

Chapitre 3

L'objet d'étude : la Terre

*Découvrir, ce n'est pas seulement
trouver des choses nouvelles, mais c'est
aussi regarder les choses d'un œil neuf.*

*Mystères de l'Égypte
Musée canadien des civilisations*

Dans ce chapitre, nous explorerons les différentes avenues dans lesquelles la télédétection peut intervenir. Il faut se rappeler cependant que, pour obtenir des informations de qualité à partir des données de télédétection, des connaissances préalables sur le ou les phénomènes à observer et à analyser sont essentielles. Notre capacité d'analyse doit être empreinte de modestie. Mesurer la Terre dans toutes ses dimensions, ce n'est pas l'analyser. Souvent, l'intelligence ne suffit pas. Il faut la couvrir d'un tissu de savoir. Nous diviserons cette exploration des possibilités d'application de la télédétection en trois parties : le milieu naturel, l'espace construit et la dynamique spatiale de la Terre (espace-temps et environnement).

3.1. Le milieu naturel

Dans un langage que la télédétection peut comprendre, le milieu naturel se divise en quatre parties bien distinctes : l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère. En d'autres mots, la télédétection peut enregistrer le signal reçu de la Terre du fait qu'elle est composée d'air, d'eau, de végétation et de minéraux. L'identification d'objets spécifiques nécessite des critères tels que la **signature spectrale**, la **texture**, la **forme** et l'**arrangement**.

Les composantes du milieu naturel ne sont pas cloisonnées et il arrive plus souvent qu'autrement que le signal reçu au **capteur** soit en fait un amalgame de ces composantes. Heureusement, il arrive souvent qu'une d'entre elles domine. C'est pourquoi nous pouvons faire une bonne distinction entre les objets de nature différente. Nous examinerons maintenant les composantes énoncées et nous verrons comment la télédétection peut nous aider à extraire des informations utiles pour la compréhension, l'analyse et l'interprétation de l'organisation spatiale.

3.1.1. Une géographie de la composante atmosphère

Ce qui nuit à l'un peut s'avérer être utile à l'autre. En effet, pour les analystes de la surface terrestre, la présence de nuages, de précipitations et d'une concentration plus ou moins grande de vapeur d'eau, de gaz carbonique ou d'aérosols est une nuisance car ces éléments les empêchent de percevoir le ou les objets d'intérêt d'une façon distincte. Pourtant, le premier satellite civil était destiné à l'étude du climat et aux prévisions météorologiques. En effet, les États-Unis ont lancé TIROS-1 (*Television Infrared Observation Satellite*) en avril 1960, soit 12 ans avant le premier satellite à vocation exclusive d'observation de la Terre. Depuis, d'après Verger [75], plus d'une centaine de satellites civils à vocation météorologique ont été lancés à travers le monde par les États-Unis, les pays d'Europe, la Russie, le Japon, l'Inde et la Chine. C'est sans doute le type de **plate-forme** le plus utilisé pour des fins appliquées. Comme on l'indique sur la figure 3.1, la Terre est entièrement couverte par des **satellites géostationnaires** localisés au-dessus de l'équateur. D'autres **satellites à défilement**, tels les NOAA (États-Unis) et les METEOR (Russie), couvrent aussi la Terre. Ils ont cependant une **résolution spatiale** plus fine et couvrent une superficie moins grande que celle détectée par les **satellites géostationnaires**. Ces satellites servent surtout à cueillir des informations brutes sur les grandes masses d'air, soit leurs caractéristiques physiques, leur dynamique et le suivi de phénomènes particuliers tels que les ouragans. En général, ils sont utilisés pour des fins de prévision météorologique.

Avec l'amélioration récente des technologies, ce genre d'information est maintenant accessible du bout des doigts. Des chaînes spécialisées de télévision ont même été mises en place depuis quelques années, confirmant ainsi l'importance de la météo dans la vie de tous les jours. Ces prévisions sont essentielles pour les agriculteurs, les pêcheurs, les navigateurs et les professionnels de la sécurité civile, notamment dans le contexte de prévision de catastrophes climatiques naturelles. Ce dernier point prend toute son importance aujourd'hui avec les grands dérangements engendrés par le phénomène El Niño. Ces prévisions sont aussi utiles dans les recherches fondamentales sur les masses d'air, leur conte-

nu ainsi que leur comportement dans le temps et dans l'espace. Sans elles, il serait difficile de modéliser le mouvement des masses d'air et de réussir, avec une efficacité certaine, à prédire le temps cinq jours à l'avance. De plus, les résultats de ce type de recherche permettent d'éviter des conséquences dramatiques qu'engendrent les phénomènes naturels tels les ouragans. Nous pouvons maintenant en effet estimer les probabilités de la zone qui sera touchée et du moment d'impact de ce genre de perturbation.

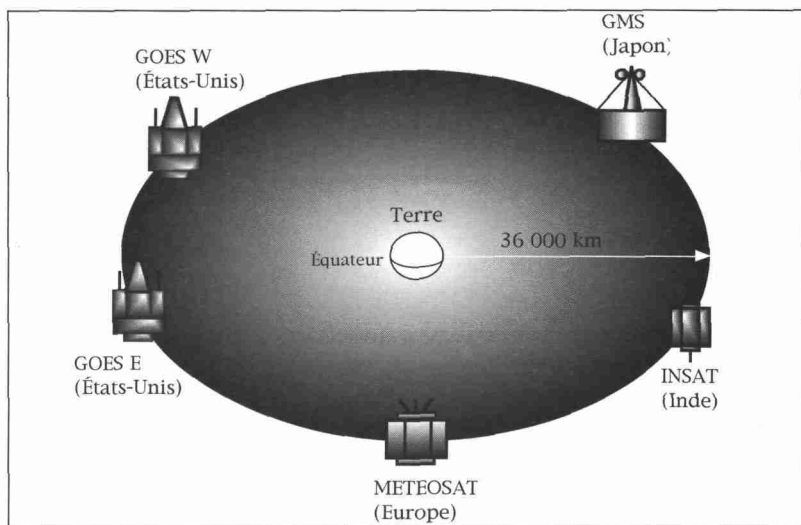


Figure 3.1. : Satellites à vocation météorologique couvrant la Terre.

Source : Adapté de Verger [75].

L'utilité des données de télédétection dans l'étude de l'atmosphère est démontrée depuis plusieurs années. Non seulement elle nous aide à mieux la connaître, la comprendre et prévoir les conditions climatiques, mais la télédétection devient aussi une manière indispensable de percevoir la météorologie au quotidien.

À l'aide de logiciels appropriés, d'informations connexes enregistrées par des **capteurs** non imageurs, de données acquises sur terre et par l'intermédiaire de ballons-sonde, les satellites peuvent, entre autres, aider à déterminer les éléments suivants :

Atmosphère	Nuages
Bilan radiatif	Répartition, densité, type et structure
Températures moyennes et isothermes	Composition des couches supérieures (cristaux de glace, gouttes de pluie)
Vitesse et direction des vents dans la troposphère	Distinction entre nuages de pluie et ceux qui contiennent des cristaux de glace
Profils d'humidité	Albédo au sommet des nuages
Teneur en ozone	Hauteur et température au sommet
Indices d'ensoleillement	Teneur en eau
	Localisation et intensité des précipitations
	Détection de bancs de brume
	Détection de nuées volcaniques et de fumée de feux
	Détection de sources visibles de pollution industrielle

En climatologie et en météorologie, la télédétection sert enfin à identifier des phénomènes tels que les fronts chauds ou froids, les courants-jets et le développement de dépressions intenses qui engendrent parfois des tornades, des ouragans, des cyclones ou des typhons. Sur la figure 3.2, nous pouvons constater l'intensité d'une dépression qui a occasionné des pluies torrentielles et des inondations majeures vers le milieu du mois de juillet 1996 dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, au Québec. Communément appelée « La Virgule », cette dépression aura laissé plus de 200 mm de pluie dans la région mentionnée après son passage, occasionnant ainsi des inondations peu communes qui ont rappelé brutalement à l'être humain les droits et privilèges de la nature. Sur la figure 3.3, nous illustrons le suivi spatio-temporel de l'ouragan *Emily* qui a frappé la côte est des États-Unis d'Amérique il y a quelques années. En une journée, il s'était déplacé d'environ 60 km vers le nord-ouest. Fait à noter, nous observons sur cette figure une circulation d'air allant dans le sens anti-horaire, situation typique dans l'hémisphère nord.

