

La détermination statistique de l'utilisation du territoire : de la photographie aérienne à la télédétection

Journal de la société statistique de Paris, tome 132, n° 2 (1991),
p. 31-70

http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1991__132_2_31_0

© Société de statistique de Paris, 1991, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (<http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

ARTICLES

**LA DÉTERMINATION STATISTIQUE
DE L'UTILISATION DU TERRITOIRE :
DE LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE
À LA TÉLÉDÉTECTION**

La présente étude résulte de la réunion d'un texte de base établi par Michel Lenco, administrateur de l'INSEE, chargé de mission Télédétection auprès du Délégué à la Qualité de la Vie (Ministère de l'Environnement), sur l'usage de la télédétection dans le domaine de l'environnement, et de textes de Philippe Fournier et Jean-Claude Porchier, ingénieurs en chef en agronomie au Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (SCEES) du Ministère de l'Agriculture.

La synthèse de ces écrits est due à Gérard Théodore, inspecteur général honoraire de l'INSEE.

La connaissance de la répartition par grandes catégories de cultures du territoire constitue l'une des données fondamentales de la statistique agricole. A court terme, dans le cadre de la campagne agricole, cette donnée permet de cerner la conjoncture et les potentialités immédiates de production ; à moyen terme, l'étude des variations annuelles des composantes de cette répartition fournit des indications sur les évolutions absolues et relatives, et donc sur les tendances de l'occupation des sols.

Dans une première partie sont analysés les outils statistiques mis en œuvre jusqu'aux années 1960, et notamment la photographie aérienne développée depuis cette date. Dans une seconde partie, sont présentées les approches nouvelles testées depuis 1980, facilitées par l'essor de la télédétection satellitaire.

Les développements qui suivent résultent d'emprunts et de regroupements de divers textes, annotés et complétés afin d'assurer leur actualité. Parmi eux, il y a lieu de citer :

- Etude sur l'utilisation du territoire, Méthodologie, Résultats 1969-70-71, Philippe Fournier, Supplément série Etudes, n° 104.

- Utilisation de la télédétection spatiale pour l'étude de l'environnement, Michel Lenco, Séminaire de l'Office Statistique des Communautés Européennes, 29 septembre-1^{er} octobre 1986.
- Premiers résultats sur l'utilisation des terres à l'échelle départementale à partir des données du satellite SPOT, R. Pastorelli et J.-C. Porchier, Cahiers de statistique agricole, n° 3/6, 1989.

On pourra consulter en outre la bibliographie sommaire suivante :

- L'utilisation du territoire en 1989 et son évolution sur la période 1982 à 1989, Cheikh Abdelli, Agreste Agriculture, n° 15, Août 1990.
- Télédétection et statistique agricole, P. Fournier, Cahiers de statistique agricole, n° 4/6, 1982.
- Enquête sur l'utilisation du sol par la méthode des segments, Ardèche 1982, M. Touzelet, Cahiers de statistique agricole.
- Observation, terrain et télédétection, P. Fournier et J. Meyer-Roux, Cahiers de statistique agricole, n° 1/6, 1985.
- La télédétection dans le programme d'enquêtes du SCEES, J.-C. Porchier, Communication au Colloque de Varèse, 10-11 oct. 1989.
- Le projet du centre commun de recherches européen d'ISPRA (CCR), Scot Conseil, B. Pons, A. Husson, M. Sharman.
- La télédétection appliquée aux statistiques agricoles, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Commission Economique pour l'Europe, Groupe d'étude des statistiques alimentaires et agricoles en Europe (8-11 juillet 1991).

I. HISTORIQUE RAPIDE DES STATISTIQUES D'UTILISATION DU TERRITOIRE

On peut faire remonter à Charlemagne le premier essai d'organisation scientifique d'enquêtes statistiques. Signalons pour mémoire les essais d'autres illustres prédécesseurs tels que Vauban au cours du 17^{ème} siècle puis de Lavoisier en 1790 pour déterminer la répartition du territoire et l'évaluation des terres utilisées par l'agriculture.

L'Empire tente d'organiser une statistique plus complète par l'établissement de tableaux et questionnaires destinés à recueillir les éléments d'une statistique de la France, les documents étant établis par les préfets. Ces évaluations, d'ailleurs très imparfaites et en réalité très incomplètes sont les seules sources disponibles jusqu'en 1840 qui marque la date de la première enquête dont le document de base était un questionnaire communal comprenant un certain nombre de questions.

La date de 1846 est à signaler car elle correspond à la diffusion des renseignements tirés du *cadastre* (sauf pour la Corse).

Jusqu'en 1902 les *commissions communales*, constituées en 1840, fournissaient annuellement les estimations des superficies affectées aux principales

cultures (« enquête annuelle »), tous les dix ans des estimations de l'ensemble de la production agricole et des faits les plus importants concernant l'économie rurale (« enquête décennale »).

Le décret du 27 Août 1902 réorganise la statistique agricole en lui donnant comme base l'établissement dans chaque commune d'un registre de culture dont la confection est confiée à une commission communale. Ces commissions communales se réuniront jusque dans les années 1950 après avoir été remplacées durant la période 1941-1946 par des déclarations individuelles obligatoires qui, totalisées, fournissaient la base de la statistique agricole.

Il ressort que les besoins d'une statistique annuelle de répartition du territoire, s'ils sont apparus depuis très longtemps, n'ont pu être satisfaits que de façon très imparfaite, puisque par évaluation plus ou moins subjective, depuis 150 années environ.

L'enquête annuelle « utilisation du territoire » sans avoir recours à des déclarations ou à des estimations répond aux besoins qui se faisaient sentir, présente tout son caractère d'originalité et vient compléter les résultats d'enquêtes spécifiques ou d'enquêtes de structure ainsi que les dépouillements de fichiers ou déclarations administratifs.

1.1 Différentes sources utilisables pour une statistique d'utilisation du territoire

La liste ci-dessous ne prétend pas être exhaustive, des différentes enquêtes ou des différents fichiers utilisables pour l'amélioration de l'estimation de l'utilisation du territoire :

- cadastre;
- enquêtes agricoles de structure et recensements généraux de l'agriculture que le chapitre suivant développe quelque peu;
- inventaire forestier national. Une mention très particulière doit être faite pour cette enquête, utilisant également la photographie aérienne comme support, bouclant l'ensemble du territoire départemental, et partant national, mais dont la nomenclature est spécialement orientée sur l'occupation forestière du sol;
- cadastre viticole et déclarations annuelles de récolte pour la vigne;
- contrats de cultures (betteraves, pommes de terre industrielles, lin, plants et semences certifiés, etc...);
- fichiers de culture des comités économiques « fruits et légumes ».

1.2 Les enquêtes agricoles de structure et les recensements généraux de l'agriculture

Depuis 40 ans, ont été réalisés :

- le recensement général de l'agriculture en 1955

- l'enquête de structure « échantillon-maître » au 1/10 en 1963
- l'enquête de structure « communautaire » au 1/5 en 1967
- les recensements généraux de l'agriculture en 1970, 1980 et 1990.

Ces enquêtes dont *l'unité statistique est l'exploitation agricole*, fournissent soit exhaustivement soit par sondage, des estimations des superficies rattachées aux seules exploitations agricoles. Ce domaine recouvre en quasi-totalité la superficie agricole utilisée, une part importante des landes et friches, mais un pourcentage moindre des superficies en forêts et encore plus faible du territoire non agricole ni forestier.

Rappelons qu'un recensement général de l'agriculture recouvre un univers se rapprochant du « secteur agricole » mais ne recouvrant pas intégralement la « branche agriculture ».

II. UTILISATION DE LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE

2.1 Les enquêtes « contrôle de surface » et utilisation du territoire

L'enquête « contrôle de surface » est à l'origine même de l'enquête utilisation du territoire.

Les commissions communales dont il a été question précédemment ont été réinstituées en 1946. A dater de cette époque ont été institués des contrôles en profondeur sur les surfaces à l'aide de relevés exhaustifs de l'ensemble des parcelles des communes, en notant leur superficie et l'occupation du sol, en s'aidant des documents cadastraux. Environ 1/10 des communes devait être couvert chaque année, ce qui aurait permis une couverture intégrale du département en 10 ans environ. Ces contrôles devaient permettre de redresser les évaluations faites par les commissions communales.

En 1955 eut lieu le recensement général de l'agriculture qui a été réalisé non pas partout par interrogatoire direct des exploitants par un enquêteur mais aussi par convocation des exploitants en mairie. Un contrôle des déclarations du recensement était lancé en 1956 par passage sur le terrain en ratissant toujours à l'aide des *documents cadastraux*, l'ensemble du territoire de *certaines communes* tirées dans un échantillon national.

L'actualisation au niveau national des résultats du RGA se réalise par la suite en opérant non plus sur des communes entières mais sur *une feuille de plan tirée au sort* parmi l'ensemble des feuilles des communes-échantillons. Les départements avaient alors la possibilité, afin d'avoir des résultats au niveau départemental, de renforcer l'échantillon primaire de communes dans lequel se faisait le tirage des plans cadastraux. Cette enquête supposait, pour qu'elle soit menée à bien, que les *plans cadastraux soient à jour*, et celle n'était donc menée en fait que sur les communes à cadastre rénové (l'ordre de rénovation des communes ne conduisait pas à un échantillon aléatoire de communes) ; elle exigeait également des relevés précis des superficies sur le terrain, la réalisation

de nouveaux tracés du parcellaire, les parcelles de culture ne correspondant pas forcément aux parcelles cadastrales.

L'enquête a donc évolué vers l'enquête d'évolution *en suivant chaque année les mêmes parcelles culturales de certains mêmes plans cadastraux*; ceci n'évitait pas l'extrapolation des superficies ni même le calcul de coefficients de redressement pour tenir compte du fait que l'échantillon de plans n'était pas réparti géographiquement sur l'ensemble du territoire départemental. L'analyse matricielle a été réalisée conjointement à partir de 1962 sur un *échantillon de points plaqués sur ces mêmes plans cadastraux*. La *photographie aérienne* a été utilisée à partir de cette époque non pas comme support nouveau d'enquête mais pour actualiser les feuilles de plan des communes à cadastre non rénové. A partir de cette idée la photographie aérienne a très rapidement supplanté le plan cadastral comme support d'enquête à partir de 1965.

L'enquête par photographie aérienne et le sondage par points devaient se généraliser en 1969 à l'ensemble des départements.

2.2 Les originalités de l'enquête utilisation du territoire

La première originalité consiste en l'utilisation de la photographie aérienne, support utilisé également pour d'autres applications telles en particulier que l'inventaire forestier national qui constitue une opération de très grande envergure, mais aussi pour certaines études locales d'aménagement ou de recensement.

La deuxième réside dans le fait que la photographie est utilisée non pas pour elle-même, pour la photo-interprétation par exemple, mais uniquement comme document le plus commode ou le plus apte à un repérage précis sur le terrain.

La troisième vient de la méthode de sondage :

- sondage au 1^{er} degré : tirage d'aires, c'est-à-dire sondage aréolaire relativement peu utilisé ou pour des applications très spécifiques;

- sondage au 2^{ème} degré : tirage de points, c'est-à-dire sondage par points.

Si l'une ou l'autre des deux méthodes de sondage se rencontre pour telle ou telle enquête, l'utilisation simultanée pour une seule enquête présente une certaine nouveauté.

III. LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE

L'Institut Géographique National Français a procédé à partir des années 1940 à l'établissement d'une couverture de la France par photographies aériennes. Actuellement la couverture est complète et a été renouvelée, depuis, plusieurs fois après les premières missions.

Il existe de nombreux types de prises de vue mais ne sera abordé ici que la présentation des photographies utilisées pour l'enquête utilisation du territoire.

