

MICHEL LENCO

**La télédétection : une nouvelle source d'information
pour l'environnement**

Journal de la société statistique de Paris, tome 120, n° 1 (1979), p. 32-50

http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1979__120_1_32_0

© Société de statistique de Paris, 1979, 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/>

III

ARTICLES

LA TÉLÉDÉTECTION : UNE NOUVELLE SOURCE D'INFORMATION POUR L'ENVIRONNEMENT (1)

Michel LENCO

*Administrateur de l'I. N. S. E. E., chargé de mission au
ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie*

La télédétection aérienne et spatiale constitue un système d'acquisition d'informations à distance sur la biosphère qui sont localisées et répétitives et qui mettent en évidence les interactions entre les différents phénomènes ou secteurs d'activité. Les résultats élaborés après traitements visuels ou informatiques se présentent sous forme de cartes et de tableaux statistiques de répartition du territoire. La télédétection s'avère intéressante pour l'environnement dans les domaines de l'inventaire et de la gestion des ressources en eau, de l'inventaire, de la surveillance et de la gestion de l'occupation de l'espace et du littoral, de l'inventaire et de la gestion des forêts et parcs nationaux ou régionaux, de la qualité et de la gestion des milieux naturels.

Aerial and space remote sensing provides a system of acquiring information on the biosphere from the distance, which are localized and repetitive and show the interactions between various phenomena or activity sectors. After usual processing or computerisation, the results are presented in the form of maps and statistical tables showing the distribution of the territory. Remote sensing is a valuable source of information on the environment in the fields of inventorying and management of water resources, inventorying and monitoring and management of land cover and coasts, inventorying and management of forests and national or regional parks, quality and management of natural environment.

1. Cette note s'inspire pour une très large part d'une communication présentée pour l'environnement au séminaire GERMES, Arc et Senans, septembre 1977, et d'un rapport soumis au groupe d'experts sur l'état de l'environnement de l'O. C. D. E. en novembre 1977.

I — LA TÉLÉDÉTECTION, PRÉSENTATION ET PLACE PAR RAPPORT
AUX AUTRES SYSTÈMES D'INFORMATION

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

- de recueillir des renseignements d'ordre physique sur la surface terrestre (terre et eau), son couvert et son environnement : proche atmosphère, faible profondeur dans le sol, pénétration de quelques mètres dans l'eau;
- de traiter ces données par des méthodes statistiques visuelles ou, surtout, opto-électriques et informatiques (analyse multicritère);
- 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 supervisés ou non supervisés à partir de vérités-terrain, cartes thématiques et de synthèse et surfaces correspondant aux classifications avec indication de la précision relative obtenue.

1.2. La saisie des informations est effectuée à partir des *plateformes d'observation* qui sont des vecteurs aériens ou spatiaux : ballons à basse ou haute altitude, avions et satellites géostationnaires (observation continue) ou bas à défilement (observation cyclique). Les vecteurs portent des *capteurs*, c'est à dire des appareils susceptibles de recevoir et de mesurer l'intensité du rayonnement qui provient du sol 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 capteurs sont des appareils photographiques, des radiomètres à balayage multispectral ou infra-rouge thermique, électronique ou mécanique, des radars ou des lasers. Les capteurs restituent des images et analysent le rayonnement émis ou réfléchi par les formes et les objets de la surface terrestre dans des longueurs d'onde auxquelles ils sont sensibles : ultra-violet, visible, proche infra rouge, infra rouge thermique, hyperfréquences, afin de reconnaître ces formes et ces objets. *Le principe fondamental de la télédétection postule la spécificité des effets physiques pour un objet donné.*

Le volume et la qualité des renseignements recueillis sont caractérisés : par la surface couverte fonction du champ angulaire, de la focale et de l'altitude, par l'échelle et la résolution au sol (ex. : 900 m pour les satellites météorologiques NOAA, 60 à 80 m pour les satellites Landsat), par les conditions de prise de vue, par les qualités géométriques et radiométriques des images et mesures. Pour un même terrain élémentaire analysé ⁽¹⁾, les enregistrements multispectraux sont aussi nombreux 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 pré traitements. Les corrections sont : soit radiométriques et consistent à étalonner et calibrer les valeurs observées, soit géométriques en raison des incidents de vol caractérisant l'attitude de la plateforme de vol : roulis, tangage, lacet.

1. pixel : picture element.

1.3. L'exploitation des données est réalisée par *analyse visuelle* : photo-interprétation par analyse manuelle ou mécanisée en isodensité ou par filtrage optique en lumière cohérente après étude multisaisonnière et amélioration des contrastes et contours des images, et au moyen de *méthodes optiques et numériques* associant l'analyse spatiale à l'analyse spectrale en mettant en avant des notions de texture ou structure qui rapprochent les points observés de leur contexte ou environnement spatial et leur insertion dans le paysage caractérisé lui-même par des éléments remarquables.

Le dépouillement informatique des renseignements rassemblés peut relever de deux démarches : une *approche probabiliste* qui conduit d'abord à classer les informations selon leur degré d'homogénéité des signatures radiométriques avant de rechercher la signification de chaque classe constituée en un second temps en ayant recours à l'analyse multidimensionnelle ; une *démarche déterministe* qui consiste à fixer le modèle d'interprétation au départ à l'aide d'observations vérité sol. *Les deux modes de classification, dits respectivement non supervisé et supervisé* (ou semi supervisé), exigent tous les deux des échantillons de vérité-terrain pour vérifier la validité d'extension des classifications et disposer d'un catalogue de signatures d'objets.

1.4. La télédétection présente des *limites dues* : aux phénomènes physiques, à la nature des phénomènes observables, aux conditions météorologiques, à la précision ou au pouvoir de résolution au sol, à la sensibilité des capteurs. Les renseignements sont restitués après traitement sous forme d'images, de cartes corrigées géométriquement directement comparables aux cartes classiques, et de résultats numériques accompagnés de leurs niveaux de fiabilité pour chaque unité aérotaire dont la dimension varie avec la nature, l'altitude et la vitesse du vecteur, avec les caractéristiques des capteurs qui doivent être adaptés aux besoins, au parcellaire cultural et urbain, à la diversité des sols, des reliefs, des climats et des ressources en eau, ainsi qu'à la variété des cultures et de la couverture végétale.

1.5. *Les avantages principaux* de la télédétection sont : son approche globale de la couverture du territoire mettant en évidence les interactions entre les différents phénomènes ou secteurs d'activité pour de très grandes fractions de l'espace terrestre et du littoral, l'utilisation de capteurs sensibles dans une gamme de longueurs d'onde s'étendant bien au delà du domaine visible et couvrant des espaces où l'homme ne peut aller, la répétitivité des survols qui permet de suivre les évolutions de l'occupation de l'espace et des phénomènes qui y sont rattachés car les informations sont parfaitement localisées et peuvent être comparées et projetées dans le temps, un coût moindre et une rapidité de restitution des résultats plus grande par rapport aux systèmes d'information classiques.

1.6. *La télédétection complète les systèmes d'information existants en raison de son approche globale* et de la possibilité de faire apparaître des limites administratives, conventionnelles ou géographiques sur les résultats obtenus pour fournir des documents adaptés aux responsables de l'action et raccorder les renseignements obtenus à ceux des systèmes classiques existants. Elle permet de dresser des inventaires et une comptabilité patrimoniale en termes physiques, de suivre les changements dans le temps ainsi que de définir sans à priori des zones et espaces homogènes pour des thèmes donnés dans un cadre géographique affranchi des limites administratives qui nuisent parfois à l'étude des phénomènes, exemples : zones biophysiques, découpage spatial d'une agglomération en zones homogènes en fonction d'un choix de critères.