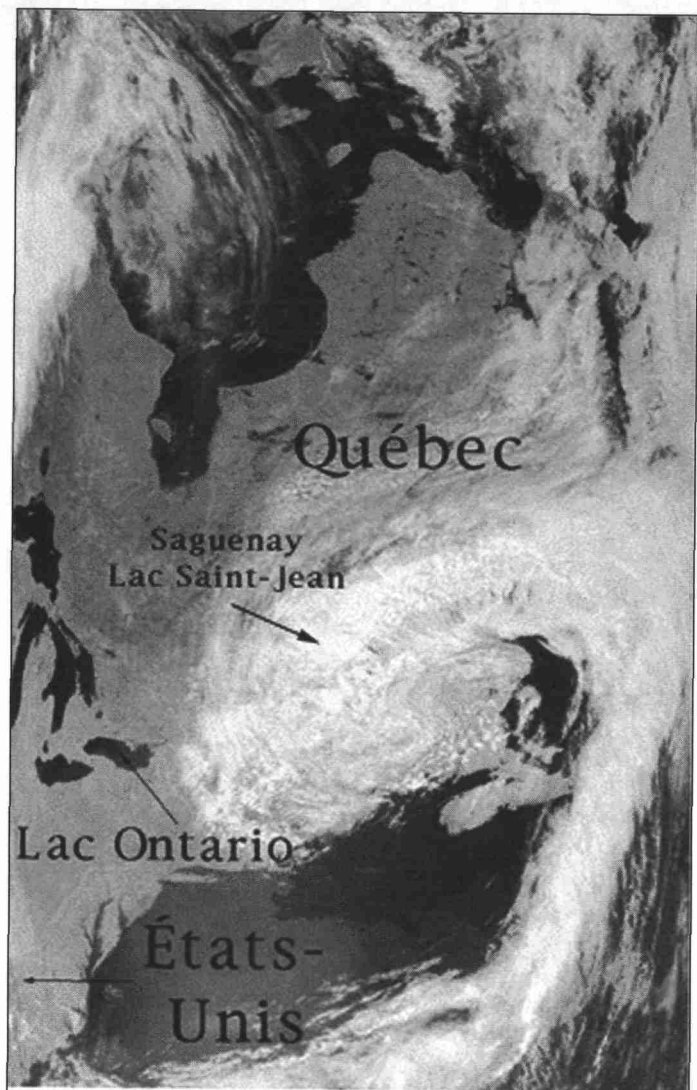


Figure 3.2. : Image du capteur AVHRR du satellite météorologique NOAA acquise le 20 juillet 1996 illustrant « La Virgule », une intense dépression qui aura occasionné pluies diluviennes et inondations.

Source : STAR/IMSAT. Université du Québec à Chicoutimi.

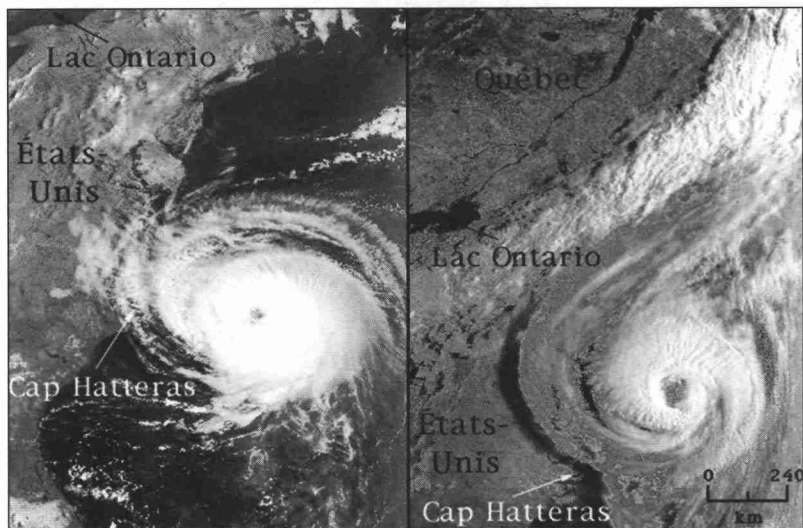


Figure 3.3. : Séquence d'images provenant du capteur AVHRR du satellite météorologique NOAA qui montre l'évolution dans l'espace et dans le temps de l'ouragan Emily, entre le 31 août (à gauche) et le 1^{er} septembre 1993 (à droite).

Source : STAR/IMSAT. Université du Québec à Chicoutimi.

Les **capteurs** SMRR des satellites Nimbus et VHRR-AVHRR des satellites NOAA ont contribué, à l'aide de données *in situ*, à appréhender et à comprendre le comportement et les conséquences du phénomène El Niño. Comme nous le savons maintenant, ce phénomène peu banal figure parmi les processus naturels qui altèrent singulièrement l'équilibre climatique de plusieurs parties du monde.

Bien qu'elle soit d'abord d'origine atmosphérique, une des manifestations de « L'Enfant Jésus » (traduction française de El Niño) est la modification significative de la température de surface des océans.

Il s'agit là d'un excellent exemple de l'interaction entre l'atmosphère et l'océan ainsi que de leurs effets combinés sur le climat. Sur la figure 3.4, nous constatons comment cette manifestation était présente en décembre 1982 (a) et en septembre 1997(c).

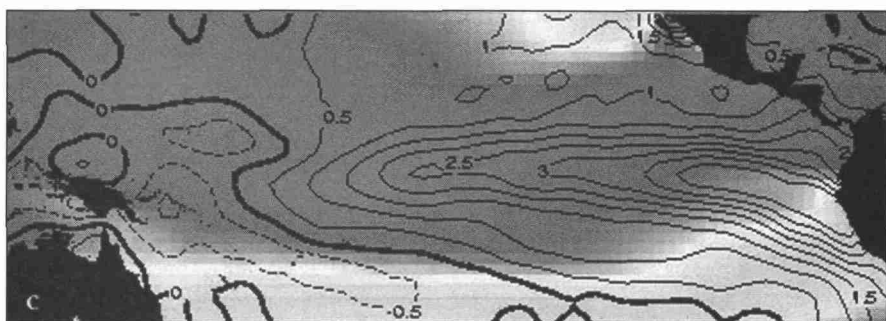
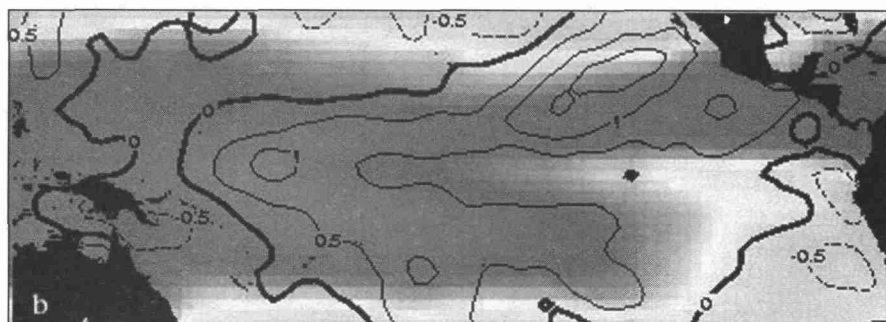
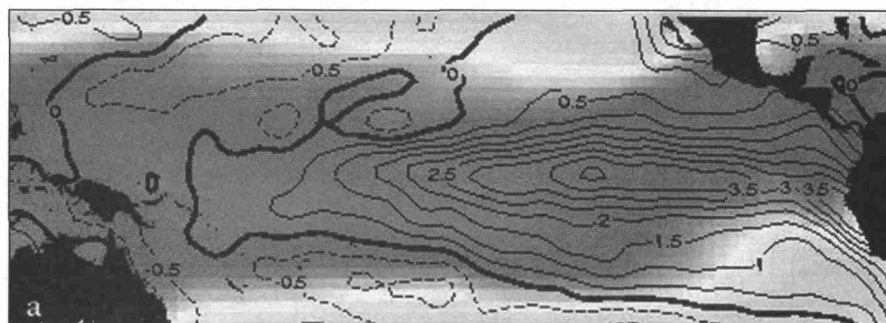


Figure 3.4. : Comportement des températures de surface du Pacifique équatorial consécutives au phénomène El Niño pour les mois de décembre 1982 (a) et septembre de 1997 (c). L'image (b) correspond à une normale en décembre 1993.