En 1965, date à laquelle a été tiré le premier échantillon de photographies, le choix s'est porté sur les photographies au 1/4 000 à partir de missions au 1/25 000 format 19 × 19. Depuis cette date la couverture a été complétée mais le plus souvent, surtout depuis 1967, à partir de clichés 24 × 24. A partir de 1975 et jusqu'en 1989, cet échantillon a été progressivement, et en partie, renouvelé à partir de missions IGN au 1/30 000 avec un agrandissement au 1/5 000, format 50 × 50. Un nouveau renouvellement complet est en cours d'achèvement pour une utilisation en 1991 à partir de missions au 1/20 000, format 50 × 50, échelle 1/5 000.

Cet échantillon de photographies aériennes est tiré au niveau national selon une méthode systématique : le territoire national a été divisé en environ 4 700 mailles carrées de 12 km × 12 km. Au sein de chaque maille, une ou plusieurs photographies standard de la couverture aérienne réalisée par l'Institut Géographique National ont été tirées systématiquement, pour parvenir à un total de 15 500 photographies. On appellera, dans les développements ultérieurs, « photographie » la partie utile de la photographie aérienne.

3.1 Plan de vol – mission photographique

Pour assurer la couverture photographique d'un secteur l'avion suit des lignes de vol parallèles en prenant sur chaque ligne une série de photographies successives constituant une bande. Les plans de vol sont établis par « missions » couvrant une ou plusieurs feuilles de la carte au 1/50 000. (La France est couverte d'environ 1 100 de ces feuilles qui chacune correspond à un secteur limité par 4/10 de grade en longitude et 2/10 de grade en latitude).

Le plus souvent la ligne de vol s'effectue dans les directions Est-Ouest ou Ouest-Est, plus rarement dans les directions, Nord-Sud ou Sud-Nord.

Sur chacune des feuilles de la carte au 1/50 000 sont matérialisées les limites des photographies faisant partie du plan de vol. Les documents appelés « tableaux d'assemblage » sont des photographies en réduction de la présentation de ce plan de vol.

3.2 Recouvrements moyens

Le plan de vol correspondant à une mission est calculé pour que les photographies qu'il comprend présentent entre elles des recouvrements :

- recouvrement sur la bande : de 55 à 60% en moyenne;
- recouvrement entre bandes : de 15 à 20% en moyenne.

Superficie utile d'une photographie

Compte-tenu de recouvrements moyens pour une même mission de :
 60% sur la bande,
 20% entre les bandes,

on peut déterminer une « partie utile » moyenne par photographie, telle que l'on peut dire en première approximation que ces « parties utiles » constituent une partition du territoire : tout point du territoire national appartient à une « partie utile » et une seule.

L'échantillon de l'enquête utilisation du territoire est un échantillon de points tirés à deux degrés. Dans un premier degré on tire des « parties utiles » de photographies, dans un deuxième degré on tire des points à l'intérieur de ces « parties utiles ».

3.3 Le tirage des photographies - échantillons

Dans le cas le plus général *le tirage* des photographies a été effectué en 1965 ou 1966 **au niveau départemental**. Un nombre fixe de 100 photographies avait été retenu initialement pour des considérations de coût et de charge d'enquête. Cet échantillon devait être tiré de façon à balayer toute la superficie du département.

Si on trace sur la carte départementale un quadrillage dont la maille est calculée par $a = \sqrt{\frac{A}{100}}$ (A étant la superficie totale départementale) il y a une probabilité de fortes chances pour qu'il y ait une centaine de points environ de ce quadrillage intérieurs aux frontières départementales quel que soit leur tracé.

L'ensemble des « parties utiles » constituant une partition du territoire on retient la photographie sur laquelle tombe un point de ce quadrillage, à condition que ce point soit compris dans les frontières départementales.

Dans la pratique la désignation des photographies s'effectue en utilisant les tableaux d'assemblage, photographies de format réduit de la carte au 1/50 000, sur lesquels sont matérialisées les limites de couverture des photographies aériennes. La maille $\sqrt{\frac{A}{100}}$ est calculée pour chaque département puis ramenée à l'échelle des divers tableaux d'assemblage. Le quadrillage est centré à partir d'un point origine tiré au hasard sur l'ensemble du territoire départemental et repéré sur le tableau d'assemblage correspondant.

Chaque point du quadrillage de tirage est matérialisé par une croix, les photographies dont on a retenu la partie utile sont entourées au crayon noir.

Les photographies sont réparties sur l'ensemble du département et à première vue on peut constater que, sauf sur les frontières, il n'existe pas de « trous » dans la répartition de l'échantillon. Dans certains départements toutefois il peut exister des « anomalies » du fait de la direction privilégiée de certaines catégories de territoire telles que les forêts ou les fleuves :

l'échantillon de photographies peut éventuellement soit prendre en écharpe toute la vallée où se pratique la polyculture ou l'arboriculture fruitière, soit au contraire l'éviter complètement. Le moyen de pallier cet inconvénient revient à renforcer ces zones particulières de façon à avoir un tirage en quinconce au lieu de le conserver linéaire.

Le tirage des photographies sur les frontières départementales fait l'objet de modalités particulières.

3.4 Le tirage des points – échantillons

a) Période antérieure à 1975

Sur chacune des « parties utiles » des photographies tirées au 1° degré a été tracé une grille de 72 points, points matérialisés par l'intersection des deux branches d'une croix et numérotées de 1 à 72. Les points sont répartis en 12 lignes de 6, l'intervalle sur le terrain entre deux points voisins étant de 300 mètres.

Cette grille est centrée sur la « partie utile » de la photographie et imprimée en interposant au moment de l'agrandissement du cliché photographique un calque sur lequel a été dessiné ce quadrillage de 72 points.

Le nombre de 72 points a été retenu pour deux raisons :

- si l'on voulait que la « partie utile » de la photographie soit entièrement balayée il fallait choisir une grille dont le nombre de lignes était le double de celui du nombre de points par ligne (hauteur et largeur de la partie utile sont dans le rapport de 2 à 1) ;

- l'observation sur le terrain de ces 72 points correspond environ à *une journée d'enquêteur*. (Le coût d'approche du secteur couvert par la photographie est proportionnellement beaucoup plus important que le coût de l'observation d'un point lorsque l'enquêteur se trouve déjà dans le secteur : de cette façon on peut augmenter le nombre de points sans augmenter de manière trop sensible le coût global d'enquête).

Dans le cas où la photographie n'est pas complète sur le département (photographie sur la frontière) on n'enquête que les points réellement sur le territoire départemental et non pas l'ensemble des 72 points.

Le tirage des points correspond à :

- un tirage assimilé à un tirage systématique à deux dimensions, les points étant équidistants sur les lignes, les lignes étant équidistantes entre elles ;

- un tirage exhaustif, sans remise ;

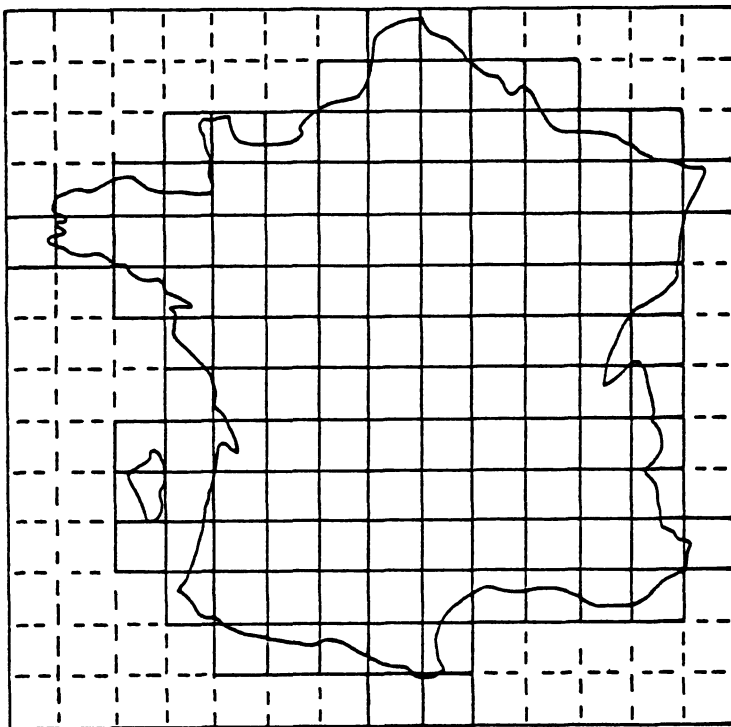
- un tirage équiprobable au niveau du point à l'intérieur d'une même photographie. Le tirage est équiprobable au niveau du département dans le cas seulement où le tirage des photographies est lui-même équiprobable.

b) Mise en œuvre depuis 1975

Le tirage systématique revient à reporter sur chacune des photographies aériennes une grille de 36 points à enquêter, alignés de 6 en 6. Les points correspondants à une photographie sont distants sur le terrain d'environ 300 m et désignent chacun une superficie d'environ 10 m² (cf. l'exemple de photographie aérienne ci-dessous).

L'échantillon ainsi constitué compte 15 449 photographies aériennes et 553 250 points situés sur le territoire métropolitain.

Schéma du maillage de base de TER-UTI

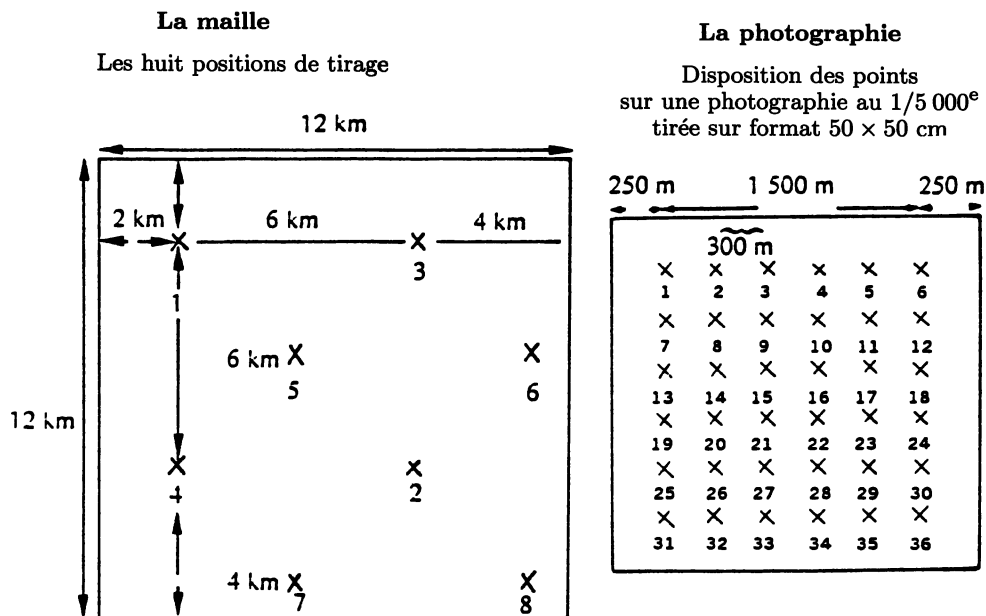


4 700 mailles pour la couverture du territoire, ...
8 positions de photographies par maille...
36 points à enquêter par photographie.

Pour des considérations dues au système de numérotation des photographies, la Corse a été inscrite dans la partie atlantique de la grille. L'échelle des mailles (12 km de côté) n'est pas respectée.

3.5 La stratification

L'échantillon initial départemental de photographies comportait une centaine de photos quelque soit la superficie et l'hétérogénéité du département.



Très tôt il est apparu que cet échantillon n'était pas satisfaisant.