1.7. La télédétection comprend les informations fournies par des missions aériennes à basse et haute altitude, par les satellites bas à défilement, par les satellites à haute altitude et

géostationnaires ⁽¹⁾. Elle constitue un nouveau système intégré d'information précieux pour étudier l'environnement à diverses échelles : occupation de l'espace, littoral, forêt, ressources en eau, aspects biophysiques et paysagers, qualité des milieux, impacts des grands travaux d'équipement et d'aménagement, etc... *Ce système doit être raccordé aux autres sources de renseignements conventionnelles* : informations qualitatives ou quantitatives éparses, sous-produits d'activités réglementaires ou administratives, fichiers statistiques, recensements, enquêtes par sondage par correspondance ou par enquêteur avec recueil de déclarations ou observations directes. *Toutefois les informations obtenues en télédétection sont d'ordre géographique, physique et radiométrique*, donc de nature différente des renseignements recueillis par les méthodes classiques. En outre, les données télédétection sont répétitives et plus globales et synthétiques car elles prennent en compte simultanément un grand nombre de variables. Enfin la production de certaines informations à priori ou indicateurs très spécifiques ou très localisés peut rencontrer un facteur limitant dans le coût actuel de la collecte des vérités terrain nécessaires à l'interprétation des données radiométriques et des traitements informatiques mis en œuvre. C'est pourquoi il paraît urgent de proposer des *nomenclatures* prenant en considération à la fois les besoins exprimés par les utilisateurs (niveau de détail, de résolution et de fiabilité), les possibilités techniques offertes par la télédétection à moyen terme, et les correspondances indispensables avec les classifications actuellement en usage.

II — ÉTAT D'AVANCEMENT DE LA TÉLÉDÉTECTION

Actuellement, la télédétection aérienne et spatiale des ressources terrestres est utilisée surtout pour : l'agriculture et la potentialité des terres, la recherche géologique et minière, les ressources en eau et la qualité de l'eau, l'inventaire et le suivi de la couverture glaciaire et neigeuse, l'inventaire et la surveillance des forêts et parcs nationaux, l'inventaire et le suivi de l'occupation de l'espace et du littoral, l'aide à la décision pour l'implantation et pour l'observation de l'impact des grands travaux d'aménagement, d'urbanisation et d'équipement, l'évaluation des risques et des dégâts occasionnés par les calamités naturelles.

Les études de télédétection ont d'abord été effectuées sous forme d'analyses visuelles ou mécanisées :

- de photographies avec ou sans filtre en noir et blanc ou couleur, en infrarouge noir et blanc ou couleur, ainsi que de thermographies;
- d'images multispectrales avion ou satellite.

1. Les principales informations télédétection proviennent actuellement :

- des missions aériennes à haute ou basse altitude avec des capteurs photographiques, multispectraux ou thermiques;
- des satellites météorologiques munis de 2 canaux visible et thermique livrant des données tous les jours avec un niveau de résolution de 900 m;
- des satellites américains « ressources terrestres » : Skylab (1973) équipé de 13 canaux visibles ou infra-rouges avec un niveau de résolution de 60 m; Landsat I (1972-1977) et II (depuis 1975) peuvent fournir des renseignements tous les 18 jours chacun aux aléas de la couverture nuageuse près dans les domaines visible et proche infra rouge (4 canaux) avec un niveau de résolution de 60 à 80 m, soit 1/2 ha; un 3^e satellite Landsat C a été mis en service en mars 1978 et présente des caractéristiques semblables. Le lancement d'autres satellites a été réalisé en 1978 ou est prévu au cours des prochaines années : « Heat Capacity Mapper » (1978), Seasat (1978), Nimbus G (1978), « Space Shuttle » (1982) et surtout Landsat D (1981) avec une résolution spatiale de 30 m (120 m dans le thermique) et 7 canaux dont un thermique, la répétitivité de passage étant de 18 jours. Le Centre National d'Études Spatiales français prépare le lancement du satellite SPOT (système probatoire d'observation de la terre) pour 1984 ayant un niveau de résolution au sol de 20 m dans 3 ou 4 bandes multispectrales recouvrant le visible et le proche infra-rouge.

Cependant, depuis le lancement des satellites Landsat I et Skylab on a assisté à un développement progressif d'exploitations informatiques rapides des données satellite avec édition de tableaux numériques accompagnés du niveau de fiabilité des résultats et de cartes corrigées géométriquement obtenues par des procédés automatiques. Ces dépouillements sur ordinateur, effectués actuellement aux États Unis, au Canada, au Japon etc... à l'aide de stations de traitement précâblées opérant selon une méthode interactive, ont été assortis de modèles d'interprétation. Peu à peu les études sont devenues plus ambitieuses. Les analyses informatiques de données multispectrales recueillies par avion ont, elles aussi, été développées parallèlement avec succès. Toutefois la question des corrections radiométriques et géométriques présente plus de difficultés dans le cas de l'avion que dans celui du satellite, et les données avion sont plus nombreuses pour une même surface en raison de l'altitude plus basse du vecteur et du plus grand nombre de canaux d'enregistrement. C'est pourquoi, exception faite de certains travaux spécifiques tels que l'étude de fleuves et de lacs de dimensions moyennes ou petites ou de zones urbanisées à observer de manière très fine, les missions multispectrales avion restent encore assez coûteuses.

Il existe donc d'ores et déjà une télédétection aérienne et spatiale opérationnelle ou quasi opérationnelle qui progresse rapidement et est suivie d'un programme d'expérience développé étalé sur les prochaines années dans plusieurs pays tels que les États Unis, le Canada, le Japon, l'URSS. D'autres pays en voie de développement ⁽¹⁾ ainsi que des pays développés comme l'Italie, la République Fédérale d'Allemagne, le Royaume Uni, la France, l'Espagne et les pays scandinaves développent aussi l'utilisation de la télédétection en se livrant à des exploitations d'images Landsat et en procédant à des expériences et à l'évaluation des capteurs et vecteurs nécessaires à la saisie de l'information, aux traitements et modèles d'interprétation à mettre en œuvre ainsi qu'aux restitutions de produits à fournir aux utilisateurs pour satisfaire les besoins de ces derniers à des conditions de coût, d'échelle, de précision et de fiabilité données, compte tenu de la variété des climats, du couvert végétal et des dimensions des parcellaires.

Les progrès réalisés et en cours dans le traitement automatisé soit des images Landsat (dont le nombre de stations de réception est en accroissement) soit des missions multispectrales aériennes, montrent que *l'usage de la télédétection ne peut aller qu'en s'accroissant, d'autant que plusieurs satellites américains avec des capteurs plus sensibles des résolutions au sol améliorées et, pour certains, des équipements en ondes radar et micro ondes passives permettant d'opérer par tous les temps, vont être lancés au cours des prochaines années* ⁽²⁾. Ces satellites vont fournir des informations plus riches, plus détaillées, à des échelles plus grandes, à un rythme plus fréquent et plus régulier, qui vont dans le sens d'une meilleure satisfaction des besoins des utilisateurs.