Adapté et modifié de : ESS/USRA Université de Floride et NOAA (Product Systems Branch).

Les isothermes correspondent aux valeurs de température (°C) supérieures (lignes continues) ou inférieures (lignes discontinues) à une moyenne de 30 ans. En les comparant à la situation présentant des conditions climatiques normales (b), force nous est de constater l'ampleur des conséquences du phénomène sur les températures. Nous observons une augmentation allant jusqu'à 4 °C par rapport à la normale pour les événements de 1982 et de 1997.

3.1.2. Une géographie de la composante hydrique

L'eau, essentielle à toute forme de vie sur la Terre, est devenue avec le temps une ressource épuisable. Pour l'être humain, le problème fondamental est que sa répartition dans le temps et dans l'espace est loin d'être uniforme. En poussant à l'extrême, nous constatons que, d'une part, des secteurs de la Terre subissent des inondations dévastatrices et, d'autre part, des territoires sont aux prises avec des sécheresses qui durent depuis 25 ans. Dans des conditions climatiques exceptionnelles telles que celles provoquées par le phénomène El Niño, la présence et l'absence d'eau frappent parfois durement des régions.

On constate des catastrophes naturelles allant des inondations jusqu'aux feux de forêt dans les endroits habituellement épargnés. C'est le cas respectivement de la Californie et de la Floride, aux États-Unis. En effet, la Californie a subi de fortes pluies causant notamment des inondations durant l'hiver de 1997 et le printemps de 1998 alors qu'à l'été de 1998, le nord de la Floride était marqué par des incendies de forêt majeurs facilement détectables par les satellites météorologiques.

Il importe donc d'assurer le suivi de la dynamique de l'eau, de sa répartition spatiale et de sa qualité. La télédétection permet de le faire grâce à la diversité des plates-formes et des capteurs en opération ainsi que des banques d'images archivées qui sont disponibles par l'intermédiaire d'agences publiques et privées.

Plus spécifiquement, la télédétection peut être utile dans la détection, la classification et l'analyse des éléments suivants :

Surfaces marines	Surfaces terrestres
Dynamique et anomalies thermiques à la surface de l'eau	Inventaire des ressources en eau (bassins et réseaux hydrographiques) et dynamique des changements
Dynamique des courants marins	Dynamique et cartographie des crues, des inondations et de leurs conséquences sur le territoire
Patron des vagues et vents de surface	Aide à la localisation des sites de forages pour l'eau souterraine par l'intermédiaire des linéaments géologiques
État et la dynamique des glaces (incluant la banquise et les icebergs)	Sélection de sites favorables à l'érection de barrages
État et dynamique de la turbidité près des côtes	Détermination de terres agricoles à irriguer ou à drainer
Localisation de certaines formes de pollution en surface	Localisation des zones d'érosion hydrique
	Turbidité et sédimentation des rivières et des lacs
	Suivi du couvert neigeux et dynamique de la fonte nivale printanière par l'hydraulicité

A) Les surfaces marines

L'eau occupe en effet près des trois quarts de la Terre. De la perception ponctuelle des caractéristiques de l'eau à partir de données *in situ* provenant de navires ou de bouées, nous sommes passés à une vision synoptique de l'objet dans le temps et dans l'espace par l'intermédiaire des **capteurs** satellitaires. Bien que les **plates-formes**, telles que les NOAA et les METEOSAT, soient destinées à la météorologie, les observateurs et les chercheurs ont vite perçu leur utilité pour la gestion et la surveillance des grands plans d'eau. Comme pour le cas de la végétation, il faut noter ici la complicité nécessaire entre les données de terrain et celles acquises par télédétection.

Les océanographes utilisent les données satellitaires afin d'observer et de comprendre les phénomènes dynamiques qui se produisent dans la partie superficielle des grandes masses d'eau. Il faut cependant noter une contrainte impor-

tante : la présence de nuages. La venue des données **radar** en télédétection élimine ce problème car, normalement, cette forme de rayonnement artificiel n'est pas absorbée ou réfléchi par les nuages. De plus, elle n'a pas besoin de la lumière du jour pour éclairer les objets d'intérêt. Nous verrons plus loin que son utilisation apporte cependant des problèmes d'interprétation particuliers.

Pour l'instant, l'étude des grandes étendues d'eau peut se réaliser entre autres à l'aide d'**images** que l'on peut donc acquérir même s'il y a un couvert nuageux. Sur la figure 3.5, nous mettons l'accent sur ce type d'**images**. Il s'agit en effet de données provenant du **capteur** RSO (Radar à synthèse d'ouverture) installé sur le satellite canadien Radarsat-I. Elles ont été acquises le 6 mars 1996 et montrent un phénomène particulier dans une partie de l'Amérique du Nord. Il s'agit des glaces marines que l'on trouve dans le golfe du Saint-Laurent, au Canada, à cette époque de l'année. Sur cette **image**, les secteurs terrestres apparaissent en **teintes** claires et les zones plus grises correspondent à l'eau dans son état liquide (**teinte** très foncée) et dans son état solide (**teinte** grise, de foncé à pâle). Les informations extraites de ces documents visuels servent à la Garde côtière canadienne pour la planification et le déploiement des brise-glaces (voir carton sur l'image) et pour diriger les navires dans le golfe du Saint-Laurent.

Pour la gestion et la surveillance des grandes étendues d'eau, il est aussi possible de détecter des phénomènes comme des sources de pollution telles que des nappes d'huile à la surface de l'eau. Dans la plupart des cas, il s'agit de déversements accidentels. Nous sommes sensibles à ces préoccupations et il est normal de considérer la détection et le suivi de ces nappes comme des priorités. Sur la figure 3.6, nous pouvons voir, à l'aide des **images radar**, des nappes d'huile de deux sources différentes : la a) correspond à des fuites naturelles d'huile tandis que la b) est originaire d'un déversement accidentel par un navire. Elles s'identifient grâce à leur **teinte** foncée sur fond gris. L'huile a pour effet de rendre la surface d'eau plus lisse, donc génère une rétrodiffusion plus simple. Notons que les deux **images** de cette figure n'ont pas la même **résolution** spatiale. Celle de l'image a) est d'environ 9 m tandis que celle de l'image b) est de 25 m de côté. C'est pourquoi nous trouvons plus de détails sur la première.

