

DEUXIEME PARTIE

OUTILS ET MÉTHODES POUR UNE APPROCHE PAYSAGÈRE MULTI-SOURCES, MULTI- DATES

**« Nous avons, nous voyant du ciel supérieur,
Le spectacle inouï de vos régions basses ».**

V. Hugo, *Les contemplations*

1. Dialectique paysage / télédétection

1.1. Introduction

Comme l'on a constaté dans la première partie, la notion de paysage est, à l'origine, de nature physionomique. Un paysage est perçu par notre vue... qui est le plus ancien «capteur de télédétection» dont l'Homme dispose, avec son odorat et son ouïe. Cette perception s'inscrit sans difficulté dans les préoccupations de l'étude paysagère.

Il est donc dans la logique des choses de mettre à profit le progrès technologique pour améliorer cette perception. En effet, la télédétection prolonge notre perception sensorielle, par exemple, celle de notre vision dans le domaine du proche infrarouge. Il en résulte à la fois une disparition du subjectif, de la perception sensorielle en première phase. L'analyse et l'interprétation font appel à la perception.

Apparemment, la liaison entre *le paysage* et *la télédétection* passe par l'étude des flux pris en compte dès le début par l'écologie du paysage qui a ainsi permis de définir une certaine *structure du paysage* : les flux structurent les paysages. Ce fut un élargissement du concept de paysage, tel qu'il résulte de l'adoption de l'approche systémique.

Ces flux, dans l'acception écologique, s'organisent dans un espace idéal, géométrique, homogène, indifférencié. L'évolution de la notion de paysage, d'origine géographique a complété le perceptible par des flux, largement invisibles. C'est justement la télédétection¹ qui repose sur la captation du flux d'énergie réfléchi par les objets qui composent les

¹ La télédétection est définie officiellement comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques des objets par des mesurages effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (COMITAS, 1988).

paysages et permet l'identification meilleure de ces flux (fig. 8). Elle contribuera sans doute de plus en plus à les quantifier.

Le progrès rapide de la technologie amène à multiplier les types de plates-formes et de capteurs² (fig. 9), ce qui se traduit par une variété et une abondance accrue d'informations relatives à l'espace géographique. Nous n'avions jamais disposé, auparavant, des données rassemblées en si peu de temps sur une étendue aussi vaste.

L'identification des objets télé-déTECTÉS repose donc bien plus souvent sur des méthodes indirectes qui font appel à l'approche systémique des paysages que sur une observation directe (problématique reprise dans la partie de méthodologie).

La télédétection ne doit pas être considérée seulement comme une technique ou un outil des plus puissants et des plus flexibles pour la gestion du milieu, la planification et le développement économique. Elle est aussi une des sources de données qui intègre les développements les plus récents de la recherche spatiale, de la physique et de l'informatique. Elle apporte une information nouvelle, différente et spatialement localisée.

En général, la télédétection exige une approche rigoureuse et ne souffre pas d'approximations. Le traitement des images satellitaires doit être modulé en fonction des sujets abordés. Les différents apports de la télédétection, la répétitivité, les données multi-spectrales, l'emboîtement des échelles (ou mesures à différents niveaux), ont été maintes fois soulignées par de nombreux auteurs. Pour revenir aux paysages, on

² Les capteurs permettent de mesurer les objets étudiés dans une bande de longueur d'onde. On distingue classiquement deux types de capteurs. *Les capteurs actifs* envoient une énergie et recueillent la fraction que les objets en renvoient : radar (*Radio Detection And Ranging*), lidar (*Light Detection And Ranging*), laser (*Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation*), fluoromètres, etc. *Les capteurs passifs* reçoivent l'énergie que les objets émettent ou réfléchissent (radiomètres, caméras, spectroradiomètres, etc.), l'émetteur principal étant le plus souvent le Soleil.

constate que la rencontre de la notion de paysage et de la télédétection est une «rencontre» qui se veut avant tout, méthodologique.

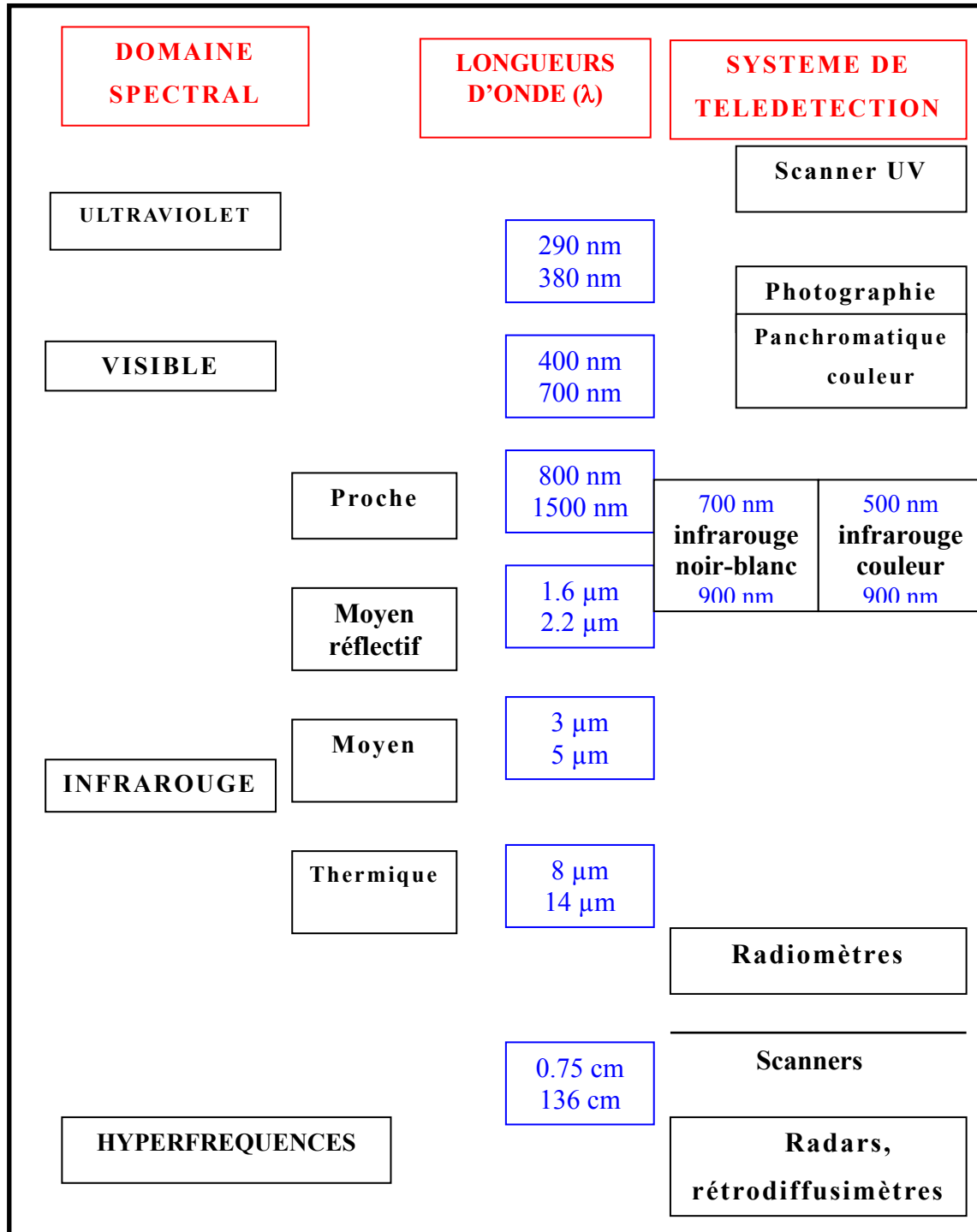


Figure 8 : Le spectre électromagnétique et les systèmes de télédétection

Approche géographique de la dynamique des paysages
du Plateau de Falticeni (Roumanie) par télédétection

Satellite (capteur)	LB (µm)	CTOS (km)	Taille du pixel (m)	Satellite (capteur)	LB (µm)	CTOS (km)	Taille du pixel (m)						
Spot 1 à 3 (HRV)	0,51-0,73	60	10 × 10	JERS1 (SAR 1275 MHz) (VNIR)	23,5 cm	75	18 × 24						
	0,50-0,59	60	20 × 20										
	0,61-0,68	60	20 × 20										
	0,79-0,89	60	20 × 20										
Landsat 1 à 5 (MSS)	0,5-0,6	185	79 × 56	(SWIR)	0,76-0,86	75	18 × 24						
	0,6-0,7	185	79 × 56		0,76-0,86	75 (S)	18 × 24 (S)						
	0,7-0,8	185	79 × 56		1,60-1,71	75	18 × 24						
	0,8-1,1	185	79 × 56		2,01-2,12	75	18 × 24						
Landsat 4-5 (TM)	0,45-0,52 0,52-0,60 0,63-0,69 0,76-0,90 1,55-1,75 10,40-12,5 2,08-2,35	185	30 × 30	2,13-2,25	75	18 × 24							
		185	30 × 30				2,27-2,40	75	18 × 24				
		185	30 × 30							MOS 1 (MESSR)	0,51-0,59	100	50 × 50
		185	30 × 30								0,61-0,69	100	50 × 50
		185	30 × 30								0,73-0,80	100	50 × 50
		185	30 × 30								0,80-1,10	100	50 × 50
NOAA 7,9,10 (AVHRR)	0,58-0,68 0,75-1,10 3,55-3,93 10,5-11,3 11,5-12,5	185	120 × 120	(VTIR)	0,5-0,7	1500				2700			
		185	30 × 30		6,0-7,0	1500	2700						
		2700	1100 × 1100		10,5-11,5	1500	2700						
		2700	1100 × 1100		11,5-12,5	1500	2700						
		2700	1100 × 1100		ERS 1 (AMI mode SAR-image)	5,66 cm	80	30 × 26,3					
		2700	1100 × 1100						(5,3 GHz)				
Nimbus 7 (CZCS)	0,43-0,45 0,51-0,53 0,54-0,56 0,66-0,68 0,70-0,80 10,5-12,5	1566	825 × 825	Scatteromètre	5,66 cm	500	45 × 45 km						
		1566	825 × 825	Altimètre									
		1566	825 × 825	Radar	13,8 GHz	-	16-20 km						
		1566	825 × 825	Météosat 2	0,4-1,1	12500	2500						
		1566	825 × 825		5,7-7,1	12500	5000						
		1566	825 × 825		10,5-12,5	12500	5000						
Seasat 1 (SAR 1275 MHz) (N + 300)	23,5 cm	100	25 × 25										

CTOS : champs d'observation totale au sol

LB : largeur de la bande

Figure 9 : Types de capteurs satellitaires (d'après Marc Robin, 1999)

1.2. Les variables géographiques du paysage mesurables par télédétection

Toutes les variables géographiques d'un paysage se déterminent par un angle de vue vertical, celui de la carte ou de l'image aérienne. Par contre, un angle de vue oblique ou même horizontal, tel que celui de la position de l'observation sur le terrain, exige toutes autres définitions (fig. 10). Dans le dernier cas, on parle de *la diversité « visuelle »* qui correspond au nombre des différents types d'éléments vus d'un site donné dans une direction donnée ou de *la complexité « visuelle »* qui correspond au nombre d'éléments vus d'un site donné dans une direction donnée.

Il y a trois raisons pour lesquelles le point de vue de l'observateur est très différent de celui de satellite : différence angulaire d'observation (α), différence de champ et donc de repères, différence de résolution (fig.10). L'observateur saisit le paysage avec une vision oblique et à partir d'un avion ou d'un satellite avec divers capteurs, la vision se rapproche de verticale, dans un certain champ.

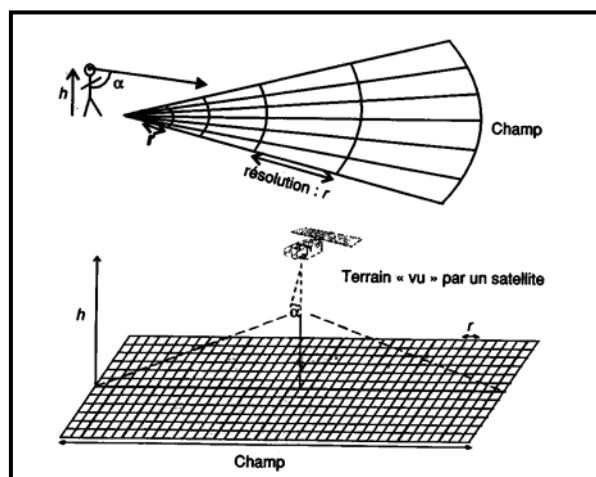


Figure 10 : Un paysage vu par un observateur et un satellite
(d'après Girard, Girard, 1999)

Le principe des capteurs satellitaires est le suivant : sur une superficie donnée, vue par le capteur, c'est-à-dire dans le champ de vision, on recueille des mesures énergétiques par l'intermédiaire des détecteurs, sur des éléments de la surface (pixel³) dont les dimensions sont définies par l'unité d'angle solide du capteur et par son altitude.

L'altitude dépend évidemment du vecteur, mais le champ de vision, l'angle solide et les bandes de longueurs d'ondes des détecteurs dans lesquelles se font les mesures dépendent du capteur. En conséquence le point de vue est très différent entre l'observateur et le satellite.

Si l'angle de vue détermine le nombre des variables géographiques prises en compte dans l'étude paysagère, il est nécessaire de présenter les principales techniques de la mesure spectrale des objets géographiques qui définissent « l'intersection méthodologique » entre la télédétection et le paysage.

1.2.1. Mesures spectrale des objets géographiques par des satellites

Facteurs déterminants

Dans cette partie de notre exposé on ne se propose pas de présenter toutes les bases physiques de la télédétection. On met en discussion seulement les parties qui, soit contribuent à la définition des variables géographiques du paysage qui peuvent être étudiées par la télédétection, soit qui représentent les fondements théoriques de nos applications de la troisième partie.

En télédétection, on utilise les propriétés physiques des objets observés, surtout leurs propriétés optiques, pour acquérir de l'information sur la nature de ces objets. Cette information est portée vers le système d'observation à l'aide d'un rayonnement

³ La plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée, définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage. Forme abrégée de « *picture élément* » (en agloaméricaine, le terme *picture* est souvent abrégé en *pic* ou en *pix*).

électromagnétique. Le système d'observation reçoit ce rayonnement et le traduit en valeurs numériques et en images.

Le rayonnement électromagnétique est modifié par l'atmosphère et par la surface de la Terre. A ce niveau-là, on met en discussion deux aspects qui constituent des facteurs explicatifs pour deux opérations techniques que l'on a effectuées dans nos applications de télédétection et qui ont un apport très important concernant les interprétations thématiques ultérieures : l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire direct et l'influence de la hauteur du Soleil sur la répartition spectrale du rayonnement solaire direct au sol.

Pour être en mesure d'interpréter de façon précise et quantitative les données satellitales acquises par la télédétection, en tenant compte que l'atmosphère peut varier spatio-temporellement⁴(sa composition physico-chimique – thermo-dynamique) et peut amener des différences dans le trajet effectué par le rayonnement solaire (fig. 11) (notamment les vapeurs d'eau et les aérosols pour les ondes en infrarouge thermique), il est nécessaire d'effectuer des corrections radiométriques ou atmosphériques avant de les analyser. Cet aspect joue un rôle primordial dans les applications sur les données thermiques comme les images LANDSAT prises de jour. Les composantes atmosphériques peuvent induire des perturbations importantes au signal électromagnétique.

⁴ Pour l'atmosphère il faut prendre en compte deux composantes : une composante relativement constante – ce sont les molécules de gaz atmosphérique (l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'argon, l'ozone) ; une composante variable - les aérosols, dont la concentration change d'un endroit à l'autre et d'un moment donné à un autre dans les couches basses de l'atmosphère : poussières, vapeurs d'eau, fumées, brouillard, crachin, pluie.

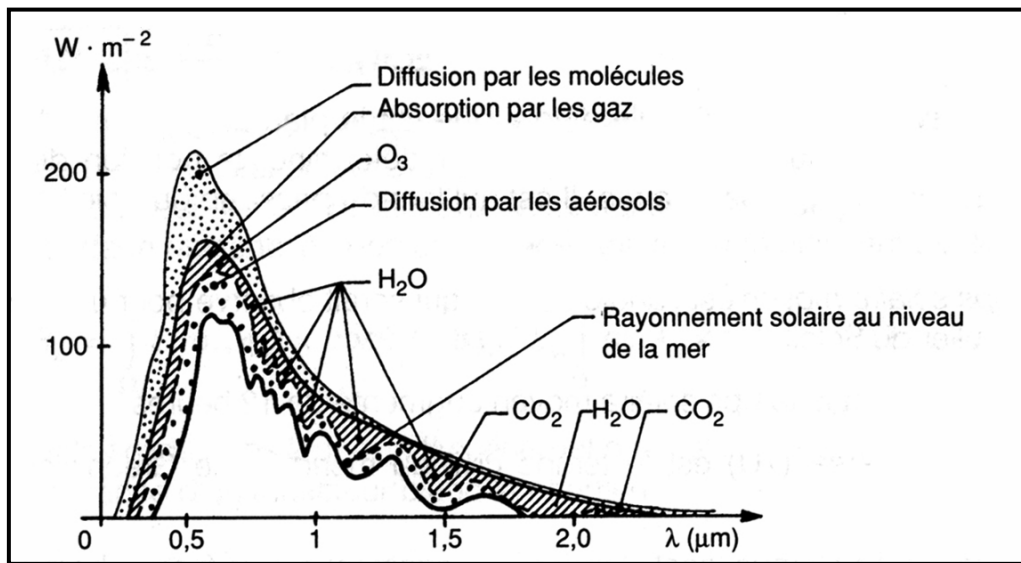


Figure 11 : Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire direct
(d'après Perrin de Brichambaut, 1985)

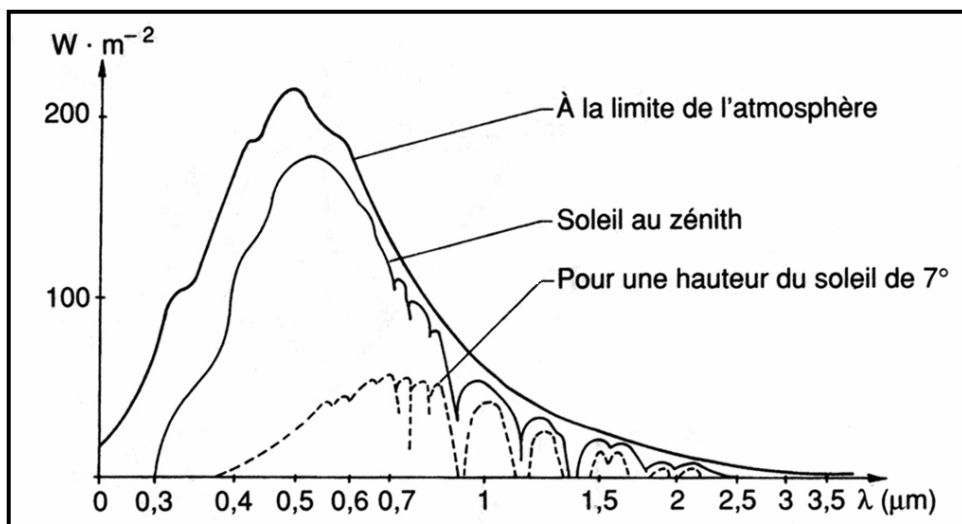
La courbe supérieure représente l'éclairement solaire reçu à la limite de l'atmosphère, tandis que la courbe inférieure représente le rayonnement solaire reçu au niveau de la mer. Du proche infrarouge à l'infrarouge thermique, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et le méthane sont premièrement responsables de l'absorption atmosphérique.

Le deuxième aspect mis en évidence au niveau de l'atmosphère et qui concerne beaucoup nos applications se réfère aux facteurs géométriques. Il s'agit de l'élévation du Soleil à l'horizon (θ), et de l'angle de prise de vue. Ainsi, nos données (LANDSAT 5 TM) pour le Plateau de Falticeni ont les paramètres suivants : le 18 août 1989 le degré d'élévation du soleil a été de 48.7 de et pour le 2 juin 1997 le degré d'élévation du soleil a été de 58 degrés.

Plus le rayonnement chemine longuement au travers de l'atmosphère, plus les effets atmosphériques sont importants. L'atmosphère ne laisse le rayonnement solaire passer que dans un nombre limité de bandes spectrales appelées fenêtres atmosphériques.

L'atmosphère est relativement transparente dans le visible PIR (0.4-0.75 μm) et le MIR (0.76 à 2.6 μm). Elle présente une large fenêtre atmosphérique dans l'infrarouge (de 8 à 14 μm), qui a l'inconvénient d'être ou mettre elle est opaque de 22 μm à 1mm.

Le rapport entre la hauteur du soleil et la réflectance des objets (réflectance exo-atmosphérique) a été beaucoup utilisé dans nos applications, notamment pour les corrections radiométriques de nos images. Les variables prises en compte pour ce type de correction sont : distance terre/soleil, le jour de l'acquisition : pour le 18 août 1989 la distance a été de 1.01174 unités astronomiques (UE) et pour le 2 juin 1997 a été de 1.0415 unités astronomiques (UE) (irradiance exo atmosphérique moyenne, le cosinus de l'angle zénithal solaire, c'est à dire cosinus de l'angle complémentaire de l'angle d'élévation solaire).



*Figure 12 : Influence de la hauteur du Soleil sur la répartition spectrale du rayonnement solaire direct au sol
(d'après Perrin de Brichambaut, 1985)*

Lorsqu'un rayonnement solaire atteint la surface terrestre, il peut être réfléchi⁵, absorbé ou transmis. La modification du signal en fonction de la nature de l'objet permet son identification à distance. En effet, cette modification engendre l'apparition d'une combinaison originale d'intensités variées à des longueurs d'onde distinctes. C'est la signature spectrale ou « la réponse spectrale d'un objet qui correspond à la courbe représentative de l'énergie réfléchie par cet objet, dans les différents domaines de longueur d'onde et en particulier dans ceux correspondant aux canaux des capteurs satellitaires. » (Gilg et Bildgen, 1993).

Les surfaces observées, sont caractérisées en télédétection par sept signatures différentes (Royer, 1991) : la signature par mesure de l'intensité du signal émis ou réfléchi; la signature spectrale proprement dite; la signature spatiale exprimant la forme des objets et leur arrangement; la signature angulaire, associée à l'anisotropie de la surface de l'atmosphère ; la signature temporelle, associée aux modifications de la surface comme la croissance de la végétation ; la signature par la polarisation du signal, appliquée surtout dans le domaine du radar ; la signature par la mesure de la phase du signal, utilisée aussi dans le domaine du radar.

L'étude des signatures spectrales s'appuie sur celle des termes du bilan d'énergie de surface⁶. La plupart des observations faites dans le visible et le proche infrarouge utilisent le phénomène de la réflexion⁷ du rayonnement solaire par la surface, alors que dans le domaine thermique

⁵ C'est la réflexion partielle du rayonnement qui permet la télédétection passive dans la partie solaire du spectre.

⁶ La température de surface est reliée indirectement à l'évapotranspiration des couverts par le biais du bilan d'énergie.

⁷ Renvoi dans le milieu matériel d'incidence, d'une onde électromagnétique incidente, par l'interface qui sépare le milieu considéré d'un autre milieu d'incidence de réfraction différent, sans changement de fréquence de l'onde.

et celui des hyperfréquences passives, c'est le phénomène de l'émission⁸ naturelle des surfaces qui dominant.

Les surfaces rencontrées en télédétection peuvent être regroupées en trois ensembles principaux : les surfaces minérales, comme les roches et les sols, les surfaces végétales et les surfaces aquatiques.

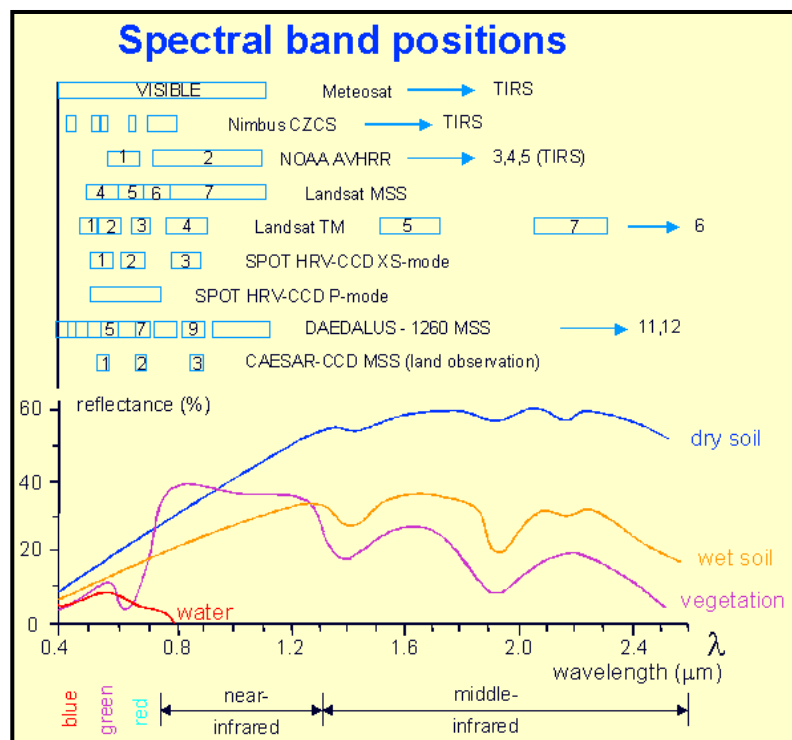


Figure 13 : Réponse spectrale des principaux composants du paysage
(d'après Wageningen, 1999)

En général, la courbe représentative d'une signature spectrale est caractérisée par des zones de réflectance faible et des zones de réflectance forte (fig. 13). La présence d'une zone (ou d'un pic) de réflectance faible indique qu'il y a une absorption d'énergie. Cette

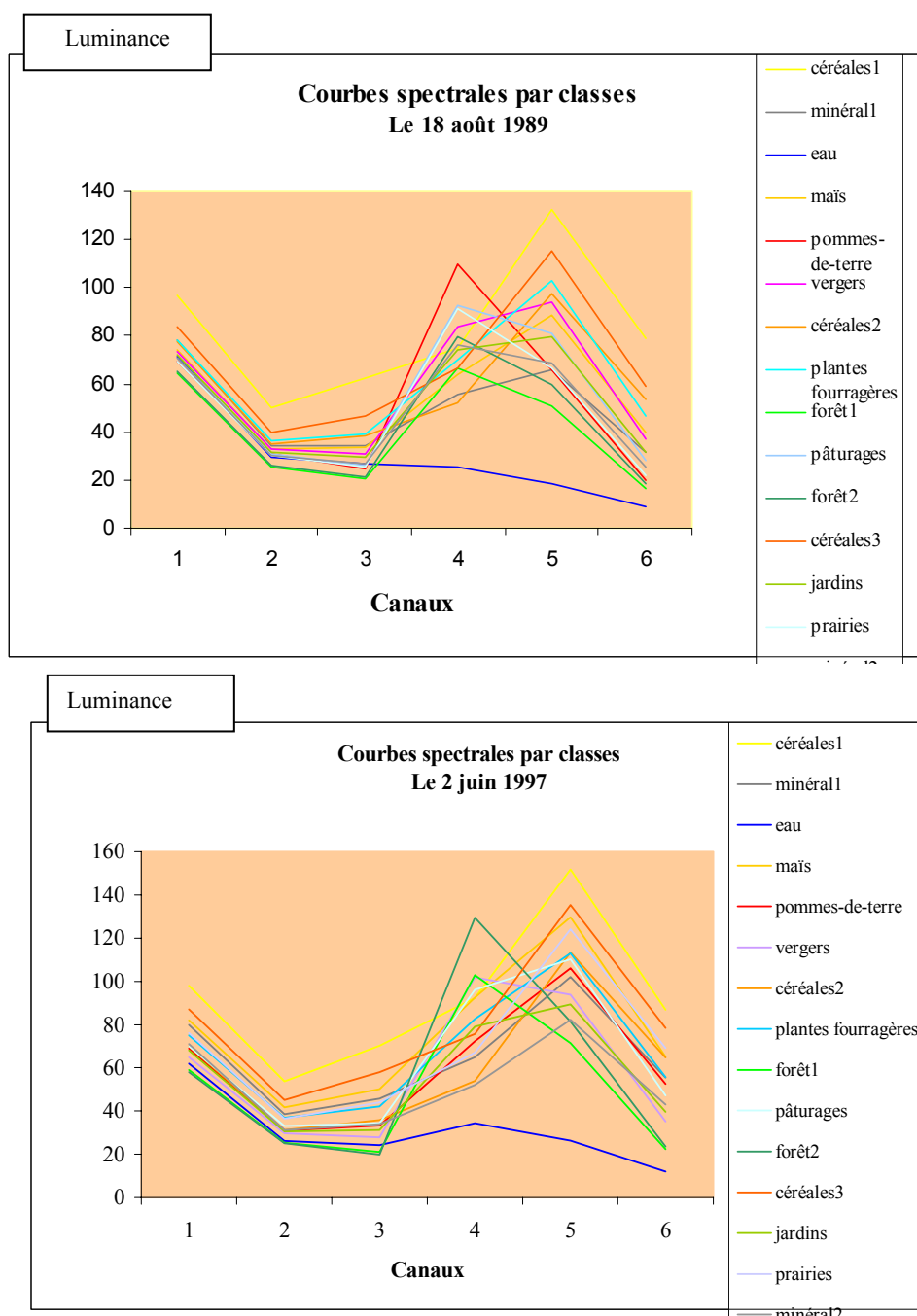
⁸ L'émission se fait généralement en fonction de la température et de l'état de la surface du corps considéré.

absorption d'énergie⁹ résulte des interactions qui se produisent entre les rayonnements incidents et la matière qui constitue les objets analysés.

Le terme de *signature spectrale* est habituellement utilisé. Mais, à présent, certains chercheurs estiment que ce terme est inapproprié : « car une *signature* laisse supposer qu'elle est constante ». Ils proposent le terme de « *comportement spectral* d'un objet, à un moment donné, dans une position géographique donnée, vu sous un angle donné et recevant un rayonnement donné » (Girard, Girard, 1999).

Pour notre part, on considère que le terme de signature spectrale désigne un comportement spectral qui peut varier sans doute pour un même objet, mais entre certaines limites. Jamais on ne pourra confondre la signature spectrale de l'eau avec celle du minéral. Par exemple, il y aura toujours des variations de l'ampleur des courbes spectrales d'un moment à un autre. Voici, à titre d'exemple, celles du Plateau de Falticeni (fig. 14).

⁹ Selon J. P. Gilg et P. Bildgen, du point de vue géochimique, on distingue deux grands types de phénomènes qui provoquent l'absorption d'énergie : dans le domaine des longueurs d'onde du visible (350 à 700 nm), les absorptions sont dues à des phénomènes de transitions électroniques, se produisant dans les orbitales de certains atomes ionisés ; dans le domaine du proche infrarouge (PIR) et de l'infrarouge moyen (MIR), l'absorption d'énergie est provoquée par des processus vibratoires, excitant des liaisons de certains groupements anioniques tels OH, CO₂, SO₄, NO_x.



Simona NICULESCU, 1999

Figure 14 : Courbes spectrales par classes à deux dates différentes
(le 18 août 1989 et le 2 juin 1997)

Les conclusions, après l'analyse des courbes spectrales diachroniques par classes, sont : la variabilité des courbes spectrales peut être observée sous deux aspects – en analysant l'allure des courbes et leur ampleur. Dans les deux cas, les variations les plus importantes s'observent à l'intérieur des surfaces (végétale, minérale et aquatique) et rarement entre ce type de surfaces. Les changements les plus importants de l'allure des courbes se passent dans les canaux 4 (quatre) et 5 (cinq) et très peu dans les canaux 1 (un), 2 (deux) et 3 (trois). Par contre, des changements de l'amplitude des courbes est valable pour toutes les deux dates et pour tous les canaux (sauf le six qui n'est pas pris en compte).

1.2.2. Mesures spectrales de diverses composantes du paysage

On y analysera la réponse moyenne des plantes en considérant qu'une importante superficie de la surface terrestre et donc implicitement des paysages est constituée de végétaux chlorophylliens et qu'une bonne partie de nos applications de télédétection sont dans le domaine végétal.

Les propriétés optiques des couverts végétaux dépendent des plantes qui les composent, de leur arrangement spatial, ainsi que de celles du sol sous-jacent. Il faut distinguer le comportement spectral de feuilles isolées de celui d'un peuplement d'individus appartenant à la même espèce ou à la même variété, ou à la même culture. Pour des études précises, il est nécessaire de distinguer les espèces et, pour une espèce donnée – les divers stades phénologiques, états physiologiques, morphologiques et structurales.

Selon les spectres de réflectance, d'absorptance et de transmittance, on distingue : dans le visible, la végétation présente un comportement spectral particulier dû à l'existence des pigments

chlorophylliens ; dans le proche infrarouge il est lié à la structure des tissus ; dans l'infrarouge moyen c'est la teneur en eau qui compte.

La réflectance et la transmittance varient sensiblement de la même façon. Dans les applications de la télédétection portant sur l'étude de la végétation, le paramètre que l'on cherche à quantifier n'est pas toujours la réflectance : ainsi, pour les évaluations de rendement, c'est l'efficacité d'interception du rayonnement et donc l'absorptance qui est le paramètre recherché, car elle conditionne la production de biomasse. Il y a une série de facteurs qui contrôlent le rendement des cultures : la biomasse, conditionnée par l'absorptance, et l'activité chlorophyllienne qui à son tour est conditionnée parmi d'autres par l'évapotranspiration réelle.

Les spectres de réflectance, d'absorptance et de transmittance ci dessus (fig. 15) ont été réalisés en laboratoire et sont valables pour des feuilles chlorophylliennes, quelles que soient les espèces.