III — APERÇU DES POSSIBILITÉS OFFERTES PAR LA TÉLÉDÉTECTION POUR DES THÈMES INTÉRESSANT L'ENVIRONNEMENT

3.1. La télédétection apporte des informations en quantité notable dans des domaines aussi variés que la météorologie, l'océanologie, la géomorphologie, la recherche archéologique,

1. La télédétection est un excellent instrument d'information pour les pays très vastes et pour les pays en voie de développement où il n'existe pas de cartes très détaillées, ni de renseignements statistiques classiques nombreux, ni d'infrastructure d'enquête étoffée.

2. Cf. note du § 1. 7.

la prospection minière, la géologie, l'agriculture, l'hydrologie, la forêt et le milieu naturel, l'occupation de l'espace et du littoral, l'aménagement du territoire, et l'environnement (qualité des milieux, aspects écologiques, ...). On s'intéressera plus particulièrement aux cinq derniers thèmes les plus en rapport avec l'environnement en examinant les données qui peuvent être fournies d'ores et déjà de manière opérationnelle ou qui pourront être obtenues à moyen terme.

3.2. Inventaire et gestion des ressources en eau

La télédétection apporte des renseignements sur les eaux continentales et littorales, leurs abords, leur qualité, et sur tous les problèmes liés à l'humidité du sol et de la végétation. On distingue :

- Irrigation, drainage, mesure de la perméabilité et de l'humidité des sols, évapotranspiration par bilan radiatif, zones inondées et inondables, zones humides et leur type de végétation, courantologie et déplacements des lits fluviaux; niveau des fleuves, lacs et réservoirs; érosion et morphologie des rives et des plages, processus alluviaux, isochrones de l'écoulement, prévision du volume et de la qualité des eaux par bassin versant, gestion des systèmes hydrauliques, zones de contact d'eaux de nature différente et intrusions salines, estuaires et marées, gestion des flux par l'emploi d'injections de colorants, interface avec la terre.
- Compléments d'informations météorologiques pour l'agriculture : paramètres hydrométéorologiques, époques d'irrigation, d'ensemencement, de plantation, de récolte, de lutte contre les gelées; évaluation des risques et des dégâts causés par les avalanches, les inondations, les gelées, les tempêtes côtières, la sécheresse; prévision du volume d'eau disponible. Précipitations : pluviométrie, ruissellement; bilan des ressources en eau.
- Neige et glace : étendue, profondeur, température, contenu en eau de la couche neigeuse, épaisseur de la couverture de glace sur les fleuves, les lacs, la mer; mouvements, fonte et fissures de la couche glaciaire; prévision du volume annuel d'eau par bassin versant.
- Aide à la pêche et à la navigation; sélection des sites pour les réservoirs, canaux, conduites, digues; aide aux investigations géologiques.
- Gestion de la végétation aquatique émergée et submergée ou au voisinage des zones humides, floraison d'algues, gestion de la végétation des rives (mauvaises herbes et phéatophytes), repérage de zones ou de caractères liés au développement d'organismes et vecteurs responsables de maladies de l'homme, des animaux et des plantes, ex. : zones d'habitat et de prolifération des moustiques; occupation de l'espace en milieu côtier. Équilibres écologiques et dynamiques. Zones d'habitat pour la faune. Définition de zones hydrologiquement homogènes.
- Eaux souterraines : profondeur, étendue, porosité, transmissibilité, localisation potentielle, recharge, déversements d'effluents par infiltration, intrusion d'eau salée.
- Qualité de l'eau, détection et mesure : bathymétrie des eaux peu profondes, température, conductivité, salinité, transparence, turbidité, matières en suspension : sédiments et matières organiques et chimiques, chlore, nitrates et phosphates, pétrole, détergents, eutrophisation (algues) et chlorophylle a, hydrocarbures, pesticides, rejets et diffusion des panaches des collectivités et industries polluantes,

rejets des stations d'épuration, oxygène dissous, calcium, magnésium, sodium. Localisation des émissaires et rejets domestiques et industriels. Diffusion des pollutions.

3.3. Inventaire, surveillance et gestion de l'occupation de l'espace et du littoral

L'étude de l'occupation de l'espace à l'aide de la télédétection nécessite au préalable la mise au point d'une *nomenclature* à plusieurs niveaux tenant compte à la fois des possibilités discriminantes offertes par cette technique et des besoins des utilisateurs.

Exemple de classification de la nature et de l'utilisation des terres pouvant être obtenue en télédétection : la nomenclature 1976 à deux niveaux de l'U. S. Geological Survey utilisée en Amérique du Nord et en Espagne :

<i>Niveau I</i> ⁽¹⁾	<i>Niveau II</i> ⁽¹⁾
1. Zones urbaines ou terrains bâtis	11 Zones résidentielles. 12 Commerces et services. 13 Industries. 14 Transports, communications et services publics. 15 Complexes industriels et commerciaux. 16 Terrains partiellement urbanisés ou bâtis. 17 Autres terrains urbanisés ou bâtis.
2. Terres agricoles	21 Cultures annuelles et prairies. 22 Vergers, bosquets, vignobles, pépinières et horticulture ornementale. 23 Élevage industriel en zone confinée. 24 Autres terres agricoles.
3. Savanes et parcours (utilisés ou non)	31 Savane herbeuse. 32 Savane à buissons et épineux. 33 Savane mixte.
4. Terres boisées	41 Forêts d'arbres caducs. 42 Forêts persistantes. 43 Forêts mixtes.
5. Eaux	51 Cours et voies d'eau. 52 Lacs. 53 Réservoirs. 54 Baies et estuaires.
6. Zones humides	61 Marais boisés. 62 Marais non boisés.
7. Zones arides	71 Lacs salés asséchés, chotts. 72 Grèves. 73 Zones sableuses autres que les grèves. 74 Roche nue. 75 Mines à ciel ouvert, carrières et gravières. 76 Zones de transition. 77 Terres arides mixtes.

1. Actuellement les données satellite fournissent des informations à un niveau intermédiaire aux niveaux I et II. Le niveau II est satisfait par des missions aériennes à haute et moyenne altitude.

*Niveau I (suite)**Niveau II (suite)*

8. Toundras	81 Toundra à buissons et épineux.
	82 Toundra herbacée.
	83 Toundra aride.
	84 Toundra humide.
	85 Toundra mixte.
9. Neiges ou glaces pérennes	91 Champ de neige perpétuel.
	92 Glaciers.