Dans les départements ayant fait l'objet d'une stratification une part importante du territoire départemental n'offre qu'un intérêt limité au point de vue agricole ou n'est susceptible que de très faibles variations d'une année à l'autre. (Landes, forêts, prairies naturelles, territoires stériles, etc...). Les cultures des terres labourables sont par ailleurs très localisées et ne représentent qu'une faible part du territoire. La précision de l'enquête, tant pour l'étude de la répartition que pour l'étude de l'évolution est d'autant meilleure que le nombre de points est plus élevé. Ceci démontre bien *l'intérêt du renforcement en points-échantillons sur les zones à plus forte concentration agricole où les cultures sont d'une année sur l'autre soumises à l'assolement*. Ce renforcement permet en outre d'appréhender de façon beaucoup plus précise des cultures permanentes telles que les vergers dont les superficies totales sont relativement faibles mais qui sont très localisées dans des secteurs d'étendue limitée : en effet l'erreur aléatoire est très forte et il convient de renforcer l'échantillon pour accroître la précision. Ce renforcement peut être obtenu soit en augmentant le nombre de photographies, soit en observant plus de points par photographie.

La variance totale est égale à la variance inter photo plus la variance intra photo. Le plus souvent la variance inter photo est beaucoup plus élevée que la variance intra photo (la variabilité entre photographies est plus importante que la variabilité à l'intérieur d'une même photographie).

On peut avancer que la variance inter est inversement proportionnelle au nombre d'unités primaires (photographies) et que la variance intra est inversement proportionnelle au nombre d'unités primaires et au nombre moyen d'unités secondaires (points) par unité primaire.

Augmenter le nombre de points par photographie échantillon reviendrait à :

- assurer une meilleure représentativité d'un secteur géographique très limité;
- ne diminuer que la variance intra, elle-même la plus faible des variances;
- ne pas modifier la répartition géographique de l'échantillon primaire.

Augmenter le nombre de photographies-échantillons revient à :

- diminuer la variance inter et intra
- assurer une meilleure dispersion géographique de l'échantillon.

La deuxième solution est la plus coûteuse tant au point de vue investissement (achat de nouvelles photographies) que du point de vue enquête (coût d'approche de la photographie très élevé par rapport au coût de l'enquête du point) mais elle assure une meilleure estimation des superficies : aussi est-ce cette deuxième solution qui a été adoptée dans un certain nombre de départements.

3.6 *Le renouvellement de l'échantillon*

Les objectifs de l'enquête sont multiples mais l'un de ses intérêts réside dans le fait que l'on ait un échantillon permanent qui peut permettre de *suivre les mêmes parcelles dans le temps*. L'Institut Géographique National procède à de nouvelles missions au fur et à mesure des années, mais les nouvelles photographies ne se superposent pas exactement aux anciennes et les grilles de points d'une ancienne photographie à une nouvelle peuvent se trouver très décalées les unes par rapport aux autres. Il y a donc lieu de *reporter* sur les nouveaux documents photographiques l'ancienne grille de points. Ce report pourrait s'effectuer mécaniquement mais à condition que les supports photographiques soient à la même échelle et que les déformations propres à chacune des photographies soient redressées. Le coût de l'opération ne peut laisser envisager un tel procédé aussi le report s'effectue-t-il manuellement à partir des points de repère communs aux deux documents.

3.7 *Réalisation pratique sur le terrain*

L'enquête étant retenue comme enquête de répartition du territoire, l'objectif essentiel est de déterminer pour une année considérée la répartition entre les différentes catégories de territoire selon une nomenclature plus élaborée pour les terres labourables.

La période d'enquête doit donc se situer à la période où toutes *les cultures annuelles principales* sont en terre et où les récoltes n'ont pas encore débuté. Cette période, relativement courte, se situe donc à partir de fin avril jusqu'à début juillet mais l'enquête doit se poursuivre sur les mois d'août ou septembre pour les zones de cultures permanentes. Ce laps de temps et la date de début d'enquête sont évidemment variables selon les régions et les départements, la période d'enquête étant décalée du Sud vers le Nord.

Sur chaque photographie, agrandie au 1/4 000, est plaquée une grille de 36 points équidistants de 300 m.

L'enquêteur note l'occupation de ce point, selon les règles et une nomenclature particulière, tous les ans, au moment de son passage sur le terrain en juin-juillet.

On notera qu'il ne s'agit pas de photo-interprétation, la photographie servant uniquement à l'enquêteur pour se repérer sur le terrain, comme c'est aussi le cas pour les enquête-segments.

La période optimum de passage sur le terrain étant fixée, la réalisation pratique de l'enquête consiste à effectuer les deux opérations suivantes pour chacun des points désignés :

1) se rendre exactement au point précis du terrain indiqué sur la photographie aérienne.

2) identifier et noter très clairement la nature de culture ou de territoire observé à l'endroit précis du point où l'on s'est rendu.

L'attribution du point à une portion de territoire homogène quant à l'utilisation du sol : mare, pré, champ, route etc. (parcelle) obéit à des consignes strictes de localisation du point par rapport à son entourage (parcelle agricole, forestière, jachère, haie etc). Chaque point identifie une portion homogène du territoire du point de vue de l'occupation du sol. Si un point tombe exactement sur une limite entre deux occupations du sol différentes, il y a choix par tirage au sort, choix fixé une fois pour toute. Une fois localisée sur le terrain, on attribue à cette position homogène un poste et un seul parmi les 82 postes de la nomenclature physique et un poste parmi les 24 postes de la nomenclature fonctionnelle.

3.8 Estimation des superficies des différentes catégories de territoire

Sont seulement données les trois formules de l'estimateur selon les modalités de tirage des photographies échantillons au premier degré.

Notations

m est le nombre total d'unités primaires de l'échantillon sur le département se décomposant en :

m_1 = nombre total de photographies échantillons complètes à 72 points

m_2 = nombre total de photographies échantillons incomplètes sur le département mais tirées à probabilité égale (complément des frontières effectué)

m_3 = nombre total de photographies échantillons incomplètes sur le département, tirées à probabilité inégale (proportionnellement à la fraction de leur partie utile contenue dans le département : complément aux frontières non effectué)

$$m = m_1 + m_2 + m_3$$

i = numéro de tirage de l'unité primaire (photographie échantillon) à l'intérieur du département ;

n_j = nombre total de points échantillons de la photographie i :

$$n_i = n_0 = 72 \text{ points pour les } m_1 \text{ photographies}$$

n_{hi} = nombre total des points de la catégorie de territoire h de la photo échantillon i

\hat{a}_h = estimateur de la superficie en catégorie de territoire h du département.

Formule générale

$$\hat{a}_h = \frac{A}{m_i + \frac{m_2}{S} \frac{n_i}{n_0} + m_3} \left[\frac{m_1 + m_2}{S} \frac{n_{hi}}{n_0} + \frac{m_3}{S} \frac{n_{hi}}{n_i} \right]$$

Tirage départemental à probabilités inégales

Cas des tirages départementaux avant que le complément de l'échantillon aux frontières n'ait été réalisé.

$$\hat{a}_h = \frac{A}{m} \frac{m}{S} \frac{n_{hi}}{n_i}$$

Soit : superficie départementale multipliée par la moyenne des proportions en catégorie de territoire h de toutes les photographies échantillons.

Tirage départemental à probabilités égales

$$\hat{a}_h = A \frac{\frac{m}{S} n_{hi}}{\frac{m}{S} n_i}$$

Soit : superficie départementale multipliée par le rapport du nombre total de points de catégorie h sur le département au nombre total de points échantillons sur le département.

Une formule simplifiée a été mise en œuvre.

A chaque point est attribué, au niveau départemental, une valeur donnée par la formule : superficie planimétrée du département S /nombre de points du département N .

La superficie de la catégorie h est $\hat{a}_h = \frac{S}{N} \times N_h$

\hat{a}_h superficie de la catégorie h

N_h nombre de points de la catégorie h .

L'erreur aléatoire pour une catégorie de territoire est évaluée par

$$\frac{1}{\hat{a}_h} \times \sqrt{\frac{\hat{a}_h(S - \hat{a}_h)}{N}}$$

Cette formule simplifiée est fondée sur un tirage à un degré avec remise.

L'erreur aléatoire relative varie au niveau national de 0,3% pour les prairies pâturées à 21,3% pour l'association vignes-autres cultures.

L'erreur d'observation est une grandeur difficilement mesurable. Cependant, pour en atténuer les effets, quelques principes s'imposent :

- meilleure formation des enquêteurs. Il faut insister sur les erreurs de localisation et d'interprétation des points observés.

- multiplication des contrôles : deux types de contrôle sont effectués. Les contrôles « *a priori* » : il s'agit de contrôler un échantillon de points tirés *a priori* qu'il faudra confronter aux renseignements de l'enquêteur. Les contrôles « *a posteriori* » ne portent que sur des points litigieux : points ayant subi une évolution jugée « aberrante ».

Le premier type de contrôle donne une idée moins partielle de l'erreur d'observation, mais les deux contrôles sont nécessaires pour minimiser cette erreur.

3.9 Les variantes de relevés de l'enquête utilisation du territoire

Une *première variante* de l'enquête utilisation du territoire consiste, en utilisant toujours comme document de base la photographie aérienne, à étudier au cours du passage sur le terrain non la catégorie de territoire relevée en un point donné, mais *les catégories de territoire comprises à l'intérieur d'une zone géographique* délimitée *a priori* d'une superficie voisine de 50 ha (*segment*), les limites étant repérées à partir de limites naturelles ou physiques stables. Le découpage n'est pas étendu à l'ensemble du département mais seulement à la partie du département couverte par les photographies de l'enquête utilisation du territoire.

Après détermination de ces segments, il est procédé à un tirage aléatoire des parcelles à enquêter.

Une *seconde variante* consiste à retenir pour chaque photographie aérienne 9 points, de *construire* à partir de chaque point *un carré de 36 ha* et de relever

ensuite, par un passage sur le terrain, les cultures portées par chacun de ces segments carrés.

Cette notion de segment, on le verra ci-après, est fondamentale pour la mise en œuvre des techniques de télédétection.

IV. UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE POUR L'ÉTUDE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE L'ENVIRONNEMENT

4.1 Introduction

Depuis le lancement du premier satellite pour l'observation des ressources terrestres Landsat en 1972, on a pu constater un développement de l'usage de la télédétection spatiale dans le monde entier pour l'étude des ressources naturelles et de l'environnement ainsi qu'une mise en place progressive de méthodes et systèmes d'exploitation des données physiques collectées à l'aide des satellites.

La réalisation de travaux variés sur la géopédologie et l'aptitude des sols, l'occupation de l'espace et l'aménagement, le couvert végétal, l'agriculture et la forêt, le littoral et les zones humides, les ressources en eau, etc... témoignent des progrès effectués et du caractère opérationnel de la télédétection spatiale.

Compte-tenu des lacunes des statistiques nationales et internationales relatives aux ressources naturelles et à l'environnement, la télédétection peut se révéler une technique indispensable, complémentaire des sources de renseignements classiques, pour mieux prendre en compte les préoccupations relatives aux ressources et à l'environnement, mieux maîtriser les problèmes globaux et améliorer la base d'information nécessaire à l'élaboration des rapports sur l'état de l'environnement décrivant la situation actuelle et les changements intervenus.

4.2 Rappels sur le principe de la télédétection

4.2.1 Description du système

La télédétection des ressources terrestres est un système d'acquisition d'informations à distance sur la biosphère qui repose sur les *propriétés du rayonnement électromagnétique*. Le système étudie les variations radiométriques, spectrales, spatiales et temporelles des ondes électromagnétiques et met en évidence la corrélation entre celles-ci et les caractéristiques des différents objets observés. Il permet :

- de recueillir des données physiques sur la surface terrestre (terre et eau), son couvert et son environnement ¹,

1. Les études portant sur le milieu marin, les océans, les glaces, exigent des satellites et des capteurs ayant des caractéristiques différentes de celles qui sont utilisées pour l'observation des ressources terrestres, limite de résolution au sol, bandes spectrales, fréquence de passage... et ne seront pas évoquées dans cette note.

- de traiter ces données par des méthodes statistiques visuelles, optoélectroniques et informatiques,
- d'interpréter par des procédures techniques et statistiques les renseignements physiques rassemblés et de les restituer sous une forme directement utilisable : inventaires et classifications statistiques, cartes thématiques et de synthèse et résultats statistiques en surface correspondant aux classifications et légendes des cartes.