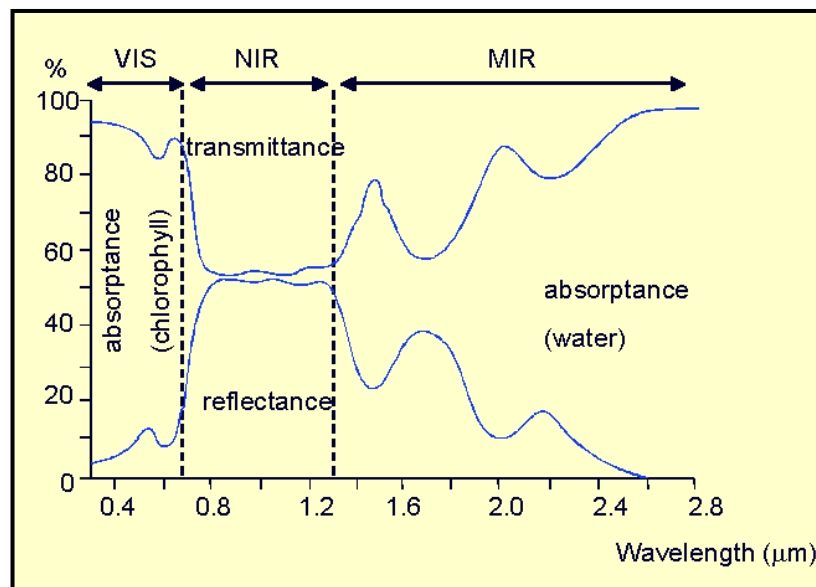


Figure 15 : Absorptance, réflectance, transmittance pour un végétal chlorophyllien (d'après Guyot, 1997)

La végétation présente dans le visible deux bandes d'absorption qui sont situées entre 0.43 et 0.45 μm puis vers 0.64 et 0.66 μm. Ces absorptions sont dues à

la présence des pigments chlorophylliens de type a et de type b. Les autres pigments : carotènes, xanthophylles, etc. ont aussi des pics d'absorption dans le visible, mais ceux-ci sont habituellement masqués par ceux de chlorophylles. Les effets des autres pigments¹⁰ sur le comportement spectral ne pourront s'exprimer que pour des végétaux très jeunes, ou au contraire sénescents, ou bien soumis à des stress ou des carences.

Les maladies, les attaques parasitaires, les déficiences minérales affectent la teneur en chlorophylle des feuilles et pourront être détectées dans le visible.

Dans le moyen infrarouge, les zones d'absorption sont centrées sur 1.45 puis 1.95 μm . Ils sont dues à la présence d'eau, ce qui permet d'estimer l'état hydrique des végétaux. La structure interne du feuillage, les différents tissus en particulier, et les arrangements des cellules et de l'espace intercellulaire sont principalement responsables des différentes valeurs de réflectance.

Selon les botanistes, les feuilles des végétaux peuvent être schématiquement classées en deux groupes : l'un qui possède un parenchyme palissadique très développé et un parenchyme lacuneux peu développé ; l'autre a un parenchyme palissadique peu développé et, au contraire, un parenchyme lacuneux très développé.

En fonction de cette structure interne de la feuille, on constate pour le premier groupe une réflectance plus faible dans le proche-infrarouge que pour le deuxième groupe. Cette différence est due au parenchyme lacuneux. Cet effet des lacunes et des vides intercellulaires

¹⁰ Des mesures de spectrophotométrie au laboratoire pour des échantillons de feuilles de diverses espèces des prairies permanentes (*Plantago media*, *Festuca pratensis*, *Prunella vulgaris*, *Primula veris*, *Salvia pratensis*, *Trifolium pratense*, etc.) dont on a mesuré par ailleurs la teneur en différents pigments : chlorophylle, carotène, montrent qu'il y a une relation inverse entre la réflectance à 550 nm et la teneur en chlorophylle. Plus la teneur en chlorophylle est élevée, plus la réflectance à 550 nm est faible.

a été montré par la diminution de la réflectance à 800 nm lors du remplissage de ces vides par de l'eau (fig. 16).

Les changements physiologiques (teneur en pigments, structure interne des tissus, teneur en eau) qui accompagnent les phénomènes de maturation et sénescence sont responsables des changements importants du comportement spectral dans le visible et l'infrarouge proche et moyen.

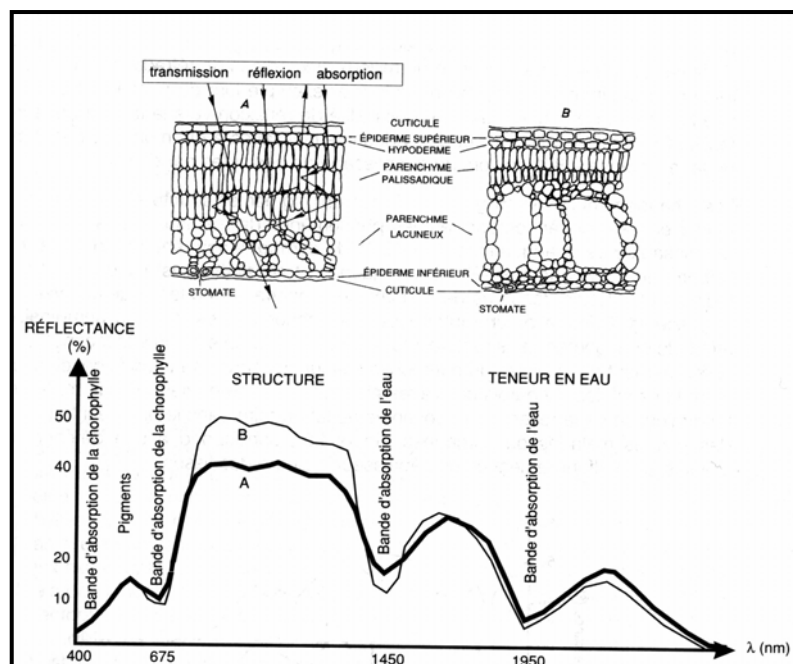


Figure 16 : Influence de la structure interne des feuilles sur la réponse spectrale (d'après Girard, Girard, 1999)

La diminution de la réflectance dans le proche infrarouge pour les plantes malades ou carencées, correspond à une détérioration des cellules, à un effondrement ou une épaisseur moindre des tissus.

Dans l'infrarouge moyen réflectif la réponse spectrale des feuilles est d'abord déterminée par la teneur en eau des cellules¹¹ ; en effet l'eau possède des

¹¹ L'infrarouge moyen réflectif est sensible à la quantité totale d'eau par unité de surface, c'est « l'épaisseur équivalente en eau » définie par Allen et al. en 1969.

bandes d'absorption à 1.45, 1.92 et 2.5 μm . Une plante verte aura des valeurs faibles de réflectance dans l'infrarouge moyen réflectif. Si sa teneur en eau diminue, soit par effet de la sénescence et du dessèchement, soit à la suite d'une maladie, des attaques parasitaires..., sa réflectance augmentera dans ce domaine spectral¹².

De la feuille à l'ensemble du couvert végétal on constate qu'il y a plusieurs cas possibles : la végétation recouvre complètement le sol (100% de recouvrement), la végétation a un faible recouvrement (<20-30%), la végétation a un recouvrement intermédiaire. On rappelle que pour les applications de télédétection c'est une situation très importante, d'une part pour le traitement des images, notamment pour la création des néo-canaux (on choisit un indice de végétation normalisé si la végétation couvre plus de 40%, un indice perpendiculaire si la végétation couvre moins de 40% et un indice de brillance s'il y a de la végétation sèche ou jaune, donc avec un taux de couverture de moins de 30%, un indice de minéralisation s'il n'y a pas de végétation) et, d'autre part pour la compréhension de la contribution du sol (de sa couleur) à la formation de la signature spectrale.

Dans le cas des couverts végétaux plus ou moins couvrants on prend en compte les phénomènes liés directement à la structure de la canopée, principalement en relation avec le port des feuilles. C'est le cas particulier des graminées dont l'angle d'inclinaison¹³ des feuilles diminue au cours de la maturation. Compte tenu de ces différences de port des feuilles, un même indice foliaire¹⁴ conduit à des

¹² Des travaux récents montrent que les composants tels que la lignine et la cellulose influencent également la réflectance des végétaux dans cette gamme spectrale.

¹³ Selon l'angle d'inclinaison des feuilles vis-à-vis de l'horizontale, on distingue des végétaux planophylles (angle proche de 0°), de végétaux à port érigée (angle proche de 90°) et des cas intermédiaires : végétaux plagiophylles (les feuilles inclinées sont les plus fréquentes), végétaux extrémophylles (les feuilles dressées sont les plus fréquentes).

¹⁴ On définit l'indice foliaire comme « le rapport de la surface développée par l'ensemble des feuilles, par la surface occupée sur le terrain » (Heller, 1977, *Abrégé de physiologie végétale*, Masson, Paris).

recouvrements plus faibles plus pour les espèces à port érigées que pour des espèces planophylles.

A cet effet de l'orientation des feuilles s'ajoutent, pour les plantes cultivées, leur structure, leur disposition spatiale (ou « l'effet de rang »).

La réflectance d'un couvert végétal variera en fonction de : ses stades phénologiques, de ses états physiologiques, de sa structure, du taux de recouvrement et on y notera l'apport de la contribution spectrale du sol en fonction de sa nature et de son état, de son environnement (notamment en fonction de son humidité) (fig. 17). Plus le sol sera réfléchissant plus sa contribution spectrale sera forte et sera détectable dans le visible, et le comportement spectral du couvert sera peu modifié dans le proche infrarouge. Au contraire, un sol peu réfléchissant apportera une contribution faible au comportement spectral de la végétation dans le visible, mais diminuera fortement celui-ci dans le proche infrarouge. Donc, les taux de recouvrement à partir desquels l'influence du sol sur les comportements spectraux sera perceptible sont très variables.

A ces facteurs qui conditionnent la formation des signatures spectrales, on ajoutera la présence de l'inflorescence du couvert, la présence de la matière sèche, non chlorophyllienne au pied des plantes.

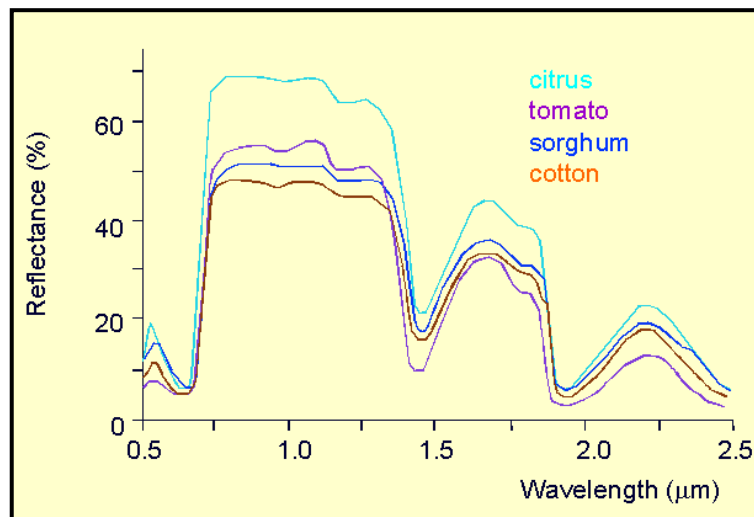
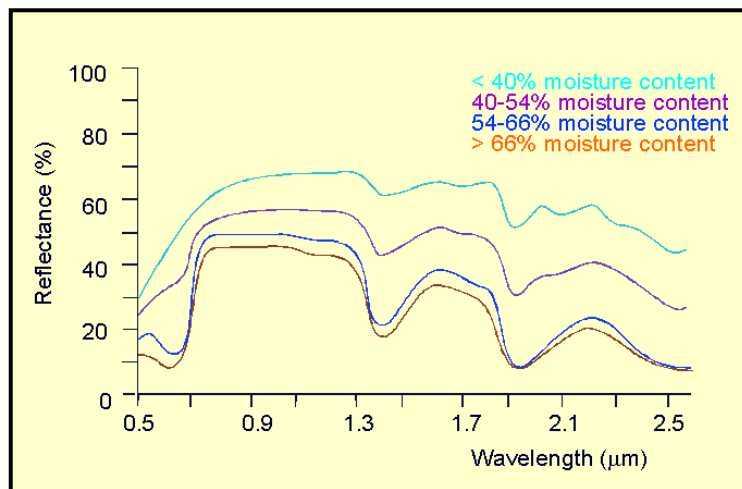


Figure 17 : Exemples de réponses spectrales de quelques cultures (d'après Wageningen, 1997).

Une signature spectrale tout à fait différente de celle du couvert végétal en général est la signature des sols. Dans le visible, les valeurs sont habituellement plus élevées que celles de la végétation, tandis qu'elles sont couramment plus faibles que celles de la végétation dans le proche infrarouge. Dans l'infrarouge réflectif moyen (1.6 à 2.2 μm), la réflectance dépend de la teneur en eau et de la composition minérale. Les sols contiennent toujours de l'eau, comme on peut le voir sur les courbes de la figure suivante.



*Figure 18 : Réponses spectrales des sols en fonction de leur humidité
(d'après Wageningen, 1999)*

La réflectance des sols dépend d'un certain nombre de facteurs, comme les états de surface ou de rugosité qui dépendent de la microtopographie et des travaux cultureux ou de la sa structure et de sa porosité. Plus une surface est rugueuse, plus sa réflectance sera faible.

Il y a encore les composants physico-chimiques qui augmentent ou diminuent la réflectance des sols. La réflectance d'un sol sera d'autant plus faible que sa teneur en l'un ou l'autre sera importante. La composition granulométrique augmentera ou diminuera la réflectance des sols. En effet, les particules fines retiennent l'eau mieux que les éléments grossiers, et de ce fait ils conduisent à une humidité plus grande, qui va diminuer la réflectance spectrale, d'où l'importance de

la prise en compte de la texture des sols, même si en apparence c'est une variable «discrète» du paysage.

La dernière catégorie des surfaces reconnues par la télédétection sont les surfaces aquatiques. Le comportement spectral de l'eau dépend des molécules d'eau mais aussi des constituants dissous ou en suspension (particules, matière organique...), ainsi que de l'état de rugosité de sa surface (fig. 13). L'eau pure réfléchit très peu dans le rouge et l'infrarouge. Alors, la réponse spectrale de l'eau est directement liée à l'interaction de plusieurs phénomènes agissant à sa surface et dans la masse d'eau : l'agitation de surface, la présence d'un polluant, le mélange d'eaux de densité et températures différentes, la présence du phytoplancton et des pigments chlorophylliens dans les eaux, la présence des substances dissoutes. Dans nos applications sur les courbes spectrales par objet on détecte la pollution aquatique justement à partir du comportement spectral différent de l'eau claire et de l'eau chargée, polluée.

En somme, ce sont les modifications apportées au signal électromagnétique qui cristallisent l'information géographique dans la mesure où toute modification peut théoriquement être reliée à la nature d'un objet géographique. D'habitude, environ 80% du rayonnement émis ou réfléchi par une surface arrivent au capteur dans le proche infrarouge et environ 50% dans le visible.

1.3. « Rencontre » méthodologique entre la télédétection et le paysage

Si en télédétection on admet qu'il est possible de détecter, identifier et quantifier des surfaces minérales, végétales et aquatiques, dans l'approche géographique du paysage les variables ou les attributs de celui-ci peuvent être structurés en fonction des attributs descriptifs, analytiques, synthétiques et évaluatifs (fig. 19).

Les attributs descriptifs représentent les variables classiques géographiques du paysage, tandis que les attributs analytiques ne considèrent qu'un aspect du paysage, par exemple : les différences entre les unités paysagères, la « variation saisonnière », la « dimension des espaces ».

Par contre, les attributs synthétiques cherchent à établir l'intégration de différentes composantes du paysage, par exemple : la « diversité », la « complexité » ou encore : la « diversité écologique », la « vulnérabilité » tellement importantes dans des pays comme ceux de l'Est de l'Europe où les paysages présentent une certaine « vulnérabilité » à cause de diverses raisons (politiques, écologiques, sociales, économiques, religieuses, etc.).

En considérant les dimensions typologiques, topologiques ou chorologiques et perceptives dans *l'étude du paysage*, on obtient déjà comme variables possibles « une » diversité ou « une » complexité d'une unité de paysage quelconque. *La diversité typologique* : le nombre de différents types d'éléments composant le paysage dans l'unité étudiée. Ce nombre dépend de celui des variables sélectionnées, ainsi que de leurs classes.

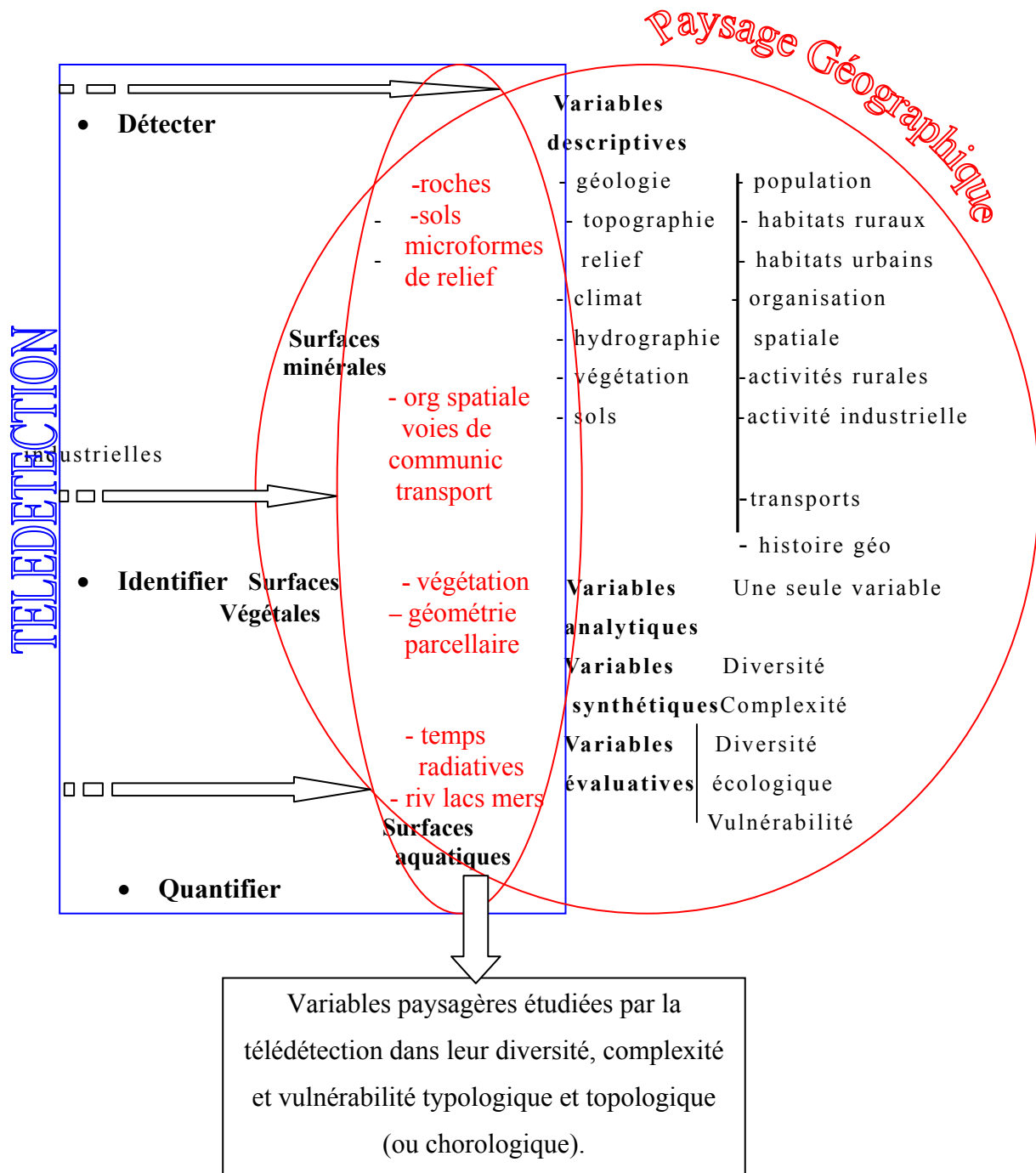
La diversité topologique se focalise sur la forme et la dimension des unités de paysage qui peuvent varier dans l'espace. Une cartographie des unités du paysage donne toujours une vue d'ensemble de ce type de diversité (cartes des paysages de la troisième partie).

La complexité typologique correspond au nombre d'éléments individuels (objet) qui se trouvent dans une unité de paysage donnée.

En exécutant l'intersection méthodologique entre les variables du paysage géographiques et les apports de la télédétection vue comme outil et en même temps comme une base de données parmi d'autres, on obtient comme variables paysagères pertinentes : celles de la série descriptive caractéristique pour la partie naturelle du paysage. On mentionnera également les roches du domaine géologique, le micro relief, une

certaine variable du climat - il s'agit de la température radiative des objets au sol, des sols, de l'hydrographie, de la végétation. Du côté social, pour le paysage descriptif, on retient : l'organisation spatiale des habitats (villages et villes), des voies de communication et de transport, l'organisation du parcellaire et l'orientation agricole. On a, donc, la possibilité d'étudier l'agencement spatial des composantes paysagères et leurs rapports spatiaux apparents (*pattern*).

Toutes ces variables paysagères peuvent être étudiées par la télédétection dans leur diversité, complexité et vulnérabilité typologique et topologique (ou chorologique).



Simona NICULESCU, 2001

Figure 19 : « Rencontre » méthodologique entre télédétection et paysage
Variables paysagères qui peuvent être mesurées par la télédétection

2. Les raisons du choix de la télédétection pour l'étude des paysages

L'exemple de « rencontre » méthodologique de la notion de paysage et de la télédétection est un exemple d'application de l'approche systémique et, par conséquent, l'émergence du sens des paysages dans notre étude suit une perspective systémique. L'approche du paysage par la télédétection se situe dans ce contexte systémique puisqu'elle repose sur l'utilisation des « signatures visuelles produites dans les espaces abiotiques et biotiques » (Gagnon, 1976).

Un autre souci de l'approche paysagère est d'appréhender la réalité du paysage d'une façon aussi globale que possible. Dans cette perspective, le paysage permet de replacer chaque composante dans l'ensemble, dans la configuration spatiale d'ensemble. Chaque élément du paysage ne peut être compris dans sa totalité qu'en considérant les éléments qui l'entourent. Donc, le paysage est intégrateur et il s'enrichit en englobant des éléments qui ne sont pas immédiatement visibles, mais qui sont étroitement associés aux objets observables : « Le paysage est une portion d'espace perceptible à un observateur où s'inscrit une combinaison de faits visibles et invisibles et d'actions dont on ne perçoit, à un moment, que le résultat global » (Deffontaine, 1973).

La télédétection répond à cette exigence d'une manière complète, en partant du principe que les images de télédétection peuvent être considérées comme des documents holistiques et que la diversité et la complexité de l'image sont en relation directe avec la diversité et la complexité des éléments et des unités de paysages représentés.

Toujours dans l'esprit de cette vision holistique, il convient de souligner aussi le souci de l'approche paysagère de la recherche d'un cadre intégrateur, d'une structure englobante, d'un cadre structurel désigné comme modèle d'organisation du paysage et qui peut représenter le lieu où se résout l'opposition dialectique de l'homogène et de l'hétérogène, comme le dit Tricart (1979), et où la mosaïque du paysage

trouve son unité. Les données de la télédétection aérospatiales répondent parfaitement à cette exigence.

En changeant l'échelle d'étude, on prend les photo-aériennes. Ce type de données se présente comme une catégorie de données complémentaires aux images satellitaires et ont une importance majeure pour l'approche du « détail » paysager, autrement dit qui donne une vision plus limitée sur le paysage, mais en revanche plus détaillée.

Le fait que l'analyse visuelle des images satellitaires ou photo-aériennes s'effectue par différenciation graduelle, permet aussi de reconnaître de différents niveaux hiérarchiques des unités délimités. En réalité, chaque unité est définie par les éléments et les phénomènes du paysage qui ont la plus importante signification dans la formation de l'image. Ce processus est analogue au concept multi-échelle en télédétection et « au principe de classification hiérarchique des terres » (Mabbutt, 1968 ; Antrop, 1976).

Pour l'élaboration d'une classification chorologique et hiérarchique des unités du paysage, l'approche multi-échelle et les mesures à différents niveaux sont fondamentales, ainsi que l'utilisation des images à différentes résolutions.

On peut donc caractériser les techniques de la télédétection et de l'analyse de l'image comme une approche multiple : « multi-échelle », donc hiérarchique, « multi-spectrale » et « multi-temporelle ».

Le choix de la télédétection tient compte de la pertinence de cet outil dans l'étude paysagère ainsi que des exigences méthodologiques de celui-ci : vision systémique, holistique, hiérarchique, dialectique entre l'homogène et l'hétérogène paysagère, dialectique entre le visible et l'invisible du paysage, répétitivité des données et donc possibilité d'étude diachronique. C'est un outil qui, sauf ses pertinences ou limites techniques (partie « *Choix de données* ») a tout un arsenal méthodologique propre qui ne fait que contribuer au renforcement du statut scientifique de la notion de paysage. Compte tenu de ce contexte

méthodologique, on considère que la télédétection est bien adaptée à l'étude des paysages et qu'en tout cas, il n'y a pas à présent quelque chose de mieux en matière de méthodologie, même si, bien des fois, il faut aussi prendre en compte d'autres types de sources de données, appelées «exogènes ».

Au-delà de tous les aspects plutôt méthodologiques, pour la Roumanie et pour toute l'Europe de l'Est d'ailleurs, la télédétection, en tant qu'outil, méthode, base de données a une représentativité, une contribution, une finalité particulière, en tenant compte qu'elle a la pertinence de contribuer d'une manière très concrète à l'élaboration des matériaux cartographiques actuels (généraux ou thématiques), en sachant que la dernière couverture cartographique de la Roumanie (dans un système cartographique pertinent) date de 1974, celle des photo-aériennes et des cadastres datent des années 1980. On notera aussi le fait que même si la couverture topographique n'est pas du tout actuelle elle reste toujours en régime de « documents secrets ».

Ensuite, on rappelle l'importance de la télédétection dans des pays comme la Roumanie, pour la création d'une base de départ concernant l'application des méthodes aréolaires en vue d'estimer les superficies et les rendements des principales cultures. La télédétection contribue effectivement (comme base de sondages), en Roumanie, à la substitution d'une statistique agricole classique, de type comptable, pas toujours fiable, par une statistique spatiale, pertinente, de type aréolaire (partie de méthodologie ou d'application des sondages spatiaux).

Enfin, on soulignera l'importance de la télédétection dans la création d'une base de données actualisée, localisée géographiquement sur l'occupation du sol et l'importance de l'utilisation du territoire en Roumanie, surtout après la chute du communisme et après la mise en place de la loi de redistribution des terres aux anciens propriétaires.

Dans ce contexte méthodologique et pragmatique, il semble qu'il ne faut pas se demander si la télédétection est un outil « à la mode » en

Roumanie ou dans les applications sur la Roumanie, mais bien au contraire, il faut l'accepter comme une technique avec une finalité qui peut-être académique et à la fois concrète et utile.

3. Choix des données images

Le développement des applications opérationnelles de la télédétection impose de fournir des résultats qui peuvent répondre à certains critères de qualité.

Avant de mettre en discussion ces critères, il faut préciser que les données de télédétection ne remplacent pas le travail de terrain, mais qu'elles servent le plus souvent à valoriser ce dernier en le rendant plus efficace (aide à la stratification de l'espace en zones homogènes, au repérage des zones, à la sélection d'un point de contrôle et de validation, spatialisation et généralisation des données ponctuelles).

Pour entreprendre une étude paysagère à travers la télédétection, il faut connaître les caractéristiques des données existantes (vecteur, capteur, résolution spectrale, résolution géométrique, date de prise de vue) ainsi que le savoir-faire, tant sur le plan technique (acquisition, traitements) que sur celui thématique (connaissance des composantes des paysages à identifier et cartographier).

Parmi les divers aspects des choix des données de télédétection on notera : le choix des résolutions spectrales et géométriques, le choix des scènes satellitaires, le choix de la date d'acquisition et le choix des canaux qui sera abordé dans la partie méthodologique.

3.1. Le choix des résolutions spectrales et géométriques

De manière générale, ce choix doit être fait en fonction des types et des dimensions des phénomènes géographiques que l'on veut détecter. Mais il faut savoir qu'il y a une certaine relation entre le niveau d'organisation et le niveau d'observation d'un paysage géographique,

dans notre cas, d'étude. Plus les relations entre les caractères détectés par la télédétection et le phénomène étudié sont complexes, plus les résultats obtenus risquent d'être peu précis.

Pour notre recherche on a choisi des enregistrements issus des satellites artificiels des ressources terrestres de deux familles des capteurs passifs embarqués à bord : les capteurs à haute résolution des satellites LANDSAT 5 TM et SPOT P en considérant que ces capteurs présentent l'efficacité réelle dans l'observation et l'étude des paysages (tableau 1). Au stade actuel du développement de la technologie de télédétection par satellite, il apparaît que les données de haute résolution sont les mieux adaptées à la cartographie des paysages et au suivi de leur dynamique.

TM : Thematic Mapper 5 (mars 1985) LANDSAT 5 est un satellite héliosynchrone en orbite sub-polaire. Son altitude varie de 696 km à l'équateur à 741 km aux pôles. Le satellite passe à l'équateur, en heure locale, à 9h37min. La durée d'une révolution est de 98.9 min et il fait 14 et 9/16 orbites par jour. La périodicité des passages du satellite est de 16 jours. Le recouvrement entre deux scènes à l'équateur est de 7.6%, valeur qui augmente avec la latitude : elle est de 54% à 60° de latitude. Le satellite n'a pas d'enregistreur embarqué puisqu'il envoie ses données aux stations de réception en temps réel et, lorsqu'il ne peut pas y avoir de liaison directe, les informations sont envoyées par des relais en utilisant des satellites de communication TDRS (*Tracking and Data Relay Systems*). Chaque scène LANDSAT 5 mesure 180 km en nord-sud et 180 km en est-ouest. Les LANDSAT 4 et 5 portent le capteur MSS ainsi qu'un capteur *Thematic Mapper* (TM) qui comporte 7 bandes spectrales. La résolution est de 30 m sauf pour la bande infrarouge thermique où elle est de 120 m. Il y a 16 photo-détecteurs en parallèle permettant de balayer seize lignes en même temps pour tous les canaux, sauf le canal 6 pour lequel il n'y a, évidemment, que 4 détecteurs.

On notera comme avantages de ces capteurs pour notre type de recherche : l'étendue couverte au sol – 180 km de côté pour LANDSAT et 60km pour SPOT. Ils offrent donc des possibilités pour appréhender les structures spatiales à l'échelle régionale et sous-régionale. La

fréquence d'acquisition des données (les enregistrements sont disponibles chaque 16 jours pour le satellite LANDSAT et chaque jours pour la série SPOT 1/2/4) permet l'étude diachronique. La résolution spatiale est appropriée (fig. 9) même pour l'étude des composantes du paysage et de leur organisation spatiale (le pixel pour LANDSAT 5 TM couvre 900 m² et 400 m² pour SPOT XS).

SPOT a une orbite héliosynchrone, quasi-polaire et circulaire avec une excentricité inférieure à un par mille. Il saisit les images en trace descendante, de jour, c'est-à-dire en allant du pôle nord au pôle sud, et passe au nœud de l'équateur à 10h30 le 15 juin. Sa vitesse par rapport au sol est de 6.6 km/s ou de 23 760 km/h. Une révolution moyenne dure 101.4min. Les orbites et les traces convergent vers les pôles. Le satellite effectue donc 14 et 5/26 révolutions en 24 heures. Il repasse au même point tous les 26 jours, en ayant effectué 369 orbites. Les satellites SPOT 1, 2 et 3 comportent quatre bandes spectrales : le panchromatique (P) : 510 à 730 nm, le vert (B1) : 500 à 590 nm, le rouge (B2) : 610 à 680 nm, le proche infrarouge (B3) : 790 à 890 nm.

Il faut tenir compte aussi des seuils dans les niveaux d'organisation. Le choix des données à résolution géométrique plus fine n'est pas toujours la meilleure solution pour identifier un phénomène géographique. Il est conseillé de prendre des images possédant un champ de vision large, ce qui permet un bon encadrement de la région à étudier.