Les apports de la télédétection concernent le recueil d'informations exhaustives et répétitives sur l'occupation de l'espace et le littoral ainsi que de données particulières ou de synthèse utiles à l'aménagement du territoire :

- Inventaire des principales espèces végétales cultivées ou non, estimation de la biomasse, connaissance des différentes cultures et terres à usage pastoral, assolements pratiqués, structure des parcellaires, rétention d'eau dans le sol et réserves humiques, influence des façons culturales (amendements, adaptations variétales, haies, brise-vents, talus, remembrement), appréciation de la teneur du sol en minéraux (carences), évaluation des échanges thermiques au sol (microclimatologie, microclimats), aptitude des sols, potentialités agricoles et risques d'érosion, évaluation des stades végétatifs en fonction des microclimats et de la situation des espèces les mieux adaptées, détection de la localisation des attaques parasitaires et extension des zones touchées, évaluation des dégâts à la végétation causés par les calamités naturelles : gel, grêle, orage, crues,... et les retombées de la pollution atmosphérique, zones d'habitat favorable pour la faune, glissements de terrain.
- Cartographie des types d'utilisation du sol, localisation des réserves potentielles de matériaux de construction, étude de la constructibilité des terrains, étude du bâti, de ses variations et de l'interface urbain-rural, contrôle de l'aménagement urbain et littoral et de l'extension des villes, détermination de zones homogènes en milieu urbain, ancienneté, densité, espaces verts et ouverts ou libres en milieu urbanisé ou en bordure de ce dernier, sélection de sites pour la construction de grands travaux d'équipement ou d'aménagement (voies de communication, barrages, ports, industrialisation, etc...) et impact de ces travaux sur l'environnement naturel, étude des dégagements de chaleur en provenance de bâtiments d'habitation ou d'usines et de canalisations (incidences sur les économies d'énergie), suivi des ouvertures et progression des chantiers, localisation et densité des résidences secondaires.
- Étude et inventaire du *littoral* : qualité de l'eau, ressources marines, mécanismes et ressources physiques, interfaces terre-mer et mer-eaux continentales, nature de la côte, occupation du sol des rivages, formations végétales en bordure de mer, unités écologiques, zones d'habitat pour la faune ou pour l'agriculture, densité du bâti, implantation optimale et impacts des travaux d'urbanisation, d'industrialisation et d'équipement (ports, zones de loisirs), rejets, pollutions par hydrocarbures ou polluants chimiques. Sélection de sites pour l'aquaculture et la baignade.

3.4. Inventaire et gestion des forêts et parcs nationaux ou régionaux

Les renseignements concernant l'inventaire et la gestion des forêts et des parcs nationaux ou régionaux peuvent être recueillis en assez grand nombre au moyen de la télédétection :

Carte et inventaire par espèces avec les surfaces correspondantes, estimation de la production potentielle sur pied, estimation de la biomasse, nature de la végétation en liaison avec l'époque de la fonte des neiges, aptitude des sols (pente, exposition), zones optimales d'aménagement, surveillance des coupes, des zones déboisées et en cours de boisement (naturel ou plantation), degré d'humidité ou de sécheresse, évaluation des risques d'incendie basée sur la connaissance dynamique des associations arbustives, surveillance des incendies de forêt, des dommages occasionnés et de la régénération forestière, détection des foyers d'incendie à travers la fumée, localisation des attaques des maladies et des insectes et contrôle de l'efficacité de la lutte phytosanitaire, atteintes portées par la pollution atmosphérique et les tempêtes, étude des éboulis selon le type, piétinement et fréquentation, recherche des points d'eau, zones biophysiques remarquables, implantation optimale et impacts des grands travaux d'équipement, effectif des gros gibiers répartis en adultes jeunes pour les principales espèces.

3.5. Qualité et gestion des milieux naturels.

La télédétection fournit des renseignements sur les aspects écologiques et sur la qualité des milieux naturels : air, eau, sol, qui sont utiles à la gestion de ces milieux :

- Qualité de l'air : localisation, présence et dosage, diffusion et effets des polluants sur la végétation; observations des paramètres : poussières et particules, fumées, température, CO, SO₂, CH₄, NH₃, CIH, C₂H₆, NO_X, NO₃H, O₃, H₂O. Classification des zones de pollution de l'air.
- Qualité de l'eau : localisation, présence et dosage, diffusion des paramètres et polluants évoqués en 3.2. Classification des surfaces en eaux continentales et littorales selon la qualité.
- Qualité du sol : localisation, présence, surface :
 - des carrières, gravières, sablières et mines à ciel ouvert, en activité ou fermées et potentielles;
 - des dépôts de déchets domestiques et industriels (dont ferrailles) en activité ou abandonnés, échauffement des crassiers et terrils;
 - des effluents d'élevages industriels.
 Repérage d'hydrocarbures sur le sol et des terrains ayant reçu des pesticides et des engrais.
- Aspects écologiques : zonage biophysique et suivi de ces zones, détermination des zones sensibles et des zones menacées par les pressions et activités humaines, aide à la délimitation des zones à protéger; catégories et formes de paysages (relief, drainage, topographie, types de couverts, éléments symétriques, tons et couleurs); analyse géologique de surface du couvert naturel et du couvert entretenu; repérage des zones favorables au développement des parasites et insectes.

IV — EXEMPLES D'APPLICATIONS A L'ÉTRANGER (1)

4.1. Exemples d'application dans le domaine des Ressources en eau et de la qualité de l'eau.

a) Les données Landsat multitemporelles ont servi à mettre au point en 1975 pour l'U. S. Geological Survey un système de *gestion de l'eau dans le sud de la Floride* * sur une zone comprenant 2 millions et demi d'habitants. Les surfaces en eau détectées sur l'imagerie Landsat ont été disponibles 2 heures après le passage du satellite et ont été comparées aux relevés au sol. Dans cette zone où l'agriculture avec irrigation est pratiquée, et qui englobe le parc national et le bassin des Everglades, il existe un système complexe d'écluses et de canaux, de réseaux de contrôle, de stations de pompage et d'aires de stockage de l'eau. Les surfaces en eau sont en étroite corrélation avec le niveau d'eau. Le système fonctionne à partir de données hydrologiques disséminées et collectées automatiquement en permanence. Les décisions, prises en fonction des informations traitées, concernent la distribution d'eau à la population, à la faune et à la flore. Elles doivent protéger des inondations et assurer la conservation de l'eau ainsi que l'approvisionnement de l'agriculture et des villes côtières. L'eau des canaux n'est pas vidée dans l'océan, mais infiltrée dans la nappe aquifère de Biscayne. Des changements notables interviennent à la saison des pluies et à la saison sèche. Des visites de contrôle des appareils enregistreurs sont effectuées une fois par mois, mais le système d'information ne peut être exploité qu'au bout d'un délai de deux mois avec introduction d'autres renseignements nationaux. L'utilisation des données Landsat a permis de raccourcir les délais de disponibilité des informations de 2 mois à 2 jours. Les données Landsat ont permis d'étudier sur les surfaces en eaux classées par bassin de drainage : la profondeur (9 classes), la turbidité, la chlorophylle, les algues, les matières organiques en suspension, ainsi que l'oxygène dissous, la conductivité. Les données multitemporelles offrent la possibilité de suivre le niveau d'eau et l'humidité du sol ainsi que l'évapotranspiration, et de repérer les sites les plus favorables à l'abri de la faune.

b) Une étude a été effectuée aux États Unis en 1976 à la demande de l'Environment Protection Agency à partir des données Landsat du 31 juillet 1975 sur la *Baie de Saginaw dans le lac Huron pour observer la qualité de l'eau* *. 16 stations sur l'eau dans la baie ont enregistré au moment du passage du satellite 9 paramètres : température, profondeur mesurée avec le disque de Secchi, chlore, conductivité, nitrates, phosphates, chlorophylle a, sédiments et matières en suspension. On a considéré que les mesures de cet échantillon au sol étaient valables pour les 80 surfaces élémentaires de 1/2 ha disposées en cercle autour du point d'observation, et l'on a recherché sur ordinateur la corrélation existant entre les relevés et les signatures radiométriques dans les deux premiers des canaux de longueur d'onde. Les corrélations atteignent le niveau de 0,99. On a traité des données radiométriques sur lesquelles les corrections géométriques avaient été effectuées. Une carte en couleurs conventionnelles des résultats étendus à toute la zone d'étude du lac a été établie pour l'ensemble des 9 paramètres répartis en 5 classes d'intensité avec indication de la précision des estimations. Des résultats extrêmement intéressants apparaissent quant à la localisation et à la diffusion des pollutions, toutefois les données Landsat analysées dépendent des conditions atmosphériques et de l'état de l'eau au moment de l'enregistrement. L'utilisation du sol du bassin de la rivière Saginaw se jetant dans la baie et couvrant 16 060 km² à dominante

1. Les résultats des études signalés par * ont été obtenus en utilisant une station de traitement Bendix.

agricole, mais comprenant 4 centres urbains a également été cartographiée selon une classification de l'utilisation du sol à 4 rubriques : urbanisé, agriculture et prairie, forêt, zones humides.