4.2.2 Plates-formes d'observation

La saisie des informations est effectuée à partir de plates-formes d'observation : ballons, avions ou hélicoptères, fusées, satellites géostationnaires à observation continue ou satellites bas à défilement à observation cyclique. Ces plates-formes portent des *capteurs* susceptibles de recevoir et de mesurer l'intensité du rayonnement réfléchi ou émis par la surface terrestre dans une certaine gamme de longueurs d'onde et de la transformer en un signal permettant de localiser, enregistrer et numériser l'information sous forme de photos-films ou d'images-bandes magnétiques. Les signaux enregistrés par le capteur sont numérisés à bord du satellite et transmis à des stations de réception au sol, soit en temps réel, soit après avoir été relayés par des satellites de télécommunication, soit en temps différé après enregistrement à bord du satellite.

4.2.3 Les capteurs

Les capteurs constituent des images et analysent le rayonnement émis ou réfléchi par les formes et les objets de la surface terrestre dans les longueurs d'onde auxquelles ils sont sensibles : ultra-violet, visible et proche infra-rouge, infra-rouge moyen, infra-rouge thermique, hyperfréquences, afin de reconnaître ces formes et ces objets. Le principe de la télédétection postule la spécificité des effets physiques pour un objet donné. Toutefois, si l'allure des signatures spectrales d'un objet est semblable d'une année à l'autre à une saison déterminée, cet objet ne peut être caractérisé par une signature spectrale fixe, l'atmosphère jouant un rôle perturbateur à chaque enregistrement ainsi que les antécédents climatologiques.

Le volume et la qualité des renseignements recueillis sont caractérisés par la surface couverte en fonction du champ angulaire, de la focale et de l'altitude, par l'échelle et la limite de résolution au sol, par les conditions de prise de vues, par les qualités géométriques et radiométriques des images et mesures. Pour une même unité élémentaire de terrain (*pixel*, abréviation de « *picture element* »), les mesures multispectrales sont aussi nombreuses qu'il y a de canaux de longueur d'onde utilisés.

Des déformations systématiques affectent les enregistrements et font l'objet de corrections au cours de prétraitements à l'aide de données auxiliaires recueillies à bord du satellite ou par des stations terrestres assurant le suivi du satellite. Ces corrections sont, soit radiométriques pour étalonner

et calibrer les valeurs observées, soit géométriques en raison des incidents de vol caractérisant l'attitude de la plate-forme de vol : roulis, tangage, lacets.

L'exploitation des données est réalisée par analyse visuelle ou par traitement informatique par des stations de traitement avec ou sans l'aide de systèmes interactifs. *Les renseignements sont restitués après traitement sous forme d'images, de spatiocartes, de cartes thématiques et de résultats numériques en surface.*

Les capteurs sont classés en deux catégories selon la source de rayonnement utilisée :

- *Source de rayonnement naturelle.* Les capteurs enregistrant l'énergie solaire réfléchie ou émise sont dits *passifs*. Ils comprennent les appareils photographiques, les caméras enregistrant sur film, les caméras électroniques vidéo, les radiomètres à balayage ou en peigne à haute résolution visible. Ces capteurs n'enregistrent qu'en l'absence de brumes et de nuages et seuls les capteurs mesurant le rayonnement émis (infra-rouge thermique par exemple) peuvent fonctionner de nuit.
- *Source de rayonnement artificielle.* Les capteurs enregistrant *la réponse du sol à une source de rayonnement artificielle* sont dits *actifs*. Ils comprennent le radar à antenne latérale et le radar à synthèse d'ouverture, opérant dans les bandes K, X, C, S, L, UHF et P, et le lidar (« Light detection and ranging ») utilisant comme source émettrice un laser. Ces capteurs enregistrent par tous les temps et sont particulièrement *utiles dans les régions où la nébulosité est dense et fréquente*, dans les régions polaires et sous les tropiques et à l'équateur par exemple. Les capteurs peuvent aussi être répartis selon les bandes spectrales dans lesquelles ils opèrent. Ces bandes décrivent leur dépendance vis-à-vis des conditions atmosphériques et d'éclairement. L'interprétation de données radiométriques multispectrales obliques en est encore à un stade expérimental.

La tendance actuelle à moyen terme est :

- de concevoir des satellites pour des missions spécifiques : ressources terrestres, météorologie et climatologie, océanographie, cartographie... en choisissant des bandes spectrales adaptées aux problèmes étudiés ;
- d'améliorer les limites de résolution spatiale et radiométrique et d'obtenir des images plus fréquentes.

L'interprétation des micro-ondes radar, qui sont intéressantes pour étudier la glace et la neige, l'hydrologie et l'humidité du sol, l'océanographie et les pollutions marines, la géologie et la géomorphologie, la topographie et la pédologie, ainsi qu'à un degré moindre l'utilisation du sol, l'agriculture et les forêts, présente des difficultés propres à la technologie radar et relève encore du stade expérimental pour de nombreux thèmes.

Par ailleurs, les données brutes radar à synthèse d'ouverture telles que celles du satellite Seasat exigent 7 heures de prétraitements informatiques

aujourd'hui pour élaborer une image de 100×100 km qu'il faut ensuite analyser. Si avec une nouvelle génération d'ordinateurs, on pourra bientôt produire cette image en moins d'une demi-heure, il faudra cependant entreprendre des prétraitements importants de correction et de rectification en temps et distance oblique pour transformer les coordonnées radar d'un point objet en coordonnées cartésiennes.

En dépit des problèmes actuels d'interprétation et de lourdeur des prétraitements, il faut s'attendre à un développement des applications de la télédétection en hyperfréquences au cours des années 90 (le lancement du satellite européen ERS 1 est prévu pour 1991).

Le lidar atmosphérique est équipé de fluorodétecteurs à laser. Il sert à détecter et localiser certains polluants et constituants atmosphériques. L'utilisation opérationnelle du lidar est, elle aussi, prévisible dans la dernière décennie de ce siècle.

4.2.4 Avion et satellite

Avion et satellite sont des outils aux performances différentes qui sont capables de répondre à des problèmes différents. Une utilisation combinée des deux moyens peut s'avérer parfois utile.

Cependant, la question des corrections géométriques et radiométriques présente plus de difficultés dans le cas de l'avion (roulis, tangage, lacets, variations d'éclairement au cours de la durée de la mission, etc.) que dans celui du satellite, qui est beaucoup plus stable et dont la trajectoire est plus régulière.

Par ailleurs, les données obtenues par avion sont plus nombreuses pour une même surface en raison de l'altitude plus basse du vecteur et d'un nombre plus grand de canaux d'enregistrement retenu habituellement. C'est pourquoi, exception faite de certains travaux spécifiques tels que l'étude de phénomènes linéaires, de fleuves et de lacs de dimensions moyennes ou petites, ou de zones urbanisées à examiner de manière très fine, ou de phénomènes à observer à un instant précis (pollution accidentelle ou catastrophe naturelle par exemple) ou encore dans des bandes spectrales particulières, les missions multispectrales aériennes et leur exploitation restent coûteuses et la télédétection spatiale est plus intéressante et plus opérationnelle à cause de la quasi-instantanéité des enregistrements et de la standardisation des méthodes d'acquisition et de traitement des données.

Pour ces raisons, on se limitera aux données satellite dans la suite.

4.2.5 Satellites intéressants pour l'étude des ressources naturelles et de l'environnement

Parmi les satellites lancés depuis une quinzaine d'années et ayant cessé de fonctionner on signalera : Skylab (1973), Seasat (1978), HCMM (1978-80) et surtout Nimbus 7-CZCS (1978-85); ce dernier satellite très peu exploité en

France, fournissait des données avec une répétitivité de 1 à 6 jours et une limite de résolution spatiale de 800 m dans 4 bandes du visible, le proche infra-rouge et l'infra-rouge thermique, et de 20 à 100 km de hyperfréquences (5 bandes spectrales). Il permettait d'étudier les eaux côtières et les grands lacs, la température de surface de l'eau, la couleur de l'océan, la chlorophylle, les substances jaunes, les matières en suspension, les polluants, les vents au niveau de la mer, le contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau et eau liquide, l'environnement ozone, les glaces, la pollution atmosphérique.

Deux satellites fournissent actuellement des informations utiles pour l'environnement qui sont sommaires mais fréquentes. Il s'agit :

- Des satellites géostationnaires Meteosat (depuis 1977) qui donnent des renseignements toutes les trente minutes avec une limite de résolution spatiale de 2,5 km dans le visible et le proche infra-rouge et de 5 km dans les deux bandes vapeur d'eau et infra-rouge thermique; ils permettent de décrire l'état de la végétation à petite échelle.
- Des satellites météorologiques de la série NOAA-TIROS (depuis 1970) qui livrent des informations toutes les 12 heures avec une limite de résolution au sol de 1 km dans le visible et le proche infra-rouge, l'infra-rouge thermique et l'infra-rouge moyen. Ces satellites renseignent à l'échelle du 1/1 000 000^e ou 1/500 000^e sur la température du sol et des eaux en surface (et par conséquent sur le bilan radiatif), sur l'état de la végétation (humidité-sécheresse), sur les variations de la couverture neigeuse et glaciaire, sur la dispersion des émissions volcaniques dans l'atmosphère...

Actuellement les principaux renseignements sur les ressources naturelles et l'environnement proviennent des *satellites Landsat* MSS et TM, depuis 1972 et 1982 respectivement, et *SPOT*¹. Les données sont réceptionnées et archivées sur l'Europe par les stations de Fucino (Italie) et Kiruna (Suède) pour Landsat, et Toulouse (France) et Kiruna pour SPOT. Plusieurs pays prévoient de lancer des satellites pour l'étude des ressources terrestres au cours des prochaines années.

Les principaux besoins d'information sur les ressources naturelles et l'environnement couvrent des espaces étendus : régions, départements, parcs nationaux et régionaux, grands bassins versants, littoral, grands massifs montagneux ou zones de grands travaux d'équipement.

Ces besoins peuvent être actuellement satisfaits à un coût acceptable en traitant à l'échelle du 1/100 000^e les données Landsat MSS qui existent depuis 1972.

Les renseignements recherchés concernent surtout : les écozones, la géomorphologie (potentialité et aptitude des sols), l'occupation biophysique du sol, répartie en une trentaine de catégories environ, et ses changements, les différentes catégories de zones humides, la nature et la qualité des milieux

1. SPOT I lancé en février 1986, SPOT II lancé en janvier 1990.

végétaux (appréhendées à l'aide de l'indice de végétation), de l'eau (profondeur, turbidité, végétation aquatique, nature des fonds, contacts eau douce-eau salée) et des sols.

Lorsqu'on se trouve en présence de besoins d'information à des échelles plus fines – de l'ordre du $1/50\,000^e$ au $1/30\,000^e$ – sur des zones limitées en surface (ex : une grande zone humide) et surtout, comme c'est fréquemment le cas, lorsque l'on souhaite disposer en même temps de renseignements physico-chimiques plus riches et détaillés sur le sol, la végétation, l'eau ou le tissu urbanisé, les données Landsat TM peuvent être intéressantes à exploiter avec une limite de résolution au sol de 30 m et 7 bandes spectrales.

Le satellite SPOT apporte une amélioration pour examiner à une échelle géographique encore plus fine, de l'ordre du $1/25\,000^e$, avec possibilité supplémentaire d'analyse oblique ou stéréoscopique, certains espaces tels qu'un grand site d'intérêt national ou une zone soumise à un plan d'occupation des sols.

4.3 Traitement des données

On trouve dans les stations de réception des produits cartophotographiques sommaires en noir et blanc ou en compositions colorées à des échelles assez grossières, et dépourvus de corrections géométriques, selon un découpage fixe en scènes de 185 km × 185 km pour Landsat et 60 km × 60 km pour SPOT pour une, deux ou trois bandes spectrales. Les mesures physiques sont aussi numérisées en raison de 256 niveaux dans chaque bande spectrale pixel par pixel. Elles peuvent être acquises sur bande magnétique compatible pour exploitation sur ordinateur pour chaque scène.