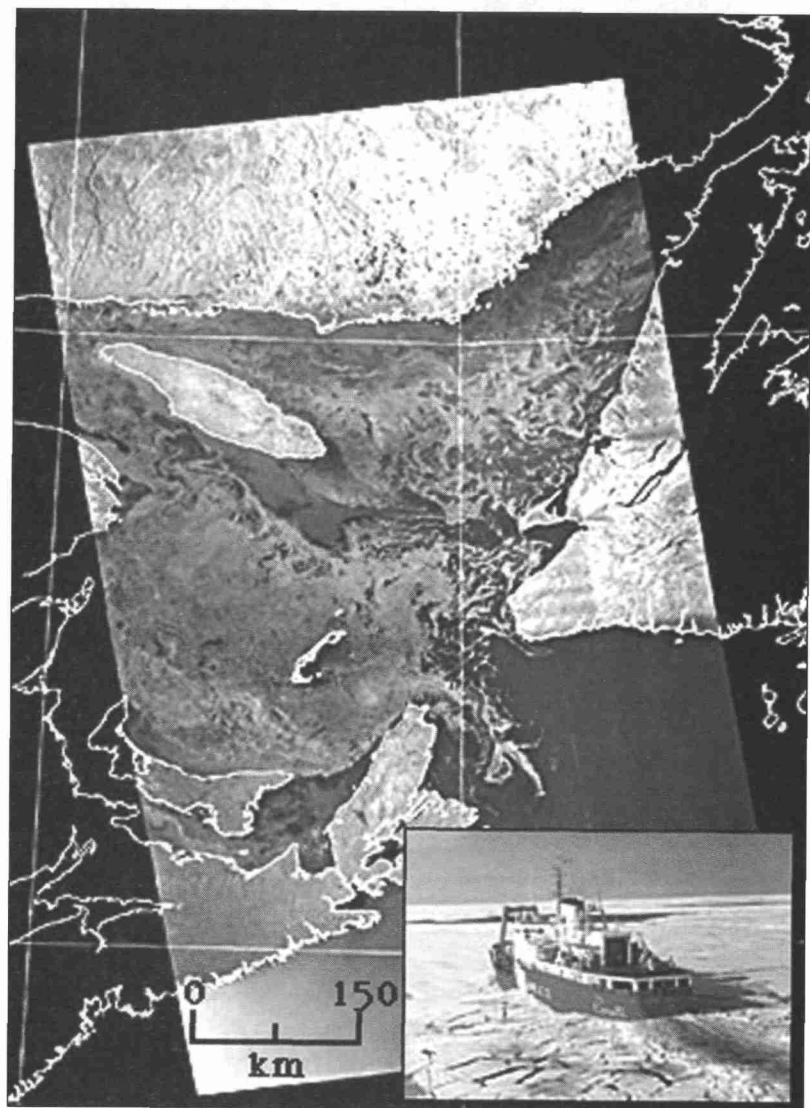


Figure 3.5.: Image acquise par le RSO de Radarsat-I qui montre son utilité dans la gestion et la surveillance des glaces de mer.

Source : Agence spatiale canadienne Centre canadien de télédétection, Radarsat international [14].



Figure 3.6. : Images provenant du RSO du satellite Radarsat I. Elles présentent a) le Golfe du Mexique le 14 février 1996 et b), le détroit de Malacca, près de la Malaisie le 26 octobre 1997. La source polluante se distingue par sa teinte foncée.
Source : Agence spatiale canadienne. Centre canadien de télédétection. Radarsat international [14].

B) Les surfaces terrestres

Grâce aux figures 3.2 et 3.3, nous avons vu comment il était possible d'évaluer la dimension et l'intensité de certains phénomènes climatiques et de les suivre dans l'espace et dans le temps. L'impact de ces phénomènes sur le milieu terrestre est cependant moins évident, non seulement à l'échelle des **images** AVHRR de NOAA, mais aussi en fonction des conditions nuageuses qui prévalent souvent dans des environnements climatiques de type froid-tempéré-humide. Dans ce contexte, il devient pertinent d'utiliser les données **radar**.

La figure 3.7 est un exemple typique des possibilités d'évaluation de l'impact de pluies torrentielles sur le territoire. Il s'agit d'une inondation exceptionnelle qui origine du débordement de la rivière Rouge, au Manitoba. Elle a dévasté une région plane sur une largeur allant jusqu'à 40 km et a provoqué l'évacuation de 100 000 personnes. Devant l'ampleur du phénomène, on la surnomma la « Mer Rouge ». Cette « mer » était localisée immédiatement au sud de la ville de Winnipeg, capitale de cette province canadienne, et s'étendait jusqu'au sud de la frontière canado-américaine. Dans cet exemple, les **images** acquises par le **capteur** RSO du satellite Radarsat-I illustrent la région du village de Morris avant (a) et durant l'inondation (b). L'énergie émise par le radar a comme particularité d'être absorbée par l'eau, ce qui explique la **teinte** à dominante foncée de l'image (b). Les **teintes** plus pâles correspondent aux zones non touchées. Notons que la photographie aérienne (c) confirme que les environs immédiats du village de Morris ont été épargnés grâce à l'érection d'une digue. Sur l'**image** satellitale b), cette limite de forme rectangulaire est bien visible autour du village. D'autres secteurs ont été épargnés grâce à la topographie locale. Notons entre autres les levées alluviales de la rivière Rouge qui s'orientent visuellement vers le nord nord-est.

Ces quelques exemples montrent l'utilité de la télédétection **multibande** pour l'identification et l'évaluation des conséquences de phénomènes parfois catastrophiques liés à la nature ou à l'action humaine sur le milieu, tant pour l'aspect des grandes surfaces océaniques que pour les eaux intérieures.

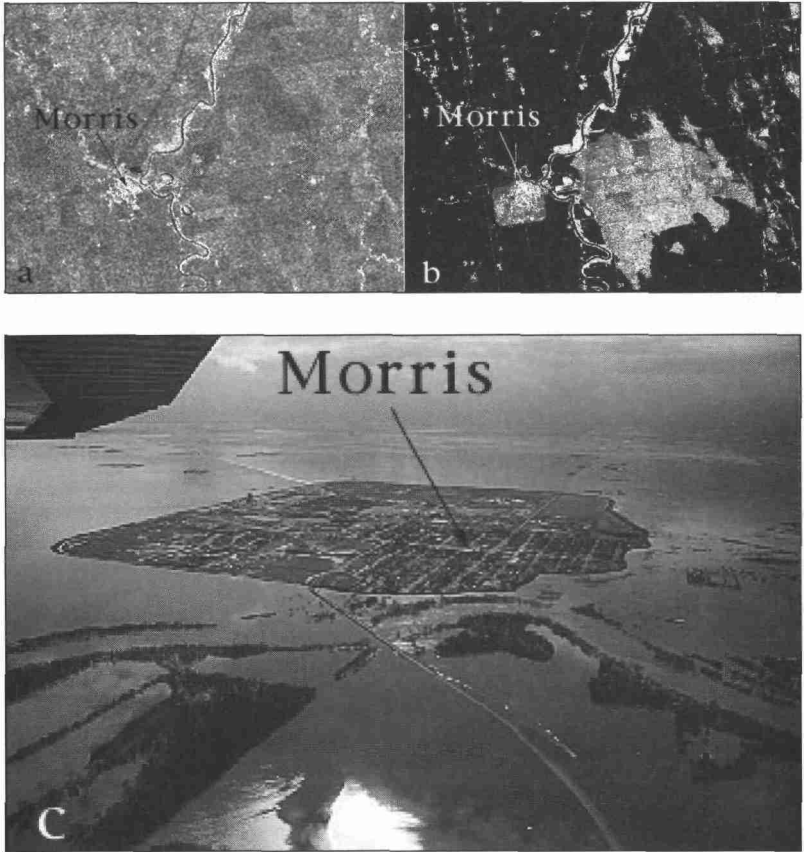


Figure 3.7.: Images présentant une inondation majeure qui s'est produite au printemps de 1997, au Manitoba, Canada.

Les images a) et b) proviennent du capteur RSO de Radarsat I.

Elles datent respectivement du 16 juin 1996 et du 1^{er} mai 1997.

L'image c) a été acquise par avion le 26 avril 1997.

Source : Agence spatiale canadienne, Centre canadien de télédétection.
Radarsat international [14].

3.1.3. Une géographie de la composante végétale

La végétation est une ressource renouvelable qui, avec l'eau, suscitent beaucoup d'intérêt auprès des développeurs, des gestionnaires et des protecteurs du territoire. Les forestiers, par exemple, figurent parmi les premiers utilisateurs de photographies aériennes et d'**images** acquises par satellite pour la gestion, l'inventaire et l'évaluation des dommages originant de causes naturelles ou autres. Par contre, la végétation est aussi les formations herbacées naturelles et les cultures agraires. Dans ce cas, la télédétection est utile dans le cadre des inventaires, du suivi, de l'évaluation en superficie et en qualité ainsi que des prévisions de rendement des cultures. Le développement de plus d'une quarantaine d'indices de végétation depuis les travaux de Tucker [73] est indicateur de la préoccupation qu'ont les chercheurs et les utilisateurs face à la végétation.

L'intérêt de la télédétection appliquée à la végétation s'est d'abord manifesté pour des raisons économiques et environnementales. En effet, les décideurs ont toujours souhaité obtenir des informations fiables sur la production agricole à l'échelle du globe. Avec les satellites et les **capteurs multibandes**, il est possible de bien distinguer certains types de culture essentiels à la nutrition des êtres vivants. De plus, la régularité de passage des satellites permet le suivi spatio-temporel à court, moyen et long termes. Il est donc réaliste de penser à effectuer des analyses de rendement. Dans un autre ordre d'idées, la télédétection aura contribué, en grande partie grâce au **radar**, à la sensibilisation des peuples au phénomène mondial de la déforestation. Encore une fois, cette vision synoptique procure à la télédétection ses lettres de noblesse en tant qu'outil parfois (et de plus en plus) indispensable pour la gestion et la surveillance du territoire.