4.2. Exemples d'application dans le domaine de l'occupation de l'espace et du littoral

a) Une vingtaine d'états des États-Unis ont fait (ou font) l'objet d'une classification de l'occupation de l'espace à partir des images Landsat. La *classification de l'Ohio* * peut être donnée à titre d'exemple. La classification a été effectuée à partir de 11 scènes Landsat enregistrées en Avril, Juillet ou Octobre 1975 ou 1976 sur 44 200 miles carrés. Il n'existe pas de couverture uniforme prise au même moment en raison des conditions météorologiques.

Cette opération a été commandée par les services du développement économique et des collectivités, de l'« Environment Protection Agency », et des ressources naturelles de l'État. On disposait de vérités terrain constituées par : une couverture partielle en photos aériennes infra rouges obtenue à 20 000 m d'altitude, la couverture photo-aérienne de l'U. S. Geological Survey au 1/24 000, des cartes classiques et des observations au sol. On a procédé à une classification supervisée à partir d'aires d'apprentissage représentatives recouvrant 8 9 à 16 18 ha (20 à 30 par image), en retenant de 20 à 60 surfaces élémentaires de 1/2 ha pour identifier les signatures radiométriques de chaque catégorie avant d'étendre la classification à l'ensemble de chaque scène, puis l'on a comparé les signatures de chaque catégorie entre les 11 scènes pour constituer à la suite de plusieurs itérations un catalogue de signatures pouvant être étendu à l'ensemble des images de l'état. On est parti de 33 classes pour n'en retenir que 22 finalement avec regroupements en 7 grandes catégories constituant le niveau I de la nomenclature Anderson.

<p>1 — <i>Urbain</i> Centre Résidentiel Suburbain-agricole</p> <p>2 — <i>Agriculture</i> Production végétale vigoureuse Production végétale moyenne à rare Terrains nus récoltés ou labourés Pâturage</p> <p>3 — <i>Milieu naturel</i> Défriché/urbain Broussailles et buissons Herbacé Herbe entretenue</p>	<p>4 — <i>Forêt</i> Dont mixte conifères et feuillus</p> <p>5 — <i>Eau</i> Turbide Claire</p> <p>6 — <i>Zones humides</i> Non boisées Boisées</p> <p>7 — <i>Sol nu</i> Mares ou aires pour le dépôt de déchets Mines, carrières, gravières Dépouillé, nu Dépouillé, urbain Plages</p> <p>8 — <i>Non catégorisé</i></p>
--	--

La classification a donné lieu à des tableaux statistiques en surface et à des images en couleurs corrigées géométriquement et orientées nord sud en utilisant des repères au sol (1 000 environ). Le fond de carte en rectangles élémentaires de l'U. S. Geological Survey a été reporté sur les sorties images. Un échantillon de ces rectangles élémentaires a servi à vérifier la qualité de l'extension de la classification sur les 11 scènes, car plusieurs essais successifs ont été effectués et ont entraîné des corrections, notamment sur les interfaces agriculture-urbain nu. Le coût de production s'élève à 0,9 D. par mile carré.

Une étude analogue sur 19 scènes Landsat recouvrant les 180 000 km² du *Dakota du*

Nord * a permis d'élaborer une classification en 36 postes, avec regroupements cartographiés en 10 classes, correspondant au niveau II de la nomenclature Anderson. On a utilisé 28 zones d'apprentissage par image et 11 itérations successives ont été nécessaires pour élaborer un catalogue de signatures pouvant être étendu à l'ensemble de l'état. De nombreuses cartes à des échelles diverses avec incorporation de données exogènes ont été produites. Le coût total de l'opération s'élève à 1,1 D par km².

b) La même procédure de classification supervisée des images Landsat est utilisée pour analyser *l'occupation de l'espace des zones côtières*. Les nomenclatures obtenues pour répartir les surfaces sont d'une nature différente des précédentes. Ainsi la classification suivante a été établie avec un degré de fiabilité a priori supérieur à 90 % dans la zone de la *baie de Delaware aux États-Unis*.

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Forêt 2. Phragmites communis (roseaux) 3. <i>Spartina patens</i> et <i>Distichlis spicata</i> (plantes des marais salants) 4. <i>Spartina alterniflora</i> (plantes des marais salants) 5. Cultures annuelles (3 catégories) 6. Terres agricoles labourées | <ol style="list-style-type: none"> 7. Sable et sol sablonneux nu 8. Vase et asphalte (2 catégories possibles) 9. Eau salée profonde 10. Eau salée peu profonde ou chargée de sédiments 11. Eau douce en étang 12. Usage industriel 13. Non catégorisé |
|--|--|

c) Une étude menée à partir de 6 images multispectrales Landsat au 1/250 000 observées en été, en automne et en hiver, avec l'appoint d'images Skylab, a été effectuée sur *l'occupation de l'espace dans les zones montagneuses de l'Italie*. Cette étude a couvert 200 000 km² et a permis de dresser une carte en 7 classes (niveau I) au 1/250 000 en 3 mois par analyse visuelle. Ont participé à ce travail : deux géologues employés durant un mois au recueil de vérités terrain, un photographe travaillant pendant un mois en laboratoire, cinq photo-géologues travaillant pendant deux mois à l'établissement de la carte à partir des deux canaux Landsat 5 (visible) et 7 (proche infra-rouge). On a utilisé comme données terrain : des cartes d'occupation du sol (très anciennes), des relevés géologiques de moins de 10 ans et des cartes de la végétation.

La complexité de l'utilisation des terres, la morphologie intensive des étendues de montagnes jeunes, la possibilité de prendre en considération à la fois des éléments multi-temporels, la pente et la texture, et des calculs de temps et de coûts sont les raisons qui expliquent que, provisoirement, des techniques conventionnelles d'exploitation soient supérieures à une classification automatique à l'échelle au 1/250 000. Cette recherche a permis de parvenir à la nomenclature suivante d'occupation de l'espace à 4 niveaux.

<i>Niveau I</i>	<i>Niveau II</i>	<i>Niveau III</i>	<i>Niveau IV</i>
1. Terrain bâti	résidentiel ⁽¹⁾ commercial ⁽¹⁾ industriel ⁽¹⁾ voies des communi- cations ⁽¹⁾		
2. Terrain agricole	cultures plantations	céréales maraîchage, vi- gnobles, vergers, oliveraies, agrume- raies, noyeraies	blé, riz

<i>Niveau I</i>	<i>Niveau II</i>	<i>Niveau III</i>	<i>Niveau IV</i>
1. Surfaces en herbe	pâturages ⁽¹⁾ surfaces non entretenues ni utilisées ⁽¹⁾		
4. Bois	feuillus conifères	toujours verts sapins, pins et pins parasols, mélèzes	châtaignes maquis chênes verts
5. Eau	cours et voies d'eau lacs réservoirs	naturels, artificiels	matières en suspension profonds peu profonds
6. Terrain nu	plages sable ⁽¹⁾ rochers	volcaniques, sédimentaires	calcaire, sable, marne
7. Neiges éternelles, glaciers			
1. Niveau de précision médiocre.			

d) L'occupation de l'espace des *grandes agglomérations urbaines* a pu être étudiée à partir des images Landsat. Elle permet de procéder à des zonages en milieu urbain et aussi d'observer, par comparaison d'images à des époques différentes, les changements d'affectation du sol avec une exactitude de 95 %.