4.3.1 Les différents types de traitement

Les traitements informatiques des enregistrements sur bandes magnétiques peuvent être classés de la façon suivante :

On distingue d'abord la production d'« *images fausses couleurs améliorées* ». Cette opération consiste en un délignage et une accentuation des contrastes dans deux ou trois bandes spectrales à l'échelle demandée par l'utilisateur comprise entre $1/2\,000\,000^e$ et $1/25\,000^e$ et comporte des améliorations supplémentaires à option : corrections géométriques pouvant atteindre la précision maximale de $1/2$ pixel, digitalisation de limites et report de repères, raccord d'images de traces différentes et/ou de dates différentes, constitution de mosaïque d'images, restauration (réorientation dans la direction nord-sud, rééchantillonnage des pixels en carrés, amélioration de la qualité radiométrique), amélioration des contours filtrages, production d'images multitudes à partir de données enregistrées à des dates différentes ¹.

1. L'image fausse couleur améliorée constitue en elle-même un matériel cartographique peu coûteux qui joue aussi le rôle de document intermédiaire de référence et d'instrument de dialogue permettant de familiariser les utilisateurs avec la télédétection.

En second lieu, on distingue la réalisation d'*opérations arithmétiques ou logiques* : sommes ou différences et rapports de canaux ¹ sans ou avec pondération (dont la signification est connue), filtrages numériques, analyse en composantes principales. Les résultats peuvent donner lieu à des cartes infographiques en couleurs conventionnelles à l'échelle demandée.

Dans les *classifications automatiques* les données numériques multispectrales sont utilisées pour constituer automatiquement les rubriques d'une nomenclature de classement et pour produire des documents de cartographie thématique à échelle variable par des procédés automatiques, sur lesquels chacune des catégories de pixels est traduite par un signe ou une couleur conventionnels différents.

On distingue deux types de classification automatique :

- celui où l'on retient une approche probabiliste pour classer les informations selon le niveau d'homogénéité des valeurs radiométriques dans les bandes spectrales retenues au moyen de procédures d'analyse multicritères avant de rechercher la signification de chaque classe constituée; la cartographie établie avant interprétation n'est pas alors définitive et sert de document de travail intermédiaire;
- celui où l'on adopte une approche déterministe qui consiste à fixer le modèle d'interprétation au départ à l'aide de données de terrain relevées sur des sites-tests et à étendre les résultats à l'ensemble de la scène en faisant correspondre les données radiométriques observées sur les sites-tests aux phénomènes ou catégories relevés sur ces sites-test (probabilités *a priori* et règle du maximum de vraisemblance).

Les deux modes de classification automatique sont dits respectivement *non dirigé* et *dirigé*, ou plus souvent par simple dialogue de l'anglais *non supervised* et *supervised*. Les traitements en classification dirigée et non dirigée exigent le recours à des logiciels plus ou moins performants. Il revient à l'utilisateur d'arrêter la méthodologie, d'examiner avec soin la légitimité des hypothèses statistiques et l'efficacité des logiciels et traitements statistiques pour analyser les phénomènes et distributions numériques réelles étudiés et contrôler la validité et la fiabilité des résultats (enquêtes de validation par exemple). Les trois types de traitement peuvent être utilisés de concert ².

Pour la première (classification non dirigée) on constate que dans le cas de la description de l'utilisation du sol la décomposition en de nombreuses classes se révèle finalement sans intérêt en raison de l'existence de classes vides, et que seules se distinguent une douzaine de classe significatives.

Dans le cas d'une classification dirigée il faut prendre garde qu'un même type d'occupation du sol sur une zone *a priori* homogène peut se traduire par

1. Par exemple sur Landsat MSS l'indice de végétation bande 7 - bande 5/bande 7 + bande 5 est en étroite corrélation avec la biomasse végétale verte. Les indices de chromaticité bande 4/bande 4 + bande 5 + bande 6 et bande 5/bande 4 + bande 5 + bande 6 renseignent sur la qualité de l'eau.

2. L'annexe qui résume les avantages et inconvénients de ces deux approches.

une radiométrie différente liée à des facteurs non décelables *a priori* : couche lithologique, antécédents climatiques, géomorphologie... etc.

Le recours à une approche automatique notamment pour la description de l'occupation du sol peut se justifier, mais il convient d'être prudent lorsque l'on recherche la répartition du territoire par culture ou groupe de cultures.

4.3.2 *Choix entre les divers types de traitement, état de l'art*

Le choix entre les trois types d'exploitation des données de la télédétection, interprétation d'image améliorée, traitement non supervisé et traitement en classification supervisée, dépend principalement de la nature de l'information recherchée, de la précision souhaitée, du budget disponible et du coût d'exploitation, de la disponibilité de données exogènes utiles à l'interprétation, des performances des logiciels disponibles.

En l'état actuel du savoir-faire, les classifications automatiques sur le couvert végétal et l'occupation du sol recouvrant des surfaces importantes conduisent le plus souvent à des classifications plus coûteuses et plus pauvres que celles que l'on peut obtenir par interprétation d'images fausses couleurs améliorées de bonne qualité avec l'assistance de l'ordinateur car les logiciels actuels ne prennent pas assez en compte la reconnaissance des formes, des structures et des textures, ce que peut faire un tirage interprète. Toutefois on peut espérer la mise au point de logiciels plus performants au cours des cinq ou dix prochaines années.

Actuellement pour l'étude du couvert végétal et de l'occupation biophysique du sol, il paraît préférable de disposer d'images fausses couleurs améliorées au moyen de traitements assez sophistiqués et de les interpréter, malgré l'attrait exercé par les classifications automatiques et les systèmes interactifs. Cependant, cette affirmation doit être nuancée. Les classifications automatiques, surtout si elles sont entreprises après avoir examiné au préalable des images fausses couleurs améliorées, permettent d'obtenir directement des résultats numériques en surface pour chaque rubrique de la classification, ainsi qu'une cartographie infographique, et elles peuvent apporter des informations supplémentaires de nature différente qui correspondent à des particularités radiométriques difficiles à détecter. Par exemple, on pourra d'abord isoler les surfaces en eau des terres et considérer ensuite uniquement les surfaces en eau en procédant à des classifications automatiques dans les bandes spectrales adéquates pour faire ressortir certaines caractéristiques de l'eau.

- La filière interprétation d'images utilise des produits photographiques standards en noir et blanc ou des images fausses couleurs optiques ou améliorées, que ce soit sur papier ou sur image d'écran. L'interprétation peut être effectuée visuellement par l'homme ou par des procédés mécaniques et avec l'aide de documents exogènes comme les cartes topographiques et géologiques ou de la végétation et un échantillon de photographies aériennes verticales extrait de la dernière couverture disponible ainsi que quelques transects

au sol. Elle est d'ordinaire effectuée avec l'assistance de l'ordinateur (zooms, ratios de bandes spectrales, indices, filtres, etc...)

Le nombre de catégories isolées relatives au couvert végétal et à l'occupation de l'espace est de l'ordre de la trentaine généralement. L'estimation des surfaces de chaque catégorie peut être réalisée au moyen d'un dépouillement par grille de points ou carroyage sur un calque, d'un planimétrage ou d'une digitalisation de limites sur table traçante ou avec une caméra vidéo (système TTS), ou encore par scannage. L'information est stockée en mode vectoriel ou en mode raster. Dans le premier cas chaque polygone est défini par une suite de frontières, elles mêmes définies par une suite de points repérés par leurs coordonnées géographiques; les caractéristiques des polygones sont stockées dans un fichier annexe. Dans le second cas chaque polygone est défini par un ensemble de pixels dont les caractéristiques sont stockées dans différents fichiers.

Le stockage en mode vectoriel requiert peu d'espace-mémoire, les opérations de mise à jour et l'extension spatiale ou informationnelle sont par contre délicates. Le stockage en mode raster exige un espace-mémoire important mais les opérations de mise à jour et l'extension spatiale ou informationnelle sont relativement faciles. Il existe des programmes informatiques permettant de passer d'un mode à l'autre.

- La filière de traitement informatique non dirigé, à laquelle on peut rattacher l'analyse en composantes principales, intéressante surtout pour la géologie, exige une interprétation sélective des cartographies obtenues et peut donner lieu à une seconde cartographie des résultats interprétés. Le nombre de catégories identifiées sur support papier ou sur image d'écran est de l'ordre de 10 à 15 pour un thème donné et ces classes ne correspondent pas toujours aux informations recherchées en priorité par les utilisateurs sur le sujet d'étude. Cette filière constitue cependant une méthode de recherche originale.

Il est toujours utile (mais coûteux) de précéder le traitement supervisé par un traitement non supervisé (clustering, nuées dynamiques...) permettant de créer des sous populations homogènes sur le plan radiométrique. Le nombre maximum de classes et de sous populations au sein de ces classes dépend des performances du logiciel, de la machine et du choix des sites testés. Les résultats peuvent donner lieu à une représentation cartographique qui ne peut dépasser 25 classes environ pour des raisons de lisibilité. Chaque pixel étant affecté à une classe avec une probabilité d'appartenance plus ou moins grande. Une telle représentation cartographique est toujours entachée d'une certaine incertitude; c'est pourquoi des enquêtes par sondage de validation sur des sites-tests non utilisés pour l'initialisation sont nécessaires.

Les problèmes de la classification supervisée résident dans le choix des sites-tests, qui ne doivent pas être ni trop typiques ni atypiques, et dans la possibilité de parvenir à un compromis entre le nombre de catégories et la fiabilité de la classification.

Les services statistiques nationaux ou communautaires ont tenté de résoudre ce problème par la construction d'un échantillon de segments représentatif de toutes les catégories d'occupation du sol.

L'introduction de nouvelles catégories à partir d'un certain seuil proche du pouvoir de discrimination du capteur risque de diminuer la fiabilité d'ensemble acquise à un stade donné. Il est possible de contrôler les résultats obtenus sur des sites-tests non utilisés pour élaborer la catégorisation et de procéder à des corrections ultérieures de la catégorisation par des itérations successives assez coûteuses.

On considère qu'une classification supervisée comportant 20 à 30 catégories d'occupation du sol est réussie lorsque 75 à 80% des pixels sont correctement classés dans une scène entière. Ce résultat n'est pas toujours obtenu dans la pratique.

Le coût de l'obtention d'une cartographie et des résultats statistiques en surface correspondants pour une classification en 15 à 30 rubriques sur une scène Landsat entière est deux fois plus élevé en classification supervisée en procédure interactive qu'en interprétant une image fausse couleur améliorée restaurée, ceci sans tenir compte des frais supplémentaires de recueil de données de terrain sur les sites-tests.

Toutefois l'interprétation d'image est impossible à réaliser dans les parcelles agricoles quand on souhaite distinguer le nombre de cultures nécessaires à la statistique agricole, et là la classification supervisée s'impose.

L'*analyse multidate* peut être réalisée au moyen de l'interprétation de plusieurs images améliorées relatives à des dates différentes, d'images fausses couleurs améliorées restaurées multidates (une même bande spectrale étant nécessairement observée aux deux dates), ou bien encore de classification non supervisées ou supervisées comportant des bandes spectrales relatives à plusieurs dates. La cartographie et la présentation des résultats obtenus est plus complexe que les précédentes car elle doit rendre compte à la fois de la situation à un instant donné et des changements intervenus dans le cas d'une même saison analysée à des années différentes. L'étude de données multisaisonniers permet d'obtenir plus de détails sur certains phénomènes dynamiques (détection des zones inondables par exemple) et sur l'occupation de l'espace et la discrimination des espèces; en ce dernier cas toutefois le gain d'information obtenu peut paraître marginal en regard des coûts supplémentaires consentis.