Approche géographique de la dynamique des paysages
du Plateau de Falticeni (Roumanie) par la télédétection

Données		Caractéristiques des données			Avantages	Limites
		Année d'édition Périodicité	Echelle Résolution	Variables		
1. Cartes	• Topographiques • Géologiques • Pédologiques	• 1925 • 1974 • 1976 • 1982	• 1/100 000 • 1/50 000 • 1/200 000 • 1/200 000	Géoréférencement courbes de niveaux, côtes principales, contour forêt, habitats, voies de communication - Couches géologiques de surface - Principales classes des sols et leurs textures	- Efficacités des représentations - Espace géoréférencé	- Matériel carto. non-actualisé, classifié
2. Données satellitaires	• LANDSAT TM • SPOT P	• Tous les 16 jours • Tous les 5 jours	- Pixel 30mx30m ou 120m pour le thermique - Pixel de 10mx10m	• Réflectance des objets • Formes des objets	- Définition des espaces en fonction du couvert végétal - Possibilité d'un suivi régulier - Analyse stat, - Quantif. de l'occup. du sol	- Problèmes d'acquisition - Coût élevé des données - Confusion entre certains objets - Typologie variable en fonction de la saison - d'enregistrement

Approche géographique de la dynamique des paysages
du Plateau de Falticeni (Roumanie) par télédétection

3. Photo aériennes	Panchromatique	1982	1/100 000	Contour des principales formations végétales	- Possibilité d'analyse du « détail » et des structures paysagères	- Pas de données périodiques - Carences importantes
4. Statistique agricole	- Officielles - Obtenues par méthodes aréolaires	1970, 1985, 1990, 1997 1997, 1998.	Départements Structures agraires, parcelle(s)	- Données démograph. - Données économiques - Occupation du sol	- Typologie détaillée des cultures - Analyse statistique des données - Quantification de l'occupation du sol	- Pas de données annuelles - Peu de fiabilité pour des données de la période communiste - Coût élevé pour la mise en place de la statistique aréolaire
5. Cadastres	Vieux cadastres autrichiens des communes de la province historique Bukovine	1856	1/2280	Structures agraires, groupement des parcelles, parcelle	- Analyse fine de la structure agraire et de la disposition spatiale du parcellaire	- Manque pour la plupart des communes du plateau en étude ; les communes qui se trouvent dans la province historique Moldavie – la partie roumaine

Simona NICULESCU, 2001

Tableau 1 : Types de données mises en oeuvre

3.2. Le choix des scènes satellitaires et de la date d'acquisition

Les données fournies par les satellites des systèmes LANDSAT et SPOT sont divisées en scènes qui correspondent à des surfaces constantes et qui sont définies par des coordonnées géographiques presque constantes dans le temps¹⁵. La même scène peut être enregistrée à plusieurs dates. Les scènes SPOT enregistrées en panchromatique (P) ont dû être mosaïquées et ensuite on a extrait la région d'étude. Ces scènes sont de niveau 1B¹⁶. Toutes les scènes sont de bonne qualité, elles ne sont pas couvertes de nuages et elles ont été enregistrées à 9 heures 30 minutes environ (heure locale au nœud descendant).

Pour des études de dynamique d'environnement, les données doivent être acquises, autant que possible, au cours de la période de différenciation maximale des éléments d'occupation du sol. Elles doivent être choisies de façon à permettre une détection aisée, soit parce que les objets ou les phénomènes seront directement observable, soit parce que les phénomènes, non directement observables, pourront être interprétés par des relations simples.

Si l'on souhaite réaliser un inventaire des cultures, il faut disposer des dates correspondantes à divers états physiologiques ou stades phénologiques, ce qui suppose par ailleurs une bonne connaissance du

¹⁵ Chaque système d'observation de la terre a adopté un mode de découpage (*World Reference System WRS* des satellites LANDSAT et *Grille de Référence SPOT (GRS)* des satellites SPOT) pour lequel le centre théorique de chaque scène est défini par des coordonnées formées par le numéro de l'orbite (désigné P pour LANDSAT et K pour SPOT) et le numéro d'une ligne parallèle à l'équateur (R pour LANDSAT et J pour SPOT) en reliant les centres des scènes. On parlera dans notre étude de la scène Landsat PR 183-27 et KJ.

¹⁶ Selon les normes SPOT, cela signifie qu'elles ont subi des corrections radiométriques (égalisation des détecteurs par étalonnage sur des surfaces de référence) et des corrections géométriques. Ces corrections prennent en compte la rotation de la terre, l'effet panoramique de la courbure de la terre et les variations d'altitude de l'orbite du satellite (Guide des utilisateurs, SPOT, CNES, 1991).

mode de croissance et de développement des espèces, ainsi que du calendrier agricole (tableau 7). On y ajoutera les informations sur le déroulement des activités rurales et leurs impacts sur l'occupation du sol et les paysages.

Pour l'utilisation de données diachroniques, il est préférable d'avoir des données du même satellite pris sous des inclinaisons pas trop différentes pour limiter les différences géométriques et radiométriques. La correction radiométrique ainsi que les corrections géométriques (pour assurer la superposition) entraînent des modifications de la radiométrie et ont une incidence sur les classifications thématiques faites ensuite.

La confrontation des données climatiques (annexe) au calendrier agricole (tableau 7) nous permet de constater que la période optimale pour l'observation des paysages du Plateau de Falticeni est du 1^{er} juin au 15 octobre. Pendant cette période, les conditions atmosphériques peuvent être favorables aux enregistrements satellitaires et la différenciation des types d'occupation et d'utilisation du sol est maximale. Toutes les données images que nous utiliserons dans cette recherche ont été acquises au cours de la période considérée la plus pertinente pour l'observation du paysage (tableau 1).

3.3. « Choix » des photo-aériennes

On considère qu'il est nécessaire de reprendre le corpus des connaissances concernant les photographies aériennes en constatant quelle place reprend aujourd'hui l'interprétation visuelle dans l'ensemble des méthodes d'interprétation des données de télédétection. Elles servent à repérer, mais surtout à tracer les limites des unités cartographiques. Les photographies aériennes viennent compléter les images satellitaires. L'utilisation du terme « télédétection aérospatiale », indique clairement la complémentarité de ces deux sources d'information.

On rappelle également la « vocation » des photographies aériennes pour les possibilités d'étude du « détail » ; c'est pourquoi nous avons eu recours à ce type d'images, pour affiner notre analyse paysagère et pour aborder l'observation des paysages à des échelles géographiques inaccessibles par les résolutions actuelles de l'imagerie satellitaire. Dans notre recherche, les photographies aériennes ont été utilisées pour l'étude diachronique du couvert végétal du Plateau de Falticeni, notamment pour les limites spatiales des principales espèces végétales du plateau, pour l'analyse paysagère à l'échelle locale et pour la cartographie des micro-paysages végétaux et leur évolution.

Il s'agit d'un choix de photographies aériennes, d'une manière tout à fait théorique, parce qu'en effet en Roumanie il n'est pas évident de faire un choix parmi les missions aériennes dont les dernières datent des années 1980. Elles restent toujours en régime secret, même pour les géographes et même après la chute du communisme ? ! !

La mission aérienne disponible pour notre recherche date de 1982 et répond bien à nos exigences d'étude dynamique, c'est à dire que les photographies aériennes issues de cette mission s'encadrent parfaitement à l'échelle temporelle étudiée, puisqu'on s'intéresse aux transformations pluriannuelles – elles couvrent bien comme période temporelle la durée en plein communisme en s'encadrant parmi les documents topographiques de 1974 et les images satellitaires LANDSAT de 1989, des documents qui reflètent parfaitement la fin de la période communiste.

4. Les pré-traitements effectués sur les données de télédétection

4.1. Corrections radiométriques

Les pré-traitements que nous avons effectués sur les données de télédétection ont été réalisés en tenant compte du type de données et de l'aire géographique couverte par celles-ci.

Pour les scènes LANDSAT 5 TM on a effectué les *corrections radiométriques* premièrement. Les corrections radiométriques ont comme but, d'une part, de corriger les valeurs de luminance des effets atmosphériques dus aux pertes d'énergie relatives aux trajets des rayonnements dans l'atmosphère, et d'autre part, de corriger ces mêmes valeurs des traitements qu'elles ont subis pour palier aux différentes modifications dues aux caractéristiques techniques des capteurs (l'égalisation des détecteurs notamment).

On a effectué des transformations des données de luminance vraie (LV) en pourcentages de réflectance¹⁷ (réflectance exo-atmosphérique) (annexe) en utilisant un modèle LOWTRAN (Low Resolution Transmittivity programme) qui a permis la transformation des comptes numériques¹⁸ en valeur de réflectance tout en tenant compte des transformations atmosphériques du signal (Deschamps, 1984). Ces calculs s'effectuent canal par canal, sauf le canal 6, l'infrarouge thermique, qui fait l'objet d'un calcul spécifique.

¹⁷ Pour réaliser le calcul de réflectance, il est nécessaire de connaître l'angle d'élévation solaire au moment de l'observation. La valeur de l'élévation solaire est normalement indiquée dans les entêtes des bandes.

¹⁸ On peut évaluer les comptes numériques à partir de la connaissance des comportements spectraux de divers objets : sol, végétation, eau, neige, route, etc. Il faut disposer, entre autres, des coordonnées de la scène satellitale, de la date et de l'heure de la prise de vues.

Types de données	Types de pré-traitements
1. Données LANDSAT 1989/1997	• Extraction de la zone d'intérêt : le Plateau de la Moldavie • Corrections radiométriques canal par canal, sauf le thermique • Ré-échantillonnage des pixels du thermique du 120mx120 à 30mx30m • Mise en projection cartographique ou corrections géométriques (redressement de l'image dans le système cartographique UTM 35N) • Application du masque cartographique correspondant au Plateau de Falticeni • Compositions colorées en réflectance avec le bleu dans le canal2, le vert dans le canal4 et le rouge dans le canal7.
2. Données SPOT PANCRO 1998	• Mosaïque des scènes satellitaires concernant la zone d'étude • Extraction de la zone d'intérêt : le Plateau de la Moldavie • Mise en projection cartographique ou corrections géométriques (redressement de l'image dans le système cartographique UTM 35N) • Application du masque cartographique correspondant au Plateau de Falticeni • Mise en pseudo couleurs
3. Photos aériennes PANCRO 1982	• Numérisation des photos • Mosaïque des clichés de la même région • Mise en projection cartographique ou corrections géométriques (redressement de

	l'image dans le système cartographique UTM 35N) • Application du masque cartographique correspondant au Plateau de Falticeni
4. Cartes topo, géologiques et pédologiques	• Extraction des contours du Plateau de Falticeni, ainsi que d'une série d'objets géographiques : forêts, habitats, voies de communication et de transport • Numérisation des objets géographiques extraits • Digitalisation des contours choisis • Mise en projection cartographique ou corrections géométriques (redressement de l'image dans le système cartographique UTM 35N) • Homogénéisation des échelles de représentation.
5. Cadastres 1856	• Numérisation des cadastres des communes et des villages choisis • Digitalisation du parcellaire choisi • Mise en projection cartographique ou corrections géométriques (redressement de l'image dans le système cartographique UTM 35N) • Homogénéisation des échelles de représentation.

Simona NICULESCU, 2001

Tableau 2 : Pré-traitements appliqués aux données

Enfin, on a exécuté des transformations des données relatives au canal 6 en termes de valeurs exprimées en températures centigrades (températures d'émission).

Pour accéder à la température de surface, il est donc nécessaire de connaître l'émissivité de la surface et le rayonnement atmosphérique. En ce qui concerne l'estimation du rayonnement atmosphérique et les corrections à effectuer pour obtenir la température de surface, de différentes méthodes sont proposées suivant les mesures dont on dispose : capteur ayant un ou plusieurs canaux dans l'infrarouge thermique, radiosondage. Les satellites tels que LANDSAT ou METEOSAT ne disposent que d'un seul canal dans l'infrarouge thermique. On doit alors utiliser les modèles de correction atmosphérique tels que LOWTRAN (Kneisys, 1983) ou MODTRAN (1995)¹⁹ où la température de surface radiative est définie à partir du rayonnement émis par la surface. Elle intègre les températures de surface de chaque élément du couvert vu par le capteur. Elle dépend, en général, de la structure de la végétation ou du type d'occupation du sol (applications sur le thermique dans la troisième partie).

4.2. Les corrections géométriques

Elles portent sur la scène observée par les capteurs des satellites et par l'image brute reçue aux stations de réception. On les corrige en les mettant dans un système de projection cartographique. Il est utile de rendre les données images géométriquement superposables à d'autres documents, pour pouvoir les comparer ou les utiliser conjointement. De manière générale, on réalise une correction géométrique : soit avant

¹⁹ Ces modèles sont basés sur la division de l'atmosphère en un système multicouches et la résolution de l'équation de transfert dans chacune des couches. Les données nécessaires caractérisant l'atmosphère (profils thermiques d'humidité et de pression) proviennent soit du radiosondage, soit des mesures indirectes, issues des modèles météorologiques, ou des prévisions.

l'interprétation, afin de pouvoir utiliser des canaux venant d'images différentes, comme par exemple dans le cas de l'analyse diachronique ; soit après l'interprétation, pour réaliser des comparaisons statistiques, ou l'intégrer dans un système d'information géographique.

Il faut préciser à la fois qu'il y a deux catégories de déformations qui peuvent intervenir. La première provient des erreurs générées lors de l'acquisition de l'image²⁰ : ces corrections sont généralement assurées par un centre de prétraitement des images. La deuxième est une conséquence directe de la rotondité et du relief de la Terre. L'image, qui n'est pas par nature bidimensionnelle, n'est qu'une projection sur le plan de la réalité tridimensionnelle de la zone observée.

Dans notre recherche on a appliqué le deuxième type de correction avant l'interprétation et après les corrections radiométriques, ayant en vue que l'on suit une étude diachronique. Des deux grandes catégories des méthodes utilisées pour la correction des déformations géométriques des images de télédétection (Tessier et Stamon, 1994) (les méthodes paramétriques²¹ et les méthodes interpolatrices), on a appliqué à nos images l'une des méthodes interpolatrices qui ne s'intéressent pas aux mécanismes à l'origine des distorsions, mais qui font l'hypothèse que l'on peut rapprocher ces déformations à l'aide d'une approximation polynomiale, estimée par les moindres carrés. Elles sont des méthodes plus générales que les méthodes paramétriques, car elles ne nécessitent pas d'informations propres au capteur-vecteur et reposent essentiellement sur la géométrie de l'image.

Selon la modélisation mathématique utilisée, on distingue les méthodes permettant de corriger les déformations globales de l'image et

²⁰ Ces erreurs peuvent être dues à l'instabilité du vecteur (roulis, tangage) qui entraîne une dérive par rapport à l'orbite théorique du satellite ou à des aberrations du capteur entraînant des distorsions non linéaires de l'image (effet tonneau).

²¹ Ces méthodes reposent sur une modélisation des phénomènes qui engendrent les déformations.

les méthodes prenant en compte de distorsions locales. Pour la première catégorie de méthodes, un modèle mathématique unique est déterminé et sera appliqué uniformément à toute image, tout comme dans notre cas. Les méthodes d'approximation polynomiale sont parmi les plus utilisées, mais elles ne permettent de corriger que les déformations globales. Les transformations plus complexes, non linéaires, sont modélisées par des polynômes d'ordre supérieur, ordre 2 (polynôme du second degré) ou plus. Nous avons choisi une équation polynomiale quadratique, de deuxième ordre²² en s'appuyant sur 20 amers²³.

L'interpolation géométrique a pour objectif de modéliser la transformation géométrique et va permettre de calculer, pour chaque pixel, ses coordonnées dans l'image rectifiée, et donc de replacer l'image satellitaire dans un système de coordonnées orthogonales²⁴, corrigeant ainsi les distorsions résultantes de la courbure de la terre. Dans certains ouvrages de spécialité, on parle de recalage, de rectification, de mise en conformité, de géoréférencement (par rapport à une carte topographique, dans notre cas 1/50 000).

Ces opérations permettent de superposer exactement le résultat et d'autres cartes, de les contrôler spatialement sur le terrain plus précisément, et enfin de l'intégrer directement dans des bases de données géographiques sous un SIG, où il pourra être croisé avec d'autres données.

En conclusion, la rectification des images est une étape importante pour l'utilisation des données de télédétection. Le choix du référentiel et

²² Il est possible de réaliser des corrections de type « *surface caoutchouc* ».

²³ On choisit généralement, comme points d'appui, des objets qui peuvent être identifiés sans ambiguïté et localisés précisément. On préférera souvent les éléments de construction et d'aménagement aux éléments du milieu naturel parce que leurs formes sont plus géométriques et plus stables. Les bâtiments et surtout les voies de communication répondent bien à ces critères.

²⁴ Pour la Roumanie, le système de coordonnées orthogonal valable est : UTM 35N (Universal Transverse Mercator).

de la méthode utilisée dépend de l'échelle d'étude. La résolution de l'image, les paramètres d'acquisition (altitude, angle), le relief de la zone étudiée sont autant des facteurs à prendre en compte dans le choix d'une modélisation²⁵.

4.3. La rectification des images

On appelle *rectification* des images la mise en conformité spatiale d'une image avec d'autres informations spatialisées, souvent avec une autre image. Elle est faite selon le même principe que les corrections géométriques. Ces combinaisons d'images peuvent être utilisées dans le cadre d'analyses diachroniques ou pour combiner des données d'origines différentes. Dans ce cas, les images seront superposables : l'image LANDSAT 1989 avec l'image LANDSAT 1997 sur le Plateau de Falticeni.

Le masquage consiste en général à cacher une partie de l'image et à conserver intacte l'autre partie. Le masque peut être géométrique ou radiométrique. Notre étude ne porte que sur une partie de l'image, et en conséquence, on préfère supprimer l'espace géographique non traité. Pour faire cela, on effectue un découpage de type géométrique sur l'image. On a tracé les limites de la région, et l'on a éliminé le reste. C'est le masquage géographico-géométrique que l'on a appliqué pour le Plateau de Falticeni afin de le détacher des autres régions géographiques des alentours : les autres sous-régions du Plateau de Moldavie et une partie des Carpates Orientales (fig. 7).

²⁵ Des modèles multi-échelles basés sur une décomposition multi-résolution des images, utilisant la transformation en ondelettes, ont été développés (Djamdj, 1993).

4.4. Pré-traitements des données SPOT P

Pour les données SPOT P, à part les pré-traitements déjà exposés, on a effectué un *mosaïquage des scènes*. Le mosaïquage consiste à « coller » plusieurs images ensemble afin de couvrir un champ plus étendu.

L'intégration des images recalées dans un SIG, constitue souvent l'étape finale de la rectification. Elle ouvre de nombreuses possibilités d'exploitation, en permettant la combinaison des données de télédétection avec d'autres bases de données géographiques.

4.5. Pré-traitements des photographies aériennes

Du fait qu'elles sont de nature analogique et qu'elles couvrent des surfaces assez réduites, les photographies aériennes ont été numérisées, puis mosaïquées (les clichés contigus de la même région), redressées par rapport aux cartes topographiques 1/50 000, et finalement on a extrait le Plateau de Falticeni.

Sur ces images on a effectué une photo-interprétation classique en effectuant un découpage spatial quant aux principales associations végétales du Plateau de Falticeni, en associant à ces résultats ceux obtenus lors des missions de terrain concernant le contenu des unités spatiales végétales (l'inventaire des espèces elles-mêmes) obtenues par photo-interprétation.

5. Choix des échelles d'analyse

Il aurait été difficile de mener une étude complète de la dynamique des paysages du Plateau de Falticeni à partir des seuls documents de télédétection. On explique le choix des autres données spatialisées, en qualité de données exogènes par rapport à celles de télédétection, à travers le choix des échelles d'analyse et de l'explication de

l'importance de la prise en compte du glissement de l'échelle d'un type de données à autre, ou autrement dit à travers l'emboîtement d'échelles.

La problématique du choix des échelles et, implicitement, du choix des autres données se situe dans trois perspectives : une perspective géographico-paysagère, une perspective cartographique en étroite liaison avec nos données exogènes et leurs possibilités d'exploitation, et la perspective de la télédétection comme outil/méthode centrale de notre étude paysagère.

La notion d'échelle est inséparable de l'étude des paysages. Cette conception a déjà une tradition si on se réfère aux échelles temporo-spatiales d'inspiration géomorphologique proposées par A. Cailleux et J. Tricart.

Dès le début, dans l'école française des paysages, le rapport théorique entre *échelles et niveaux d'observation* s'est imposé. Pour définir ces notions, G. Rougerie fait des comparaisons pertinentes entre différentes catégories de paysages : « dans les paysages ouverts, il existe un continuum entre ces niveaux, absolument inexistant en paysages bocagers. ».

Dans le même milieu scientifique, il y a eu des préoccupations concernant la problématique des échelles et des niveaux d'observation qui conditionnent et désignent la taxonomie²⁶ paysagère. Chaque discipline spécialisée dans l'étude d'un aspect du paysage s'appuie sur un système de découpage plus ou moins systématique, formé d'unités homogènes et hiérarchisées qui s'emboîtent les unes dans les autres. Les paysages dits « physiques » sont en fait remodelés largement presque toujours par l'exploitation anthropique. Le découpage en parcelles, terroirs, finages, « quartier » et « pays » va constituer l'un des critères essentiels de la taxonomie des paysages. Le système taxonomique doit permettre de classer les paysages en fonction de l'échelle, c'est à dire de

²⁶ On remarque le glissement sémantique du terme géographique « taxonomie » vers le terme utilisé en télédétection « nomenclature ».

les situer dans la double perspective du temps et de l'espace. La définition d'un paysage est en fonction de l'échelle (fig. 20).

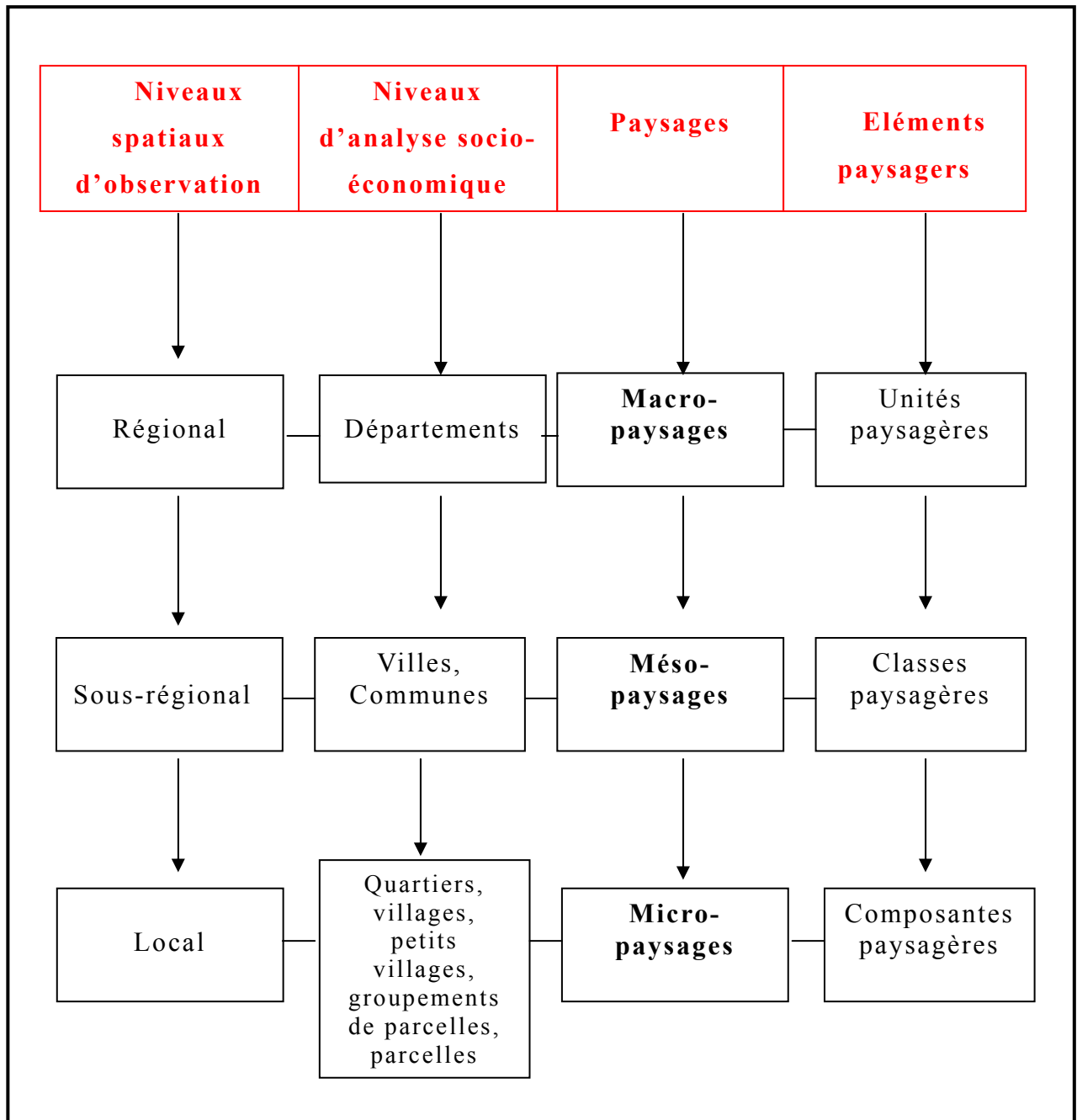
De l'école paysagère française, on citera aussi Thierry Brossard qui a mis en évidence des niveaux d'échelles dans l'étude des milieux intégrés et qui a présenté une méthode d'analyse des effets d'échelle qui permet de définir les seuils²⁷ remarquables de l'organisation du paysage.

Dans notre acception, étudier l'effet scientifique de l'emboîtement d'échelles c'est accepter l'existence d'une certaine hiérarchie dans l'espace, en commençant avec le niveau géographique. Celui-ci est composé de divers systèmes spatiaux emboîtés, qui, à leur tour, sont constitués de plusieurs niveaux d'organisation emboîtés. Alors, les objets de la surface terrestre présentent de nombreux niveaux d'organisation. Ce niveau d'organisation²⁸ correspond à l'ensemble des liens et des fonctionnements entre les objets géographiques qui constituent une cohérence géométrique, sémantique et fonctionnelle. Les niveaux d'organisation présentent plusieurs niveaux d'observation, tout comme le *paysage*. Le *paysage*, en tant que niveau d'observation de l'espace géographique à une certaine échelle, peut être, lui aussi, appréhendé à travers plusieurs niveaux de perception²⁹ qui vont permettre la « descente » de l'étude jusqu'aux composantes du paysage (fig. 21). On a convenu donc de s'intéresser à la quantité d'informations qui est en fonction du champ spatial, de la résolution et du niveau d'analyse, aux niveaux d'organisation, aux moyens de perception, à la mesure de la précision.

²⁷ Le terme de « seuil » devient en télédétection « discontinuité spatiale ».

²⁸ Les niveaux d'organisations sont en relation avec les composantes des écosystèmes – composantes abiotiques : climats, substrats géologique, régime hydrique, sol, ... ; composantes biotiques : flore, faune, homme y compris.

²⁹ On souligne encore une fois l'acception du terme « *niveau de perception* » - niveau qui correspond aux outils, et types de mesures ou estimations que l'homme peut mettre en œuvre pour détecter tel ou tel niveau d'organisation.



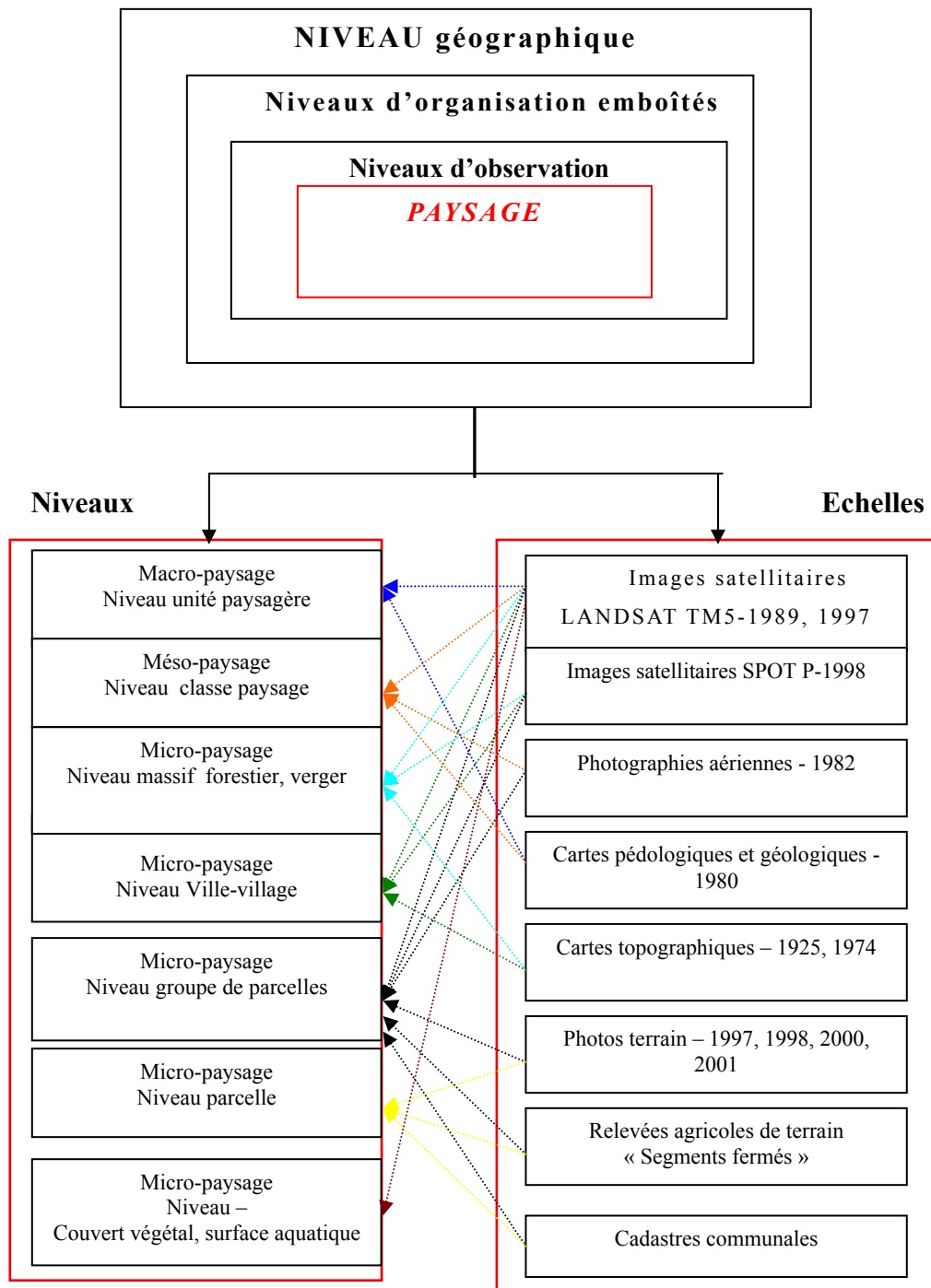
Simona NICULESCU, 2001

Figure 20 : Niveaux d'observation des paysages et échelles

A cette échelle que l'on peut appeler géographique, on observe une hiérarchie discontinue (discrétisée, en langage mathématique). Par contre, l'échelle cartographique (l'ordre de grandeur de la réduction des cartes) est une variation continue. Il faut aussi ajouter qu'à chaque niveau spatial pertinent correspond également une temporalité autonome. Cette démarche permet l'étude des objets complexes à partir des macro-paysages jusqu'aux micro-paysages par approches emboîtées, elle assure un meilleur équilibre des faits pris en compte, enfin, elle peut être dynamique même si le recours à la notion d'emboîtement spatial suppose la maîtrise du passage d'un niveau d'échelle à un autre.

Cette méthode *d'emboîtement d'échelles* contribue à mettre en évidence la structuration et l'organisation d'un espace et à connaître les différenciations spatiales en dégagant à la fois les structures spécifiques de chaque niveau et celles que l'on perd dans le changement d'échelle : de la parcelle vers les grandes unités paysagères en passant par des groupements des parcelles à diverses structures végétales ou anthropiques.

L'étude simultanée aux différentes échelles doit permettre de répondre à certaines questions liées au problème de l'analyse des données géographiques et, par conséquent, à celui de l'hétérogénéité spatiale : quel est l'effet du découpage géographique sur la perception d'un phénomène donné, autrement dit quel niveau d'analyse choisir ; trouve-t-on les mêmes éléments d'organisation aux différentes échelles ; quelle est la nature de l'hétérogénéité interne des unités spatiales.



Simona NICULESCU, 2001

Figure 21 : Niveaux spatiaux et emboîtement d'échelles dans l'étude paysagère

L'espace étudié est découpé souvent en maillages administratifs, tout comme nos représentations cartographiques, à partir des données socio-économiques des années du communisme et du post-communisme (1970, 1980, 1985, 1992, 1997). Alors, il existe des méthodes classiques, aussi bien inférentielles que descriptives pour comparer le pouvoir de discrimination des différentes variables à différents niveaux d'agrégation géographique, dans notre cas au niveau des communes. Le choix de ce type de données exogènes s'explique par le fait que la cartographie, à partir des données satellitales sur des unités paysagères, a été validée et complétée par des données socio-économiques.

Cette méthode d'interprétation par traitement d'images (classifications statistiques et structurales), mais aussi visuelle à partir des données socio-économiques aboutit à un découpage de l'espace étudié en unités paysagères plus pertinentes et plus précises corrélant les données satellitaires avec les données socio-économiques. Cette approche du paysage en tant qu'indicateur des conditions du milieu et des activités humaines, avec une représentation cartographique, est très intéressant pour croiser, sous système d'information géographique, de différentes données régionales.

Le passage d'une cartographie thématique (topographique, géologique ou pédologique, les exemples que l'on a pris en considération dans notre recherche) à une interprétation en paysage (surtout pour l'élaboration d'une typologie des paysages) nécessite une connaissance des processus en cause, une généralisation synthétique. L'adéquation entre les niveaux d'organisation et de perception est essentielle pour chaque niveau d'organisation ou d'observation. Il y a une échelle de la mise en valeur (fig. 21) : les cadastres pour les parcelles foncières, les relevées de terrain pour les parcelles et les groupement des parcelles, tout comme les photos de terrain, les images SPOT P pour le zonage des organisations spatiales anthropiques (villages, villes), les cartes topographiques pour le découpage des principales marches d'altitude

ainsi que pour l'extraction des structures internes anthropiques (voies de communications et de transport) et des structures internes des unités paysagères naturelles ou d'autres types d'occupation du sol, comme les massifs forestiers, les vergers, etc., les photographies aériennes pour la discrimination et l'extraction des limites spatiales des principales formations végétales, les cartes géologiques et celles pédologiques pour l'individualisation des grands ensembles paysagers, les données statistiques socio-économiques par communes et finalement les images satellitaires LANDSAT diachroniques qui ont servi en premier temps, notamment celle de 1997, comme support informationnel pour le découpage spatial des principaux types de paysages du Plateau de Falticeni et ensuite pour l'étude diachronique des paysages.