Les classifications effectuées sur des agglomérations comme Washington, Seattle, Phoenix, San José, etc... aux États Unis, Londres au Royaume-Uni, Milan et Rome en Italie, etc... sont d'ordinaire traitées de manière supervisée à l'aide de vérités sol, de photographies aériennes noir et blanc et infra-rouge couleur.

L'exemple ci après porte sur les 6 100 km² de l'agglomération de Washington *, comprenant 109 bassins versants et 95 districts, examinés sur une image d'avril 1977. Un traitement séparé des zones rurales et urbaines a permis, après synthèse, de dresser une catégorisation selon le niveau d'imperméabilité des sols en 28 classes regroupées en 16 pour une représentation cartographique au 1/96 000.

- | | |
|---|--|
| 1. Urbain commercial et industriel très dense (100 %) | 8. Terrains de golf, parcs, pâturages, prés de fauche (0 %) |
| 2. Urbain commercial et industriel dense (90 %) | 9. Pâtures non entretenues, friches |
| 3. Résidentiel moyennement dense, grandes routes (65 %) | 10. Terrain agricole nu (labourable) |
| 4. Résidentiel moyennement dense (55 %) | 11. Terrain nu (carrières, constructions en cours) |
| 5. Résidentiel de faible à moyenne densité, institutions (35 %) | 12. Bois de feuillus sur terres hautes |
| 6. Résidentiel à basse densité, institutions (22 %) | 13. Bois de feuillus sur terres basses |
| 7. Parcs avec structures, cimetières (5 %) | 14. Bois de conifères et d'essences mixtes feuillus + résineux |
| | 15. Eau |
| | 16. Zones humides |

Les recherches, les traitements particuliers, la production de résultats statistiques classifiés dans le cadre des bassins versants et des districts, la cartographie en couleurs avec corrections géométriques, ont été obtenus au coût de 3,3 D/km².

4.5. Exemples d'application dans le domaine de la forêt et du milieu naturel

a) Une étude a été effectuée en 1975-76 sur la *forêt de la réserve indienne de Quinault dans l'état de Washington aux États Unis* * couvrant 77 000 ha, à partir des informations obtenues en août avec le satellite Landsat. On a également examiné sans traitement la même scène survolée en janvier. Les données Landsat et une photo aérienne au 1/50 000 ont conduit à stratifier l'univers étudié pour décider des zones de vérité terrain au nombre de deux. Les résultats, après traitement informatique, ont permis : de ventiler le territoire en une vingtaine de classes avec les surfaces correspondantes et une précision approximative de confusion de 96 % dans le cas le plus défavorable d'après la vérité terrain, et de sortir des cartes corrigées géométriquement au 1/125 000 et 1/50 000 en couleurs conventionnelles en 16 classes. La classification finale est la suivante :

— Eau (2 classes)	— Souches, déchets d'abattage
— Fleuves et rivières	— Sable, gravier
— Surfaces recouvertes d'eau peu profonde	— Territoire urbanisé et sol nu
— Broussailles	— Reconquête par la forêt (2 classes)
— Aulnes rouges	— Surfaces brûlées
— Sapin cigué (2 classes)	— Forêt à préciser
— Vieux cèdres	— Indéterminé

Des études similaires ont été menées au Canada sur les parcs nationaux de Banff et Jasper et ont conclu que la télédétection pourrait apporter aussi des informations sur les sols et paysages.

b) Les États Unis (Colorado) et le Canada (Manitoba) se sont intéressés aux possibilités offertes par la télédétection pour dresser une *classification biophysique des terres*. On décrira ici l'expérience effectuée par le ministère de l'Environnement du *Canada en 1976 dans la zone de Churchill* située dans la partie Ouest de la baie d'Hudson et s'étendant sur plus de 13 000 km². Les informations recueillies par les satellites Landsat semblent en mesure d'aider à l'établissement de cartes biophysiques utiles pour procéder à des études d'impact de grands travaux (oléoducs, recherche et exploitation pétrolière, aménagements hydrauliques, changements consécutifs à des incendies, etc...).

On disposait de données multitemporelles Landsat de 1972 à 1975, d'une couverture photo noir et blanc 1961 au 1/1 000 000, de vols aériens avec photos couleurs et infra rouge couleur avec filtre, infra rouge thermique et radar à 10 700 m, 1 500 m et 3 050 m d'altitude respectivement, effectués en 1973, ainsi que de données terrain acquises en 1971-72 sur un échantillon stratifié de zones tests avec observations au sol et prélèvements pour analyse. On a comparé l'exactitude et les rapports coût efficacité des méthodes d'interprétation comprenant : les traitements visuels et automatiques (supervisés et non supervisés) des données Landsat et la photo interprétation des données aériennes.

L'interprétation classique des photographies aériennes a permis de classer environ 50 types de terrains et s'est avérée la méthode de cartographie biophysique la meilleure et la plus pratique. Le dépouillement par photo interprétation des images Landsat au 1/1 000 000 et au 1/250 000 (couleurs composites) avec utilisation de cartes exogènes et de données terrain selon une nomenclature à 16 postes montre que le dépouillement d'images

multitemporelles au 1/1 000 000 est finalement plus précis et moins coûteux mais que, néanmoins, les erreurs de classement restent importantes si l'on tient compte de l'exactitude de la localisation et se répartissent entre des classes voisines.

Classification biophysique (entre parenthèses nombre de sous classes isolées en photo-interprétation de clichés en noir et blanc au 1/100 000).

A. Tourbières polygonales (7)	H. « Palsas » (2)
B. Marécages avec carex (3)	I. Vasières (1)
C. Marécages avec larix (4)	M. Champs de pierres (3)
D. Tourbières dominées par des épicéas (5)	N + O. Terres limoneuses glaciaires (pier- reuses ou glaiseuses, sableuses)
E. Marécages avec mitage (5)	P. Grèves sableuses et dépôts glacio-fluviaux (2)
F. Marais boisés ou non (3)	R. Affleurements rocheux (2)
G. Plateaux à tourbe (8, introduction de la pente)	Z. Eau

Une classification automatique supervisée par des données photo interprétées et des vérités-terrain a permis d'isoler une dizaine de rubriques avec une bonne précision globale (80 à 100 % selon les classes). Toutefois les rubriques sont différentes de la classification de départ et il n'est pas possible de parvenir aux 50 positions obtenues en photo-interprétation noir et blanc au 1/100 000. Cette classification est satisfaisante dans l'ensemble mais reste très simple et pauvre sur le plan écologique en milieu hétérogène, même si elle est bonne en tant que premier zonage biophysique grossier du terrain et en tant que classification végétale. La classification automatique peut toutefois être améliorée :

- si l'on utilise l'imagerie multitemporelle, en ajoutant par exemple un canal d'une image d'hiver à ceux de l'image d'été correspondante, mais cet apport n'est intéressant que lorsque la végétation est un bon indicateur du type de terres car il peut être néfaste dans le cas contraire;
- si l'on effectue les traitements par petites zones (a) après stratification grossière d'ensemble préalable et si l'on choisit très soigneusement les lieux des vérités-terrain;
- si l'on introduit l'analyse de la reconnaissance des formes ou de texture afin d'éclater des classes trop hétérogènes.