En bref, grâce à des capteurs installés sur des satellites tels les Landsat, SPOT et NOAA, il est donc possible d'obtenir des informations utiles à propos de la détection, de l'identification, de l'état, de l'inventaire et du suivi de la végétation sur une base temporelle de plus de 25 ans et ce, de l'échelle continentale à l'échelle locale.

Plus spécifiquement, les **images** satellitaires peuvent être utilisées aux fins suivantes dans le domaine de la végétation :

Forêt	Végétation herbacée naturelle	Végétation herbacée cultivée
Cartographie des types, de leur âge et de leur densité	Cartographie des essences	Cartographie des zones cultivées et des friches
Suivi de la croissance et de l'état de santé (incluent les infestations)	Suivi de la croissance et de l'état de santé	Suivi de la croissance et de l'état de santé
Suivi des coupes légales et illégales	Valeur pastorale d'une superficie	Prévisions sur le rendement des terres, l'estimation du prix de produits agricoles
Suivi de la déforestation et de la régénération	Étude d'impact des feux de brousse	Dynamique temporelle de l'occupation du sol
Suivi des feux, des infestations et des maladies	Détection et analyse des milieux humides	Évaluation de superficies couvertes par différentes cultures
Évaluation de superficies	Suivi de l'action humaine et conséquences sur le milieu	
	Évaluation de superficies	
	Dynamique spatiale	

De toutes les préoccupations les plus importantes pour l'avenir de l'humanité, il en ressort une primordiale : celle de la rivalité entre les besoins pour la subsistance des êtres humains à court et à long termes. Pour le court terme, cela s'exprime par la vente des richesses naturelles, de leur utilisation pour se chauffer, s'abriter et se nourrir. Pour le long terme, le vocabulaire change et devient plus nuancé. On parle de **développement durable**. Ce débat sur le mode d'exploitation des richesses naturelles est loin d'être terminé. Les alertes, telles que celles qui ont été déclenchées avec le Sommet de la Terre de Rio sur la déforestation et la désertification, commencent à sensibiliser les autorités politiques et publiques à l'**échelle** du globe sur l'action humaine qui a créé et qui crée des impacts (parfois négatifs) maintenant mesurables.

Un des exemples frappants est l'utilisation de l'indice normalisé de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) sur le continent africain afin de déterminer la dynamique de la végétation et de la désertification dans les pays limitrophes aux grands déserts et ce, à différentes échelles temporelles.

Sur la figure 3.8, nous pouvons observer le comportement de la végétation par l'intermédiaire du NDVI à quatre moments d'une année. La **teinte** varie du pâle (présence de végétation) au foncé (absence de végétation). La migration du front végétal est évidente entre septembre et décembre : il se déplace sur une distance de 1 200 km, vers le nord.

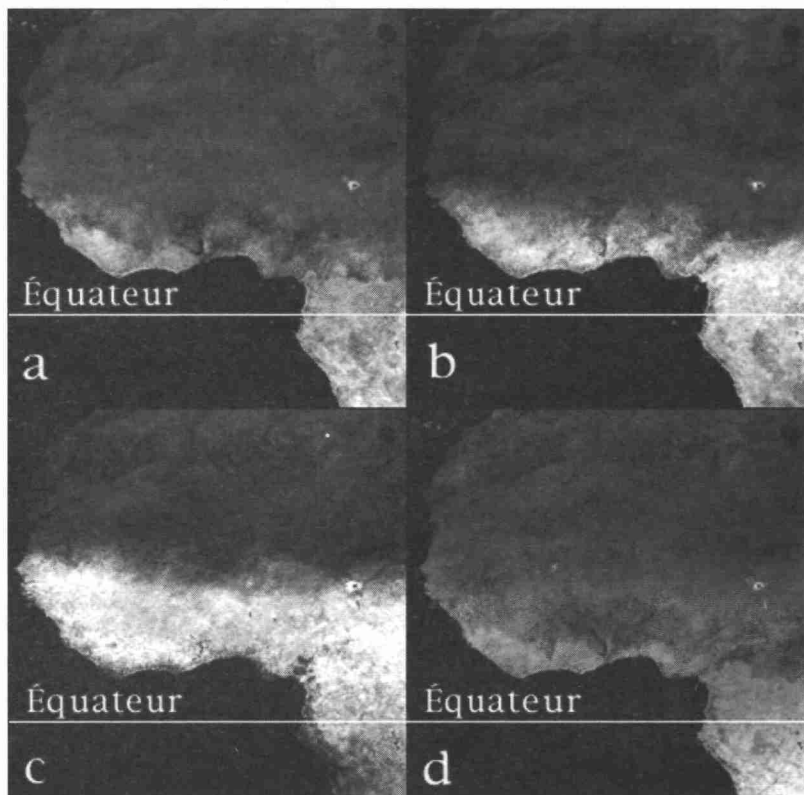


Figure 3.8. : Dynamique de la végétation dans la portion ouest de l'Afrique équatoriale en 1987 : a) février, b) mai, c) septembre et d) décembre.

Source : NOAA/Global Change Database.

En foresterie, la télédétection intervient surtout à l'échelle régionale pour le suivi d'événements naturels ou anthropiques. Par exemple, il devient aisé de suivre dans le temps les coupes forestières et d'évaluer leur superficie. Sur la figure 3.9, il est possible de détecter une zone de coupe complète. La **signature spectrale**, la **texture** et l'**arrangement** sont très distincts par rapport aux secteurs non altérés et nous pouvons même observer les chemins ou sentiers qui sont empruntés par la machinerie lourde destinée à cette forme de déboisement. C'est par la variation spectrale dans la bande rouge du spectre électromagnétique qu'il est possible de clairement distinguer les zones coupées du reste des composantes du paysage. Sur cette image, elles sont détectables à cause de l'absence de chlorophylle aux endroits coupés. Elles correspondent aux zones de teinte pâle sur la figure. Les chemins sont caractérisés par leur disposition en lacet. De plus, ils sont facilement visibles à cause de la forte réflectance des matériaux terreux dont ils sont constitués.

Avec l'arrivée imminente des **capteurs** à haute **résolution**, les **images** satellitaires offriront un potentiel d'utilisation fort élevé dans le domaine de la végétation. Déjà, plusieurs laboratoires et instituts de recherche ont entamé des expérimentations à l'aide de simulations afin de pouvoir évaluer la pertinence de ce genre de document. Le Gouvernement canadien, par l'intermédiaire du Centre de foresterie du Pacifique, a mis sur pied une méthode d'interprétation automatique des **images** aériennes numériques et satellitaires à haute **résolution** spatiale (0,3-1 m). Cette approche se base sur des données multisources et a pour but d'inventorier les peuplements forestiers. Sur la figure 3.10, on présente une vision schématique de la démarche proposée.

Pour la végétation herbacée, la télédétection trouve son efficacité en matière d'application aux **échelles** régionale et surtout locale. Il existe cependant une condition préalable à cette efficacité : l'acquisition et l'utilisation de la télédétection doivent encore être combinées à des relevés de terrain et à des photographies aériennes. Cette condition demeure, même si nous sommes à l'aube d'une nouvelle génération de **capteurs** satellitaires à haute **résolution**. Seule l'utilisation des photographies aériennes pourrait être grandement diminuée. Dans une étude réalisée par Grenier *et al.* [32], des données aéroportées numé-

