.
- PEARLSTINE, L., MCKELLAR, H. & KITCHENS, W. (1985). Modelling the impacts of a river diversion on bottomland forest communities in the Santee River floodplain, South Carolina. *Ecological modelling*, 29, 283-302.
- PETERKEN, G. F. & HUGHES, F. M. R. (1995). Restoration of floodplain forests in Britain. *Forestry*, 63(3), 187 - 202.
- PETERSON, D. L., ABER, J. D., MATSON, P. A., CARD, D. H., SWANBERG, N., WESSMANN, C. & SPANNER, M. (1988). Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. *Remote Sensing of Environment*, 24, 85-108.
- REX, K. D. & MALANSON, G. P. (1990). The fractal shape of riparian forest patches. *Landscape Ecology*, 4, 249-258.
- RIPPLE, W. J. (1987). GIS for ressource Management: A Compendium. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*.
- ROCK, B. N., VOGELMANN, J. E., WILLIAMS, D. L., VOGELMANN, A. F. & HOSHIZAKI, T. (1986). Remote detection of forest damage. *Bioscience*, 36, 439-445.
- ROY, L. (1990). *Analyse spatiale du milieu naturel. Concepts, outils, application à l'étude des conséquences écologiques de la déprise agricole sur un adret de Moyenne Maurienne (Savoie)* (Mémoire de deuxième année E.N.G.R.E.F.
- RUBEC, C. D. A. (1983). Application of remote sensing in ecological land survey in Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 9, 19-30.
- RUNNING, S. W. & NEMANI, R. R. (1988). Relation seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forest in different climates. *Remote Sensing of Environment*, 24, 347-367.
- RYKIEL, E. J., COULSON, R. N., SHARPE, P. J. H., ALLEN, T. F. H. & FLAMM, R. O. (1988). Disturbance propagation by dark beetles as an episodic landscape phenomenon. *Landscape Ecology*, 1, 129-139.
- SAJALOLI, B. (1993). *Les zones humides du Laonnois (Aisne). Fonctionnement, usage et gestion*. Thèse Géographie, Université : Paris - Panthéon-Sorbonne.
- SHORT, N. M. (1986). *Geomorphology from space : A global overview of regional landforms*. Washington, D. C. : NASA Scientific and Technical Information Branch.
- TUCKER, C. J., GATLIN, J. A. & SCHNEIDER, S. R. (1984). Monitoring vegetation in the Nile delta with NOAA-6 and NOAA-7 AVHRR imagery. *Photogram. Engineering and Remote Sensing*, 50, 53-61.
- TUCKER, C. J. & TOWNSHEND, J. R. G. (1985). African

- Land-cove classification using satellite data. *Science*, 227, 369-75.
- TUCKER, C. J., VANPREST, C., BOERWINKEL, E. & GASTON, E. (1983). Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 13, 461-474.
- TURNER, M. G. (1987). *Landscape heterogeneity and Disturbance*. New York: Springer-Verlag.
- TURNER, M. G., DALE, V. H. & GARDNER, R. H. (1989). Predicting across scales : theory development and testing. *Landscape Ecology*, 3, 245-252.
- TURNER, M. G. & GARDNER, G. H. (1991). *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New-York : Springer - Verlag.
- URBAN, D. L., O'NEILL, R. V. & SHUGART, H. H. (1987). Landscape Ecology. *Bioscience*, 37, 119-127.
- VERBOOM, J., METZ, J. A. J. & MEELIS, E. (1993). Metapopulation models for impact assessment of fragmentation. In *IALE Studies in Landscape Ecology, 1, Landscape Ecology of a Stressed Environment*, (pp. 172 - 191). London : Chapman & Hall.
- VOGELMANN, J. E. & ROCK, B. N. (1988). Assessing forest damage in high-elevation coniferous forest in Vermont and New Hampshire using thematic mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 227-246.
- WALSH, S. J. (1980). Coniferous tree species mapping using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 9, 11-26.
- WARING, R. H., ABER, J. D., MELILLO, J. M. & MOORE III, B. (1986). Precursors of change in terrestrial ecosystems. *Bioscience*, 36, 433-438.
- WHITE, P. S. & MACKENZIE, M. D. (1986). Remote sensing landscape pattern in Great Smoky Mountains National Park Biosphere Reserve, North Carolina and Tennessee. In *Coupling of ecological Studies with Remote Sensing: Potentials at Four Biosphere Reserves in the United States* (pp. 52-70). U.S. Dept. of State Publ. 9504.
- WOOD, T. F. & FOODY, G. M. (1989). Analysis and representation of vegetation continua from landsat Thematic Mapper data for lowland heaths. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 181-191.
- WOODCOCK, C. E. & STRAHLER, A. H. (1987). The factors of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21, 311-332.
- WU, S. T. (1984). Analysis of synthetic aperture radar data acquired over a variety of land covers. *IEEE Transactions, Geoscience and Remote Sensing*, GE(22), 550-557.
- WU, S. T. & SADER, S. A. (1987). Multipolarization SAR data for surface feature delineation and forest vegetation characterization. *IEEE Transactions, Geoscience and Remote Sensing*, GE(25), 67-76.