V. LES STATISTIQUES DÉPARTEMENTALES D'UTILISATION DES TERRES À PARTIR DE DONNÉES DU SATELLITE SPOT

Le SCEES conduit, depuis 1980, un programme d'études sur l'application de la télédétection aux enquêtes statistiques d'utilisation des terres.

La production de statistiques par télédétection ne se limite pas à la production d'une image classée ou d'une représentation cartographique. Il

s'agit d'estimer la superficie occupée par chaque culture, et d'estimer la précision de cette estimation.

En pratique, une première estimation est obtenue par une enquête aréolaire spécifique menée selon la méthode des segments, (voir ci dessous) et la combinaison de ces résultats avec les données de l'image classée conduit à une nouvelle estimation, qui est d'autant meilleure que l'image est bien classée (estimateur par la régression, ci-dessous page 56).

Cette enquête couvre à présent les régions Ile-de-France et Centre ainsi que le département de la Haute-Garonne.

Cette enquête de terrain est indispensable :

- pour initialiser la classification des images ;
- pour mettre en œuvre l'estimateur par la régression ;
- pour avoir un résultat en cas d'absence d'images.

Pour exploiter ces données, le SCEES a mis en place une chaîne de traitement fin 1987.

Le traitement, conduit avec le logiciel PEDITOR, comprend les opérations suivantes :

- localisation des segments dans l'image ;
- extraction des pixels des segments ;
- création des fichiers des signatures spectrales des types d'occupation du sol étudiés ;
- classification des pixels des segments (classification à petite échelle), qui permet d'établir une matrice de confusion ¹ et de calculer le pourcentage de pixels bien classés et de pixels d'origine étrangère dans un type donné d'occupation du sol ;
- classification des pixels des images (classification à grande échelle) ;
- mise en œuvre de l'estimateur par la régression.

5.1 L'estimateur par la régression

A l'issue de la classification à petite échelle, on dispose, pour chaque segment et pour une culture donnée, de deux valeurs, la superficie en cette culture (y), et le nombre de pixels classés dans la même culture (x). Ceci permet de dessiner un nuage de points, sur lequel est ajustée, par la méthode des moindres carrés, une droite de régression, qui passe par le point (x , y). On obtient également le coefficient de corrélation linéaire r lié à cette régression.

On procède alors à la classification à grande échelle sur chacune des images.

La zone d'analyse peut être considérée comme un ensemble d'unités de sondage aréolaire (« segments théoriques »), parmi lesquelles ont été tirés les

1. Croisant les observations terrain et les observations résultant du classement des images.

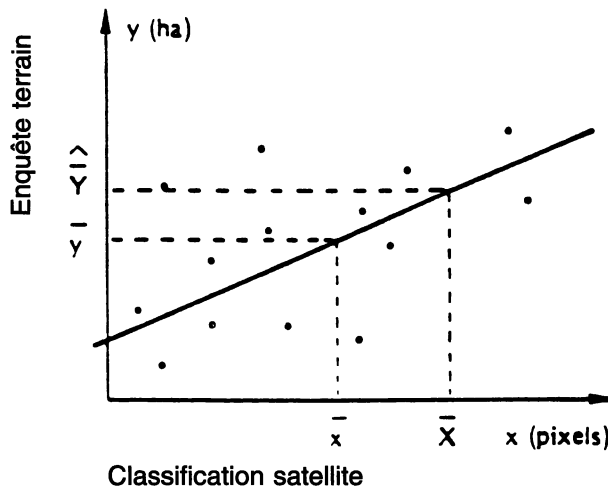
segments de l'enquête de terrain, dont le nombre s'obtient en divisant la superficie de la zone d'analyse par la superficie d'une unité (36 ha).

Ce nombre est ensuite utilisé pour diviser le nombre total de pixels classés dans cette catégorie par unité de sondage aréolaire X .

L'application des coefficients de la droite de régression à X lui fait correspondre Y , estimation par la régression de la superficie moyenne dans la culture considérée par unité de sondage aréolaire.

Il reste à multiplier Y par le nombre d'unités pour obtenir l'estimation au niveau de la zone.

L'efficacité relative de la régression est mesurée par le rapport de la variance de l'estimateur fourni par l'enquête-segments à la variance de l'estimateur par la régression. On démontre qu'elle est égale à $1/(1 - r^2)$.



5.2 L'enquête-segments

L'enquête-segments est réalisée sur des échantillons départementaux de segments carrés, repérés chacun sur une photographie aérienne, et elle consiste à relever, sur un transparent, le parcellaire de chaque portion de territoire inclus dans le segment.

Cette enquête exige une méthode particulière, se traduisant par des instructions spécifiques relatives :

- à la définition de la parcelle;
- à la nomenclature, qui diffère de celle de TER-UTI par des regroupements ou des éclatements faits en fonction des aptitudes radiométriques du satellite SPOT;
- à la taille minimale d'observation, qui découle de la taille du pixel SPOT (20 m);

– aux simplifications de forme exigées par la saisie numérisée des contours.

La saisie du questionnaire de l'enquête-segments est plus complexe que celle du questionnaire d'une enquête classique puisqu'il s'agit non seulement de saisir des chiffres mais encore de placer les contours des parcelles dans un système de coordonnées géographiques.

Aussi le SCEES a-t-il expérimenté plusieurs méthodes : le système interactif PERICOLOR (1986), le logiciel DIGITER, réalisé spécialement pour le SCEES (1987-1988-1989), et le système TTS par caméra vidéo (1990), développé par le Centre Commun de Recherche (CCR) d'Ispra, qui s'avère le plus rapide.

5.3 L'acquisition des scènes SPOT et le traitement des données satellitaires

L'acquisition des scènes SPOT s'est déroulée dans des conditions diverses : bonnes en 1986 (9 scènes sur Ile-de-France et Centre, 6 scènes sur la Haute-Garonne en multitemporel), peu satisfaisantes en 1987 (4 scènes, hors-période de programmation) et 1988 (8 scènes), bonnes en 1989 (15 scènes sur l'Ile-de-France et le Centre, 3 scènes sur la Haute-Garonne) et très bonnes en 1990 (la totalité des 26 scènes demandées).

Le premier traitement effectué a permis d'obtenir de premiers résultats sur le département de l'Indre, en utilisant deux scènes SPOT du 16 septembre 1987.

Ces résultats ont confirmé le bon fonctionnement de la chaîne, et, malgré une date d'acquisition des images peu favorable à la discrimination de l'ensemble des cultures, ont permis d'améliorer sensiblement la précision de l'enquête de terrain sur quatre postes (eaux, bois et forêts, prairies, tournesol) et un poste composite correspondant à peu près à des terres nues (blé-orge-colza d'hiver).

A partir de 1988, le SCEES a commencé une collaboration avec le CCR, traitant l'Indre et l'Indre-et-Loire 1988 avec les données SPOT, et communiquant les segments de l'Eure-et-Loir, du Loir-et-Cher, et du Loiret au CCR qui les a utilisés avec des données Landsat TM. Cette collaboration s'est poursuivie en 1989, pour devenir une opération commune SCEES-CCR en 1990.

5.4 Eléments pour un bilan technico-économique

L'évolution de l'application de la télédétection aux statistiques agricoles peut s'analyser en trois phases successives :

– les études de faisabilité théorique portant sur l'aptitude des capteurs à distinguer les différents types d'occupation du sol et la conception de méthodes ;

– les études de faisabilité opérationnelle portant surtout sur la conception d'enquêtes de terrain spécifiques et la réalisation de logiciels dédiés à cette application ;

– l'introduction dans les systèmes statistiques nationaux ou communautaires.

Les deux premières phases se sont déroulées dans des conditions où la rentabilité économique n'était pas examinée, avec toutefois l'hypothèse sous-jacente que l'usage des images-satellite réduirait les coûts des enquêtes de terrain.

Néanmoins, bien que le programme SPOT en soit déjà à son deuxième satellite, la troisième phase en est toujours à ses débuts : aucun service statistique national ne produit actuellement de façon régulière et sur une vaste étendue des statistiques agricoles par télédétection.

L'imagerie satellitaire, loin de remplacer avantageusement les enquêtes de terrain, apparaît maintenant comme une marchandise plus coûteuse, qui ne leur est pas entièrement substituable, et dont le traitement est très consommateur en main-d'œuvre qualifiée.

Il est donc encore prématuré de tirer un bilan économique mais, pour le moment, la télédétection ne fournit pas de statistiques moins chères pour les raisons suivantes :

- coût des images élevé par rapport à celui des enquêtes statistiques équivalentes ;
- qualité insuffisante des classifications (qui met en cause aussi bien les aptitudes des satellites que les méthodes de classification) ;
- impossibilité de réduire les enquêtes de terrain au dessous d'un certain seuil ;
- coût de main-d'œuvre élevés.

En contrepartie, la télédétection pourrait fournir un résultat supplémentaire, celui des statistiques localisées (cartes d'occupation du sol intégrables dans un système d'informations géographiques). Mais à l'heure actuelle, cette application n'a pas la précision requise pour la statistique, qu'elle peut illustrer mais non représenter rigoureusement.

Il ne faut donc pas, au vu de quelques études pilotes encourageantes, sous-estimer l'ampleur des travaux qui restent à mener pour que l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans le domaine de la surveillance de la végétation devienne rentable dans le cadre d'une utilisation de routine. Les quelques points soulevés plus haut sont autant de pistes de recherche à explorer.

VI. LES DÉVELOPPEMENTS AU NIVEAU DE LA COMMUNAUTÉ ÉCONOMIQUE EUROPÉENNE

Un projet pilote de télédétection appliquée aux statistiques agricoles a été approuvé le 26 septembre 1988 par le Conseil des Ministres de la Communauté Economique Européenne.

L'objectif de ce projet est de tester les applications de la télédétection spatiale dans le domaine de la statistique agricole de façon à en intégrer les données dans les procédures d'information sur l'agriculture.

Détenir une information précise et à jour sur la production agricole est vital pour la conduite de la politique agricole commune. Les profondes différences des Etats membres au niveau de la production agricole ont amené à établir un système complexe de règlements et de subventions fondés sur la précision des statistiques agricoles.

Il s'agit donc d'améliorer les statistiques agricoles en accroissant la précision, l'homogénéité, l'objectivité et la fréquence des observations et d'éviter une diversité de méthodologie comme une duplication des travaux.

Un article publié le 13 octobre 1989 par l'hebdomadaire spécialisé dans le suivi conjoncturel de l'agriculture européenne « Agra Europe », sous le titre « des estimations peu fiables », vient tout à fait confirmer ce besoin :

« La récolte étant déterminée dans les Etats membres selon des méthodes différentes, il existe des divergences dans le degré de précision des estimations d'un pays à l'autre, ont souligné le commerce, les producteurs et les coopératives. Pour avoir une idée de la situation, il ne faut pas se contenter d'interroger le commerce et les producteurs mais il conviendrait d'appliquer des méthodes objectives identiques dans toute la CEE pour la détermination des superficies et des rendements, ont-ils précisé ».

C'est pour répondre à ce souci qu'un programme ambitieux, conduit par la Direction Générale VI « Agriculture » en collaboration avec l'Office Statistique de la Communauté, a été préparé et mis en œuvre par le Centre Commun de Recherche (CCR) des Communautés Européennes d'Ispra. L'exécution de l'ensemble du projet, articulé autour de 7 actions, ¹ est assurée essentiellement par des organismes nationaux sous la coordination étroite du CCR.

L'action IV fait intervenir l'interprétation assistée par ordinateur des données satellite haute résolution.

6.1 Les grandes lignes du projet

Il a deux objectifs principaux :

- Définir une méthodologie et mettre en place un système d'exploitation (matériel et logiciel) permettant d'estimer les variations de superficies

1. Actions : 1 Inventaires rejiman

- 2 Suivi de la végétation et indicateurs de rendement
- 3 Modèles de prévision des rendements
- 4 Estimations rapides au niveau européen des superficies et des rendements potentiels
- 5 Système avancé d'information sur l'agriculture
- 6 Bases des sondages aréolaires, enquêtes associées
- 7 Recherche à long terme

des 12 principales cultures au niveau européen, ainsi que leurs conditions de développement et de rendement potentiel.