Les photo-sols sont des prises de vue instantanées, réalisées à l'aide des appareils photographiques à partir d'un point d'observation au sol. Elles fournissent une vision globale et contribuent à la collecte des observations de terrain et elles servent à présenter la réalité paysagère telle qu'on peut l'observer sur le terrain. Par contre, il ne faut pas négliger l'objectivité relative des enregistrements du fait que les sites observés et les points de prises de vue sont choisis par le chercheur ni la vision oblique ou horizontale qui déterminent une hiérarchie arbitraire aux objets. Ces photos peuvent constituer un support correct pour un suivi des dynamiques intra-annuelles.

Travailler simultanément sur plusieurs échelles (de 1/5000 à 1/100 000 en passant par 1/200 000, 1/50 000, 1/5000) permet de décider du niveau d'analyse pertinent pour un phénomène donné et de saisir l'influence des mêmes facteurs sur des niveaux différents (fig. 16) et finalement de permettre d'élaborer une typologie des paysages du Plateau de Falticeni. Cela nous conduit à réfléchir parallèlement à la

pertinence des découpages géographiques presque toujours arbitraires, servant de base à la stratification et à la cartographie³⁰.

Les cartes topographiques à 1/50 000 (éditions 1974), système cartographique UTM 35N ont été utilisées en complément et/ou en appui à l'exploitation des données de télédétection : comme référentiel cartographique pour le redressement de tous les matériaux cartographiques issus de cette recherche, comme support informationnel pour l'extraction du contour de toute une série de composantes des paysages – forêts, vergers, villages, villes, voies de communications et de transport et pour tout autre type de repérage spatial, y compris les missions de terrain.

Le choix des cartes topographiques au 1/100 000 éditions 1925 (trouvées dans les bibliothèques parisiennes en 1999) en qualité de type de données exogènes face aux données images satellitaires, s'explique, d'une part, par l'inédit du document lui-même et par le fait qu'en Roumanie, de ce que l'on sait, c'est un document cartographique inconnu, d'autant moins valorisé d'un sens à autre et, d'autre part, c'est un document cartographique qui offre à notre recherche une profondeur historique particulière et qui, auprès des éditions plus récentes, offre un support informationnel précieux pour notre analyse paysagère diachronique.

En télédétection, on considère plusieurs niveaux de mesures. Ainsi, en télédétection, les objets peuvent être caractérisés par deux résolutions seuils (Puech, 1995) : la résolution minimale quand le pixel est plus petit que l'objet observé. Au-dessous de cette résolution, on

³⁰ Il y a des préoccupations pour analyser l'emboîtement de deux ou de plusieurs échelles géographiques par l'analyse de la variance (Hagget, 1973). Elle s'applique à l'explication des différenciations spatiales d'une variable de nature quantitative à partir d'une ou de plusieurs variables explicatives qualitatives définies par l'appartenance à une unité spatiale de niveau supérieur. Cela signifie que l'on dégage les structures communes des unités spatiales correspondant au niveau le plus fin et qui se modifient progressivement au fur et à mesure que l'on passe à une échelle supérieure.

différencie les éléments constitutifs de l'objet, et non plus l'objet entier. Par contre, la résolution maximale est atteinte lorsque le pixel est plus grand que l'objet observé. Ce schéma explique comment des couverts forestiers qui apparaissent homogènes sur les données LANDSAT 5 TM deviennent hétérogènes sur des images SPOT, tout simplement parce que la taille de la fenêtre SPOT est la plus adéquate à l'identification d'un objet complexe. En télédétection, la qualité et la précision de l'information sont d'abord en fonction de la résolution spatiale. La notion de résolution spatiale est très importante car elle impose un niveau d'analyse pour l'élaboration des unités paysagères.

En télédétection, il est important de souligner le fait que l'information géographique traitée est observée à une échelle qui correspond à un certain niveau d'agrégation spatial. Le processus d'agrégation transforme l'information puisque celle-ci est analysée non plus suivant l'unité élémentaire d'observation, mais suivant une unité spatiale définissant le niveau d'agrégation géographique.

En effet, la nature des relations, leur intensité et leur sens varient en fonction de l'échelle à laquelle on se place, puisque « l'agrégation crée des associations spatiales entre des variables qui n'étaient pas, à l'origine, associées au niveau individuel et affectent de manière fondamentale les caractéristiques des données, et donc les résultats de l'étude géographique » (Openshaw, 1981).

L'analyse par niveaux d'agrégation a comme but de cerner la structuration de l'espace sous des formes différentes ; chaque échelle fournit un point de vue particulier sur cette structuration, ce qui doit permettre d'étudier les différenciations entre les unités spatiales constituant le niveau d'agrégation ; on analyse des passages entre deux niveaux d'agrégation afin d'établir la jonction entre ces différents points de vue, pour étudier l'effet dû à l'agrégation, c'est-à-dire la différenciation interne des unités spatiales constituant le niveau supérieur (application sur le thermique de la troisième partie).

En télédétection, il est souhaitable d'avoir la meilleure adéquation possible entre les dimensions des pixels et les dimensions des phénomènes étudiés, dans notre cas la diversité des paysages et leur dynamique. Le plus souvent, les pixels se situent entre deux niveaux d'organisation spatiale ou parfois il est nécessaire de descendre au dessous de la résolution du pixel pour faire une analyse des composantes du paysage plus détaillée et plus précise. Par ailleurs, la carte, qui représente une des applications les plus fréquentes de la télédétection, suppose une certaine conceptualisation des données ainsi qu'une taille minimale des unités autorisant leur représentation graphique. Habituellement, les dimensions des pixels des données de télédétection ne correspondent pas aux dimensions des plages cartographiques du document final.

Il existe plusieurs solutions pour recaler les niveaux d'observation satellitale avec les niveaux d'organisation : soit on agrège les pixels pour les faire correspondre à un niveau d'organisation supérieur et alors on effectue une démarche ascendante³¹, soit on ne classe pas les pixels isolés mais on tient compte de leur environnement, soit on re-décompose le pixel en ses éléments constitutifs et, dans ce cas, on est dans une démarche descendante³².

Dans cette partie on n'expose pas d'une manière exhaustive ces méthodes d'emboîtement d'échelles spécifiques à la télédétection : elles seront exposées dans la partie méthodologique et dans la partie des applications (troisième partie) mais seulement pour marquer l'existence de ces deux catégories (ascendante et descendante) de méthodes

³¹ Le modèle conceptuel des paysages impliqué dans la segmentation des images suppose que ceux-ci puissent être constitués d'une mosaïque d'objets homogènes, aux formes irrégulières, de dimensions supérieures à un pixel.

³² Il faut faire recours à de différentes méthodes statistiques : l'analyse de la texture et des variations des luminances autour de chacun des pixels ou des régressions multi-temporelles.

d'approche paysagère par la télédétection qui permettent une meilleure adéquation entre niveau d'organisation, niveau d'observation et exigence de précision.

En somme, nous disposons d'un ensemble de données multi-sources, multi-dates et multi-échelles à partir desquelles nous nous proposons d'analyser les paysages du Plateau de Falticeni au niveau régional et surtout au niveau local et de suivre leur dynamique.

6. Méthodes et démarches d'approche des paysages et de leur dynamique

6.1. Méthodes spécifiques à la télédétection

On connaît qu'en télédétection on travaille avec des images satellites : qui sont définies comme :

« Une image satellite est une image issue des données enregistrées par un capteur non photographique à bord d'un satellite », dans le dictionnaire de *Terminologie de télédétection et photogrammétrie* (1997).

La représentation numérique la plus utilisée pour les images est la représentation matricielle. A chaque pixel de l'image est associée une cellule de la matrice. Comme toute représentation informatique des valeurs numériques, le codage des pixels repose sur une représentation informatique des valeurs numériques, le codage des pixels repose sur une représentation binaire des nombres. Le bit (*binary digit*) est l'unité élémentaire d'information qui ne peut pas prendre que valeurs de 0 ou 1. La plupart des systèmes de traitement d'images sont capables aujourd'hui de gérer des images dans de différents codages (binaire, octet, entier, réel) et avec de différentes précisions (de 1 à 64 bits).

L'image satellitaires peut être aussi caractérisée comme un document global et non spécifique, sur lequel on trouve toutes les thématiques imbriquées les unes aux autres, à une date et à un moment donné.

A partir d'une image numérique qui se définit également comme l'expression d'un traitement des signaux correspondants à des valeurs énergétiques, il convient d'extraire les informations pertinentes de ces thématiques imbriquées, de les traiter, puis de les interpréter. La phase traitement est appelée *l'analyse d'images*. D'une manière générale, « l'analyse d'images est basée sur des concepts mathématiques qui permettent de décrire quantitativement des images de provenances diverses » (Coster et Chermant, 1989), dans notre cas des satellites et de l'avion.

Lorsqu'on désire analyser les images satellitaires de façon systématique, il est nécessaire de considérer trois notions fondamentales : *l'aspect spatial*, notion étroitement liée à la résolution du système d'enregistrement, ainsi qu'à l'échelle de l'image. Il faut remarquer que, grâce aux nombreuses possibilités de traitement de l'image, la notion d'échelle est devenue moins significative que celle de résolution. *L'aspect spectral* – dont l'enregistrement de données en dehors de notre expérience visuelle est particulièrement significatif. *L'aspect temporel* – est important pour les études de l'évolution des paysages qui se transforme de plus en plus rapidement et qui est tout à fait révélatrice de toute une évolution socio-historique pour notre étude de dynamique paysagère.

La qualité du document final (une carte ou tout autre type de représentation) ne dépend plus uniquement des conditions d'enregistrement déjà présentées, mais aussi du traitement des images. En tout cas, la quantité d'informations rendue disponible par les systèmes de télédétection actuels est impossible à traiter et à interpréter avec les méthodes classiques.

Le traitement des données d'images présente des aspects multiples. Il repose sur des méthodes mathématiques et des approches statistiques, assez connues mais qui n'ont pu se développer qu'avec les ordinateurs, en raison des calculs compliqués et très longs.

Avant de présenter les méthodes de traitement d'images, il faut souligner le fait que les méthodes d'interprétation d'images puissent être groupées de différentes manières. La plupart des auteurs font une distinction nette entre : l'interprétation visuelle des images et leur classification automatique. Le premier groupe utilise les données digitales et initiales de l'enregistrement. Le traitement des images et leur interprétation sont étroitement liés. Dans la deuxième catégorie on peut les désigner aussi par « reconnaissance des formes », où il faut interpréter « forme » dans un sens très large. En effet, il s'agit des signatures multi-spectrales, structurales, texturales et temporelles des images-satellites.

Selon les objectifs de notre approche sur la dynamique paysagère du Plateau de Falticeni à travers la télédétection – de détecter, identifier, analyser et quantifier la dynamique des structures spatiales correspondantes à différentes organisations spatiales caractéristiques aux différents laps de temps – on a commencé la partie méthodologique de l'analyse spatiale³³ de notre plateau avec les méthodes d'amélioration de la discrimination entre les différents types d'occupation du sol³⁴ et les différents types d'utilisation du territoire³⁵ (catégorie de méthodes qui

³³ Selon le *Dictionnaire de terminologie de télédétection et photogrammétrie* – recherche des caractéristiques remarquables dans une image et (ou) exploitation systématique d'une image contenant un thème donné.

³⁴ On comprend par *l'occupation du sol* l'affectation de l'étendue à des usages, des activités déterminées, à un moment donné. C'est l'équivalent anglais de *land cover*.

³⁵ Notion définie « plus dynamique d'une séquence d'opération dans le cadre d'un usage ou d'une production déterminée ». C'est l'équivalent anglais de *land user*. L'occupation du territoire peut être également vue comme un processus de prise de

peut être assemblée dans les méthodes analogiques, connues aussi sous le nom de « méthodes de visu-interprétation » (M. Hotyat, 1991) pour continuer avec les méthodes de reconnaissance spectrales et les formes de l'occupation du sol pour finir les méthodes d'analyse et de quantification des changements des mêmes structures spatiales entre la période communiste et celle post-communiste.

Dans cette partie on se propose de présenter les méthodes d'exploitation des données images satellitales d'une manière générale, en soulignant seulement les principes généraux de ces méthodes et en précisant à la fois notre choix méthodologique. Les méthodes déployées seront directement appliquées dans la troisième partie.

6.1.1. Méthodes d'amélioration de la discrimination entre les types d'occupation du sol

Afin de répondre à une exigence que l'on considère prioritaire et qui a été d'ailleurs formulée clairement : « Un paysage a du sens parce qu'il est lisible. » (Soubeyran, 1984), on a consacré cette première partie de l'exposé de notre méthodologie à la présentation des possibilités techniques d'amélioration des qualités des images afin de les rendre aussi lisibles que possible.

Les méthodes d'interprétation visuelle sont basées sur des méthodes d'interprétation des photographies aériennes traditionnelles et sont connues aussi sous le nom de démarches analogiques. Un de leurs plus importants avantages est la possibilité d'une approche holistique et hiérarchique. Ces méthodes permettent, « par une différenciation graduelle de l'image, d'élaborer une classification rapide des terres, hiérarchique et très complète. » (Lillesand et Kiefer, 1979).

possession, qu'il s'agisse d'un espace vierge, ou dont les occupants éliminent ou asservient (Dictionnaire critique, 1993).

La démarche analogique consiste en une lecture directe des informations images après l'amélioration de leur qualité pour en faciliter leur lisibilité. Cette analyse visuelle peut se faire soit sur des canaux bruts, soit sur des combinaisons de deux ou plusieurs canaux (notamment sur des compositions colorées, sur des néo-canaux, sur des axes factoriels d'une analyse en composantes principales etc.) ou sur des clichés aériens. On a utilisé, dans notre approche, des compositions colorées en réflectance en qualité de support visuel et informationnel pour la lecture, l'analyse et l'interprétation de la dynamique des paysages du Plateau de Falticeni sur laquelle on a « découpé » les principales unités paysagères du plateau au 2 juin 1997, reconnues préalablement (troisième partie sur la typologie classique des paysages).

On définit la composition colorée comme une image trichrome qui résulte de l'affectation d'une couleur primaire (bleu, vert, rouge) à chacun des canaux d'une même scène pour obtenir une information synthétique contenue dans l'ensemble des trois canaux considérés.

Dans le cas du satellite LANDSAT 5 TM, la possibilité de disposer de sept bandes spectrales allant du visible jusqu'à l'infrarouge thermique permet un nombre très important de combinaisons (sauf l'infrarouge thermique) ainsi qu'une mise en évidence de thèmes très différents. On a proposé comme combinaison d'images une combinaison diachronique, avec des images corrigées radiométriquement afin d'obtenir une première différenciation de l'occupation des sols à ces deux dates différentes. Des couleurs différentes apparaîtront (fig. 22 et fig. 23) aux endroits des changements qui sont survenus pour l'une ou l'autre des dates considérées : on observe des changements impressionnants tout de suite au niveau de l'organisation du paysage agricole, on peut dire même un bouleversement total du parcellaire agricole après la chute du communisme. Il s'agit des compositions colorées diachroniques qui

s'avèrent très pertinentes pour une première partition du territoire du plateau en unités paysagères.

Afin de mettre en évidence, d'une part certains thèmes, phénomènes (fig. 24), et de l'autre part les changements concernant l'occupation du sol aux laps de temps pris en considération, il s'impose un choix des canaux, les plus pertinents pour notre thématique d'étude diachronique de l'occupation des sols. On a retenu comme combinaison des canaux pour les deux images : le canal 2 en bleu (dynamique de l'image min. 6 et max. 19), le canal 4 en vert (min 12, max. 32) et le canal 7 en rouge (min 12, max. 24).

On justifie ce choix des canaux en fonction du comportement spectral des principales composantes du paysage – eau, végétation, minéral sur les longueurs d'ondes mentionnées, sachant que ces compositions colorées en réflectance s'inscrivent dans une analyse diachronique des « classes stables » des paysages, justement ces composantes principales du paysage du plateau à travers des signatures spectrales par « objets » (troisième partie).

En ce qui concerne l'eau, sa réflectance plus forte dans le visible que dans l'infrarouge conduit à utiliser préférentiellement le canal 2 lorsque l'on souhaite mettre en évidence des différences de profondeur, de turbidité. Au contraire, pour l'étude des couverts végétaux, on pourra utiliser le canal 4, et le 7 parce qu'en effet l'infrarouge moyen réflectif apporte une information intéressante sur les teneurs en eau des couverts végétaux, complémentaire aux celles apportées par le visible et le proche infrarouge.

Il est donc possible de mettre certains thèmes ou phénomènes plus ou moins en évidence en utilisant d'une part les différences de comportements spectraux des objets dans les diverses bandes spectrales et d'autre part les différences de sensibilité de l'œil aux couleurs et aux contrastes colorés (fig.23). Le tableau y ajouté rassemble les effets

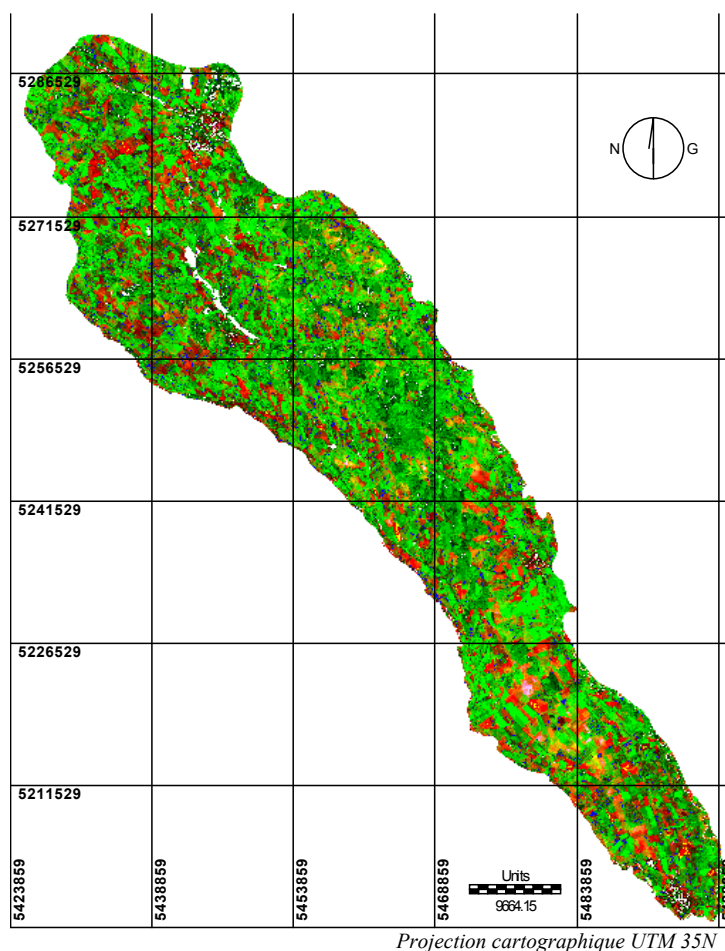
visuels et les possibilités de différenciations entre les divers thèmes (fig.23).

L'interprétation visuelle est une forme d'analyse de l'organisation des objets dans un espace à deux dimensions. Il s'agit de définir des ensembles d'objets géographiques dont l'organisation spatiale est spécifique et définit des motifs. L'organisation spatiale peut être appréhendée visuellement par des aspects plus ou moins bien définis, dénommés *variables visuelles* – couleur (teint), taille, forme, structure et/ou texture, agencement des objets, contexte et/ou voisinage, continuité et/ou discontinuité – ou par des lois chorologiques qui désignent « l'étude des liens qui existent entre la caractérisation des unités sémantiques retenues (facteurs intrinsèques) et leur distribution dans le paysage à trois dimensions (facteurs extrinsèques).

En conclusion, les données satellitales constituent une information objective, sous forme digitale, facile à actualiser. L'interprétation des images peut se réaliser visuellement à partir des compositions colorées, à l'aide des cartes topographiques, des photographies aériennes et des données de terrain.

**Type d'occupation du sol du Plateau de Falticeni au 18 août 1989
détecté à partir d'une composition colorée en réflectance**

Bleu – canal 2 (min 6, max 19), Vert – canal 4 PIR (min 12, max 32), Rouge –
canal 7 MIR (min 12, max 24)



Simona NICULESCU, 2000

Figure 22.

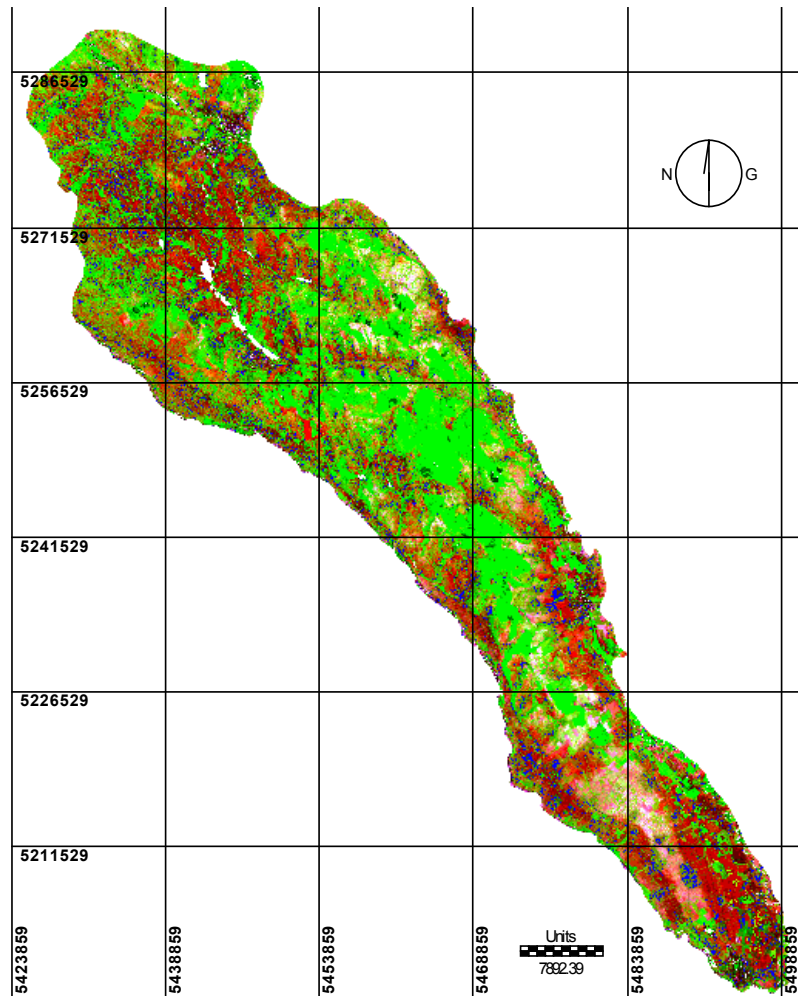
Commentaire

Comme intérêt de cette composition colorée en réflectance, on notera :

- mise en valeur des principaux types d'occupation pendant le régime communiste ;
- élaboration d'un bon support visuel qui exprime la puissance suggestive de l'image – la Roumanie pendant le régime communiste ;
- élaboration d'un bon support informationnel pour d'autres traitements ultérieurs, tels que l'étude des "familles" de signatures spectrales par objet.

**Type d'occupation du sol du Plateau de Falticeni au 2 juin 1997 détecté à partir
d'une composition colorée en réflectance**

Bleu – canal 2 (min 4, max 51), Vert – canal 4 (min 12, max 32), Rouge
– canal 7 (min 12, max 24)



Projection cartographique UTM 35N

Commentaire

Comme intérêt de cette composition colorée en réflectance, on notera :

- mise en valeur des principaux types d'occupation du sol pendant le régime post-communiste ;
- élaboration d'un bon support visuel qui exprime la puissance suggestive de l'image – la Roumanie pendant le régime post-communiste ;
- élaboration d'un bon support informationnel pour d'autres traitements ultérieurs, tels que l'étude des "familles" de signatures spectrales par objet.

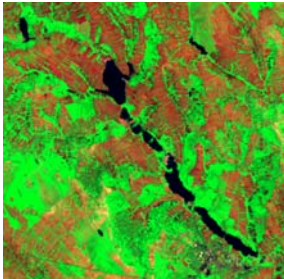
Simona NICULESCU, 2000

Figure 23.

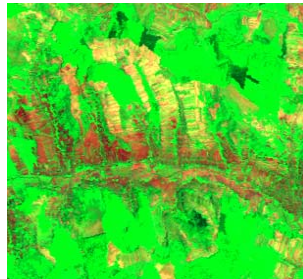
Exemple d'analyse visuelle des compositions colorées en réflectance

Echantillons du Plateau de Falticeni

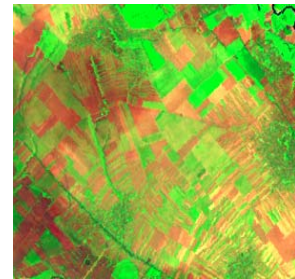
Le 2 juin 1997



Les lacs de Pocoleni



Vallée du Somuzul Mare



*alentours du village de
Halauceti*

Couleurs/canaux			Caractéristiques des grands thèmes d'occupation du sol		
Bleu	Vert	Rouge	Eau	Végétaux	Sols nus Bâti
2	4	7	noir à bleu (pour une turbidité faible à forte)	- chlorophylliens : vert claire à vert sombre selon la nature du couvert - peu chlorophylliens : rose à rouge pâle	mauve

Commentaire

Bonne séparation de l'eau vis-à-vis des autres thèmes, des différences dans l'eau, bonne séparation entre végétaux et sols nus, des différences à l'intérieur de chacun de ces thèmes. Des confusions entre certains sols nus et bâtis.

Simona NICULESCU, 2000

Figure 24.

En restant toujours dans le domaine de l'amélioration de la qualité de l'image et de la discrimination des différents types d'occupation du sol, on a proposé dans nos chaînes logiques d'étude paysagère des traitements d'image incluant *la transformée de Hotelling* ou l'analyse en composantes principales (adaptation de la transformée de Karhunen – Loève pour des valeurs discrètes) qui est une transformation orthogonale.

En général, il y a le plus souvent une corrélation importante entre les différentes composantes images. La transformée de Hotelling vise justement à réduire au minimum la corrélation entre les canaux de sortie en opérant une rotation des axes dans l'espace à M dimensions (Bonn et Rochon, 1992). Les nouveaux axes, ou les composantes principales, sont définis par les vecteurs propres aux composantes image d'entrée (fig. 25).

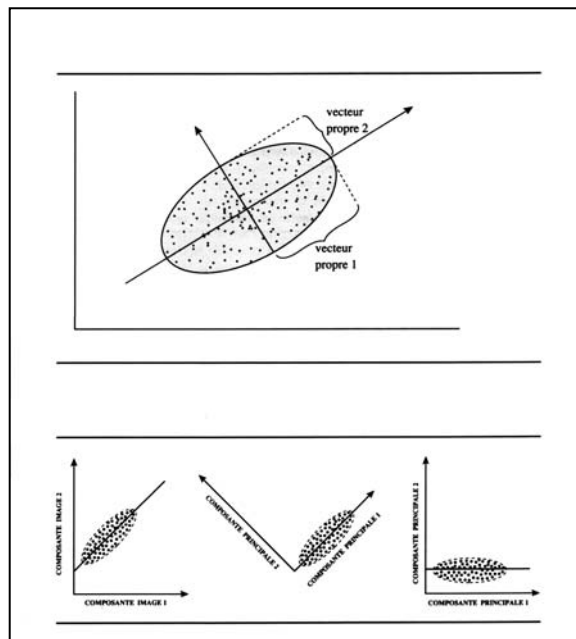


Figure 25 : En haut : Ellipsoïde de distribution des données dans un espace à deux dimensions. En bas : Rotation d'axes suivant les vecteurs propres aux composantes principales

La première composante principale (ACP 1) correspond à la plus grande dispersion du nuage. Elle contient le maximum de variance des données d'entrée et donc plus d'informations que les canaux bruts (80.90 %). Le deuxième axe factoriel et les suivants (ACP 2, ACP 3,...), construits de manière orthogonale entre eux, prennent en compte le maximum des informations résiduelles successivement. En général, l'essentiel des informations est concentré dans les deux premiers axes. L'axe 1 correspond approximativement à la brillance globale de l'image, l'axe 2 aux différences spectrales majeures entre les canaux d'entrée, et le troisième axe rassemble l'information résiduelle ou le bruit. Cette dernière composante met en valeur les différences entre les deux canaux du visible, le canal infrarouge n'y jouant presque aucun rôle. Elle permet donc de détecter les lignages de l'image (ou le bruit).

Si l'on garde le seul axe ACP 1 pour représenter l'image, on garde presque deux tiers de l'information contenue dans l'image entière. Si l'on garde les deux premiers axes ACP 1 et ACP 2, on conserve presque toute l'information. Pour ACP 2 on peut ajouter que cette deuxième composante met en valeur l'opposition entre le visible et l'infrarouge. C'est donc sur ce canal que l'on détectera le mieux les divers types de végétation.

On a effectué une ACP sur les six canaux d'une image LANDSAT TM 5 du 2 juin 1997³⁶ et sur une autre image du 18 août 1989 : visible, proche infrarouge et moyen infrarouge réflectif ; les résultats sont de type suivant.

³⁶ On trouve des corrélations très fortes entre les trois bandes du visible. Les corrélations entre le proche infrarouge et le visible sont très faibles. Les corrélations entre les bandes 5 et 7 du moyen infrarouge sont fortes ; ceux deux canaux présentent des corrélations assez fortes avec les bandes du visible, mais les corrélations sont faibles avec la bande du proche infrarouge de TM 4. Enfin, la bande TM 6 de l'infrarouge thermique a un comportement spécifique. Il faut faire attention à ce canal puisque sa résolution spatiale n'est pas la même que pour les autres canaux (120 m x 120 m).

Ce que l'on a retenu pour notre recherche a été le premier axe. L'image qui en résulte est en noir et blanc, et permet une étendue de la répartition géographique des divers objets, structures spatiales qu'il faut reconnaître. La dynamique du signal de chaque axe de l'ACP est fort différente de celle des canaux de l'image satellitale.

Dans notre approche on a « valorisé » ce calcul sur nos images pour structurer et concentrer l'information et pour raisonner plutôt en termes de surface en se rapprochant ainsi mieux de nos structures spatiales de la réalité géographique, de terrain. On a intégré des axes factoriels d'ACP en diverses chaînes de traitement d'images, tout comme pour l'analyse de la disposition spatiale du parcellaire par opérateurs mathématiques (troisième partie, partie intégrante de l'étude diachronique de la morphologie agraire à l'échelle de micro-paysages.

Une autre catégorie de méthodes d'amélioration de la description de l'occupation du sol réside dans la *création des néo-canaux ou des indices*. Dans notre approche paysagère on a travaillé sur des indices de végétation et de brillance. Les indices ont été établis à partir des travaux portant sur les réflectances. Les images obtenues à partir de ces calculs sont transformées. Il n'y a plus de radiométrie. On utilise ce calcul pour mieux faire ressortir les structures spatiales végétales et leur distribution spatiale.

Les différents indices de végétation³⁷ normalisée, brute ou intégrée temporellement sont basés, le plus souvent, sur un calcul arithmétique de la bande du proche infrarouge (PIR) et du rouge (R). Plus les valeurs sont grandes, plus la végétation présente une forte activité chlorophyllienne. Dans nos applications on a calculé l'indice de végétation normalisé (NDVI³⁸) qui s'obtient à partir des mêmes données

³⁷ Actuellement, il y a une quarantaine d'indices de végétation qui ont été mis au point (Bannari, 1995 ; Bariou, 1985).

³⁸ Le *Normalized Difference Vegetation Index* mis au point en 1974 par Rouse et al. est l'indice de végétation le plus rencontré dans les applications de télédétection.

PIR et R : $(PIR - R)/(PIR + R)$. On note que son utilisation doit tenir compte du taux de recouvrement du couvert vert (à part une certaine densité de végétation, toutes les valeurs de NDVI sont identiques (Holben, 1986). Pour notre territoire d'étude le NDVI a eu des résultats significatifs en insérant les images obtenues dans deux chaînes logiques : la première portant sur l'applications des différents filtres de convolution (Laplacien, etc., cf. troisième partie) afin d'analyser la variabilité de la géométrie du parcellaire en faisant partie de l'étude diachronique de la morphologie agraire à l'échelle de micro-paysages ; et la deuxième portant sur des classifications par seuillage de l'histogramme³⁹ en ressortissant trois catégories de structures spatiales végétales.

Un autre indice que l'on a calculé est l'indice de brillance. Certains auteurs ont défini un indice de brillance comme la racine carrée de la somme des carrés de deux canaux : PIR et R. $IB = \text{racine carrée } PIR^2 + R^2$. Cela revient à calculer une valeur équivalente à l'albédo. Il donne une image qui n'est pas très éloignée d'une image en panchromatique et sur laquelle on n'a plus de radiométrie. L'indice de brillance peut apporter une information synthétique sur l'état de la surface des sols et surtout sur la clarté de leur couleur (Escadafal, 1989).

Quant à nos applications, l'image issue du calcul de cet indice a été intégrée dans des traitements par filtrage afin de ressortir certaines structures agraires circulaires du régime communiste (application troisième partie) : construire des indices mettant en valeur tel ou tel thème (par radiométrie ou par diachronie) ; améliorer la représentation de l'information, ou la réduire.

³⁹ Analyser le contenu d'un histogramme consiste à définir une classe sur l'histogramme, à lui affecter une couleur donnée, puis à représenter sur l'image, par cette même couleur, tous les pixels qui appartiennent à cette classe de l'histogramme. On peut alors analyser la distribution et l'organisation spatiale de tous les pixels qui ont les mêmes valeurs de compte numérique sur l'image étudiée.