Une classification automatique non supervisée présente l'avantage de faire un dégrossissage rapide de tout ce qui est spectralement séparable et une économie de temps machine, par contre les classes obtenues peuvent s'avérer ne pas être utilisables pour l'écologiste pour la raison qu'elles ne correspondent pas à ses besoins d'information. La classification automatique non supervisée permet cependant d'éclater certaines classes assez hétérogènes rencontrées dans les classifications supervisées et elle exige aussi des vérités-terrain pour apprécier à posteriori le niveau d'exactitude des classements. En fait les classifications supervisées et non supervisées sont souvent complémentaires.

D'autres études biophysiques menées au Canada en exploitant les enregistrements Landsat (Vallée du Mackensie, Baie de Pelly, Ile de Melville, etc...) aboutissent toutes à la même conclusion : les données Landsat sont utilisables pour caractériser les densités et distributions de la végétation, les associations végétales, les variations d'humidité, les

1. Des études biophysiques menées sur le Colorado à partir des enregistrements Landsat ont montré que la précision des classements était améliorée si l'on dépouillait les données par classes d'altitude.

différences entre les sols nus rocheux et les différences de rugosité des dépôts superficiels, c'est-à-dire pour effectuer des zonages biophysiques et dresser des cartes grossières. A l'heure actuelle, les méthodes visuelles d'interprétation des images prises par satellite sont plus efficaces, relativement au coût, que les méthodes automatisées en ce qui concerne la classification biophysique des terres, de plus elles tiennent compte des tons, des textures et structures. Toutefois l'analyse automatisée est meilleure à grande échelle pour extraire certains détails (1).

V — OPÉRATIONS TÉLÉDÉTECTION MENÉES EN FRANCE DANS LE DOMAINE DE L'ENVIRONNEMENT

La direction de la prévention de la pollution et des nuisances du Ministère de l'Environnement a entrepris depuis 1974 des opérations expérimentales de télédétection aérienne sur le littoral qui sont actuellement en cours d'examen. Ces investigations avaient pour objet d'établir un inventaire cartographique à un instant donné aussi optimal que possible des sources polluantes et des rejets côtiers en mer en vue de contribuer à l'établissement d'un bilan de la pollution et du niveau de dégradation du milieu et à l'étude de l'implantation de nouveaux rejets.

Par ailleurs, une autre série d'actions a été lancée à partir de 1976 par cette direction afin d'observer en temps réel le déballastage des navires pétroliers au large des côtes et la diffusion des produits pétroliers en cas de déversements accidentels en mer (Ekofisk, Amoco Cadiz).

On développera davantage les autres expériences ci-après qui avaient pour objectif d'obtenir des informations numériques et/ou des classifications de l'occupation de l'espace et des surfaces en eau.

5.1. Une première opération expérimentale télédétection aérienne avec capteur infra-rouge thermique a été lancée à l'instigation du ministère de l'Environnement en 1976 sur le *parc de Boutissaint* (450 ha) dans l'Yonne comprenant une forêt de feuillus et des enclos de vision sous résineux, et sur un secteur de la *forêt d'Orléans* (Lorris, 4 000 ha) ayant une densité moyennement élevée de résineux, pour étudier s'il était possible de recenser les *gros gibiers* : cervidés, chevreuils, sangliers, en forêt de plaine au moyen de cette nouvelle technique car les effectifs sont très mal connus et difficiles à approcher. L'opération a permis de conclure qu'il était possible d'appréhender les gros gibiers, distingués grossièrement en adultes jeunes par espèce, à l'aide de vols-avions équipés en infra-rouge thermique (canal 8-14 μ) à une altitude comprise entre 150 et 250 m. Le niveau d'exhaustivité obtenu est de l'ordre de 90 à 95 % en forêt de feuillus et de 70 % sous couvert de résineux moyennement dense. Toutefois le coût de l'opération demeure relativement élevé en raison de la faible altitude de vol, même si l'on opère par sondage sur des massifs tirés au sort après stratification préalable selon la densité approximative de gros gibier.

1. Le ministère de l'Environnement et le Centre canadien de télédétection se sont intéressés par ailleurs à l'étude des panaches de pollution de l'air et de l'eau en traitant les enregistrements des satellites Landsat. Au moyen d'un traitement informatique peu coûteux, les polluants sont repérés et dosés en classes, et les résultats sont traduits automatiquement sur cartes à l'aide de classes de densité colorées composites à partir des trois couleurs primaires : rouge, vert, bleu, correspondant aux trois ratios de brillance des 4 canaux de Landsat pris dans l'ordre.

5.2. Venant après une investigation aérienne, non entièrement concluante, lancée avec le Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale sur les Bouches-du-Rhône de 1974 à 1976, une seconde mission télédétection aérienne à 1 200 m d'altitude a été effectuée en juillet 1976 à l'initiative de l'Environnement avec un capteur multispectral digital à 11 canaux opérant dans le visible, le proche infra rouge et l'infra rouge thermique, dans la région de *Toulouse Montauban* * sur des *surfaces agricoles* (en plaine ou avec relief), *urbanisées, forestières et sur des surfaces en eau* (Garonne et Tarn). Les résultats étaient disponibles deux mois 1/2 après l'exécution du vol. Une classification supervisée de l'occupation de l'espace comprenant une quarantaine de positions a pu être établie avec un niveau de fiabilité a priori de l'ordre de 95 % tandis qu'en l'absence de vérité terrain sur l'eau, une classification non supervisée en 16 postes a pu être dressée, mettant en évidence : la température, la turbidité, les sédiments et matières en suspension et les différents rejets, ainsi que la profondeur, la nature des fonds, la végétation aquatique, la courantologie et l'érosion des berges, les gravières exploitées ou abandonnées, l'utilisation du sol aux abords de l'eau, localement la catégorisation atteint un niveau d'exactitude finale de 80 % environ.

Cette expérience a montré que la télédétection aérienne : saisie, traitement, interprétation et restitution des données, était opérationnelle et était intéressante pour étudier des zones limitées de façon détaillée, fleuves, zones urbanisées, etc... ou à un instant précis.

5.3. Les données du satellite météorologique NOAA ont été recueillies sur toute la *France* le 29 avril et le 5 août 1976. La comparaison des enregistrements dans les deux canaux visible et thermique aux deux dates a permis de mettre en évidence les caractéristiques de la végétation, de la température et de l'humidité du sol afin de classer les différentes régions, en fonction du phénomène *sécheresse*. Ce travail a été achevé avec le concours de l'O. P. I. T. (Opération Pilote Interministérielle Télédétection).