Cette action repose sur des observations fréquentes réalisées par des satellites haute résolution sur 50 sites répartis en Europe (carte 2 ci-dessous page 64).

- Tester une méthodologie non supervisée (sans enquête terrain) qui pourrait être appliquée à l'évaluation des récoltes dans les pays en dehors de la CEE.

Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau ci-après :

Données d'entrée	Localisation géographique	Méthodologie
Données satellites haute résolution • SPOT • Landsat • MOSS	50 sites de 40 × 40 kms (1600 km ²) répartis en Europe	Photo-interprétation assistée par ordinateur Comparaison avec les années précédentes

	Résultat	Contraintes
	Bulletin de conjoncture (6/an) indiquant par site l'évolution relative des surfaces et des potentialités des rendements entre l'année n et l'année $n - 1$	- Analyse d'image sans enquête terrain - Délai de traitement très court - Important volume de données à analyser

Les grandes lignes de la méthodologie utilisée s'articulent autour des points suivants :

- acquisition de 3 à 7 images satellite haute résolution par année culturale sur un échantillon de 50 sites européens de 1600 km² chacun ;
- photo-interprétation assistée par ordinateur de séries d'images corrigées radiométriquement et géométriquement. Cette analyse comparative des images se fait **sans** l'apport de données-terrain à jour ;
- validation de l'interprétation à l'aide d'enquêtes spécifiques par sondages, disponibles en fin d'année calendaire ;
- utilisation de la télédétection pour élaborer une **statistique d'évolution** (de l'année n par rapport à l'année $n - 1$) et non pas une cartographie exhaustive. Cet objectif conduit à une **utilisation conjointe**

et complémentaire de la télédétection et des méthodes statistiques ;

- rédaction de bulletins périodiques de conjoncture (6 par an) présentant l'évolution des surfaces et des rendements potentiels entre l'année culturelle étudiée et les années précédentes. **Ces bulletins de conjoncture constituent le « produit » de cette action IV.**

6.2 Les opérations

6.2.1 La réalisation de l'action 4 repose sur trois idées :

- Il est possible de discriminer les cultures et d'en évaluer les surfaces à la condition de disposer d'un nombre suffisant d'images acquises tout au long de l'année culturelle.
- Il est possible de faire un suivi de la végétation à l'aide des données de satellite haute résolution, même en Europe du Nord.
- La méthode de traitement développé permet d'obtenir rapidement des résultats fiables (en particulier elle peut intégrer des données satellitaires moins de 5 jours après leur réception par le prestataire, soit 10 à 15 jours après leur acquisition).

Discrimination des cultures

L'identification des cultures repose sur leur discrimination radiométrique ; chaque culture est identifiée par sa réponse spectrale spécifique, sa « signature spectrale »¹.

6.2.2 La programmation de prises de vue très répétitives, pour accroître les chances d'obtenir des images dans les périodes optimales, ne peut être envisagée que pour des sites, relativement peu étendus (moins de 117 km de large) et orientés selon l'axe de défilement du satellite (pour SPOT) ; ou localisés sur les zones de recouvrement de 2 orbites voisines (pour Landsat).

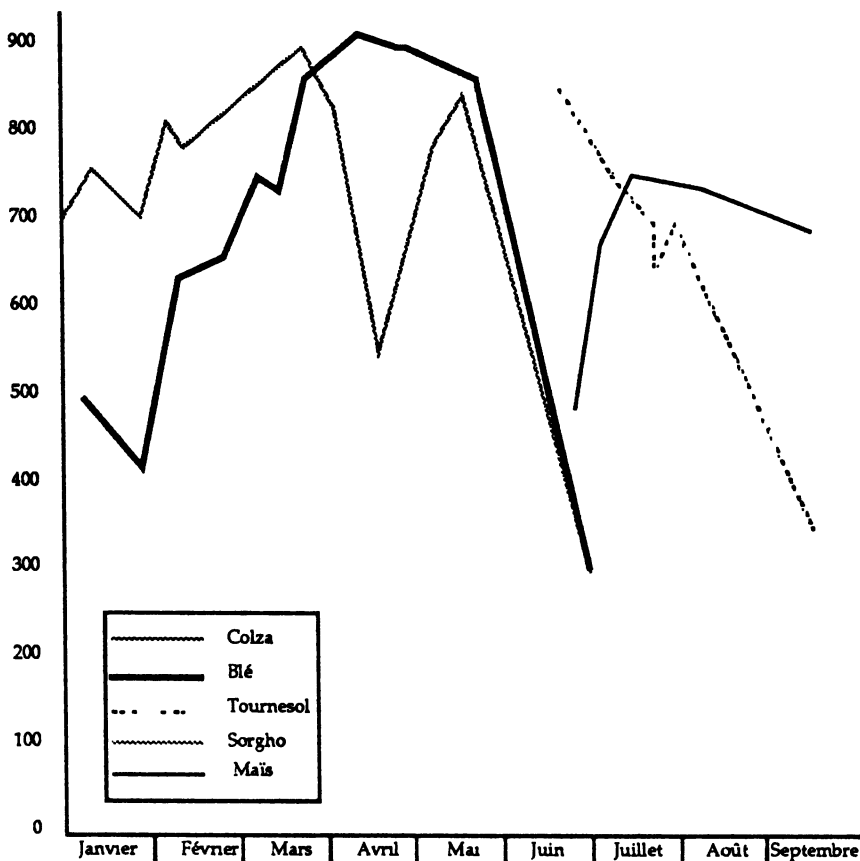
La nature même des satellites d'observation de la Terre et la gestion des ressources satellitaires par Eosat et par SPOT Image induit une incompatibilité entre la fréquence de l'observation et l'exhaustivité de la couverture ; l'option prise de privilégier la fréquence d'observation a, de ce fait, conduit à s'appuyer – non sur l'ensemble de l'Europe – mais sur un certain nombre de sites échantillon répartis dans les divers pays de la Communauté.

Le choix de ces 50 sites de 1600 km² a été fait par la CCR (en excluant les zones de montagne ou les zones ne présentant pas d'intérêt au niveau agricole).

1. Les trois caméras utilisées sont :

- dans le vert, bande 0, 50 – 0, 59 micron
- dans le rouge, bande 0, 61 – 0, 68 micron
- dans le proche infra rouge, bande 0, 79 – 0, 89 micron

FIGURE 1
Evolution radiométrique des principales cultures du Lauragais



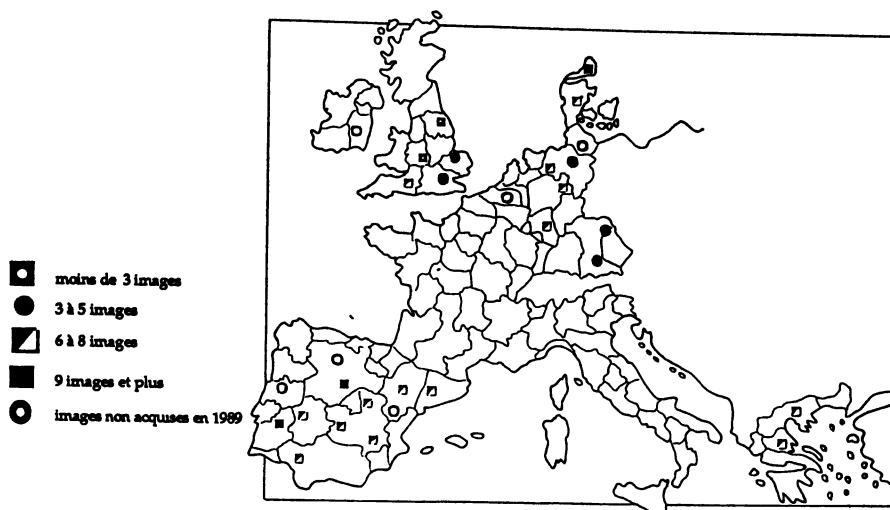
(Source : SCEES-CNES)

La répartition des sites par pays est proportionnelle à l'importance du pays dans la superficie cultivée totale de la CEE. Par exemple la superficie cultivée au Portugal représente 4% de la superficie cultivée totale de la Communauté. Le Portugal compte donc 4% des 50 sites échantillonnés soit 2 sites. La localisation de sites a été faite en vue de maximiser la probabilité d'obtention des images.

Ce choix délibéré de privilégier la localisation des sites sur les traces des orbites satellitaires a permis l'acquisition d'un nombre suffisant d'images pour réaliser le suivi spatio-temporel des cultures importantes sur tous les sites y compris ceux de l'Europe du Nord (voir carte 1) pour les opérations de mars-octobre 1989.

L'expérience montre que pour identifier les cultures à partir de leur « signature » spectrale, il fut disposer d'un nombre suffisant d'images haute

CARTE 1
*Nombre d'images haute résolution acquises par site
 Mars/Octobre 1989*



N.B. : les sites de France et d'Italie seront traités à partir de 1992.

résolution : au moins 3 à 7 par site, acquises tout au long de l'année culturale. C'est l'évolution du comportement radiométrique des cultures qui permet de les discriminer.

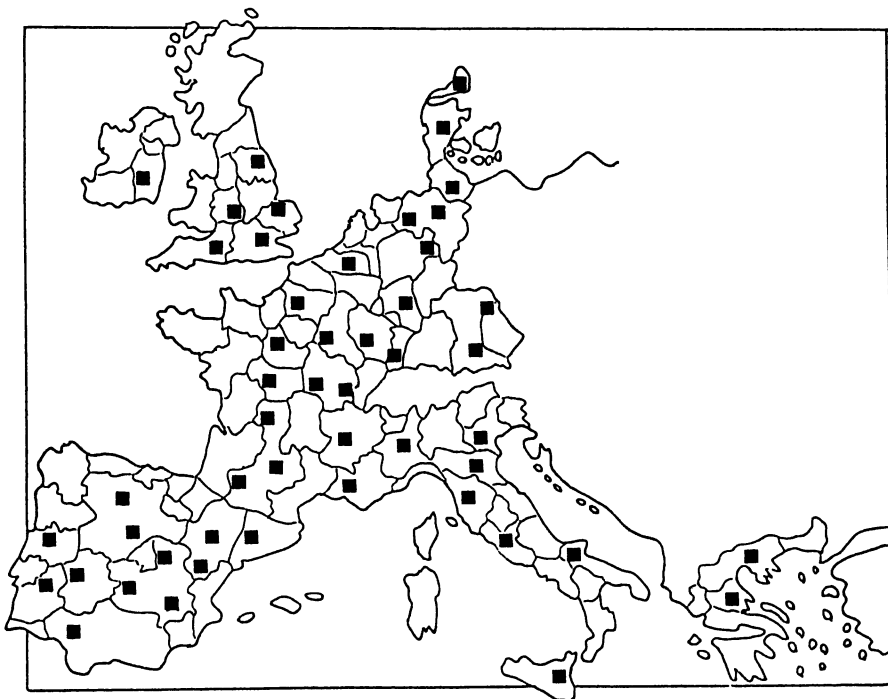
La grande répétitivité et la haute résolution géométrique sont donc nécessaires mais ce sont deux caractéristiques antinomiques sur les satellites actuellement en service. Les satellites météorologiques (type NOAA) sont bien adaptés au suivi continu et global des cultures mais leur résolution est insuffisante pour permettre d'appréhender les parcelles culturales et d'identifier les cultures qui s'y trouvent. Inversement, si les satellites d'observation de la Terre tels que LANDSAT et SPOT permettent une approche des cultures à une échelle suffisante grâce à la résolution élevée de leurs capteurs, la fréquence du passage de ces satellites n'autorise qu'une observation périodique des cultures à quelques dates de leurs cycles, déterminée en pratique par le calendrier de passage du satellite et surtout par les contraintes de nébulosité.