6.1.2. Méthodes de reconnaissances spectrales des structures spatiales, de l'occupation du sol

Classifications spectrales

Avec cette catégorie de méthodes on passe à un autre type d'analyse d'images - aux méthodes numériques, plus compliquées et plus lourdes que la première catégorie. On énonce parmi ces méthodes les classifications, les reconnaissances des formes, les structures spatiales, les analyses texturales et fractales, etc.

En commençant avec les classifications, on remarque deux catégories de classifications : les méthodes de classification non-assistées ou non-supervisées sont celles pour lesquelles on recherche une partition des données en fonction de leur propre structure. L'interprète ne donne pas des informations *a priori* sur les objets qu'il veut définir. Il intervient cependant en choisissant, par exemple, un nombre de groupe, de seuil, etc. Toutes ces deux méthodes des traitements portent à la fois sur la radiométrie et sur le spatial.

Les méthodes de classification assistées sont celles pour lesquelles on recherche des objets semblables à des objets de référence. Ceux-ci peuvent être repérés géographiquement sur une image (noyaux, zones de référence). Ces méthodes sont aussi dénommées supervisées.

Pour le suivi de la dynamique des paysages du Plateau de Falticeni par des classifications spectrales on a choisi les classifications non-supervisées, car pour la date de l'image du régime communiste (1989) il y a eu un décalage important entre le moment d'enregistrement et le moment de l'acquisition de l'image (on a eu l'image après presque dix ans) et la collecte des informations du terrain.

Ce type de classification –non supervisée par nuées dynamiques⁴⁰ - est basé sur des mesures de distance ou sur un choix a priori d'un nombre de groupes ou « noyaux » (fig. 26). Parce que l'on a travaillé sur des images Landsat, donc plusieurs bandes spectrales sont disponibles, il faut généralement sélectionner les canaux ayant une forte dynamique pour les objets que l'on veut détecter et retenir ceux qui sont peu corrélés entre eux de façon à disposer d'un maximum d'informations. On calcule la matrice de corrélation entre les canaux avant d'entreprendre une classification (annexes).

Les méthodes de classifications statistiques utilisées pour le traitement des images reposent en grande mesure sur les notions de probabilité et de distance mathématique. Plus la probabilité qu'un pixel soit réuni à un groupe est forte, mieux le pixel sera classé si l'on l'inclut dans ce groupe. Plus la distance entre un pixel et un groupe est grande, moins le pixel sera classé dans ce groupe. La distance mathématique se calcule dans un espace multivariable : multicanal et/ou multidate. La distance euclidienne est plus grande entre deux pixels qui ont une seule grande différence sur un canal que pour deux pixels qui ont de petites différences sur plusieurs canaux.

Pour chacun d'entre eux, on tire au hasard⁴¹ un certain nombre de pixels qui permettent de définir statistiquement le centre de gravité radiométrique de chaque noyau. Ensuite, on calcule pour chaque pixel de l'image sa distance à chacun des noyaux⁴². Chaque pixel est affecté au noyau le plus proche de lui au sens de la distance euclidienne. On obtient de la sorte une segmentation en autant de groupes qu'il y a des

⁴⁰ Méthode des nuées dynamiques séquentielles sur des variables quantitatives.

⁴¹ Echantillonnage aléatoire par maille.

⁴² L'algorithme utilise comme « noyaux » des centres de gravité, et comme critère l'inertie des inter-classes pour la distance usuelle (euclidienne).

noyaux⁴³. Mais, si tous les pixels sont classés, ils ne sont pas forcément bien classés.

On fait alors plusieurs itérations. Après la première itération, on calcule pour chaque noyau à partir de tous les pixels qui y sont classés, ce qui permet de définir un nouveau noyau. Si les noyaux de la première itération ont rassemblé des pixels assez éloignés du centre du gravité d'un noyau, le nouveau centre de gravité sera assez différent. Il « bouge » pour la deuxième itération, d'où le terme générique de méthode de « centres mobiles » ou « nuées dynamiques » mises au point par Diday.

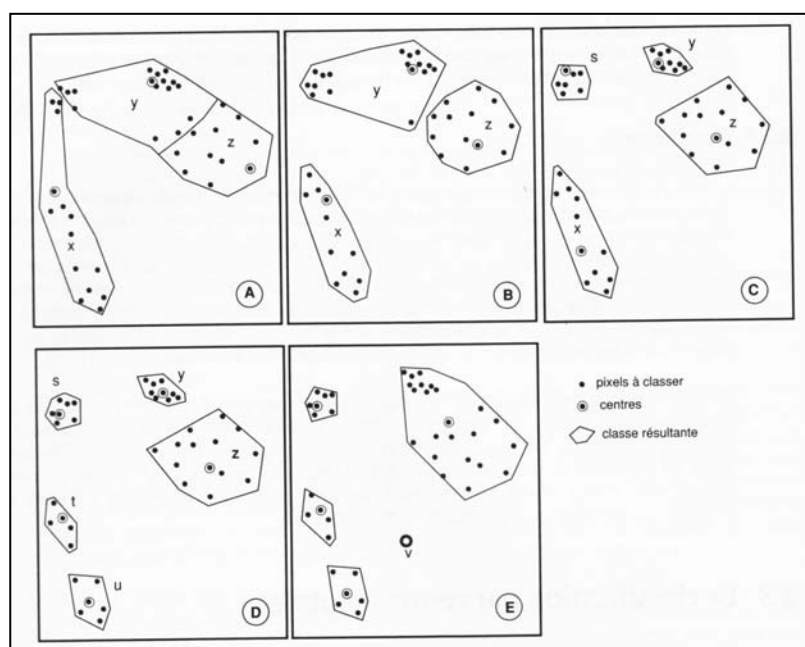


Figure 26 : Schéma des classifications de type centre mobiles. Sur chacune des 5 itérations sont représentés : les pixels à classer, les centres des noyaux, les résultats obtenus à l'issue de l'itération

⁴³ En effet, l'algorithme procède alternativement à une « affectation » de manière que chaque pixel soit affecté à la classe dont le noyau est le plus proche ainsi qu'à la « représentation » de manière qu'à chaque classe soit associé son noyau (ici son centre de gravité) qui la représente.

Les distances vont permettre d'exprimer d'une façon simple le principe sur lequel reposent les classifications : une classification est un regroupement des pixels d'une région de telle sorte qu'à l'intérieur d'un groupe les pixels soient le plus proches possible les uns des autres et que les pixels des groupes différents soient le plus éloignés que possible les uns des autres.

Cette étape de calcul en laboratoire doit être impérativement suivie de l'étape de la validation des résultats au terrain, ce qui permet de lier la position géographique des objets à leur comportement spectral sur l'image. Cette phase constitue le fondement théorique pour les classifications supervisées qui seront faites ultérieurement. Pour celles non-supervisées, elle va permettre de définir les lois chorologiques. Autrement dit, on passe de la réalité radiométrique à celle thématique et vice-versa.

Ce type de classifications apporte une vision objective du terrain à travers les calculs sur la radiométrie de l'image, et elles se prêtent bien aux estimations des superficies des principales cultures du Plateau de Falticeni en fournissant une première stratification automatique.

La chorologie (du grec *khoro*s, la contrée, le canton et *logos* le discours, la science) est « l'étude des liens qui existent entre la caractérisation des unités sémantiques (thématiques) retenues (facteurs intrinsèques) et leur distribution dans le paysage à trois dimensions (facteurs extrinsèques)» (Brunet, 1993).

Segmentation d'images

Cette méthode est assimilée aux méthodes descendantes et ascendantes. Les méthodes descendantes consistent à choisir des critères géographiques et radiométriques, pour découper l'ensemble des images en diverses parties. Puis, on itère ce découpage pour chacune des parties précédentes avec de nouveaux critères qui ne sont pas forcément semblables aux précédents. Ces méthodes correspondent

assez souvent à l'interprétation visuelle, de nature synthétique, qui se base sur une analyse structurale.

Les méthodes ascendantes consistent à agréger ensemble des pixels qui présentent des caractéristiques prédéfinies. Ces dernières peuvent faire référence à la radiométrie, à leur position géographique relative ou à la température radiative des objets au sol.

Nos applications dans ce sens portent sur la méthode d'agrégation spatiale sur le thermique, afin de trouver une échelle adaptée à l'étude des paysages, et sur la méthode de désagrégation spatiale sur un indice de brillance afin de trouver toujours l'échelle adaptée pour la représentation d'un certain parcellaire, comme celui des céréales. Dans les deux cas de figure, on a calculé dans un sens ou autre les moyennes et les variances pour chaque voisinage : 5x5 dans le premier cas et 7x7 dans le deuxième cas et on finit par affecter au pixel courant la valeur moyenne du voisinage ayant la plus petite variance (troisième partie).

6.1.3. Méthodes de reconnaissance des formes des structures spatiales, de l'occupation du sol

Le filtrage numérique des images

Le filtre, au sens électronique du terme, est un dispositif destiné à favoriser ou à entraver le passage de certaines composantes de fréquence, d'un signal électrique (Larousse, 1998).

D'une manière générale, dans les méthodes statistiques, l'accent est placé sur l'extraction des « paramètres » et dans une petite mesure sur la transformation d'une image en une autre image, comme dans le traitement du signal. En télédétection, on peut extraire ces valeurs numériques au niveau du pixel.

« Le traitement de signal⁴⁴ est fondé sur l'usage des opérateurs linéaires, et se diversifie en rameaux tout comme le filtrage linéaire ou la convolution, l'optimisation de formes, la transformation de Fourier, etc. » (Coquerez et Philipp, 1995).

Mathématiquement, le signal est représenté par une fonction d'une ou de plusieurs variables. Selon la nature de ces variables, on distingue un « signal analogique » pour les variables continues et un « signal discret » ou échantillonné pour les variables discrètes. En outre, l'amplitude du signal (niveau de gris pour une image) peut également être continue ou discrète. « Une image digitale est donc représentée par une zone discrète et finie, d'amplitude discrète. » (Haralick et Shapiro, 1991).

Le filtrage numérique des images regroupe un ensemble de méthodes, traitant le signal de l'image⁴⁵. Le champ d'application de ces méthodes, dans le domaine de l'analyse des images est vaste : les pré-traitements (réduction de bruit), la détection et l'extraction des éléments d'une image (détection des contours), l'analyse (analyse morphologique), les post-traitements. On distingue classiquement deux grandes catégories de filtres : filtrage linéaire et filtrage non-linéaire et on cite encore le filtrage morphologique et le filtrage adaptatif.

Le filtrage linéaire est produit de convolution par une fonction de voisinage⁴⁶. Il faut mentionner que la nature du filtrage dépend de la fonction de voisinage. Le filtrage linéaire peut être représenté par des filtres passe-bas⁴⁷ ou des filtres passe-haut. Ce que l'on a appliqué dans

⁴⁴ Un signal « s » est le support physique d'une information (Kunt, 1981).

⁴⁵ Quand l'image est considérée comme un signal bidimensionnel, on utilise les méthodes et les techniques du traitement du signal pour les analyser.

⁴⁶ Le voisinage ne se limite pas nécessairement aux premiers voisins d'un point, mais il peut s'étendre au second, voire au troisième voisin.

⁴⁷ Consiste à remplacer la valeur de chaque point par la moyenne effectuée entre ses premiers voisins.

notre recherche c'est un filtre passe-haut⁴⁸ qui nous a permis de mettre en évidence des contours entre les plages de niveaux de gris différents. On a opéré par la mise en place d'un *rehaussement d'image* (un Laplacien avec la valeur 1 ou 2 au centre) afin d'extraire le réseau de la morphologie agraire pour les deux périodes historiques « couvertes » par des images satellitales multi-résolution – la période communiste et post-communiste (troisième partie).

Morphologie mathématique

Le principe de base de la morphologie mathématique est de comparer les objets que l'on veut analyser à un autre objet de forme connue, appelé « élément structurant » (Coster et Chermant, 1989). A l'aide de la morphologie mathématique, on transforme l'image initiale en utilisant des opérations ensemblistes. De ces opérations⁴⁹ on utilise d'habitude les opérations ensemblistes de *transformation en tout et en rien*⁵⁰ qui travaillent avec un élément structurant (dans nos applications

⁴⁸ L'étendue spatiale du voisinage est généralement donnée par le côté de la fenêtre de traitement, en nombre de pixels. Le plus souvent il s'agit d'une fenêtre de taille impaire. Les temps de traitement augmentent de façon importante avec la taille de la fenêtre.

⁴⁹ On signale qu'il y a encore une catégorie de transformation dénommée *transformations classiques*.

⁵⁰ « Considérons un objet bi- ou tridimensionnel et appelons X l'ensemble des points de l'espace constituant cet objet. La structure de X est donnée par l'ensemble de toutes ces relations entre ces différents points. Les transformations en tout ou rien forment un moyen systémique pour étudier ces relations. » (Coster et Chermant, 1989). En effet, ces transformations ne donnent pas de paramètres caractérisant la structure de X, mais un nouvel ensemble. L'information structurale n'est pas donnée par la mesure, mais par la transformation de l'image.

on a utilisé comme élément structurant un disque⁵¹ qui nous a donné une information relative à sa géométrie et à sa topologie⁵²).

Les opérations classiques des transformations ensemblistes sont : l'union ($X \cup Y$), l'intersection ($X \cap Y$), la complémentation $(X^c)_Z = X^c \cap Z$ (en supposant qu'un ensemble X est intersecté par un masque Z , la différence symétrique X/Y qui est reliée aux transformations précédentes par la relation : $X/Y = X \cup Y - X \cap Y$).

Sur nos images LANDSAT on a effectué des calculs par des opérateurs morphologiques, à l'aide des éléments structurants de l'alphabet de GOLAY (Golay L), en exécutant un épaississement associé à une convergence. L'objectif de ce traitement a été de mieux ressortir les éléments linaires du paysage et donc de mettre en évidence la forme, la géométrie des structures spatiales agraires spécifiques aux périodes historiques prises en compte (cf. les chaînes méthodologiques).

6.2. Démarches opérationnelles et alternatives mises en œuvre

6.2.1. Démarches spatiales

Les méthodes présentées, soit analogiques ou numériques, soit ascendantes ou descendantes, s'inscrivent d'une manière tout à fait théorique et générale en plusieurs types de démarches opérationnelles

⁵¹ Le cercle qui est l'élément structurant le plus convexe et le plus isotrope sert plus particulièrement à la détermination de la taille des objets (granulométrie, mesure de distance, ...).

⁵² On comprend par dimension topologique la dimension au sens intuitif, pas très éloignée de la description intuitive proposée par H. Poincaré : « un point ne pouvant pas être divisé aura une dimension 0, ce point peut diviser une ligne continue à laquelle on attribuera la dimension 1, cette ligne peut diviser une surface continue qui sera en dimension 2, etc.). C'est à partir de cette notion intuitive que d'autres mathématiciens ont construit une définition exacte de la dimension topologique (Menger, 1943).

. Tout d'abord, la *démarche spatiale* a comme but central l'analyse spatiale qui dérive de la nature même des données images satellitaires. Cette vision d'approche correspond dans la théorie des paysages à ce que G. Rougerie (1969, 1985) appelait « paysages vus du dessus ».

L'objectif de l'analyse spatiale est de décrire une disposition particulière de certains objets ainsi que leur *organisation spatiale*, repérer des structures, expliquer une localisation par rapport à d'autres. « Le but de l'analyse spatiale est de déceler en quoi la localisation apporte un élément utile à la connaissance des objets étudiés et peut en expliquer les caractéristiques, en totalité ou en partie. » (Pumain et Saint-Julien, 1997). On a étudié la localisation dans notre approche comme un facteur qui peut expliquer une situation générale ou, au moins, qui peut contribuer à l'explication d'un état des choses d'un certain moment historique. Par exemple, pourquoi les cultures de betterave dans notre plateau étaient-elles plus étendues en tant que superficies pendant le communisme qu'après 1989, etc.

Les méthodes analogiques font partie des *démarches déductives*, si l'on pense qu'une image ne représente qu'un mélange, une imbrication de thématiques à un certain moment. L'interprétation de l'image doit être fortement déductive. Ensuite, il y a les démarches statistiques et analytiques avec tout leur cortège de méthodes tellement employées en télédétection - les méthodes numériques.

6.2.2. Démarche sémantique

La *démarche sémantique* est d'une importance tout à fait particulière et spécifique à la télédétection parce qu'elle va de part avec les classifications supervisées ou non-supervisées. Au niveau de la problématique sémantique interviennent trois aspects : le contenu sémantique ou les composantes sémantiques (définies comme des attributs des unités spatiales), autrement dit l'établissement de la

typologie et implicitement de la nomenclature, la qualité de la sémantique établie, y compris les modalités de validation de cette qualité ainsi que l'évaluation géographique de la classification.

L'établissement de la typologie est une phase qui doit être commencée avant d'entreprendre la classification. Une première difficulté apparaît lorsque les thèmes qui doivent être cartographiés ne correspondent pas à des comportements physiques ou à des caractéristiques spectrales identifiables. Par exemple, la discrimination uniquement spectrale entre des prairies de fauche et des pâturages n'est pas possible parce qu'il ne s'agit pas seulement de différencier des objets, mais aussi de différencier leur utilisation. Dans ce cas, c'est la réalité de terrain qui impose la typologie. La question la plus importante est de mettre en corrélation la situation radiométrique obtenue sur des logiciels avec les observations de terrain, quand il est possible. Dans notre cas, surtout pour l'image d'avant la chute du communisme, la typologie a été établie en s'appuyant sur de cartes topographiques (1/50 000, 1974) notamment pour les prairies de fauche et pour les pâturages, ensuite pour la typologie des cultures nous nous sommes appuyés sur les résultats des enquêtes sociales auprès de la population locale (exemple d'enquête socio-économique des annexes) et pour une partie du plateau (le nord) sur l'expérience de certains spécialistes agronomes. On signale qu'il n'y a pas de couverture cadastrale d'une manière systématique et cohérente pour notre territoire, ni à cette époque-là, ni pendant la période actuelle.

Pour l'autre date (LANDSAT du 2 juin 1997) on a effectué la mission de terrain en bons termes, dans le sens que « ...la télédétection génère une nomenclature pour chaque date d'acquisition⁵³ » (Gilg et

⁵³ Un même thème peut être séparé en différentes classes, ou à l'inverse, plusieurs thèmes peuvent être regroupés dans la même classe, en fonction du rayonnement électromagnétique qu'enregistre le satellite. Ce rayonnement dépend de la combinaison du moment entre les différents objets et leur environnement.

Fournier, 1985). De ce fait, l'enquête de terrain présentée dans la partie des sondages spatiaux a été effectuée simultanément à la date de prise de vue.

Techniquement, le nombre de classes dans une classification non-dirigée doit toujours être supérieur au nombre de thèmes que l'on veut réellement mettre en évidence et individualiser. Ensuite, on procède à des regroupements plus significatifs. Finalement, c'est le thématicien qui fixe le nombre de classes en fonction du niveau du détail désiré, de l'objectif de l'étude, etc.

Notre nomenclature (celle issue des enquêtes de terrain) est une nomenclature physique⁵⁴ de l'occupation du sol avec quelques notions du fonctionnel pour le non-agricole (cf. la nomenclature de Ter-uti⁵⁵). Elle couvre tous les types d'occupation du sol et elle serait peut-être à affiner au niveau « milieu naturel » la poste « forêt » étant susceptible de regrouper toutes les zones de végétation spontanée arbustive, le poste « pâturages naturels », regroupant les landes et les friches. Il existe 75 postes de nomenclature (plus le « -1 » et le « -2 » en relation avec les enquêtes pour l'estimation de superficies et rendements) dont 41 concernant les terres labourables sur les 61 postes agricoles.

Sur nos fiches d'enquête le « -1 » s'intéresse des cultures non identifiées (enquêtes estimation superficies), le « -2 » est relatif au parcellaire non cartographiable au 1/10 000 : il s'agit des parcelles découpées en lanières, cultivées ou non par le même exploitant agricole, ne faisant que quelques mètres de largeur (cf. application des sondages

⁵⁴ L'observation physique détermine l'occupation du sol sur la portion de territoire enquêtée, tandis que l'observation fonctionnelle renseigne sur l'utilisation du sol. Ces deux nomenclatures sont subdivisées en niveaux et sous-niveaux.

⁵⁵ C'est une nomenclature emboîtée pour les enquêtes d'utilisation du territoire, utilisée par le Service des Enquêtes et des Etudes Statistiques (SCEES) du ministère de l'agriculture (en France).

spatiaux sur le Plateau de Falticeni). L'observation de ces parcelles a été faite de façon particulière (en détail).

Il nous semble important d'ébaucher le cadre européen et le cadre conjoncturel dans lequel cette nomenclature a pu être établie en Roumanie et dans d'autres pays de l'Europe Centrale et de l'Est. L'Union européenne a lancé plusieurs opérations d'établissement de nomenclature. Le 27 juin 1985, l'Union européenne a adopté le programme *CORINE* (coordination de l'information sur l'environnement), placé sous la responsabilité de la DG XI (Environnement, Sécurité nucléaire et protection civile) de la Commission européenne.

Les objectifs de ce programme, réalisé de 1985 à 1990, concernent : la collecte d'informations sur l'état de l'environnement et la mise en place d'un système d'information ; *la mise en cohérence des nomenclatures existantes* ainsi que *le développement des nomenclatures* et des méthodologies nécessaires à l'exécution du programme ; la coordination des initiatives prises dans les états membres ou à l'échelon international visant à l'amélioration de l'information sur l'environnement.

Ce programme est aujourd'hui géré par l'Agence européenne de l'environnement. Parmi les différents thèmes rassemblés dans CORINE, relatifs à l'environnement, celui de *l'occupation des terres* (land cover) a fait l'objet d'un développement important. Il s'applique aux pays d'Europe Centrale et de l'Est depuis 1991. A la fin de 1996, la cartographie Corine Land Cover est achevée sur 3 000 000 km², ou bien dans 17 pays européens et 2 d'Afrique du Nord, cartographiée avec la même légende (nomenclature annexée ici).

La cartographie CORINE Land Cover a été aussi appliquée en Roumanie et dans notre approche on a respecté cette nomenclature. On cite également d'autres projets, comme MARS (avec Action IV et Action

VI) ou *Phare* qui ont été lancés afin de réaliser l'estimation des superficies et des rendements des principales cultures.

Mais il convient de signaler la possibilité de l'existence *des erreurs d'affectation* dans l'établissement d'une nomenclature. Certaines erreurs d'affectations résultent d'une confusion et peuvent avoir des conséquences plus graves que des autres. Par exemple, la confusion entre une forêt et une surface d'eau (due à une faible luminance dans le proche infrarouge) est plus grave qu'une confusion entre une forêt pure de feuillus et une forêt mixte de feuillus et de conifères (on a eu cette situation sur l'image de 1997, dans la partie centrale de notre plateau), d'où l'importance d'établir une typologie avant de commencer la classification et d'accorder attention aux matériaux cartographiques déjà existants.

Ces erreurs peuvent être liées aux caractéristiques des données images (bandes spectrales peu discriminantes sur le thème étudié, dimension des pixels inadaptée aux tailles des objets à étudier,...), ainsi qu'aux conditions d'acquisition.

La précision sémantique est la « conformité des valeurs des éléments du jeu de données avec les valeurs de leurs homologues dans le terrain nominal » (Comité national des informations géographiques, 1993). Cette étape s'appelle encore étape de l'évaluation géographique de la classification hiérarchique pseudo dirigée ou, autrement dit, vérification de la *qualité sémantique* et consiste à confronter le résultat de la classification finale avec les documents de référence (dans notre cas, les compositions colorées, les cartes topographiques et d'autres cartes thématiques) et les connaissances de terrain. Il s'agit donc de se référer aux attributs des classes. Il faut distinguer des classes de nature qualitative qui correspondent à de diverses occupations du sol et celles de nature qualitative ordonnée (forêt très dense, forêt dense, eau claire, eau turbide, végétation spontanée, végétation ligneuse, etc.).

Code de la classe	Nomenclature de la légende	Correspondance sur le terrain
UP1	Forêt 1	Forêt de feuillus à <i>Fagus silvatica</i> , <i>Quercus petraea</i> , <i>Quercus robur</i>
UP2	Forêt 2	Forêt mixte à <i>Fagus silvatica</i> associé à <i>Picea excelsa</i>
UP3	Végétation ligneuse	Espèces mésophylles et/ou halophiles
UP4	Végétation spontanée	Végétation arbustive secondaire
UP3	Minéral 1	Bâti rural et sol nu
UP4	Minéral 2	Bâti urbain
UP5	Hydrique	Rivières et lacs

Tableau 3 : Les relations entre image et terrain dans la nomenclature des classes de l'occupation du sol

6.2.3. Démarches sémiologiques

Comme on l'a déjà souligné dans la première partie, dans l'étude de diverses organisations spatiales par la télédétection s'imposent de plus en plus la prise en compte de leur niveau sémiologique, le détachement de toutes les imbrications thématiques possibles, les éventuels « signes » qui peuvent communiquer « un message ». Mais il ne faut pas « chercher » que des signes dans l'organisation spatiale, quelles qu'elles soient, mais il faut aussi envisager le fait que la plupart des paysages et donc d'organisations spatiales n'ont pas de significations, mais des

formes. Ces *formes* qui sont étudiées justement par la télédétection peuvent être des indices pour beaucoup de choses, d'évolutions différentes, de cultures, des sociétés différentes, mais ne sont pas forcément des signes. On y trouve ce qui est bien venue l'affirmation : « C'est dans le Coran que tout est signe. » (Brunet, 1993) et pour continuer, on pense qu'il ne faut pas se laisser tenter dans nos interprétations par une certaine « intentionnalité » et que la télédétection offre la possibilité d'observer globalement les organisations spatiales toujours porteuses des « indices » dans le sens défini ici et les éventuels « signes » visibles ou cachés.

En ce sens, dans notre partie d'applications, on a mis au point une chaîne méthodologique qui ressortie une espèce de structure spatiale agraire circulaire (de la période communiste) qui peut être interprétée, soit comme un modèle von Thünen (sans tomber dans le fétichisme des modèles⁵⁶), il faut cependant accepter que dans l'espace les objets géographiques puissent s'agencer d'une manière plus au moins régulière et dans ce cas on les appelle - des modèles spatiaux), soit comme un signe d'une dictature de type communiste, soit ou un indice spatial d'une structure agraire communiste (applications troisième partie).

Pour finir, on doit renforcer l'idée que la télédétection est un outil qui se prête à une telle démarche, tout simplement parce qu'il a cette capacité, pertinence de « voir et comprendre » les choses, les diverses formes des organisations spatiales dans leurs ensembles, dans leur agencement spatial.

⁵⁶ « Les modélisations servent à parvenir à l'essentiel et d'évaluer les écarts entre les objets géographiques singuliers et les modèles qui aident à leur interprétation. Il est souhaitable que les modèles prennent sens dans et par les pratiques, objectifs et intentions des actions humaines. Les modèles servent aussi à comprendre la structure et la dynamique des objets géographiques ainsi que les mécanismes généraux de la dynamique. » (Brunet, 2001).

6.3 Chaînes méthodologiques proposées pour l'approche des dynamiques des paysages par télédétection

Les méthodes sont structurées tout d'abord en fonction du but de notre étude – de mieux identifier les combinaisons des variables-images donnant la meilleure partition de l'occupation du sol et de mieux mettre en évidence les éléments du paysage et ensuite en fonction du niveau de l'approche, au niveau de l'objet géographique ou des surfaces (zones) géographiques. Les chaînes méthodologiques proposées seront expliquées en détail dans la troisième partie.

En ce sens, on propose et on formalise les traitements d'images suivants et/ou les chaînes méthodologiques suivantes:

Typologie des paysages

- Composition colorée en réflectance (sur laquelle on a découpé le plateau sur l'image LANDSAT 1997, la plus récente de nos images) qui va constituer le support visuel pour une première partition, tout à fait classique, en grandes unités paysagères du plateau, selon des critères strictement géographiques (géologie de surface, topographie, climat, réseau hydrographique, végétation, sols, démographie, habitats humains, activités rurales - cf. la première partie de la troisième partie) afin d'établir une première typologie des paysages. Les limites des unités paysagères vont être incrustées sur les compositions colorées. Résultat : spatiocartes des unités paysagères.
- Canaux bruts (LANDSAT 1997) – transformée de Karhunen-Loeve – combinaison des axes de la transformée – moyenne locale itérée (fenêtre 21x21 pixels, 30x30 pixels, 65x65 pixels⁵⁷) –

⁵⁷ Le filtrage d'image a fait l'objet de nombreuses recherches en traitement d'image. La difficulté principale vient du fait que les contours des objets et les discontinuités de l'image doivent être préservés. Ceci rend nécessaire l'introduction de méthodes

classification non-supervisée – transformation morphologique (Golay H, amincissement et convergence) – Fusion arithmétique. Résultat – spatiocarte des unités paysagères (sur des critères spectraux et géométriques), une deuxième typologie des paysages et donc un deuxième découpage spatial du plateau.

- Indice de brillance (1989) – moyenne et variance (avec une fenêtre de 7x7 pixels) – seuillage par bornes. *Résultat* – spatiocarte de l'organisation spatiale d'un certain type de parcellaire.

Diachronie des paysages

- Canal 6 (six) thermique du LANDSAT 5 TM (1989, 1997) – passage de la température de brillance à la température au sol – moyenne et variance (avec une fenêtre de 5x5 pixels) – fréquence des températures radiatives au sol. *Résultat* – spatiocartes diachroniques des températures radiatives au sol et spatiocartes diachroniques des surfaces agrégées, selon leurs températures radiatives au sol.
- Canal 4 (quatre) de TM 5 (1989, 1997) – indice normalisé de végétation – classifications par seuillage de l'histogramme. *Résultat* : spatiocartes diachroniques d'intensité de l'activité chlorophyllienne.

non linéaires variationnelles (D. Mumford, J. Shah, 1989) ou stochastique (S. Geman, D. Geman, 1984), qui permettent de lisser les régions homogènes à l'exception des zones de discontinuités de l'image. Les méthodes basées sur les équations aux dérivées partielles (F. Catté, P.-L. Lions, J.-M. Morel, T. Coll, 1992 ; P. Charbonnier, L. Blanc Féraud, G. Aubert, M. Barlaud, 1997) et les techniques de filtrage anisotropique (P. Perona, J. Malik, 1990 ; M. J. Black, G. Sapiro, D. Marimont, D. Heeger, 1998) ont particulièrement été étudiées ces dernières années. On peut citer également quelques méthodes non linéaires qui calculent une moyenne pondérée des valeurs d'intensité dans un voisinage local (O. Lepski, 1991 ; F. Gotliebsen, E. Spjotvoll, J.S. Marron, 1997 ; S. Gadal, mémoire de DEA, 1997, N. Sochen, R. Kimmel, R. Malladi, 1998 ; S. Gadal (CD-ROM), 1998).

- Trois canaux bruts (1989, 1997), les plus décorélés – indice de végétation – un axe de la transformée de Karhunen-Loeve - classifications monodimensionnelles (pixel par pixel) – lissage local (histogramme local avec une fenêtre de 3x3 pixels et 5x5 pixels). *Résultats* : spatiocartes diachroniques de l'occupation du sol et de l'utilisation du sol.
- Indices normalisés de végétation – rehaussement des contours par convolution (filtre Laplacien) – seuillage par bornes – lissage majoritaire (fenêtre de 3x3 pixels) – applications des masques thématiques (par des opérations arithmétiques, multiplication sans étalement de la dynamique de l'image). *Résultat* : spatiocartes diachroniques des structures agraires.
- Canaux bruts (1989, 1997) – transformée de Karhunen-Loeve - combinaisons des axes des transformées K-L – transformation morphologique (Golay H, épaisseur associé à une convergence). *Résultat* – spatiocartes diachroniques de la géométrie de la morphologie agricole.
- Classifications non-supervisées (1989, 1997) – regroupement des classes – statistique géographique – intersection d'images et d'informations (corrélations croisées). *Résultat* – spatiocartes des changements de l'occupation du sol.
- Compositions colorées diachroniques en réflectance – extraction des polygones « d'entraînement » - « familles » de signatures spectrales par des objets. *Résultat* : dynamique sur les classes « stables ».
- Autocorrélation spatiale – variogrammes horizontaux à palier asymptotique (1989, 1997) sur des échantillons, avec une certaine représentativité géographique. *Résultat* : structures paysagères agraires diachroniques à l'échelle de micro paysage.