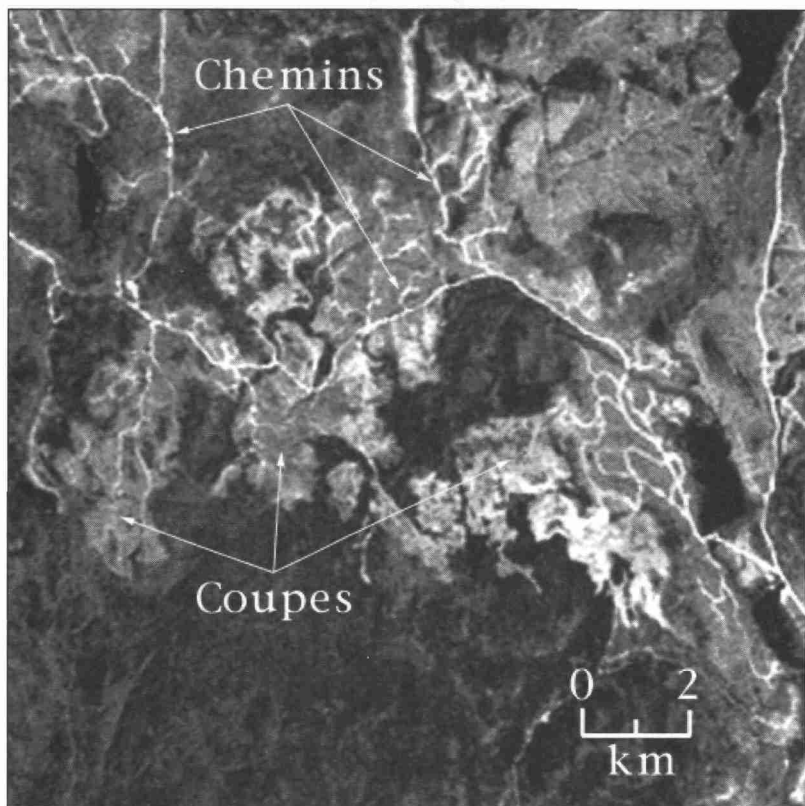


Figure 3.9. : Exemple de coupes forestières dans un secteur boisé de la région de Charlevoix, au Québec, en fin d'été (Image TM3 de Landsat-5, septembre 1989).

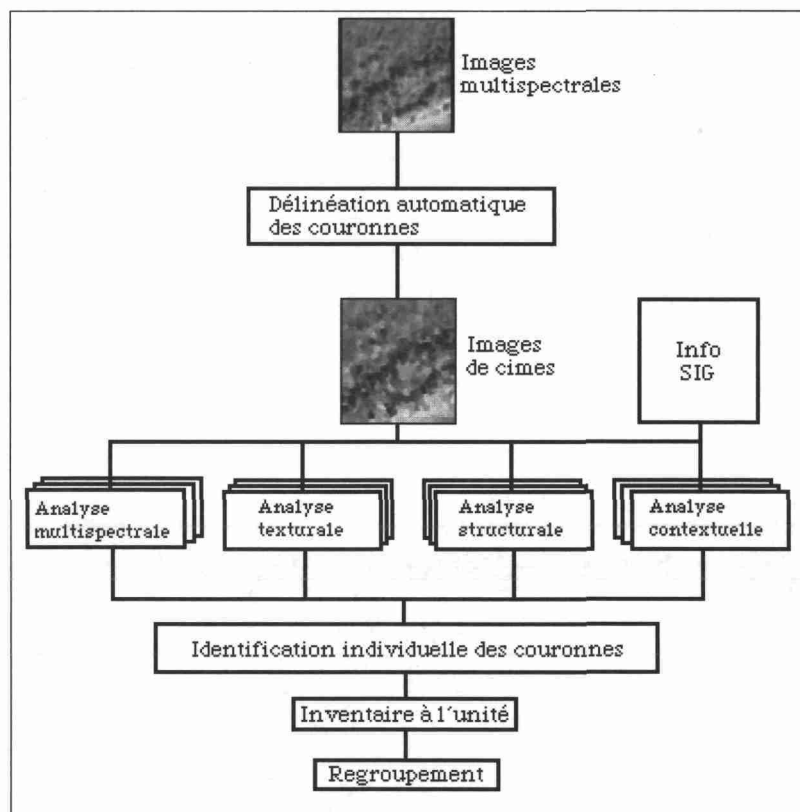


Figure 3.10. : Organigramme identifiant les étapes à franchir dans une démarche d'inventaire forestier à partir de données de télédétection à haute résolution.
Adapté de : Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique.

riques ayant une **résolution** spatiale de 7 m ont été acquises dans le but de caractériser certains milieux humides localisés le long du fleuve Saint-Laurent, au Québec. Les auteurs en arrivent à la même conclusion en ce qui a trait à l'efficacité de ces données télédéteectées. Outre l'intérêt informatif de cette recherche, elle a comme particularité de présenter une légende raffinée incluant la végétation herbacée qui peut servir d'exemple pour les prochains travaux qui utiliseront des données provenant de **capteurs** satellitaires à haute **résolution** spatiale. À titre indicatif, nous présentons une partie de la légende accompagnant la cartographie de ces milieux humides à l'**échelle** locale :

- eau libre ;
- eau libre peu profonde sur fond minéral ;
- herbier aquatique à végétation submergée ;
- herbier aquatique à végétation submergée à myriophylle et élodée ;
- herbier aquatique à végétation submergée à myriophylle ;
- herbier aquatique à végétation à feuilles flottantes ;
- marais profond à typha ;
- marais profond à sagittaire ;
- marais peu profond à scirpe fluviatile ;
- prairie humide à graminées hautes ;
- prairie humide à graminées basses ;
- prairie humide à pissenlit officinal ;
- marécage arboré.

Une des conclusions de cette étude est que ces données, ayant une **résolution** spatiale de 7 m, permettaient une information fine cartographiable à l'**échelle** du 1 : 20 000. On note aussi que l'acquisition et le traitement d'**images** numériques, pour une cartographie comparable à celle faite par photo-interprétation avec validation au sol, revenaient à un coût dix fois moindre pour une étude à l'**échelle** régionale.

La télédétection aura aussi été utile dans l'évaluation et l'expérimentation de mesures de protection contre la dégradation des sols dans des bleuétières

(Lemieux *et al.* [37]). Avec des **photographies** aériennes numérisées, on a pu constater visuellement et quantitativement cette dégradation des sols. En effet, les superficies dénudées de sols ont plus que triplé entre 1976 et 1989, passant de 156,7 ha à 478,6 ha. Il a été aussi possible de noter que certaines bleuetières étaient plus affectées que d'autres et qu'il fallait y apporter de façon toute particulière des mesures correctives.

La diversité des **plates-formes** et des **capteurs** actuellement disponibles, l'arrivée du **capteur VÉGÉTATION** sur le nouveau satellite européen SPOT-4 ainsi que le développement technologique lié au raffinement des **résolutions** spatiales et spectrales des **capteurs** font en sorte que la télédétection est vouée à un avenir prometteur en tant qu'outil d'appréhension et, indirectement, de compréhension de la végétation terrestre et ce, à toutes les **échelles**.

3.1.4. Une géographie de la composante minérale

Dans cette partie, nous nous préoccupons de l'environnement minéral tant au plan de son contenu (où domine l'aspect géologique) que de son contenant (où domine l'aspect géomorphologique). Ces importants secteurs des sciences de la Terre peuvent être appréhendés à la condition de pouvoir détecter de la façon la plus directe possible la **signature spectrale** des sols ou des composantes du substratum rocheux, ainsi que les caractéristiques géomorphologiques du paysage (avec ou sans l'effet de stéréoscopie). Souvent, nous sommes limités dans notre étude par l'occupation du sol sur le territoire analysé. D'après Williams Jr [77], la télédétection de la composante minérale a longtemps été dominée par l'utilisation de la photographie aérienne. Encore aujourd'hui, plusieurs chercheurs s'y réfèrent très souvent. Il faut de plus noter que, dans plusieurs pays, la photographie aérienne est encore considérée comme un document militaire et donc difficilement disponible pour des fins d'utilisation civile, contrairement aux **images** satellitales.

L'intérêt pour les **images** satellitales a débuté avec les vols habités au début des années 1960 soit avec la mission Mercury, aux États-Unis. Selon Lowman [41], des photographies prises avec des caméras portatives 70 mm sont rapidement devenues une nouvelle méthode d'étude pour les chercheurs en sciences

de la Terre. Il en fut de même pour les informations acquises lors des missions *Gemini*, *Apollo* et *Skylab*. Du côté soviétique, les **plates-formes** *Salyut* et *Soyuz* ont joué le même rôle.

Cependant, les photographies avaient, dans la plupart des cas, une vision oblique ou panoramique de la Terre, limitant ainsi leur utilisation sur une base opérationnelle. À la figure 3.11, nous illustrons un exemple typique d'**image** obtenue à partir d'une capsule spatiale habitée. Ici, il s'agit de Gemini-4.