La possibilité d'obtenir des images de satellites haute résolution en nombre suffisant pour réaliser le suivi spatio-temporel des cultures importantes sur des sites échantillons constitue donc un pari, un défi, de l'action IV.

Céréales d'hiver : orge ou blé ?

Au stade de la photo-interprétation assistée par ordinateur, les classifications effectuées aux différentes dates sont fusionnées pour procéder à une identification raisonnée des cultures.

CARTE 2
La localisation des 50 sites tests



A partir d'avril, l'ensemble des céréales d'hiver et des oléagineux peut être isolé. Au moment de la floraison du colza, qui s'échelonne du début avril à la mi-mai selon les pays, la distinction céréales-colza est nette. Dès la fin avril, les sols nus pour les cultures d'été peuvent être estimés. Selon la date « d'entrée en végétation » (quelques semaines après les semis), il est possible de discriminer le tournesol du maïs.

De mi-juin à fin juillet selon les régions, la distinction blé-orge d'hiver peut être faite : la maturité de l'orge d'hiver est plus précoce que celle du blé. D'autres cultures spéciales telles le riz ou le coton sont bien identifiables sur les images : dès la mi-août le riz est repéré tandis qu'il faut attendre la fin octobre (au moment de l'éclatement des capsules de coton) pour séparer le coton du maïs au sud de l'Europe.

Des évolutions de surfaces et de rendements

La méthodologie et le système d'exploitation mis en place permettent d'identifier, sur les sites échantillons, les douze principales cultures au niveau européen, puis d'élaborer une statistique d'évolution des superficies en comparant les résultats à ceux de l'année précédente.

De plus, les indices de végétation obtenus, s'ils ne constituent pas des indicateurs absolus de la biomasse et des rendements permettent de mettre en évidence des phénomènes agro-climatiques « anormaux » comme l'avance ou le retard de la végétation par rapport aux années précédentes, une sécheresse marquée, des problèmes phyto-sanitaires, et donc de mettre en évidence des variations dans les rendements potentiels.

6.2.3 Les enquêtes de terrain

Le projet communautaire qui a démarré dès 1989 a déjà fourni des résultats fiables. Cependant, en phase expérimentale, les estimations statistiques obtenues doivent être confrontées *a posteriori* aux résultats d'enquêtes de terrain. Celles-ci portent à l'intérieur de chaque site, sur des portions carrées du territoire de 50 hectares de côté, appelées segments. L'enquête consiste à repérer toutes les catégories d'occupation du sol qui se trouvent dans le segment, et dessiner leur implantation. On y choisit un échantillon de parcelles de rendement parmi les cultures d'intérêt, pour lesquelles il est procédé à une interrogation de l'exploitant.

La comparaison, effectuée sur les vingt premiers sites étudiés, répartis sur six pays (Allemagne, Danemark, Espagne, Grande-Bretagne, Grèce et Portugal), montre des résultats voisins selon les deux sources de données. Les trente sites complémentaires appartenant soit à ces mêmes pays, soit aux autres pays membre de la CEE seront intégrés au fur et à mesure de l'avancement du projet. En France, l'opération a commencé en mai 1990.

6.2.4 Un bulletin de conjoncture

Pour répondre à la demande des décideurs économiques ou politiques, le programme de télédétection a été axé sur la rapidité de l'information. Des procédures très strictes ont été mises en place pour réduire les délais de réalisation. L'analyse des images par SCOT Conseil doit être réalisée dans un délai contractuel de 5 jours après réception, soit si la livraison par le fournisseur est satisfaisante, une quinzaine de jours après l'acquisition par satellite. Ce calendrier tendu suppose bien sûr une bonne organisation et un système logiciel et matériel performant.

Six fois par an, un bulletin de conjoncture présentera l'évolution des surfaces et des rendements potentiels entre l'année culturale étudiée et les années précédentes. Ce bulletin de conjoncture constitue le produit de l'Action IV.

ANNEXE

*Avantages et inconvénients des différentes filières
de traitement de données de télédétection
pour étudier l'occupation du sol*

On a tendance parfois à opposer les différentes méthodes d'analyse d'image. Si les thèmes d'étude, l'échelle et l'étendue des surfaces examinées, le niveau de finesse de la nomenclature d'occupation du sol retenu, les caractéristiques des capteurs fournissant les images traitées, aident au choix de la méthode d'exploitation, la séparation des trois filières d'analyse n'est pas aussi nette en pratique. Certains travaux peuvent être effectués en employant plusieurs méthodes à la fois. Il faut donc bien insister sur la complémentarité des approches et non sur leur concurrence.

Avantages	Inconvénients
<i>I) Interprétation d'image améliorée, assistée par ordinateur</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Coût peu élevé par rapport aux autres filières de traitement. - Disponibilité d'une image améliorée neutre servant d'instrument de dialogue avec l'utilisateur final et renseignant sur les rubriques de la nomenclature qui peuvent être obtenues par rapport à celles demandées (meilleur adéquation de la nomenclature). L'image constitue aussi une source d'information potentielle utilisable à d'autres fins (ex : interprétation géopédologique sur l'aptitude des sols). - Possibilité d'obtenir une quarantaine de catégories avec un niveau de fiabilité acceptable de l'ordre de 85 à 90%. - Possibilités de traiter un grand nombre de scènes et des surfaces importantes sans difficulté de raccords d'images. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de disposer de logiciels d'amélioration d'image perfectionnés (ex : restauration d'image). - Interprétation et statistique en surface établies en zone et non par pixel, avec un seuil minimum imposé par des contraintes techniques de lisibilité bien que des phénomènes plus fins soient repérables sur l'image. - Numérisation et stockage des données interprétées sur ordinateur en mode vectoriel et non rastrée, moins coûteux mais moins pratique pour les mises à jour. Toutefois l'existence de programmes informatiques permettant de passer du mode vectoriel au mode rastré limite l'importance de cet inconvénient. - L'interprétation réalisée sur transparent ne constitue qu'un document de travail cartographique. Les résultats de celle-ci doivent être numérisés pour obtenir une statistique des différentes catégories, lesquels, pouvant être fusionnés avec d'autres données géocodées afin d'être cartographiés en couleurs conventionnelles sur système infographique pour présentation au public.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Souplesse de la méthode, le télé-détecteur pouvant : • traiter à part les zones sous brume ou pollution atmosphérique ou dans l'ombre des versants, • prendre en considération la texture et la structure de l'image (reconnaissance des formes), • tenir compte de données exogènes non mises sur ordinateur (altitude, orientation des versants, etc...) et de toutes les informations disponibles par ailleurs (cartes, recensements, inventaires, monographies, etc.) pouvant aider à l'interprétation, • procéder à des agrandissements et traitements simples sur ordinateurs : indices, ratios... (avec éventuellement l'utilisation d'autres bandes spectrales) sur des sites présentant des difficultés, • se procurer des photos aériennes prises lors de la dernière couverture nationale disponible sur des zones posant des problèmes d'interprétation. - Possibilité de procéder à une interprétation progressive à plusieurs niveaux successifs de la nomenclature. - Système simple et rapide d'observation des changements entre deux dates sur une même scène. 	<p>Voir pour les inconvénients la page précédente</p>

Avantages	Inconvénients
II) <i>Classification dirigée</i> (catégorisation)	
<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de faire apparaître des phénomènes présentant des particularités radiométriques difficiles à détecter, sur les caractéristiques de l'eau par exemple. - Possibilité d'utiliser pour la classification un nombre de bandes spectrales supérieur à 3 (qui figurent sur une image améliorée). - Possibilité de redressement global des résultats numériques par catégorie à partir des matrices de confusion établies sur les erreurs de classement des pixels : <ul style="list-style-type: none"> • sur les zones-témoins utilisées pour la catégorisation, • sur des zones-témoins de contrôle (non utilisées pour la catégorisation). - Obtention d'une cartographie info-graphique définitive en couleurs conventionnelles des pixels classés par catégorie. - Classification par pixel se prêtant bien au stockage et à la mise à jour des données en mode rastré. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé d'exploitation auquel il convient de rajouter les frais de recueil de données de terrain, par ailleurs rarement rassemblées au moment de l'enregistrement. Fiabilité finale mal connue de la classification obtenue, de l'ordre de 75% sur une scène entière. - Grande importance du choix des zones-témoins, très largement empirique en nombre et en étendue pour une catégorie donnée, quant au niveau de fiabilité de la catégorisation obtenue. - Nombre de zones-témoins insuffisant – pour des raisons de capacité machine – pour obtenir une catégorisation fiable de plus de 20 à 25 rubriques sur une scène entière, ce qui constitue un nombre limite supérieur. - Difficulté à classer les pixels mixtes et existence probable d'une classe rebut de pixels non classés. - Quasi impossibilité d'utiliser cette méthode sur des surfaces importantes recouvrant un assez grand nombre d'images et de scènes. En effet, la catégorisation est effectuée scène par scène et exige des calages radiométriques, des itérations successives longues, coûteuses et complexes dans le cas de surfaces étendues sur plusieurs scènes enregistrées à des dates et selon des traces différentes. - Réalisation difficile d'un compromis entre le nombre de classes et le niveau de fiabilité <i>a priori</i> de la catégorisation : l'introduction de nouvelles catégories à partir d'un certain seuil proche du pouvoir de discrimination du capteur risque de diminuer la fiabilité d'ensemble acquise à un stade antérieur de la catégorisation (ex : tissu urbain confondu souvent avec les minéraux naturels qui entrent dans sa composition).

Avantages	Inconvénients
Voir pour les avantages la page précédente	<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="581 280 992 493">– Nécessité de traiter à part les zones sous brume, sous pollution atmosphérique (aérosols) et dans l'ombre des versants car les bandes spectrales sont toutes affectées, mais de manière inégale, par ces phénomènes et ont des caractéristiques différentes de celles enregistrées dans des conditions normales.<li data-bbox="581 520 992 638">– Le fait de traiter plus de 3 bandes spectrales à la fois améliore faiblement l'identification automatique des objets et conduit à une fiabilité décroissante au-delà d'une 5^e bande.<li data-bbox="581 666 992 733">– Absence de logiciels généraux opérationnels sur la reconnaissance des formes.<li data-bbox="581 760 992 828">– Forte influence du coefficient personnel de l'opérateur qui procède à la catégorisation.<li data-bbox="581 855 992 1048">– Contrôle <i>a posteriori</i> de validité de la catégorisation sur des zones de contrôle (non utilisées pour initialiser les catégories) pratiquement jamais entrepris pour parvenir à améliorer la classification par itérations successives en raison de la lourdeur et des coûts des traitements.

Avantages	Inconvénients
III) <i>Classification non dirigée</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Bonne construction mathématique et logique de groupes homogènes de réponses spectrales dans l'ensemble des bandes de longueur d'onde d'un capteur spécifié. - Méthode de recherche originale pour détecter certains phénomènes (ex : zones de transition, zones de piémont...). - Méthode intéressante pour étudier les phénomènes géologiques et certaines caractéristiques de l'eau en l'absence de données de terrain. 	<ul style="list-style-type: none"> - Légitimité des hypothèses statistiques sur lesquelles reposent les logiciels à vérifier pour l'étude de l'analyse des données. - Implémentation, efficacité et choix des logiciels à évaluer et à vérifier. Absence de logiciels généraux opérationnels sur la reconnaissance des formes. - Coût assez élevé pour analyser des surfaces importantes et difficultés pour caler au plan radiométrique des scènes de date et de trace différentes. - Interprétation délicate des groupes constitués tenant compte de plusieurs variables thématiques contenues dans l'image (géo-pédo-morphologie, par exemple). - Obtention d'un nombre peu élevé de classes intéressantes pour un thème d'étude parmi les groupes constitués qui sont en nombre inférieur à ceux d'une classification dirigée. - Cartographie infographique et résultats numériques par classe à reprendre après interprétation des groupes et fusion (ou éclatement) de certaines classes. - Impossibilité de traiter les zones sous brume ou sous pollution atmosphérique et à l'ombre des versants.