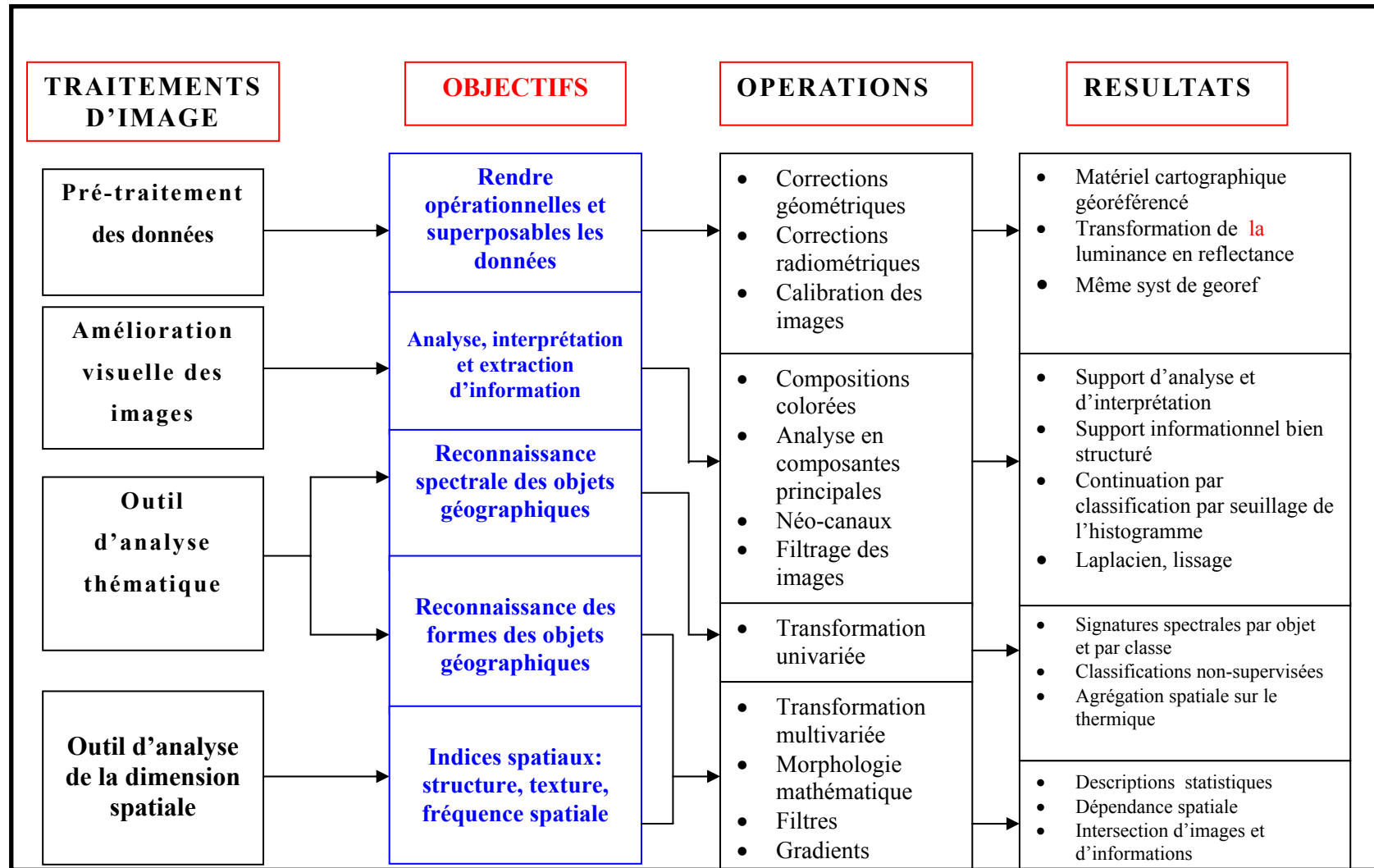
- Transformée bidimensionnelle de Fourier sur les mêmes échantillons. *Résultat* : structures paysagères agraires diachroniques à l'échelle de micro paysage.

Les chaînes méthodologiques que l'on a proposé pour déceler les organisations spatiales générées par deux périodes historiques différentes et pour suivre leurs dynamiques spatiale et temporelle essaient de répondre à trois niveaux de cohérence : radiométrique, spatiale et thématique et sont spécifiques au système d'observation satellitale.

Cependant, il ne faut pas tout attendre de la télédétection. Chaque méthode a ses limites et elle ne permet pas l'analyse complète d'une problématique ; c'est toujours la combinaison de plusieurs approches qui est la plus constructive. De ce fait, la télédétection ne supprime pas les études de terrain, bien au contraire, elle permet les rendre plus efficaces et les valorise par sa dimension spatiale.

C'est pourquoi on accepte de plus en plus la nécessité de l'existence de toute une série de méthodes complémentaires, enrichissantes pour la télédétection et réciproquement. Ainsi, la télédétection doit être considérée avant tout comme une source de données.

La Télédétection et l'étude du paysage



7. D'autres méthodes complémentaires à la télédétection

7.1. Les méthodes aréolaires ou la théorie des sondages spatiaux

7.1.1 Cadre de développement

Dans les pays où il y a une carence importante de matériaux cartographiques ou statistiques à multiples niveaux (social, économique et surtout dans le domaine agricole), les méthodes de sondage sont utilisées pour *produire de l'information* dans toutes ces directions à partir de l'observation d'une partie de ce domaine.

Les techniques de sondage peuvent contribuer dans une grande mesure à remplir les conditions de souplesse et de rapidité nécessaires aux inventaires de l'occupation du sol, à l'estimation des superficies et des rendements des principales cultures en l'Europe Centrale et de l'Est. Tout comme pour la problématique de l'établissement de la nomenclature adoptée, on trouve nécessaire de présenter le cadre général de l'application de ces méthodes en l'Europe Centrale et de l'Est en présentant de la sorte une autre facette de la télédétection, celle des enjeux économiques et de son aspect opérationnel.

Au niveau européen⁵⁸, le plus important programme d'application des techniques spatiales à l'agriculture est le programme MARS⁵⁹ (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*) lancé par la Direction Générale de l'Agriculture en coopération avec l'Office Statistique des

⁵⁸ On notera que dès le lancement du premier satellite LANDSAT en 1972, la télédétection spatiale civile a été appliquée de façon prioritaire à l'estimation des récoltes. Les programmes de recherche américains *LACIE* (*Large Area Crop Inventory Experiment*) puis *Argistars* y étaient consacrés.

⁵⁹ La méthode mise en œuvre par le projet MARS consiste en un échantillon représentatif de 60 sites carrés de 40 x 40 km, pour l'Union européenne. Une série d'images satellitales, trois ou quatre environ par an, généralement de type SPOT, interprètent et permettent l'extraction de l'information désirée. La référence correspond toujours aux statistiques *Eurostat*.

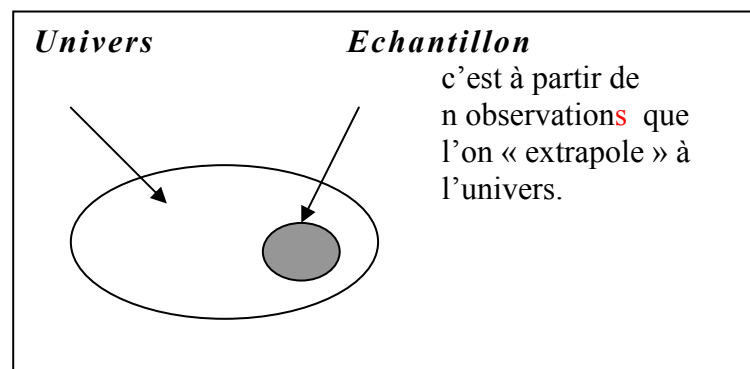
Communautés européennes (Eurostat). Le programme s'est déroulé en Roumanie pendant les années 1992-1998 (dès 1992 sur 6 départements du sud du pays, puis sur 21 départements en 1998). Parmi les principales activités figurent le suivi régional de l'état des cultures (inventaires régionaux pour évaluer les surfaces cultivées à l'aide des images issues de la télédétection de haute résolution – LANDSAT et SPOT) et la prévision précoce des rendements nationaux des principales cultures. Ces activités sont principalement basées sur des modèles agrométéorologiques (le *système avancé d'information agricole*) utilisant comme données principales d'entrée des observations météorologiques de surface et/ou des informations dérivées des satellites météorologiques, mises au point par des méthodes et techniques nouvelles pour l'analyse des images satellitaires et par l'évaluation de l'utilité en agriculture, de nouveaux capteurs embarqués sur satellite, tels que ERS-1, ERS-2, RADARSAT, VEGETATION, IRS.

On peut encore y ajouter : « L'estimation des récoltes est au effet un enjeu économique important et les marchés sont difficilement maîtrisables du fait d'une variabilité des récoltes inhérente aux facteurs humains mais surtout météorologique », (Meyer-Roux et Girard, 1997).

La Commission européenne utilise la télédétection principalement pour l'estimation des surfaces et, indirectement, pour le contrôle des modèles agro-météorologiques de prévision des rendements. On apprécie que l'utilisation directe pour le rendement en Europe soit encore à l'état de recherche et de développement. Les spécialistes considèrent que la télédétection peut contribuer à prévoir les rendements mais elle ne peut pas fournir la réalité de ces rendements car les cultures céréalières de l'Europe présentent une biomasse aérienne importante, et les indices de végétation saturent les images pour des couverts chlorophylliens très denses. La solution est de mettre en œuvre des méthodes conventionnelles pour obtenir les résultats définitifs. En général, dans ces cas, la *télédétection* sert de base de sondage.

Pourtant, de façon opérationnelle, la télédétection est surtout appliquée aux Etats-Unis pour l'estimation des rendements sur des pays où de tels rendements sont en général faibles. L'information de télédétection est intéressante, les indices de végétation sont considérés inadéquates. Ainsi, la télédétection spatiale est utilisée pour l'estimation des récoltes à USDA (*United States Department of Agriculture*) et par *Earth Satellite Corporation* avec son service *Cropcast*.

En conclusion, pour l'estimation des superficies et de rendements des principales cultures en Europe, l'accent est mis sur les méthodes conventionnelles ou les enquêtes par sondage avec ou sans une base de sondage assurée par les images satellitaires. L'enquête par sondage consiste à tirer au hasard des individus dans l'ensemble de la population.



*Figure 27 : Principe de la méthode des sondages
(d'après Clairin et Brion, 1996)*

Il existe plusieurs méthodes statistiques de tirage qui fournissent des estimations de ce que c'est que la population à partir de ce l'on sait des individus tirés (échantillon) à condition que ce tirage soit purement au hasard⁶⁰ (sondage aléatoire⁶¹). La méthode des sondages aléatoires est

⁶⁰ Au sens probabiliste du terme.

fondée sur le principe que l'échantillon doit être déterminé d'une façon objective, dans laquelle aucun « facteur personnel » n'intervienne, de façon que tout élément de l'ensemble à étudier ait des chances d'être choisi et que ses chances puissent être déterminées avec certitude. Le tirage aléatoire peut être appliqué à plusieurs unités primaires ou secondaires : « département, arrondissement, canton, commune, îlot urbain, photographies aériennes –« segments », aires quelconques, points – placettes, autres –points d'eau, intersection des réseaux. » (Gilg). Il y a de divers types de méthodes d'échantillonnage par points :

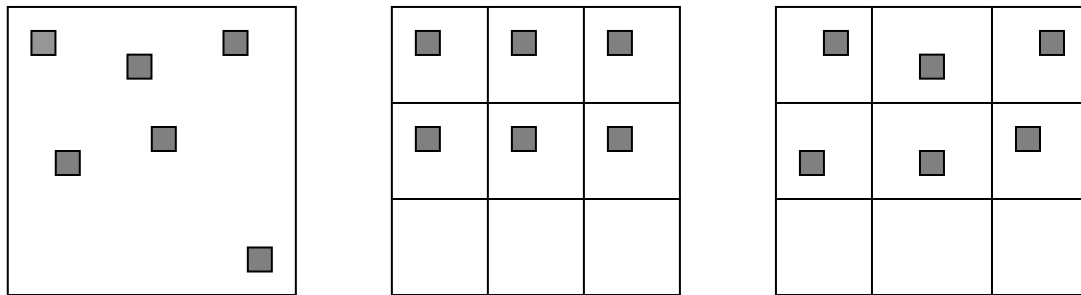


Figure 28 : Echantillon aléatoire simple, systématique aligné et systématique non aligné (d'après Gilg).

Le tirage systématique et aléatoire est envisagé comme un sondage stratifié.

Tandis que la France s'est orientée depuis les années 1960 vers un système d'enquête sur l'utilisation du territoire par sondage aréolaire par point, les Etats Unis ont mis au point un système d'enquête sur les statistiques agricoles par aires ou par « segments ».

Le segment n'est pas une portion de droite mais « une portion de territoire formée de parcelles contiguës » (Fournier, 1985). Grâce au tirage aléatoire, nous disposons des lois statistiques qui permettent l'extrapolation des résultats de l'enquête, le passage de l'échantillon à la zone d'étude et aussi le calcul de la précision : « Dans le cas où la

⁶¹ Un sondage est aléatoire, ou probabiliste, si toute une unité statistique a une probabilité non nulle et connue d'être sélectionnée dans l'échantillon.

sélection n'est plus purement aléatoire, on ne peut plus donner de résultats représentatifs avec une marge d'erreur calculable. » (Fournier, 1998).

La méthode des segments est une méthode aréolaire ; elle utilise un découpage du territoire (une « segmentation » - d'où le nom de la méthode) en segments qui sont déterminés à partir des limites naturelles (cours d'eau, routes, chemin, forêt, chemin de fer,...) ou construits « artificiellement » sur des cartes, souvent sous forme des carrés. Cette méthode est utilisée dans les pays en cours de développement, en particulier pour les enquêtes agricoles.

La méthode du *segment fermé*⁶² consiste à relever l'ensemble des types d'utilisation du territoire à l'intérieur du segment, afin de produire des estimations de superficie (Fournier, 1986). Cette méthode se réfère surtout aux aspects physiques de la composition du segment. L'unité d'observation est le *segment*, ce qui fait que les estimations soient produites en fonction de la manière de laquelle l'échantillon du segment a été tiré (fig. 29).

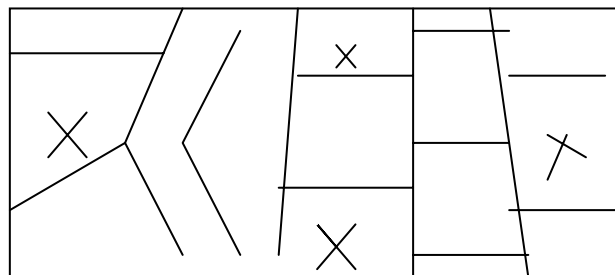


Figure 29 : Méthode de tirage aréolaire à partir d'une grille de points (d'après Fournier, 1996)

⁶² A part cette méthode, on remarque encore : la méthode du *segment ouvert*, qui consiste à enquêter toutes les exploitations agricoles dont le « siège » est à l'intérieur d'un des segments tirés dans l'échantillon. Le tirage est en grappe et le questionnaire de l'enquête concerne les terres des exploitations agricoles qui sont situées hors du segment, aussi bien que celles qui sont à l'intérieur. Une troisième méthode – la méthode du *segment pondéré* – réalise un questionnaire pour chaque exploitation agricole ayant des terres sur le segment. Il y aura un nombre total de questionnaires plus important que pour la méthode du segment ouvert.

Le sondage stratifié est recommandé par de nombreux auteurs pour améliorer la précision des statistiques : « une stratification même très imparfaite, est préférable à une absence totale de stratification » (Desabie, 1966), (fig. 30).

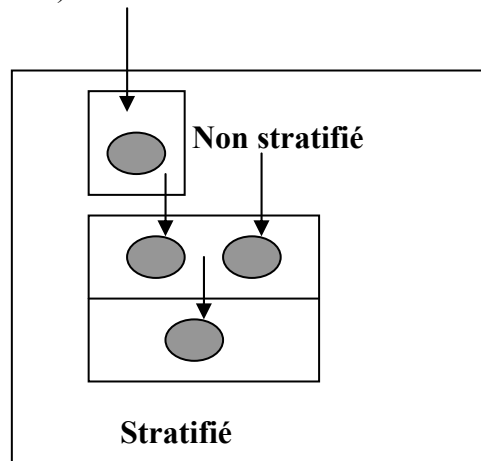


Figure 30 : Principe du sondage stratifié (d'après Clairin et Brion, 1996)

Par contre, il y a des auteurs qui disent bien le contraire - il ne faut pas procéder à une à une stratification plus poussée, avec l'élimination a priori de catégories de territoire que l'on n'aura pas estimées auparavant ; on aboutira à une surestimation des surfaces agricoles que l'on ne saura plus extrapoler. Au Etats-Unis, on travaille sur des limites physiques (qui peuvent être des limites de strate). En France, Ter-uti a abandonné la notion de strate au bout de trois ans ; il a été impossible à gérer du fait des frontières entre strates, entre départements, coefficients d'extrapolation, coefficients d'équilibrage, etc. « De toutes les façons, la stratification à outrance n'amène rien sinon des complications de gestion et des problèmes d'extrapolation » (Fournier, 1998).

A part de l'enquête, il faut disposer d'une base de sondage⁶³ (ou support de l'enquête) pour pouvoir passer de l'échantillon à l'ensemble de

⁶³ Une base de sondage est une « liste » (ce terme doit être compris au sens large) complète et à jour des unités de l'univers sans omission telle que l'identification de chaque unité se fait sans ambiguïté.

la zone d'étude. La priorité pour une base de sondage est sa mise à jour : « une base de sondage vieillit, et doit être mise à jour » (Brion, 1995). Ensuite, une base de sondage doit être adaptée au domaine d'étude – il est recommandable à utiliser une « base de sondage composite » (Brion, 1995). Les images satellitales peuvent constituer la base de sondage des enquêtes par sondage. En général, elles sont utilisées comme base de sondage pour des enquêtes démographiques en milieu urbain, mais aussi pour les enquêtes agricoles en qualité d'information auxiliaire⁶⁴ exhaustive, ou comme support pour une stratification du territoire en zones homogènes. Sinon, on utilise la base cartographique la plus détaillée.

J. Mayer-Roux (1981) compare les intérêts respectifs de la cartographie et de la statistique : « la cartographie comme la statistique est une représentation codée normalisée, ou symbolique de la réalité ». La cartographie doit être donc réservée à la visualisation de la répartition et de l'extension spatiale de différents postes d'occupation du sol, alors que les statistiques permettent une approche analytique globale et par poste, ce que ne permet pas la cartographie.

Un dernier aspect concernant les enquêtes par sondage est la précision de l'enquête. L'estimation obtenue à partir de l'échantillon doit être la plus proche possible de la valeur inconnue que l'on veut estimer. C'est pourquoi, pour améliorer les résultats, qu'on on choisira une méthode d'échantillonnage probabiliste car « seuls les sondages probabilistes permettent d'estimer, à l'issue du processus de collecte, l'erreur d'échantillonnage et donc d'agir sur le plan de sondage pour la réduire » (Barbary, 1988).

⁶⁴ Informations concernant les unités statistiques, plus que leur localisation, utilisables pour le sondage. Ces renseignements sont appelés variables auxiliaires qui peuvent être utilisées pour améliorer la technique de tirage ou pour calculer une estimation plus efficiente.

Alors, pour qu'une enquête de sondage donne une description satisfaisante de la population étudiée, il faut choisir judicieusement le mode de désignation de l'échantillon ; il faut procéder à des observations exactes auprès des individus échantillon, extrapoler correctement et efficacement à la population les observations réalisées sur l'échantillon (Desabie, 1966).

7.1.2. Application des méthodes aréolaires en Roumanie et sur le Plateau de Falticeni

L'objectif « statistique agricole » du projet « *PHARE* » pour 1997-1998 est d'étendre à l'ensemble du territoire roumain l'enquête aréolaire qui avait été testée depuis plusieurs années sur le sud du pays (dès 1992 sur 6 départements, puis sur 21 en 1997). L'enquête est basée sur l'observation sur le terrain d'un certain nombre d'aires (de 500m x 1km = 50ha) de forme rectangulaire, sans frontières physiques, réparties géographiquement sur le territoire.

Le but est de fournir des estimations, au niveau national, des superficies des principales cultures avec un degré de précision suffisant, puis de donner au moment de la récolte des prévisions de rendement pour quelques cultures d'intérêt majeur. Compte tenu de l'objectif initial, il n'est pas certain que l'on puisse obtenir des résultats statistiques satisfaisants au niveau de chacun des départements. L'enquête fournit, en fait, des statistiques globales d'utilisation du territoire, tout type d'usage du sol ayant une probabilité d'appartenir à l'échantillon, proportionnellement à son extension spatiale.

Par un néologisme tiré de l'américain, on appelle « segment » une aire de 500ha (1 km de largeur dans le sens Est-Ouest sur 500m de hauteur dans le sens Nord-Sud). Cette aire, sans limite physique sur le terrain, est repérée dans un premier temps sur les cartes topographiques

au 1/25 000 couvrant l'ensemble de la Roumanie, selon un principe de tirage exposé ci-dessous.

En se basant sur l'expérience d'autres pays (USA – UE) et sur celle acquise dans les pays depuis 1992, on s'est fixé un taux de sondage de 1% du territoire. Ayant retenu le segment dans sa forme rectangulaire avec 500ha d'extension spatiale, la Roumanie est couverte, en théorie, de 476 782 segments, dont on souhaite tirer 1 sur 100, ou bien 4 768 environ en tant que le Plateau de Falticeni est couvert par 42 segments.

La carte topographique 1/25 000 de la Roumanie comporte en surimpression un carroyage kilométrique (1km x 1km) dans le sens Est-Ouest et Nord-Sud, ce qui représente une partition du territoire selon des grilles carrées de 100 km². Le carroyage est de 2km x 2km sur les cartes 1/100 000. Le sondage consistera à tirer deux segments de 0.5 km² à l'intérieur de chaque grille de 100 km² afin d'assurer le taux de sondage souhaité.

Il existe plusieurs méthodes de tirage à l'intérieur de grilles, les unes et les autres assurant plus ou moins la dispersion géographique de l'échantillon. Il a été choisi d'opérer deux tirages indépendants, l'un et l'autre « systématique », selon les deux directions Est-Ouest et Nord-Sud.

Le tirage systématique consiste à tirer des individus dont les rangs sont en progression arithmétique ou équidistante les uns des autres au cas des sondages aréolaires. Le premier tirage est appelé répétition 1, tous les segments de cette « répétition » 1 sont équidistants de 10 km selon les deux directions privilégiées, le deuxième tirage, indépendant du premier, est appelé « répétition » 2. La figure suivante fournit le schéma de tirage des deux segments à l'intérieur d'un carreau de la grille.

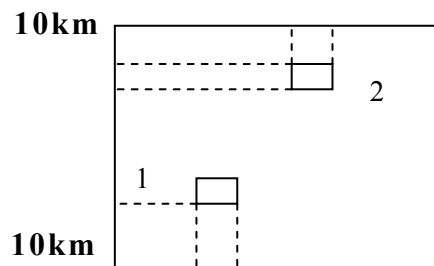


Figure 31 : Schéma de tirage des deux segments à l'intérieur d'un carreau de la grille

La projection planisphère n'est pas identique sur toute la Roumanie, la rupture étant Est-Ouest. Afin d'éviter tout chevauchement ou tout manque sur la bande Nord-Sud intéressée, on a retenu selon les cas le segment la répétition 1 ou le segment la répétition 2 afin de maintenir la répartition géographique de l'échantillon. Le choix se fait sur carte, et donc il est purement aléatoire et ne privilégie pas telle ou telle occupation du territoire (fig. 37).

Le tirage final pour toute la Roumanie a donné 4 766 unités de sondage, ce qui assure un taux de sondage de 1/99.96 et un coefficient d'extrapolation de 100.04 par segment en moyenne. Le tirage ainsi réalisé répond aux exigences de l'aléatoire et de la répartition géographique en respectant le taux de sondage que l'on s'était fixé a priori.

Les segments ont été numérotés les uns à la suite des autres au niveau national de 0001 à 4766, ligne par ligne, d'Ouest en Est et du Nord au Sud. Cette numérotation ne tient pas compte de la « stratification » a priori qui a été réalisée sur le pays. Ceci supposerait que l'on réintroduise les résultats obtenus sur la « strate 1 » aux résultats obtenus sur les autres strates.

La numérotation va de 0001 à 4766 et tout « segment » participe théoriquement au résultat de l'enquête. Sur une même ligne, les numéros des segments de la répétition 1 (ou de la répétition 2) se succèdent unité par unité. En fait, les segments ont reçu une double numérotation, toujours selon le même principe (Ouest-Est/Nord-Sud) mais au niveau de

chacun des départements, ce qui suppose que le segment a été affecté dans son ensemble à un département et un seul : ceci se justifie dans la mesure où les frontières entre départements sont des frontières administratives et non pas naturelles⁶⁵.

Tandis qu'en France l'échantillonnage s'appuie sur 8 répétitions possibles à l'intérieur d'une grille de 12 km x 12 km = 144 km² le modèle roumain est basé sur 100 répétitions possibles à l'intérieur d'une grille de 100 km².

La notion de stratification correspond à regrouper dans une même classe des individus qui se ressemblent, de telle façon à minimiser la variabilité entre deux strates différentes. Pour réaliser une stratification a priori il faut connaître la population afin de classer un individu dans une strate et une seule selon un critère donné de sélection⁶⁶. Ceci implique une très bonne connaissance de terrain à travers les photos aériennes, les images satellites, les cartes topographiques ou les enquêtes au sol.

Cette stratification est relativement facile à réaliser par la manière de laquelle s'est fait l'appropriation du sol aux Etats Unis au cours du XIX^e siècle. Elle est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre sur le contenu européen, surtout si l'on veut tenir compte de la structure du parcellaire.

S'il s'agit de découper l'univers en zones plus ou moins homogènes selon les cartes topographiques classiques ou selon les images satellitaires, il vaut mieux parler de *zonage* plutôt que de *stratification*. A partir des cartes topographiques et des images satellites un zonage a été réalisé, introduisant la notion de « stratel », zone naturelle incluant la

⁶⁵ L'expérience montre d'ailleurs que la gestion d'échantillons à cheval sur deux unités administratives ou sur deux strates différentes est pratiquement impossible (on fait des références aux statistiques agricoles de la France).

⁶⁶ Aux Etats-Unis, la stratification de l'espace est réalisée selon le pourcentage d'espace agricole dans un secteur donné : de 0% pour les zones urbaines, les forêts, l'eau...jusqu'à 75% des terres de culture.

zone de montagne et du Delta du Danube. Cette « strate 1 » est couverte par 1120 segments au niveau de toute la Roumanie. Aucun sur notre territoire. Les forêts des plaines, les grandes villes n'ont pas été isolées de la strate agricole.

En somme, sur le territoire de Roumanie il y a eu un tirage d'aires de 500 ha réparties géographiquement sur le territoire selon deux tirages indépendants réalisés tous les dix kilomètres dans les directions Est-Ouest et Nord-Sud. Il s'agit d'une affectation par département des « segments » de l'échantillon national et de l'introduction de la « strate 1 » à caractère peu agricole.

L'enquête par sondage consiste à tirer au hasard un individu dans l'ensemble de la population. Il existe plusieurs méthodes statistiques de tirage qui fournissent des estimations de ce que c'est que la population à partir de ce que l'on sait de quelques individus tirés (échantillon) à condition que ce tirage soit dû purement au hasard (sondage aléatoire). Dans le cas où la sélection n'est pas purement aléatoire, on ne peut plus donner des résultats représentatifs avec une marge d'erreur calculable.

Un autre aspect très important pour les enquêtes sont les relevées par enquêteur. Ceci constitue le point clé de l'enquête. L'erreur aléatoire, due au fait que l'on procède par sondage, peut être aisément calculée à partir des formules statistiques appropriées au type de sondage utilisé.

L'erreur d'observation est plus difficilement calculable, d'autant plus qu'il existe plusieurs types d'erreurs possibles : erreur de localisation, erreur dans le tracé des parcelles (omission par exemple), erreur sur la nature de la culture. L'erreur totale est la résultante des deux types d'erreurs (figure suivante).

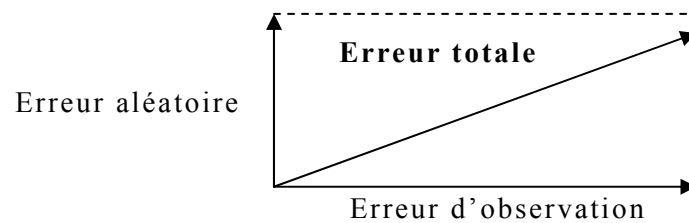


Figure 32 : Types d'erreurs des enquêtes agricoles

Quelle que soit l'amélioration que l'on peut apporter au sondage (multiplication du nombre des segments, stratification ou zonage plus fin), si l'erreur d'observation est importante, l'erreur totale le restera également.

L'observation de terrain par enquêteur

La couverture photographie aérienne n'est pas disponible ou est trop vieille. Le cadastre n'a pas été remis à jour depuis la redistribution des terres ; il est donc inutilisable. Le seul support disponible à présent est donc l'agrandissement au 1/10 000 de la carte topographique au 1/25000. Ces cartes ne sont pas très récentes mais elles présentent un nombre suffisant de points de repère et un tracé minimum de la voirie pour pouvoir faire un cheminement sur le terrain sans beaucoup d'erreurs. La carte au 1/25 000 est le support du tirage de l'échantillon, ce qui fait qu'il n'y a pas d'erreur dans le rapport des limites des segments dont les côtés sont bien orientés vers Est-Ouest et Nord-Sud.

En France, les enquêtes agricoles reçoivent annuellement un numéro de visa du Ministère de l'Agriculture et du Ministère des Finances (INSEE, Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques). Par cela même, elles deviennent obligatoires : les personnes interrogées sont obligées à répondre au questionnaire de l'enquête mais elles sont assurées en contrepartie du secret statistique (loi du 7 juin 1951), toute donnée individuelle ne pouvant être communiquée à un tiers ou utilisée à des fins répressives ou fiscales.

Les enquêteurs sont munis d'une carte d'identité d'enquêteur annexée, leur permettant de se rendre au domicile des agriculteurs, de parcourir les parcelles de culture. Ils sont soumis eux-mêmes au secret statistique.

La carte topographique est donc le document d'enquête (cf. les échantillons présentés). Il existe trois documents de repérage : la carte au 1/100 000 où les segments sont repérés par rapport à leur environnement. On peut y définir aisément la manière d'approcher le segment par rapport au réseau routier. La carte au 1/25 000 permet de savoir comment aborder le segment, quel cheminement est envisageable. L'agrandissement au 1/10000 est le document d'enquête à proprement parler et pour notre plateau on a superposé nos segments sur une image Spot Panchromatique.

Le relevé terrain (figures 34, 35, 36) : à 1/10 000, 1 mm représente 10 m, même outillé d'un stylo à plume fine, il est difficile de prétendre à une précision relative sur le terrain de 3 à 5 m. Si l'on veut dessiner une parcelle avec ses frontières, il faudra qu'elle ait au moins de 12 à 15 m de largeur.

L'erreur dans le dessin peut-être importante : il semble préférable que l'enquêteur fasse un document de travail sur le terrain avant de réaliser le dossier définitif du parcellaire sur transparent. Les micro-parcelles jointives sont regroupées sous un seul numéro avec le code -2. Les parcelles sont numérotées et codées par type de culture par l'enquêteur lui-même. Pour les parcelles codées -2, l'enquêteur note chaque culture rencontrée et compte le nombre des pas qu'il fait à travers chacun des champs, renseignements qu'il retranscrit sur une fiche parcelle particulière (annexes).

Les estimations de superficie

Sh = superficie en catégorie de territoire « h » à estimer

S = superficie de la Roumanie⁶⁷ et du Plateau de Falticeni

m = nombre total de segments tirés

i = numéro des segments

ϕ_i = proportion de catégorie de territoire « h » à l'intérieur du segment « i ».

$Sh = S \times 1/m \sum \phi_i$, ϕ_i est calculé en ajoutant à la numérisation des segments : les superficies des parcelles dont le code n'est pas -2 ; en affectant à chaque champ regroupé dans le -2 une superficie proportionnelle au nombre des pas réalisés par l'enquêteur.

La variance de cet estimateur est :

$$V(Sh) = S^2 \times M-m/M \times 1/m \times 1/m-1 \times \sum (\phi_i - \bar{\phi})^2$$

M = nombre théorique de segments couvrant de Roumanie

($M-m/M$ est très proche de 1 et peut être négligé = 0.99)

$\bar{\phi}$ = proportion moyenne en catégorie de territoire h calculée sur tous les segments.

L'écart type est σ_h = racine carrée de $V(Sh)$. Il s'exprime en hectares.

Le coefficient de variation $CV_h = \sigma_h/Sh$ est une grandeur sans dimension qui s'exprime en %.

On a essayé de dépouiller l'enquête par département (Suceava, Iasi et Neamt) pour notre plateau et par parcelles codées « -2 » non pas proportionnellement au nombre des pas mais selon la fréquence relative de chacune des cultures présentes dans ces parcelles (une culture est comptée autant de fois qu'elle apparaît dans cette parcelle). Les enquêtes par point présentent, en tant qu'enquêtes sur l'utilisation du territoire,

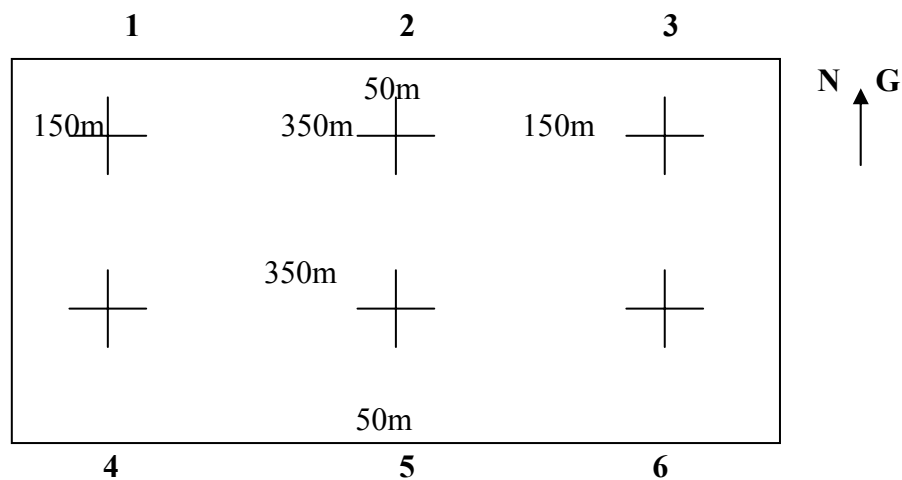
⁶⁷ D'après la statistique officielle, elle se répartit en : 147 931 km² de superficie agricole dont : 93 415 km² de terres arables, 33 626 km² de prairies naturelles et pâturages, 14 893 km² de prés de fauche, 3 039 km² de vignes, 2 958 km² de vergers ; ensuite 66 810 km² de forêts, 8 926 km² d'eau, 14 724 km² autres (bâtiments, infrastructures de transport, etc.). L'agriculture et la sylviculture représentent plus de 62% du territoire national (90% avec les forêts). L'agriculture et la sylviculture représentent plus de 20% de la valeur ajoutée brute nationale.

des avantages certains par rapport aux enquêtes par aire ; c'est d'ailleurs le point qui est le support de l'enquête rendement.