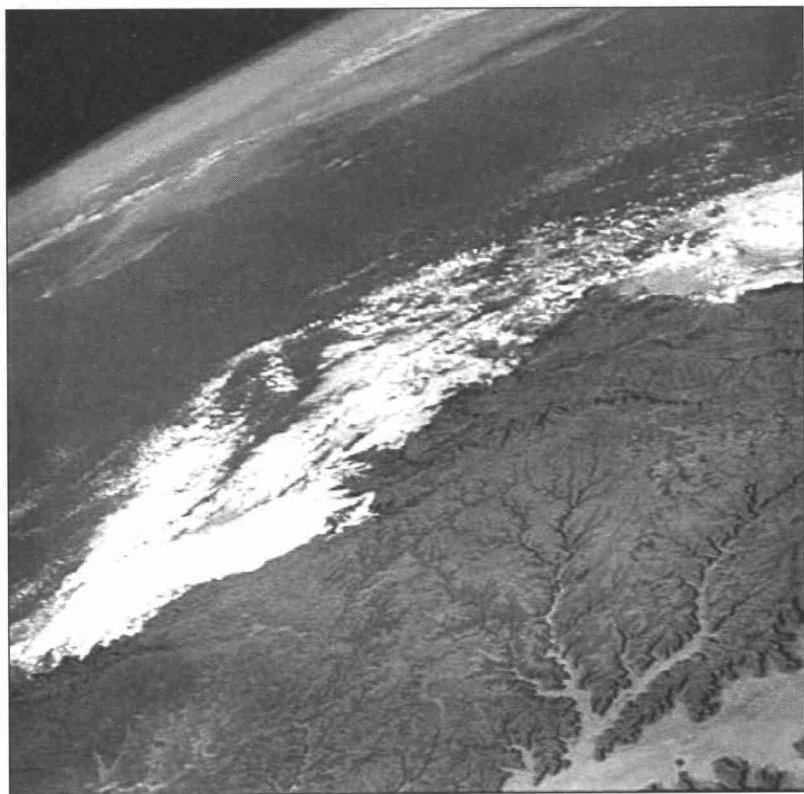


Figure 3.11. : Photographie panoramique de la partie sud de la péninsule arabique prise le 21 juin 1965. En avant-plan nous trouvons le plateau Wadi Hahramaut et, en arrière-plan, le golfe d'Aden masqué partiellement par des nuages (en blanc).

Source : NASA/ Mission Gemini-4.

Ce n'est que lors de la mission Apollo-9, en mars 1969, qu'a débuté l'ère de l'utilisation des données de télédétection spatiale grâce à l'installation de caméras multibandes spécifiquement fabriquées pour répondre à des besoins de télédétection pour les sciences de la Terre. Ces expériences, jumelées avec les quatre missions de Skylab, ont pavé la voie au développement des capteurs pour le programme Landsat.

Les avantages multiples de Landsat en matière de répétitivité, de vision synoptique, de superficie couverte et d'acquisition de données en mode multibande auront tôt fait de séduire notamment les géologues et les géographes physi-ciens. L'intérêt grandissant pour cette approche est on ne peut mieux représenté dans des ouvrages de référence publiés dans les années 1970. Depuis, de nombreux ouvrages spécialisés ont été édités. Ils ont été alimentés par l'acquisition, le traitement et l'analyse de nouvelles **images** provenant de nouvelles **plates-formes** et de nouveaux **capteurs** de type **multibande**. Ils obtiennent de l'information tant dans le domaine du visible que dans celui de l'infrarouge et des hyperfréquences. De plus, le développement de capteurs radar (hyperfréquences actives) installés d'abord sur des **plates-formes** satellitaires, comme le Seasat en 1978 ou comme la navette spatiale *Columbia* en 1981, aura grandement contribué à l'augmentation de l'intérêt par rapport à la télédétection. En effet, ce type de **capteur**, rappelons-le, peut enregistrer des informations de la Terre le jour ou la nuit et ce, même en présence d'une couche nuageuse. Enfin, depuis la mise en orbite des satellites du programme européen SPOT, en 1986, il est possible de voir la Terre en trois dimensions. Nous verrons dans le prochain chapitre les **plates-formes** et les **capteurs** qui ont été développés et utilisés depuis 25 ans.

En fait, les capteurs installés sur les plates-formes satellitaires permettent de détecter des informations aux échelles continentale, régionale ou locale utiles sur la géologie et la géomorphologie et ce, tant pour leurs aspects dynamiques que statiques.

Plus spécifiquement, les satellites d'observation de la Terre peuvent être utilisés pour les aspects suivants en sciences de la Terre :

Structural	Lithologique	Catastrophes naturelles	Morphologique
Reconnaissance des linéaments	Détermination de la signature des minéraux	Volcanisme	Compartimentation du paysage
Stratégie d'échantillonnage sur le terrain	Recherche de gîtes minéraux	Détection d'indices et conséquences de tremblements de terre	Suivi dans le temps et dans l'espace des phénomènes dynamiques
Reconnaissance et cartographie des grandes unités structurales	Cartographie des formations géologiques	Détection de zone de glissement de terrain et de leurs conséquences	
	Stratégie d'échantillonnage sur le terrain	Détection d'effondrement dans des milieux karstiques et suivi temporel	
	Détection d'indices de localisation de nappes de pétrole ou de gaz naturel		

Il est normal qu'une première utilisation des **images** satellitales soit liée aux linéaments : c'est que la reconnaissance d'éléments linéaires est directe et non déduite. Notons cependant que l'identification des linéaments n'est pas automatique. Une phase d'analyse et d'interprétation est nécessaire. La vision synoptique que l'on obtient des **images** comble un besoin flagrant de perspective et de vision du terrain sous un angle différent et nécessaire : la vision verticale. Avant la venue des satellites, les chercheurs avaient vite compris l'utilité de la photographie aérienne dans ce sens. Cependant, cette dernière ne pouvait, à moins de réaliser des mosaïques parfois coûteuses et de grande dimension, avoir une vision d'ensemble aussi complète à l'**échelle** régionale. Dans des pays de grande superficie comme le Canada, cette **échelle** est souvent privilégiée.

Comme le mentionnent De Sève *et al.* [18], il est d'ores et déjà établi que, comme dans d'autres disciplines, un décloisonnement des informations et une orientation nette vers l'intégration de données multisources sont nécessaires.

Pour l'aspect structural, l'intégration des données de la télédétection, de la géophysique et de la topographie facilite l'appréhension et la compréhension des aspects structuraux de la Terre.

La reconnaissance des linéaments par télédétection a eu des répercussions positives sur la recherche fondamentale au niveau structural dès le début de l'utilisation des satellites vers le milieu des années 1970. En effet, Williams Jr. [77] souligne que les observations directes à partir d'**images** acquises par télédétection ont permis de repenser certains concepts morphotectoniques tels que : 1) les cratons qui sont moins stables qu'on ne le pensait ; 2) les linéaments et les blocs semi-rigides de la croûte qui sont communs dans et pour tous les cratons ; 3) plusieurs bassins continentaux qui sont délimités par des linéaments ; 4) les linéaments qui ne sont pas limités par les frontières d'une province tectonique ou par l'âge géologique et qui semblent être des fractures rajeunies le long d'anciennes zones de faiblesse ; 5) les grandes fractures et les blocs semi-rigides de la croûte qui sont probablement la manifestation de déformations à l'intérieur même d'une plaque tectonique.

Dans une perspective plus appliquée, l'extraction des linéaments est particulièrement utile pour l'exploration minière. En effet, bien que ce secteur soit peu documenté du fait que ce sont souvent des entreprises privées qui font la recherche et le développement, il n'en demeure pas moins que des corrélations élevées ont été constatées entre l'intersection de linéaments majeurs et des dépôts de minerai importants. Dès 1975, les travaux de Salas [58] en faisaient foi. Il est aussi reconnu que les linéaments peuvent être utiles à la localisation de nappes de pétrole, de gaz naturel et d'aquifères.

Lillesand et Kiefer [39] font référence à une autre approche dans le cadre de l'exploitation minière : la géobotanique. Elle est utile surtout dans les cas où nous sommes en présence d'anomalies végétales. Elles sont souvent associées à des surfaces minéralisées. Les anomalies sont identifiables à partir de différences dans la densité du couvert, la **teinte** des feuilles, des changements anormaux dans le cycle phénologique ainsi qu'une distribution anormale des espèces. Dans ce cas, une approche pluridisciplinaire est requise.