5.4. Ce dernier organisme qui rassemble, depuis 1976, les principaux ministères utilisateurs de la télédétection : Agriculture, DATAR, Environnement, Équipement, Industrie (D.G.R.S.T de la télédétection : Agriculture, DATAR, Environnement, Équipement, Industrie (D. G. R. S. T.) a lancé, en 1977, plusieurs expériences d'exploitation des données Landsat destinées à illustrer les apports possibles de la télédétection et à tester les logiciels existants (1). On développera, ici, la seule opération répondant à des préoccupations environnementales. Il s'agit de l'exploitation de l'*image Languedoc** de 185 × 185 km limitée au nord par une ligne Nîmes Castres et au sud par la frontière espagnole. L'expérience avait pour objectif :

- d'étudier par photo interprétation les images disponibles multitemporelles d'hiver et d'été en noir et blanc au 1/250 000 dans les bandes spectrales 5 (végétation) et 7 (eau et humidité) pour délimiter, cartographier, classer et planimétrer les surfaces des *zones humides* réparties en 6 catégories : surfaces en eau, marais, marais asséchés cultivés, zones inondables des basses vallées, zones impermes des dépressions hydromorphes, forêts humides (non rencontrées sur l'image);
- de procéder au traitement informatique des données radiométriques en classification supervisée par des données terrain d'une image pleine d'été existant déjà (celles du 6/7/1975) à l'aide d'une station de traitement précâblée interactive :

1. L'O. P. I. T. a pour tâche de mettre au point des outils et méthodes nécessaires à l'exploitation opérationnelle et efficace de la télédétection d'ici 1980 en tant qu'instrument d'information pour le compte des cinq ministères participants tant pour la saisie que pour le traitement, l'interprétation et la restitution des informations.

- en étudiant la *qualité de l'eau* : bathymétrie, salinité, turbidité (rejets et sédiments), eutrophisation (chlorophylle);
- en caractérisant assez grossièrement le *couvert végétal et le territoire urbain* de toute la partie terrestre de l'image;
- en *contrôlant a posteriori* avec les informations conventionnelles disponibles la *qualité de la catégorisation effectuée* sur l'eau, les zones humides et le couvert végétal, avec toutes les limites qu'une telle critique postérieure comporte;
- *de contacter les services utilisateurs potentiels pour connaître leurs besoins* dans le cadre des thèmes retenus et des possibilités techniques offertes et pour rassembler les vérités-terrain disponibles en veillant à ce que les observations soient convenablement réparties géographiquement et représentent correctement la diversité des phénomènes étudiés afin de constituer un catalogue de signatures radiométriques pour établir la classification supervisée.

Le fait de travailler sur une image existante empêchait de réaliser une campagne d'observation de vérités terrain au moment de l'enregistrement des données par le satellite comme cela a été fait dans certaines expériences étrangères. Or, les eaux continentales présentent des caractéristiques instantanées très changeantes avec les conditions météorologiques. Il s'est avéré que les observations effectuées sur la qualité de l'eau étaient ponctuelles et peu nombreuses au voisinage de la date de recueil des informations satellite. Aussi, a-t-on eu recours à une méthode mixte supervisée et non supervisée en utilisant les propriétés et connaissances acquises sur l'eau dans d'autres expériences basées sur l'observation des différences radiométriques caractérisant les divers phénomènes étudiés. L'étude en classification supervisée du couvert végétal est moins exigeante quant à la coïncidence impérative du recueil des données terrain avec la date de passage du satellite et les renseignements exogènes obtenus en ce domaine ont été relativement nombreux. D'autre part, on peut utiliser aussi la photo interprétation de photos aériennes prises à une époque voisine.

La classification supervisée est finalement largement tributaire du choix de la localisation, de l'exactitude et de la qualité des vérités terrain fournies par les utilisateurs contactés.

Les sites de vérités terrain comprennent de 10 à 100 pixels (5 à 50 ha) sur chaque zone échantillon, localisée à l'aide d'un curseur quadrangulaire mobile sur un écran de visualisation, et doivent contenir un nombre suffisant de pixels sur le plan statistique pour porter un jugement sur la fiabilité de l'établissement de chaque catégorie.

L'exploitation a exigé 4 jours de traitement pour élaborer une classification supervisée de la surface recouverte par l'image en une cinquantaine de catégories à partir d'une trentaine envisagée au départ. En effet, la nécessité est apparue de créer des sous classes en raison des réponses spectrales différentes enregistrées sur des sites tests considérés comme homogènes.

La procédure de classification ⁽¹⁾ ne néglige aucun contrôle : entre les pixels d'une même zone-test, entre les zones-tests placées dans une même catégorie, entre les caractéristiques de chaque zone test retenue dans chaque catégorie en procédant de proche en proche et en s'assurant qu'il n'y a pas d'ambiguïtés ni de chevauchements entre les classes, en se livrant à des essais d'extension de classification partielle afin de contrôler la vraisemblance de la catégorisation sur l'ensemble de l'image.

1. Les principes de la catégorisation reposent sur l'hypothèse de multinormalité des distributions statistiques des pixels dans chaque classe, et l'affectation à une classe est effectuée en fonction de règles logiques proches de celles du maximum de vraisemblance.

Le taux de couverture, représenté par les zones-tests utilisées, est de 0,074 %. Mais on disposait, en fait, pour établir la classification supervisée, de 2 à 3 fois plus de données de terrain. La proportion de territoire non catégorisée, s'élève à 2,36 % et comprend principalement quelques petits nuages et leur ombre figurant sur l'image. La classification obtenue est la suivante :

- terres labourables, pâturages et landes (7 s/classes),
- vignes et vergers (4 s/classes),
- forêts $\left\{ \begin{array}{l} \text{à feuilles caduques (7 s/classes),} \\ \text{à feuillage permanent (4 s/classes),} \\ \text{mixtes (3 s/classes),} \end{array} \right.$
- terrain nu,
- sel humide,
- zones humides (2 s/classes),
- marais salants,
- territoire urbanisé (5 s/classes selon la densité sur les 8 principales agglomérations de l'image placées dans une strate à part),
- eau douce selon la transparence et la turbidité (3 s/classes),
- eau salée selon la transparence et la turbidité (3 s/classes),
- eau saumâtre (2 s/classes),
- non catégorisé.

Les produits obtenus sont :

- des *tableaux de résultats* (en ha et %) pour chaque catégorie élémentaire et des regroupements des 50 catégories dans les limites terrestres nationales et départementales, dans les limites d'un bassin versant : celui de l'Hérault, et d'un secteur quadrangulaire autour de l'étang de Leucate;
- une *cartographie au 1/250 000* en 24 classes regroupées en couleurs composées sur l'ensemble de l'image, les limites diverses étant reportées sur un calque transparent, et une *sortie agrandie au 1/100 000 de la zone centrale* de l'image ⁽¹⁾;
- une *cartographie au 1/250 000 en classification informatique non supervisée fausses couleurs* dans les 3 principales bandes spectrales avec amélioration des contrastes et des contours ⁽¹⁾ ⁽²⁾;
- un *tableau donnant la localisation sur l'image, le nombre de pixels et la nature de chacun des sites-tests* ayant servi pour la classification supervisée;
- *tableaux de résultats sur la validité et les seuils de confiance a priori pour chaque catégorie élémentaire de sites — tests* utilisée pour établir la table de catégorisation, *caractéristiques radiométriques et statistiques* de chaque catégorie, *ressemblance et opposition avec les autres catégories*.

1. Les cartes en couleurs conventionnelles ou en fausses couleurs ont fait l'objet de corrections géométriques.

2. L'expérience a montré qu'il aurait été préférable d'examiner d'abord l'image fausses couleurs afin de procéder à un premier zonage en strates homogènes et à choisir et à répartir les zones vérités-terrain en fonction de ce 1^{er} examen.