On se demande si l'on ne privilégie pas l'agricole par rapport au non agricole, en procédant de la sorte. Comment sont traités les chemins, les réseaux routiers ou ferrés, les canaux de drainage ou d'irrigation ? L'enquête par segment appréhende plutôt des superficies agricoles brutes, alors que l'enquête par point fournit des superficies agricoles nettes (toute occupation du sol de 3 mètres de large ou de plus de 10m² a effectivement une probabilité d'être tirée et l'on peut ainsi estimer des superficies en chemin, arbre isolés, sentiers, etc.).

L'enquête rendement

Echantillonnage



Une grille de six points équidistants de 350m entre eux sur le terrain est superposée au relevé des segments. On remonte du point à l'exploitant qui met en valeur le champ tiré et on l'interviewe sur certaines caractéristiques de la parcelle et sur les rendements des cultures principales au niveau de son exploitation entière.

On n'a retenu qu'un segment sur trois pour cette enquête rendement, les segments dont le numéro national est divisible par 3 (quelle que soit la répétition). Ce tirage semble garantir la dispersion des

observations. Seuls les segments des strates 2 et 3 (hors strate 1) font partie de l'échantillon.

Les segments de plaine 100 % en forêt mais qui sont tirés dans l'enquête rendement sont visités par l'enquêteur afin de vérifier s'il n'y a aucune culture sur le segment.

L'interview de l'exploitant n'aura lieu qu'après les récoltes avec retour de l'enquêteur sur le terrain : pour les grandes parcelles où le point de tirage rendement peut être attribué sans ambiguïté, l'enquêteur peut se renseigner sur le numéro et sur l'adresse de l'exploitant dès le mois de juin.

Chacun des points est équiprobable, c'est à dire qu'ils ont tous la même représentativité. Les renseignements obtenus au niveau de la parcelle, et ramenés à l'unité de superficie sont auto-pondérés : l'estimation d'une moyenne sera la moyenne des critères renseignés, ramenée à l'unité de superficie⁶⁸. Une parcelle doit être comptabilisée autant de fois qu'elle a été tirée (autant de fois qu'il y a des points tombés dedans).

Les exploitations ont une probabilité d'être tirées proportionnellement à leur superficie (sondage à probabilité inégale). Il faut d'abord définir la superficie de l'exploitation : soit on considère seulement la superficie en terres arables ; soit en terres arables, plus vergers, plus vigne, donc en superficie agricole utilisée (SAU) ; soit en superficie agricole utile (SAU, plus landes et friches, plus sol des bâtiments). Les données relevées au niveau de chaque exploitation seront en effet pondérées par l'inverse de la superficie de l'exploitation. Les tirages à probabilités inégales supposent que les variables étudiées soient bien corrélées avec la variable de tirage. Ici, la variable de tirage est la superficie de l'exploitation. La production est liée à la superficie et non pas à la répartition des cultures.

⁶⁸ Exemple : dose moyenne d'engrais = moyenne des doses à l'ha.

Estimation des rendements

Compte tenu de la réserve faite concernant les variables à étudier qui doivent être corrélées à la variable de tirage, on ne s'intéresse qu'aux principales cultures (en France, dans l'enquête terre labourables, on ne retient que 6 à 7 cultures⁶⁹).

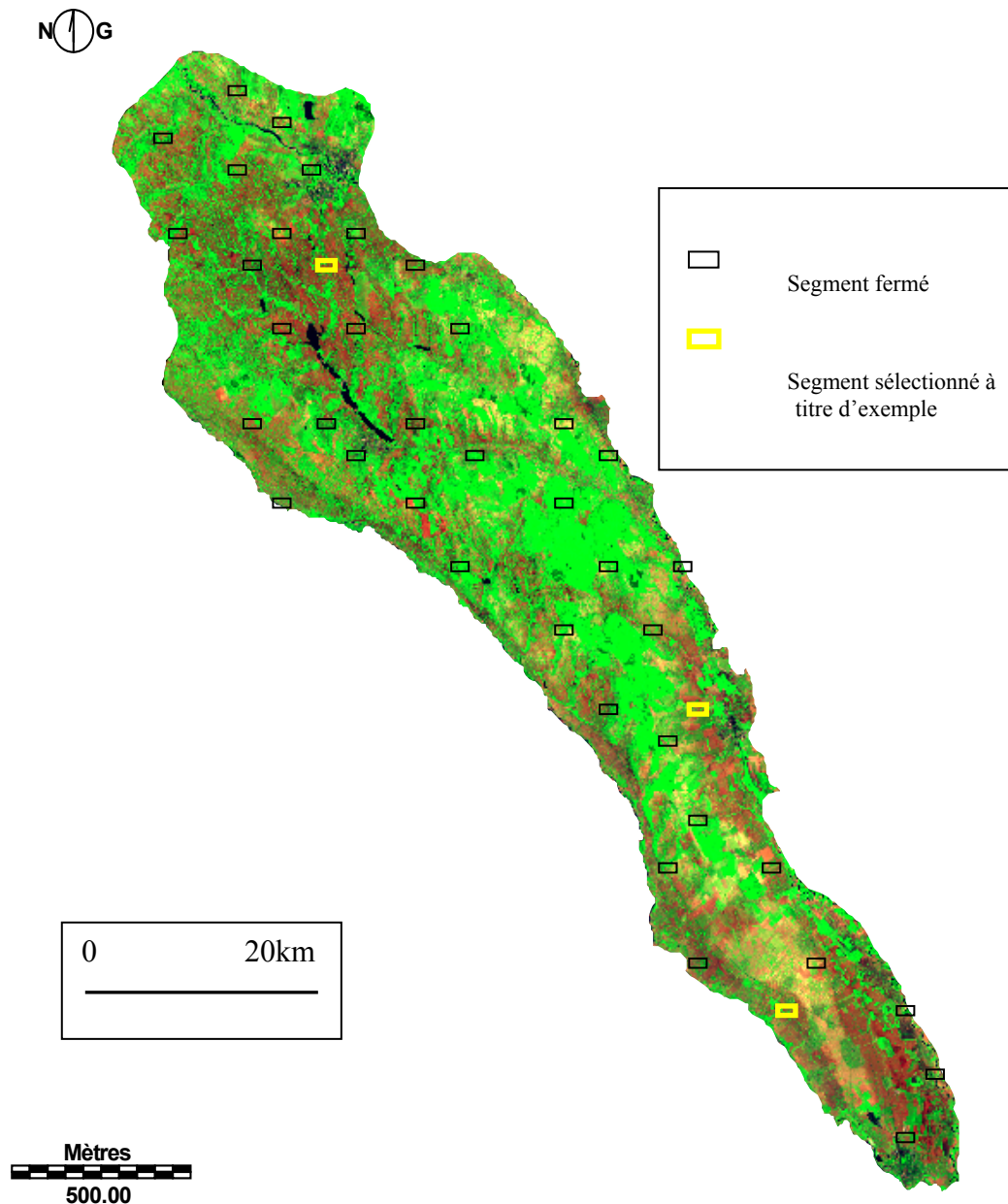
Le rendement culture par culture s'obtient par le rapport entre la production et la surface (toutes deux estimées à partir de la fiche exploitation). On peut éventuellement calculer un taux de précision de cet estimateur⁷⁰.

L'enquête se fait selon les exploitations générées par des points tirés sur la surface de la Roumanie, y compris le Plateau de Falticeni. Si l'on tire un point (d'une surface théoriquement nulle) sur un territoire de surface « S », la probabilité pour ce que ce point engendre l'exploitation « I », ce qui veut dire qu'il tombe dans l'espace occupé par cette exploitation, et sans doute proportionnelle à la superficie s_I de l'exploitation : c'est exactement s_I/S . *Le tirage est un tirage à probabilité inégale à deux degrés et systématique.*

⁶⁹ En France, on retient 300 exploitations environ par département. Pour les petits départements de l'Ile de France, on descend à 150 exploitations environ (mais les terres labourables représentent près de 95% de la superficie agricole utilisée).

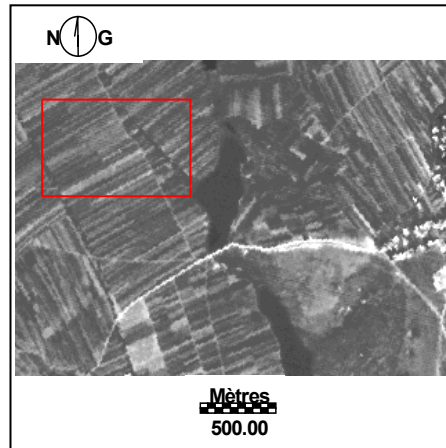
⁷⁰ On peut approcher le rendement moyen en calculant la moyenne arithmétique des rendements (en faisant intervenir chaque rendement autant de fois que l'exploitation a été tirée). On pourra observer que, sur un grand nombre, le résultat est peu différent de celui calculé par la formule rigoureuse.

Du satellite à l'enquête de terrain
Distribution spatiale des 42 «segments fermés» sur le Plateau de Falticeni



Par un néologisme tiré de l'américain, on appelle «segment» une aire de 500 ha – 1 km de largeur dans le sens Est-Ouest sur 500 m de hauteur dans le sens Nord-Sud qui n'a pas de limites physiques sur le terrain. Le taux de sondage est de 1% du territoire et la Roumanie devait être couverte en théorie de 476 782 segments, dont on tire 1 sur 100, soit environ 4 768. Sur le territoire du Plateau de Falticeni on compte 42 de segments à partir desquels on calcule les estimations des superficies et des rendements des principales cultures – état de lieux 1997/1998. La composition colorée en réflectance a été redressée dans le système cartographique (projection cartographique) UTM 35N sur laquelle ont été superposés les segments «fermés».

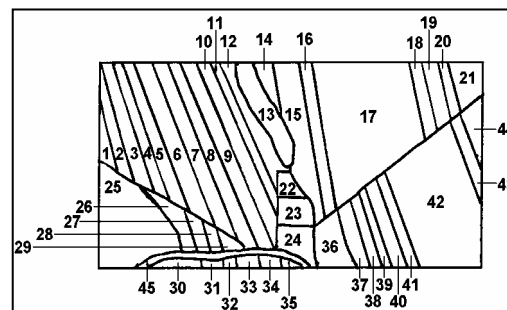
Du satellite à l'enquête de terrain
Exemple du «segment fermé» du Nord du Plateau de Falticeni situé entre la localité Moara-Carp et Bosanci (département de Suceava)



Sur l'image Spot Panchro le «segment» est localisé par rapport à son environnement. On peut aisément le repérer par rapport au réseau routier.



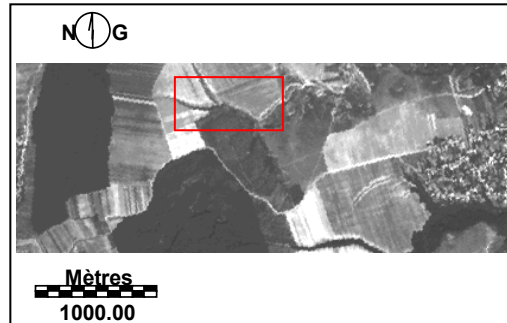
La carte topographique permet de définir le chemin d'accès



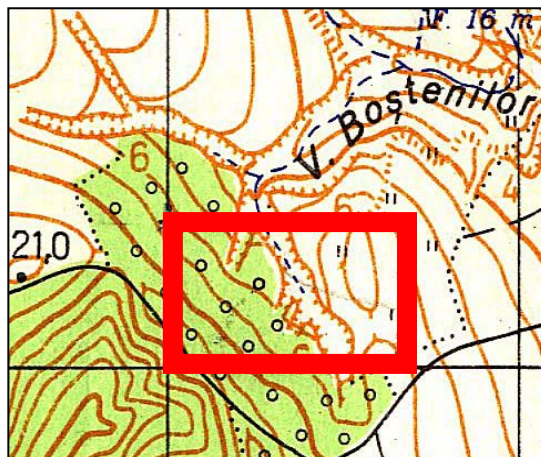
*Relevé de terrain pour l'estimation des superficies
des principales cultures*

Figure 33

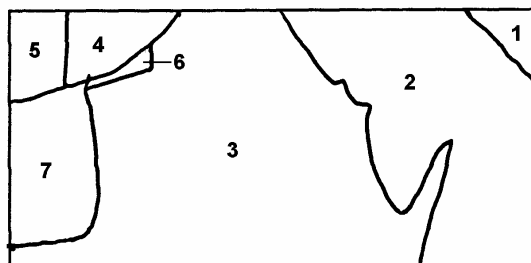
Du satellite à l'enquête de terrain
***Exemple de «segment fermé» de la partie centrale du Plateau de Falticeni situé près
de la localité de Bosteni (département de Iasi)***



*Sur l'image Spot Panchro le «segment» est localisé par rapport
à son environnement. On peut aisément le repérer
par rapport au réseau routier.*



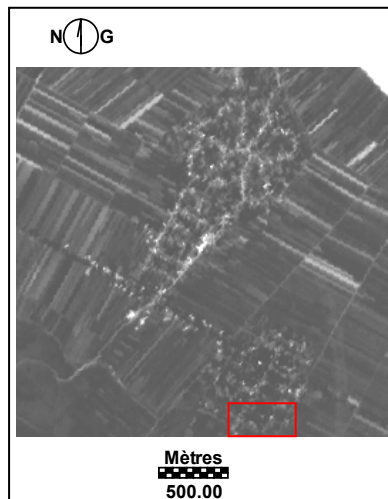
La carte topographique permet de définir le chemin d'accès.



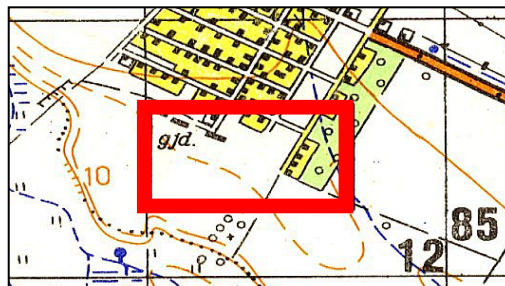
*Relevé de terrain pour l'estimation des superficies des
principales cultures*

Figure 34.

Du satellite à l'enquête de terrain
Exemple de «segment fermé» du Sud du Plateau de Falticeni situé partiellement dans
la localité
Gheraestii-Noi (département de Neamt)



Sur l'image Spot Panchro le «segment» est localisé par rapport à son environnement. On peut aisément le repérer par rapport au



La carte topographique permet de définir le chemin d'accès.

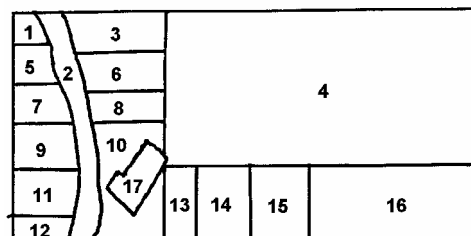


Figure 35.

Relevé de terrain pour l'estimation de superficies des principales cultures.

Cultures	Moyenne (ha)	Moyenne (%)
Blé	18.904.340	4.624
Orge	720.718	0.176
Variété d'orge	3.504.781	0.055
Avoine	13.592.216	3.325
Seigle	2.443.665	0.592
Maïs	29.252.399	7.156
Autres céréales	28.914	0.007
Lin	35.060	0.008
Tournesol	1.951.738	0.477
Colza	97.256	0.023
Betterave	3.121.037	0.763
Tabac	24.055	0.005
D'autres plantes industrielles	41.235	0.010
Pommes de Terres	18.970.199	4.641
Choux	516.530	0.126
Fève	462.813	0.113
Betterave fourragère	1.091.734	0.267
Luzerne	3.186.238	0.776
Trèfle	10.113.148	2.474
D'autres cultures fourragères	14.507.554	3.549
Labourable non cultivé	1.196.878	0.292
Pruniers	53.952	0.013
Pommiers	2.414.260	0.590
Pommiers intensifs	5.537.462	1.354
Vignobles	8.789	0.002
Pâturages	57.287.577	14.015
Près de fauche	83.772.083	20.494
Cultures non-identifiées	80.388	0.019

*Tableau 4 : Résultats des enquêtes « estimation superficies » -
Département de Suceava (le nord du Plateau de Falticeni)*

Segment SV 82

Exemple de fiche-enquête

N ^o de la parcelle	R	Code culture	Utilisation du territoire	Exploitant	Observations
1.		-2			
2.		11	maïs		
3.		-2			
4.		51	pommes-de-terre		
5.		-2			
6.		1	blé		
7.		-2			
8.		1	blé		
9.		-2			
10.		11	maïs		
11.		51	pommes-de-terre		
12.		11	maïs		
13.		121	eau		
14.		11	maïs		
15.		-2			
16.		1	blé		
17.		-2			
18.		11	maïs		
19.		-2			
20.		67	trèfle		
21.		-2			
22.		11	maïs		
23.		113	près		
24.		51	pommes-de-terre		
25.		113	près		
26.		-2			
27.		11	maïs		
28.		+1	blé		
29.		-2			
30.		113	près		
31.		-2			
32.		1	blé		
33.		-2			
34.		67	trèfle		
35.		4	orge de printemps		
36.		113	près		
37.		113	près		
38.		57	haricot		
39.		-2			

40.		1	blé		
41.		11	maïs		
42.		-2			
43.		11	maïs		
44.		-2			
45.		136	voies de communications		

Tableau 5.

8. Méthodes s'appuyant sur la connaissance de terrain

Dans ce sous-chapitre, on inclut les *missions de terrain*, sauf celles pour les applications des méthodes aréolaires. Ces missions de terrain, en ce qui nous concerne, ont eu deux objectifs : l'identification des objets au sol pour l'établissement de la nomenclature de nos classifications en télédétection et la production d'une heuristique géographique.

L'acquisition de référence de terrain doit se faire en fonction des objectifs. En effet, la collecte de cette information est souvent longue et elle doit être entièrement fiable puisque c'est sur elle que repose le jugement des résultats sur la qualité desquels on propose telle classification, telle méthode et telle démarche.

Dans tous les cas, on a suivi les principes de *l'analyse spatiale*, dans le sens de caractériser les objets par leur position géographique et par les connaissances sur leurs positions spatiales relatives. La reconnaissance des objets à partir des études sur le terrain et en relation avec des informations déjà acquises (principalement par des cartes existantes ou par la bibliographie) constitue une des bases du traitement ultérieur des images : c'est la méthode géographique.

Notre intérêt à ce niveau s'est focalisé sur la collecte des données, dans la perspective d'un travail d'inventaire, et ensuite sur la description géographique classique de notre territoire. Le travail d'inventaire a concerné les principales formations, associations végétales du plateau

après que l'on ait extrait leurs limites spatiales à partir des photographies aériennes.

Dans la bibliographie de spécialité il y a des références sur les étapes dans la description de la végétation : la première étape est qualitative, il s'agit de la description de la structure générale des formations végétales. La suivante est sémi-quantitative⁷¹ et elle décrit la composition floristique. Il y a aussi les descriptions quantitatives qui fournissent des informations sur la phytomasse aérienne herbacée.

⁷¹ Les mesures qualitatives et sémi-quantitatives se font au niveau de l'unité d'observation, la parcelle. Les mesures quantitatives se font au niveau de l'unité de comptage ou de prélèvement, placette par parcelle.

Données exogènes mises en œuvre

Données		Caractéristiques des données		
Catégories	Sous-catégories	Année Période	Echelle Support informationne l	Variables
Données du cadre naturel	• Géologie de surface	-	Plateau Matériel carto	• Couches de surface
	• Hypsométrie	-	Plateau Matériel carto	• Courbes de niveaux (100m, 200m, 400m, 600m)
	• Climat	1966-2000	Plateau Données stat	• Moyenne pluriannuelle de la température
		1966-2000	Plateau Données stat	• Moyenne pluriannuelle des précipitations
		1989	Plateau Données stat	• Température moyenne du mois d'août 1989
		1997	Plateau Données stat	• Température moyenne du mois de juin 1997
		1989	Plateau Données stat	• Durée moyenne de l'ensoleillement du mois d'août 1989
		1997	Plateau Données stat	• Durée moyenne de l'ensoleillement du mois de juin 1997
		1966-1998	Plateau Données stat	• Evaporation réelle moyenne pluriannuelle
		1896-1972	Communes	

Approche géographique de la dynamique des paysages
du Plateau de Falticeni (Roumanie) par télédétection

		1896-1972 1896-1972	Communes Communes Données stat	• Zones thermiques • Zones de précipitations • Zones de rayonnement global
	• Végétation	1982 1925, 1974, 1982,	Communes Données stat Communes et plateau Données stat Matériel carto	• Végétation naturelle dominante • Couvert forestier et végétation spontanée
	• Pédologie	1982	Plateau Matériel carto	• Unités de sols et leurs textures
Données du cadre socio- économique	• Population	1992 1966-1999 1966-1999 1992 1992	Communes Données stat	• Le potentiel productif • Densité de population • Soldes naturels • Soldes migratoires • Structure confessionnelle • Taux de chômeurs
	• Habitats	1992 1992 1992	Communes Données stat	• Taux d'occupation des habitats par communes • Distances des villages par rapport aux villes • Accessibilité ferroviaire kilométrique
	• Occupation du sol	1925 1974 1980-1997	Plateau Matériel carto Communes	• Bâti (villages, villes, voies de communication et transport)

Approche géographique de la dynamique des paysages
du Plateau de Falticeni (Roumanie) par télédétection

Données du cadre socio-économique	Utilisation du territoire	1980-1997 1980-1997 1980-1997 1970-1997 1970-1997	Données stat	- Taux d'occupation du blé - Taux d'occupation du maïs - Taux d'occupation de la pommes-de-terre - Taux d'occupation de vergers - Taux d'occupation de pâturages - Taux d'occupation de près de fauche
	Productions végétales	1980-1997 1980-1997 1980-1997 1980-1997 1970-1997 1970-1997	Communes Données stat	- Production (t/ha) de blé - Production de maïs - Production de pommes-de-terre - Production de biomasse des pâturages - Production de biomasse des près de fauche
	Elevage		Communes Données stat	- Cheptel bovin (nr animaux/ha agricole) - Cheptel porcin - Cheptel ovin
	Structures agraires	1856	Villages, petits villages Cadastes	Parcelles foncières

Simona NICULESCU, 2001

Tableau

Pour notre but de recherche (localisation et identification au sol des objets géographiques au sol afin de se repérer thématiquement sur des images satellites et ensuite pour l'établissement d'une typologie des paysages du Plateau de Falticeni), on a estimé suffisant de réaliser seulement la première étape, celle descriptive en ajoutant le stade phénologique de la végétation et quelques détails sur la topographie et la pédologie. On note aussi qu'il a eu des cartes de géobotanique sur la zone qui ont constitué une bonne base de départ pour nos recherches. Pour les espèces herbacées on a utilisé la méthode la plus simple et la plus fréquente – *l'échelle mixte d'abondance dominance*. C'est un travail d'inventaire des espèces et on doit leur affecter une cote en fonction de leur abondance ou de leur recouvrement⁷². Le résultat de ce travail a été utilisé, d'une part, pour l'établissement de la nomenclature de nos classifications, et d'autre part pour l'élaboration du matériel cartographique à partir des photographies aériennes (fig. 23) mises en valeur dans la typologie des paysages.

La collecte de données entraînées par la télédétection impose une série de règles spécifiques : l'enquête de terrain doit être simultanée à la date de prise de vue, la végétation doit être au même stade phénologique. En somme, le rayonnement électromagnétique enregistré par le satellite dépend de la combinaison de moment entre les différents objets et leur environnement. Ayant en vue cette situation, les spécialistes recommandent d'observer le terrain sous les aspects suivants : description selon une nomenclature prédéfinie, comme celle

⁷² Le système de cotation comporte 6 (six) niveaux (selon Boudet, 1984) : espèces présentes à l'état d'individus isolés (abondance et recouvrement très faible), espèce présente à l'état d'individus abondants, mais à faible recouvrement ; espèces présentes à l'état d'individus abondants, recouvrement voisin de 5%, espèce dont le recouvrement peut atteindre le tiers du relevé (5-35%), espèce dont le recouvrement occupe entre 1/3 et 2/3 du relevé (35 à 65%), espèce dont le recouvrement occupe plus des 2/3 du relevé (plus de 65%).

de la structure générale de la végétation (analyse qualitative) et observations sur la relation thème-substrat en tenant compte de la variabilité spatiale des signatures spectrales liées aux facteurs d'environnements.

Couvert forestier et végétation spontanée définis par photo- interprétation manuelle à partir des photographies aériennes de 1982 du Plateau de Falticeni

Cartographie des principales formations végétales mises en relation
avec les données climatiques (1966-2000) dont le régime explique
partiellement la distribution spatiale et la présence des espèces dominantes

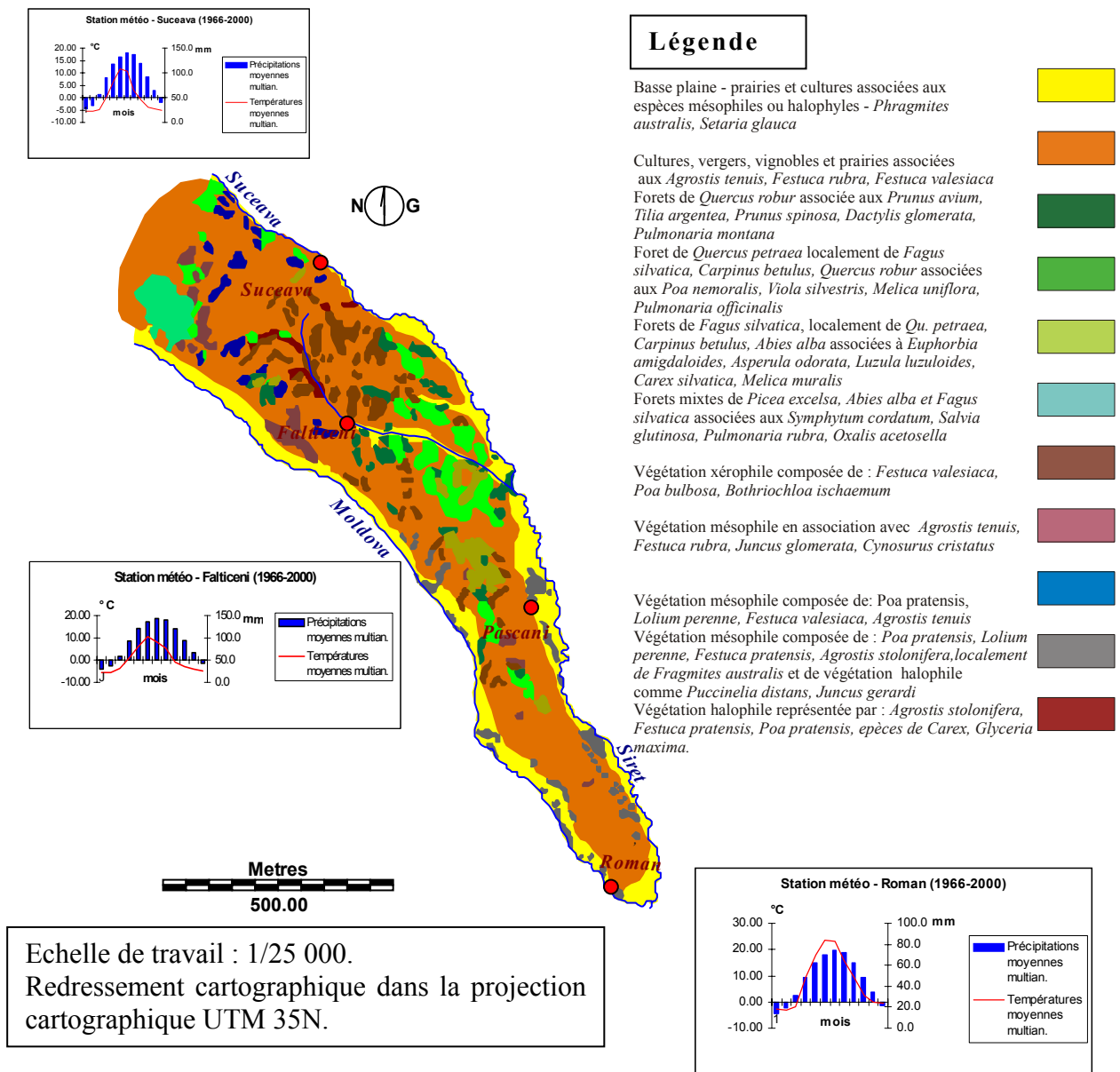


Figure 36.

On rappelle que toutes les catégories de données exogènes, sauf celles extraites des matériaux cartographiques sont traitées, à la fois, à l'échelle du plateau ou des communes par la méthode de krigéage⁷³. Le krigéage est une méthode stochastique d'interpolation (méthode optimale d'interpolation) fondée sur l'hypothèse que deux points voisins ont plus de chance d'avoir des valeurs similaires pour une propriété donnée que des points éloignés (théorie des variables régionalisées, Matheron, 1970).

Données exogènes	Leur utilisation en télédétection
• Données géologiques (couche de surface)	• Typologie des paysages • Déterminent la couleur des sols et donc contribuent à la formation des signatures spectrales des objets
• Données hypsométriques (principales courbes des niveaux)	• Typologie des paysages
• Données climatiques (ensemble du plateau, par communes)	• Typologie des paysages • Comparaisons et interprétation des températures radiatives des objets au sol (traitement sur le thermique, canal 6 Landsat) • Interprétation de l'intensité de l'activité chlorophyllienne (à partir de l'évapotranspiration réelle - traitement sur l'indice normalisé de

⁷³ Recherche d'un ou de plusieurs estimateurs traduisant le plus fidèlement possible les variations dans un ensemble de données, et construction d'une courbe (ou d'une nappe) approximant l'ensemble des données.

	végétation)
• Données sur la végétation	• Etablissement de la nomenclature de l'occupation du sol et de l'utilisation du territoire • Identification des classes végétales
• Données pédologiques	• Contribuent à la formation des signatures spectrales • Identification des classes de l'occupation du sol
• Données démographiques	• Typologie des paysages • Interprétation des organisations spatiales à différents laps de temps
• Données sur l'habitat humain	• Typologie des paysages • Interprétation de l'évolution de l'occupation du sol à différents laps de temps
• Données économiques	• Etablissement de la nomenclature de l'utilisation du territoire • Interprétation de l'évolution de l'utilisation du territoire à différents laps de temps
• Données foncières (vieux cadastres)	• Terme de comparaison et interprétation des structures agraires post-communistes

Tableau 7 : Utilisation des données exogènes en télédétection

En conclusion, dans notre approche paysagère, on a adopté une démarche générale où l'on reconnaît les limites des données utilisées et

celles des unités spatiales qui leur sont associées. En somme, la démarche mise en œuvre est celle heuristique (dans le sens étymologique du mot), spatiale, globale, hiérarchique - ascendante/descendante (autant dans le sens statistique que du général au particulier et du particulier au général) en passant par les démarches et les méthodes caractéristiques à divers types de données et à chaque type de système d'observation du paysage : système d'observation du satellite, système d'observation statistique, système d'observation de terrain, système d'observation historique et système d'observation socio-économique, système d'observation cartographique (fig. 45). On y met en œuvre des démarches à la fois différentes et complémentaires.

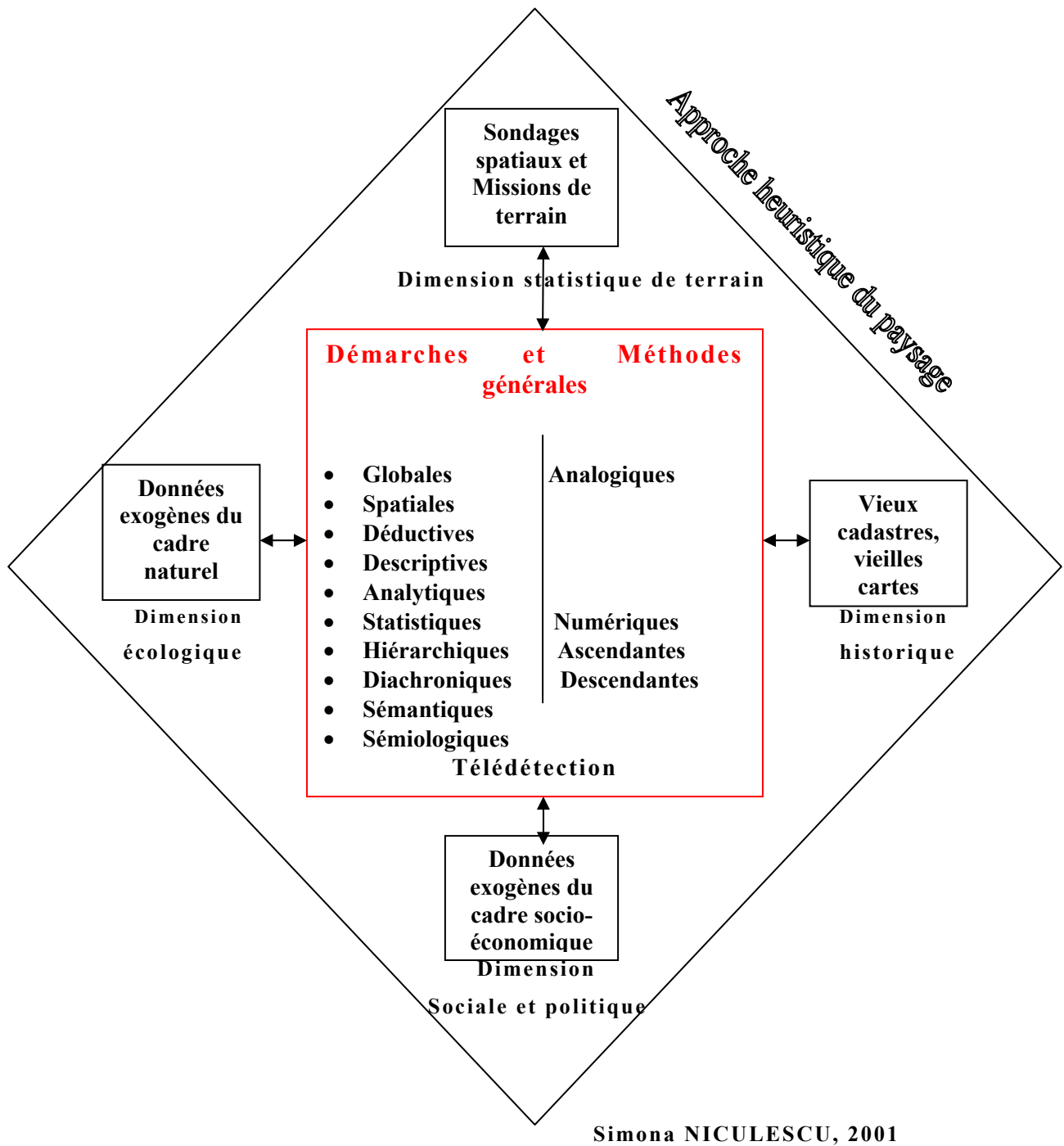


Figure 37 : Démarches et méthodologies développées

9. Vers une base de données et vers un système de génération d'informations spatio-temporelles du Plateau de Falticeni

L'intérêt de la cohabitation SIG-télédétection n'est plus à démontrer aujourd'hui (Ehlers, 1989). Cette association doit être comprise dans deux sens : enrichissement des SIG par l'imagerie et, inversement, possibilités accrues d'extraction des informations de l'imagerie par son intégration dans les SIG.

Les SIG sont donc une occasion de s'interroger sur ce que les structures de représentation du monde (engendrées par le stockage de l'information) impliquent. Les SIG sont, avant tout, des modèles de données. Les SIG en eux-mêmes sont une modélisation du réel, une représentation du monde. Il y a aussi des modèles d'organisation de l'information⁷⁴. En *vectorel*, on décrit des objets qui s'inscrivent dans l'espace : le but n'est pas de décrire l'espace, mais les objets qu'il contient. L'espace n'est pas le sujet comme dans le mode *raster* où l'on représente des surfaces géographiques en discontinu. L'analyse spatiale assistée par ordinateur nécessite la création d'une base de données contenant des couches d'informations monothématiques (chaque thématique est sur un niveau d'information). Chaque objet d'une couche possède un ou plusieurs attributs. L'avantage d'un stockage numérique est qu'il permet de construire des descripteurs topologiques explicites et

⁷⁴ Organisation des données : dans une base de données les informations sont décrites par deux niveaux d'informations : le niveau géométrique, qui donne leur localisation et le niveau descriptif qui fournit leur nature et leurs caractéristiques. Les objets géométriques sont reliés entre eux par des relations topologiques. La géométrie est portée par les sommets et les arcs par des listes de coordonnées (x, y). Le niveau descriptif – les objets géographiques sont repartis par classes. Une classe se caractérise par un nom et une liste d'attributs, de sorte que chaque objet de la classe prenne une valeur pour chaque attribut parmi un ensemble de valeurs possibles.

d'arriver à une assistance machine dans l'analyse spatiale⁷⁵. Les SIG sont donc bien des outils de l'analyse spatiale⁷⁶.

On retient dans les SIG (mode vecteur) deux niveaux d'approche : la production cartographique qui est une approche strictement descriptive de l'espace. Dans ce cas, la base de données n'est pas véritablement exploitée, on effectue simplement une production cartographique de meilleure qualité que celle manuelle. On note aussi comme avantages : les sorties cartographiques peuvent être faites à différentes échelles, la base de données peut être réutilisée et actualisée. Le SIG peut recevoir et stocker les résultats, d'où ils pourront intervenir dans des nouvelles recherches.

Le deuxième niveau concerne la gestion des données spatiales (système de gestion de base de données SGBD), à l'aide de requêtes (dans la base de données, isoler un thème et le visualiser avec les caractéristiques statistiques). On a mis en valeur, comme requêtes dans la base de données dont le résultat est transcrit spatialement :

- afficher l'extension du couvert forestier en 1925 et en 1974 sur le Plateau de Falticeni (fig. 38 et fig. 39) ;
- afficher l'extension du bâti et du réseau de communication et de transport en 1925 et en 1974 (fig. 40, 41, 42).

Nous proposons une méthode pour aborder cette différenciation des espaces ruraux et pour définir les systèmes ruraux localisés qui composent une région. Elle consiste à analyser les structures spatiales produites par les facteurs naturels et économiques du développement régional. On cherche à identifier un niveau d'organisation pour prendre

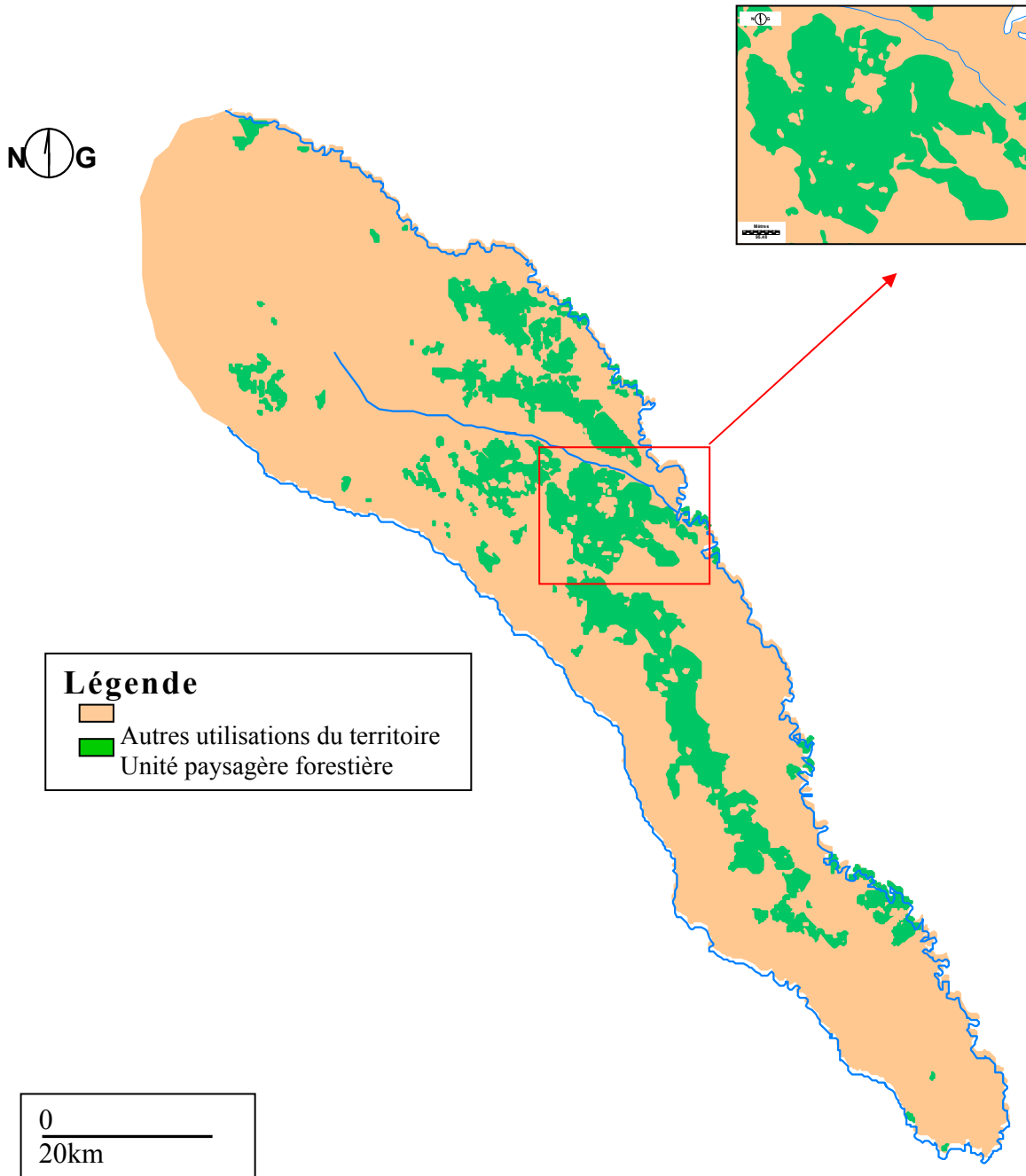
⁷⁵ Chaque information géographique a trois composantes : description géométrique (à trois primitives – point, ligne, polygones), description attributaire (texte et numérique) et ensemble des relations spatiales (appartenance, inclusion et voisinage).

⁷⁶ L'analyse spatiale observe le monde en tenant compte des positions relatives pour comprendre les modalités d'interaction entre les lieux et les distributions spatiales.

en compte le fonctionnement des espaces dans leur complexité et de ne pas couper des réseaux de relation.

Reconstitution de la cinématique du couvert forestier sur le Plateau de Falticeni
Extraction du contour du couvert forestier à partir des cartes
topographiques allemandes de 1925

Echantillon test de l'étude
comparative de la superficie forestière de
1925 à 1998
Forêt localisée au sud du Somuz - 1925



Echelle de travail : 1 / 200 000.
Redressement cartographique dans la projection
cartographique UTM 35N.

Reconstitution de la cinématique du couvert forestier sur le Plateau de Falticeni

*Extraction des couverts forestiers à partir des cartes topographiques de 1975,
taux d'occupation forestier et volume d'exploitation du bois par communes en
1985*

*Echantillon test de l'étude comparative
de la superficie forestière de 1925 à 1998
Forêt localisée au sud du Somuz*

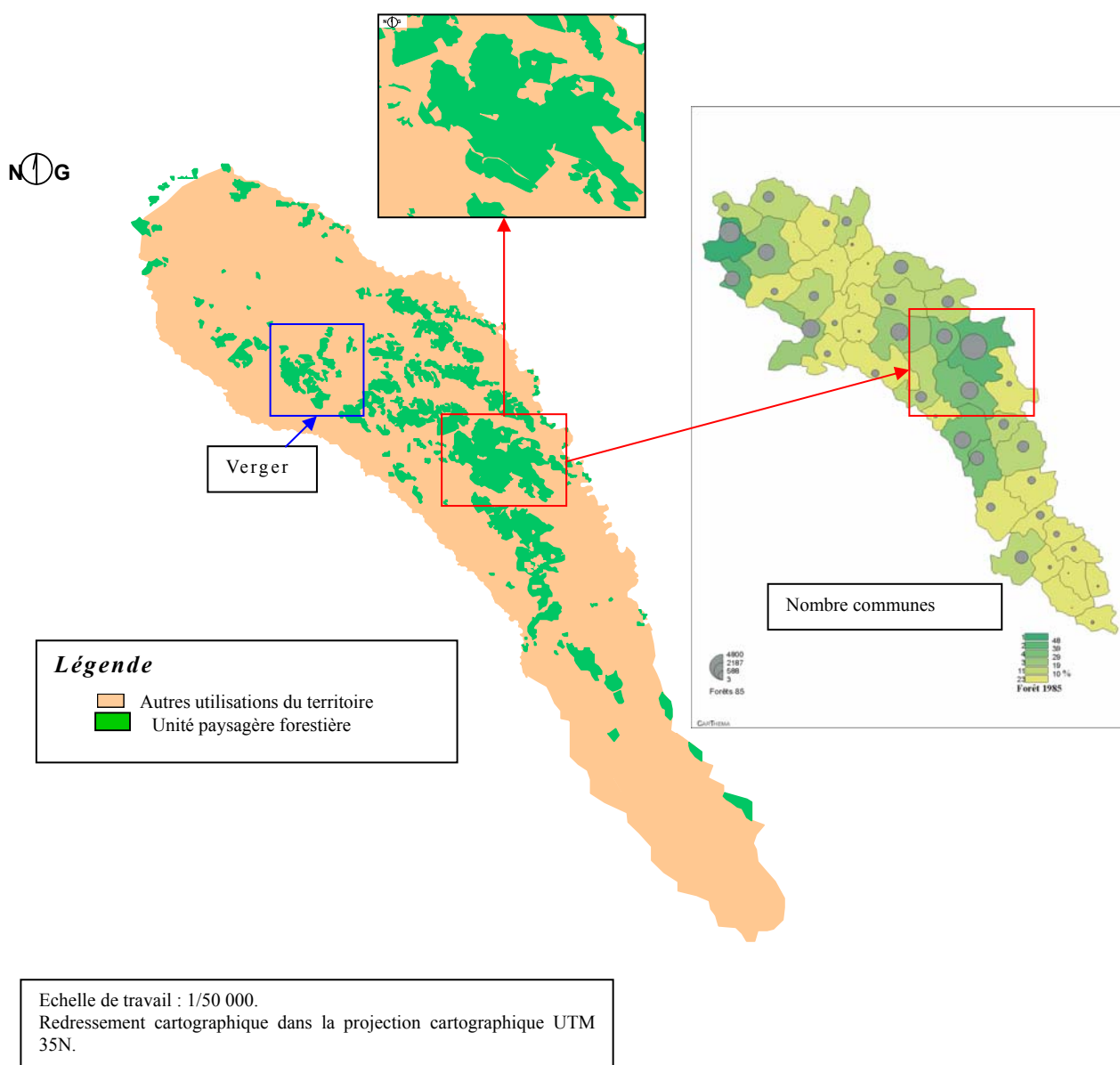
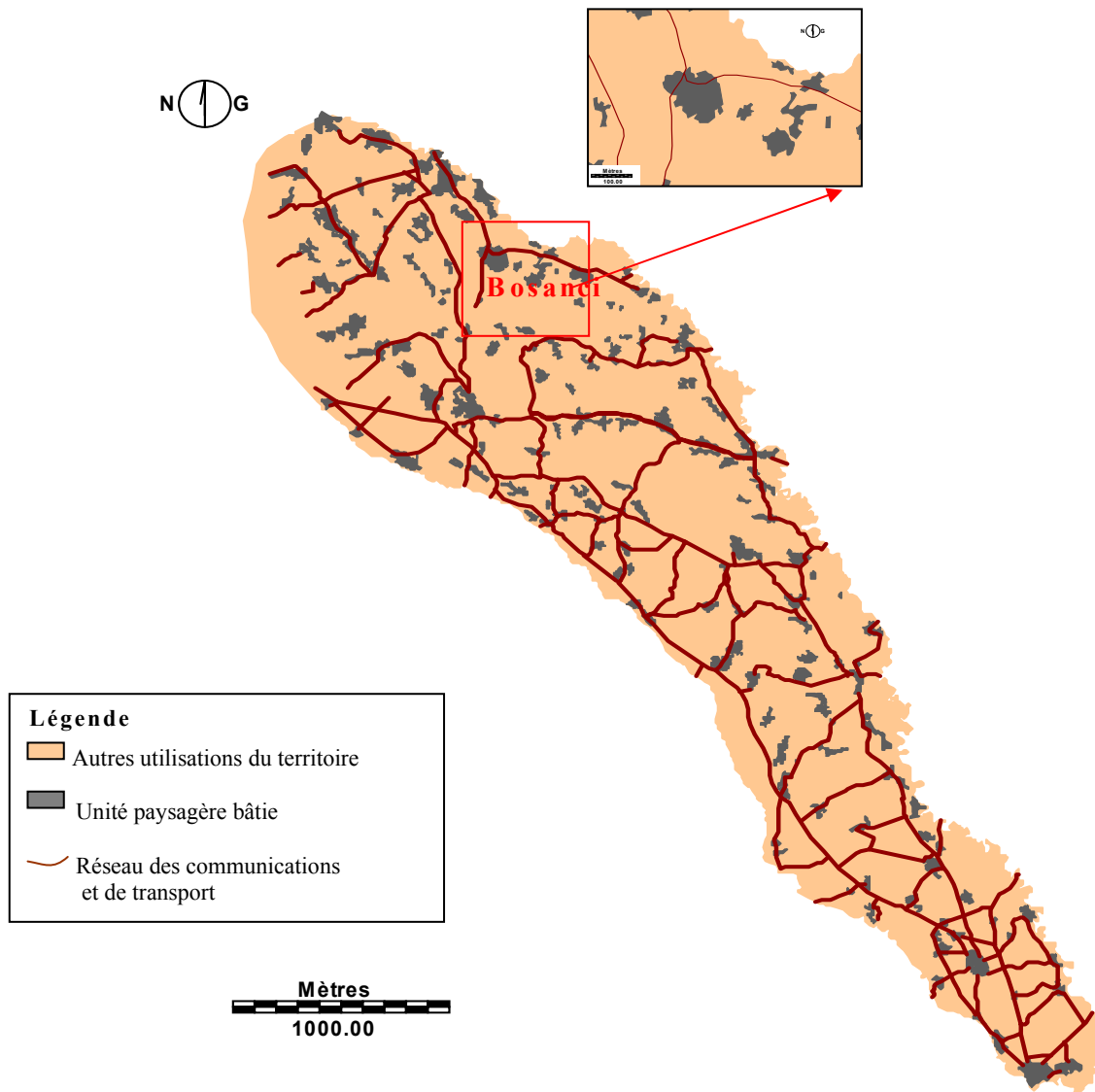


Figure 39.

**Reconstitution de la cinématique de l'unité paysagère bâtie sur le Plateau
de Falticeni**

***Extraction de l'unité paysagère bâtie à partir des cartes topographiques
allemandes de 1925***

*Echantillon test de l'étude comparative
du paysage bâti de 1925 à 1998
Village de Bosanci – 1925*

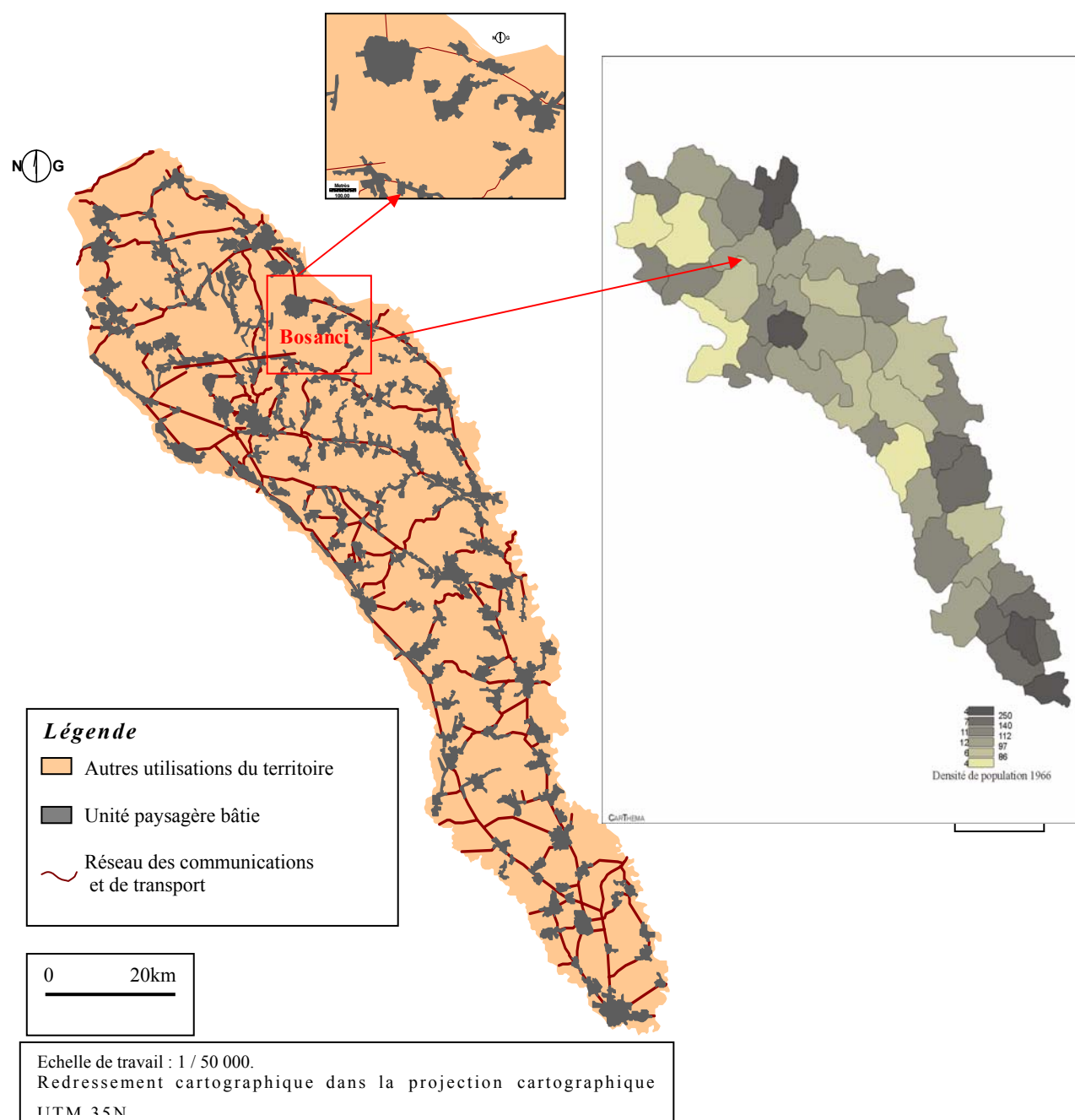


Echelle de travail 1 / 200 000.
Redressement cartographique dans la projection
cartographique UTM 35N.

**Reconstitution de la cinématique de l'unité paysagère bâtie sur le Plateau
de Falticeni**

*Extraction de l'unité paysagère à partir des cartes topographiques de 1975 et
par unités administratives (communes) à partir des données statistiques de
1966 sur la densité de population*

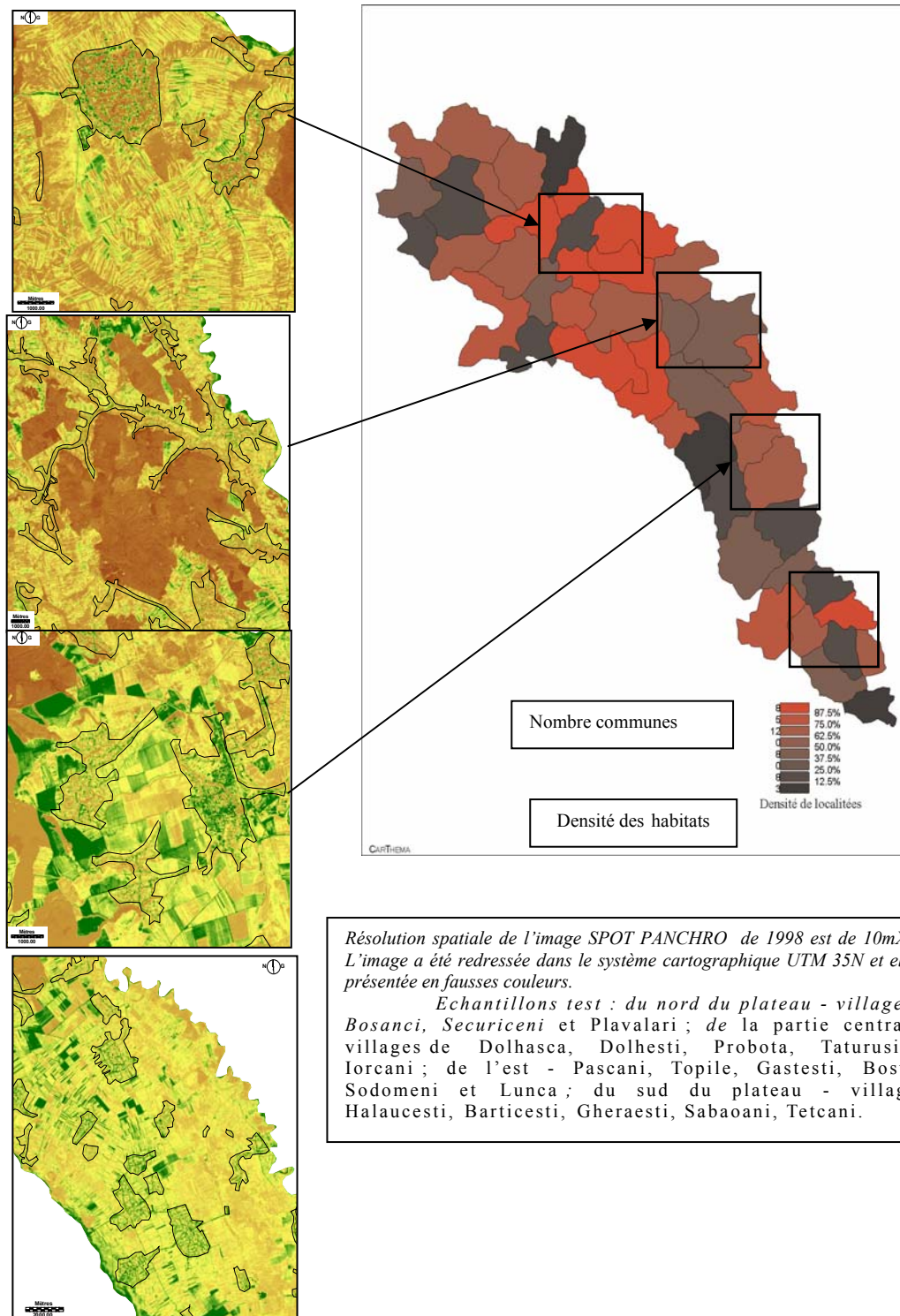
*Echantillon test de l'étude comparative
du paysage bâti de 1925 à 1998
Village de Bosanci – 1975*



Reconstitution de la cinématique de l'unité paysagère bâtie dans le Plateau de Falticeni

Zonage et photo-interprétation par échantillons test de l'unité paysagère à

partir d'une image SPOT PANCHRO de 1998 en fausses couleurs et taux
d'occupation des habitats par communes à partir des données statistiques de
1992



Une analyse en terme systémique fournit les éléments d'appréhension du fonctionnement des systèmes ruraux, en terme de trois grandes tendances : de concentration urbaine, de spécialisation industrielle et agricole et de marginalisation. On peut donc énoncer un certain nombre d'indicateurs statistiques susceptibles de caractériser ces fonctionnements. On projette ces données statistiques dans l'espace des communes. Information obtenue est localisable par des unités administratives et ce type d'inventaire fournit une bonne information sur les structures, le cheptel, les techniques agricoles et le machinisme.

L'effet ville s'exprime par un modèle centre - périphérie avec gradient diminuant en fonction de la distance au centre. On constate aussi l'extension de l'aire d'influence des villes. « L'effet » axe de communication se manifeste fortement ainsi que « l'effet » vallée par lequel on met en évidence la réalité des vallées et leur importance concernant le peuplement d'une région.

La possibilité d'associer des données dites naturelles et des données non - naturelles devrait permettre de mieux qualifier l'espace. On souligne aussi quelques avantages du mode vecteur : grande précision graphique, stockage d'information facile pour l'implantation de la topologie. Il s'agit finalement d'une base de données relationnelle, structurée, intégrant des relations topologiques.

Toujours dans le mode vecteur on a digitalisé directement sur une image SPOT P le contour du bâti (1998) (fig. 42) ou on a superposé sur une image, une couche vecteur (par exemple, le contour du plateau et les frontières de la Roumanie, fig. 1). Il s'agit de la superposition des éléments vecteurs (couches informationnelles sur une image).

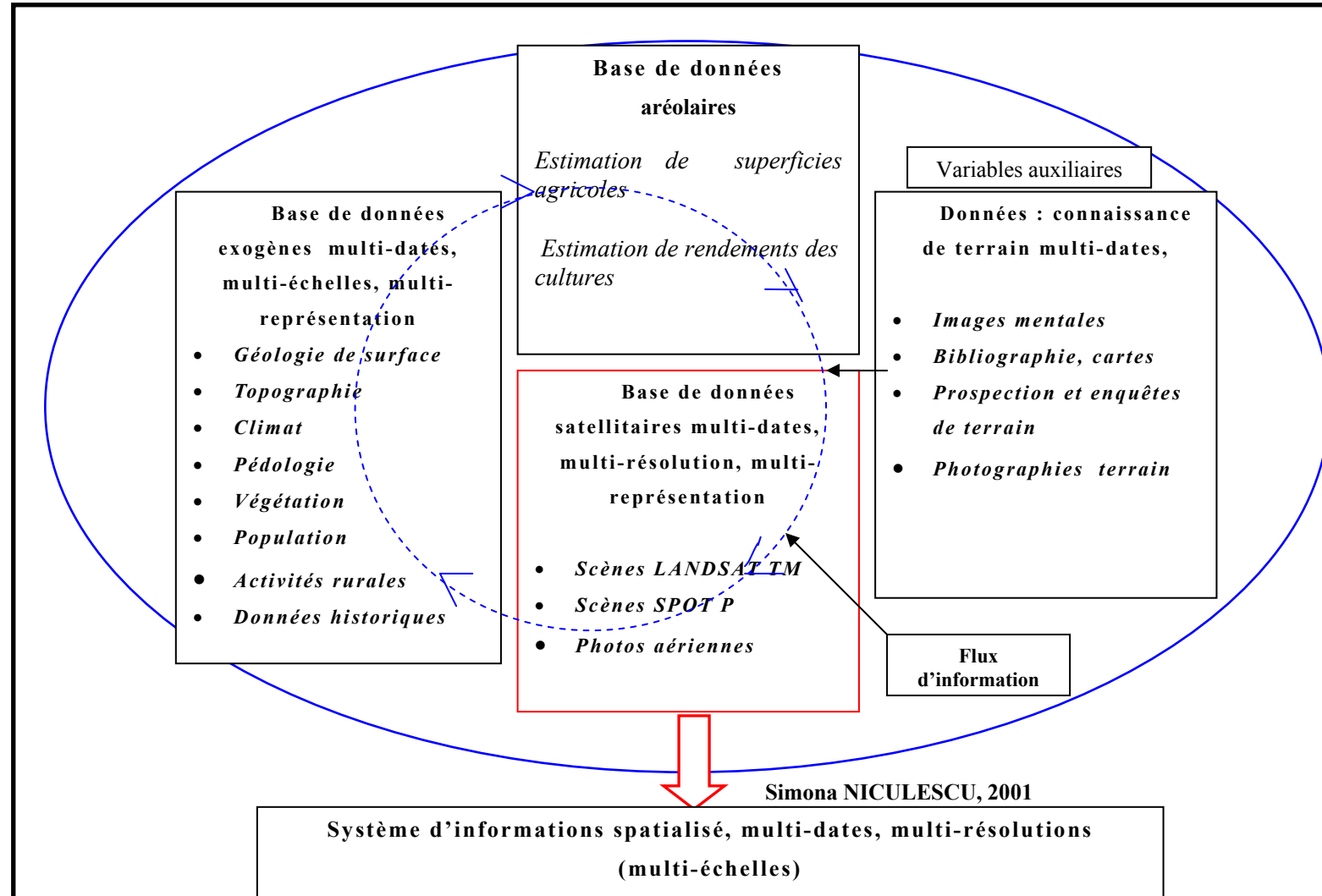
Les logiciels offrent des passerelles entre les deux modes. On remarque que le passage du mode vecteur vers le mode raster est plus facile par rapport au passage du raster au vecteur qui est plus

compliqué. On mentionnera le logiciel ARC/INFO qui réalise bien le passage du raster vers vecteur.

Combiner des informations de nature et de sources différentes : documents plans cadastraux (uniquement le contours des lots) ; cartes topographiques, cartes géologiques, pédologiques, images satellitaires (mesures de réflectance à traiter soit par classification supervisée, pour identifier les cultures, soit par la morphologie mathématique pour caractériser des structures), données d'observation sur le terrain (segments fermés), des données de gestion, issues des pratiques des agriculteurs ou des agronomes (fertilité d'un sol) ; des données de gestion, issues des pratiques des agriculteurs sur leur espace (travail du sol, rotation, réserve forestière).

Cette tentative de créer une base de données pour le Plateau de Falticeni vient dans la perspective de mieux gérer un territoire, de mieux le maîtriser et de le mettre en valeur, peut-être pour les aménagements territoriaux à venir (fig. 43). En effet, gérer l'espace, c'est répondre à deux types de questions (Desfontaines, Lardon, 1990) : élaborer des références, comprendre des processus, décomposer des mécanismes, pour accumuler des connaissances et les approprier.

Système de génération d'informations spatio-temporelles (figure 43)



10. Conclusion

Dans cette partie de notre approche paysagère on a présenté par la télédétection la dialectique paysage/télédétection, leur intersection méthodologique, les variables paysagères qui peuvent être abordées par la télédétection, les mesures que la télédétection apporte à ces variables, les données choisies, les démarches et les méthodes mises en œuvre. La télédétection constitue un outil privilégié de notre approche car elle permet de donner une vision globale, hiérarchique avec plusieurs niveaux de mesures aux différents états de la surface de notre zone d'étude : le Plateau de Falticeni. Elle se conjugue avec les sondages spatiaux et contribue en tant que base de sondage au remplacement de la statistique de type comptable⁷⁷ à une statistique spatiale plus fiable (comme dans la plupart des pays d'Europe Centrale et de l'Est).

⁷⁷ Les comptables historiquement sont les premiers. Leur objectif est de connaître la propriété et d'estimer la valeur de la terre en fonction des qualités du sol et de l'utilisation du sol. *La statistique économique et sociale* est la première qui s'inscrit dans un objectif d'état régulier et de l'utilisation du sol et des ressources végétales et animales. Il s'agit de fournir, par unité administrative (commune, département) ou par région agricole et forestière, une statistique de l'utilisation du sol, des cultures et des forêts en superficie et volume de production. La seconde emploi la cartographie de l'utilisation du sol comme base de sondage (et/ou à la stratification) et a comme objectif d'obtenir des productions (ex. volume de bois exploitable), des enquêtes de productivité ou des études socio-économiques.