Enfin, la télédétection d'aujourd'hui permet de créer des **signatures spectrales** des minéraux et ce, avec une très grande finesse. En effet, des **capteurs hyperspectraux** ont été développés de telle sorte qu'il est possible d'obtenir la **réponse spectrale** des objets à partir de centaines de fenêtres spectrales situées entre l'ultraviolet et l'infrarouge thermique. Comme nous le verrons dans le prochain chapitre, des **capteurs** tels que le **CASI** et l'**AVIRIS** en sont des exemples.

Dans un autre ordre d'idées, la cartographie des risques naturels, tels que les glissements de terrain est devenue possible, à l'**échelle** régionale, grâce aux possibilités de **stéréoscopie** des **plates-formes** comme SPOT et Radarsat. Dans ce genre de phénomène, la troisième dimension devient un atout majeur pour la localisation précise du secteur perturbé et pour établir ses caractéristiques géomorphologiques particulières.

Un **modèle numérique d'altitude** (MNA) peut aussi devenir une aide précieuse pour la reconnaissance des formes naturelles lorsqu'on lui superpose une **image** satellitale ou un voile topographique avec effet d'ombrage et que le tout est présenté dans une vision tridimensionnelle. Sur la figure 3.12, nous percevons la géomorphologie à l'**échelle** régionale d'un secteur de la région de Charlevoix, au Québec. Cette figure a comme particularité de faire ressortir des linéaments ainsi qu'une spécificité géomorphologique : la gorge de la rivière Malbaie. Les versants symétriques de cette vallée en auge ont une dénivellation de près de 800 m. La vallée a une largeur d'environ 2,5 km dans la partie supérieure. Elle est localisée à 130 km au nord-est de la ville de Québec. Cette organisation géomorphologique particulière est mise en valeur grâce à la combinaison d'une **image** TM4 de Landsat-5 (a) et d'un **MNA à résolution** fine (équidistance des courbes de 10 m) (b). Le **MNA** est couvert avec un voile topographique illuminé par une pseudo lumière rasante provenant du sud-sud-est. Elle correspond à la position du soleil lors de l'acquisition de l'**image** TM. La venue des **MNA**, de la vision stéréoscopique des **images** et surtout de la grande variabilité des **résolutions** spatiales, spectrales et temporelles des **plates-formes** fait en sorte que la géomorphologie de la Terre peut être mise en valeur et ce, de l'**échelle** locale à l'**échelle** planétaire. Dans une perspective

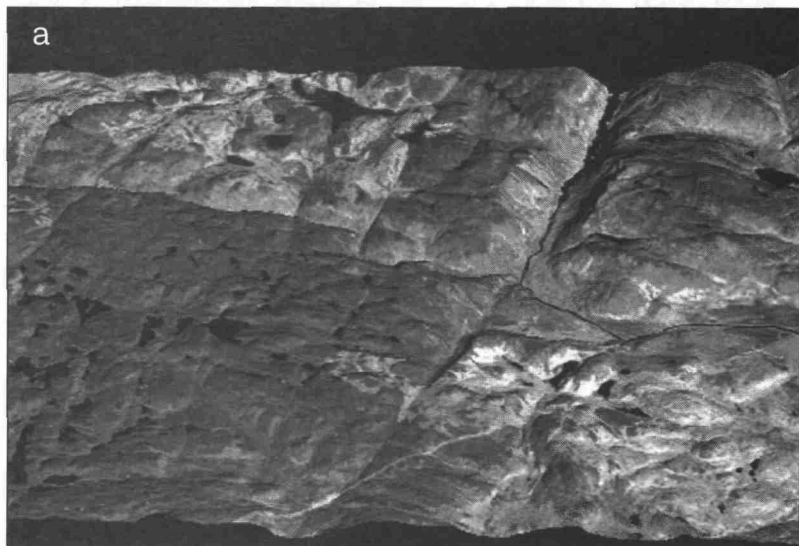


Figure 3.12. : Images 3D orientées plein nord du secteur de la gorge de la rivière Malbaie (au centre nord-ouest), au Québec. La partie a) correspond à une image TM acquise le 25 septembre 1988 par le satellite Landsat-5 calée sur le MNA. La partie b) représente la topographie mise en évidence grâce au MNA et aux effets d'ombrage provoqués par une pseudo lumière. Source du MNA : Centre canadien de cartographie, Ressources Naturelles Canada.

de planification et d'aménagement du territoire, la géomorphologie de la Terre visualisée d'un point de vue spatial devient aujourd'hui une source d'information essentielle à intégrer dans un **système d'information géographique** visant à proposer des schémas d'aménagement. Dans une perspective de recherche fondamentale, la géomorphologie issue des **images** satellitales trouve son utilité notamment à l'**échelle** planétaire. Aujourd'hui, grâce à des sondes telles que *Voyager*, *Global Surveyor* et *Magellan*, l'exploration du système solaire nous oblige à voir la Terre comme une planète parmi d'autres. L'organisation physiographique du paysage de Mars ou de Vénus se comprend à partir d'analogies avec des phénomènes terrestres. C'est pourquoi les astronomes, les géographes, les géologues et les physiciens ont tout intérêt à percevoir la Terre par cette approche.

Le potentiel d'application de la télédétection dans les sciences de la Terre dépasse donc largement les limites de notre monde. Les récentes missions des satellites américains *Magellan* et *Global Surveyor* respectivement pour Vénus et pour Mars ont permis de recueillir des **images** saisissantes de leur surface. Avec la figure 3.13, nous avons un excellent exemple des possibilités de la télédétection à haute **résolution**. Elle représente un glissement de terrain dont la partie délimitée par un rectangle orienté de façon verticale couvre une superficie de 2,6 km par 45,4 km. Cette caméra de haute précision est installée à bord du *Global Surveyor*.

Sur la figure 3.14, nous trouvons une manifestation tout aussi spectaculaire de la nature. Cette **image** provient du **capteur RSO** du satellite *Magellan*. Elle présente un cratère ayant un diamètre de 37 km qui est en partie marqué à droite par plusieurs failles et fractures. Notons qu'il s'agit là d'une **image radar** typique qui présente des aberrations géométriques notables caractérisées par un repliement du relief.

Enfin, à une **échelle** différente, il est possible de détecter des particularités propres au contenu pour la partie épidermique de la Terre. Nous prendrons comme exemple la détection de la teneur en eau des dépôts de surface par la

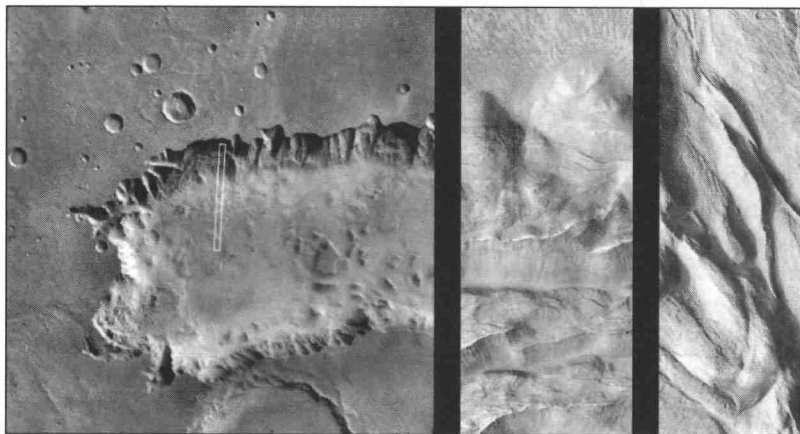


Figure 3.13. : Important glissement de terrain sur Mars, dans le secteur de Ganges Chasma ($7,8^{\circ}$ S/ $51,8^{\circ}$ W). L'image centrale correspond à la section localisée dans la partie supérieure du rectangle blanc tandis que celle de droite correspond à la partie inférieure. Il s'agit d'une image acquise le 26 octobre 1997 par le capteur MOC (Mars Orbital Camera) dans le domaine du visible. La résolution spatiale est de $5 \times 7,4$ m.
Source : NASA/GSFC.

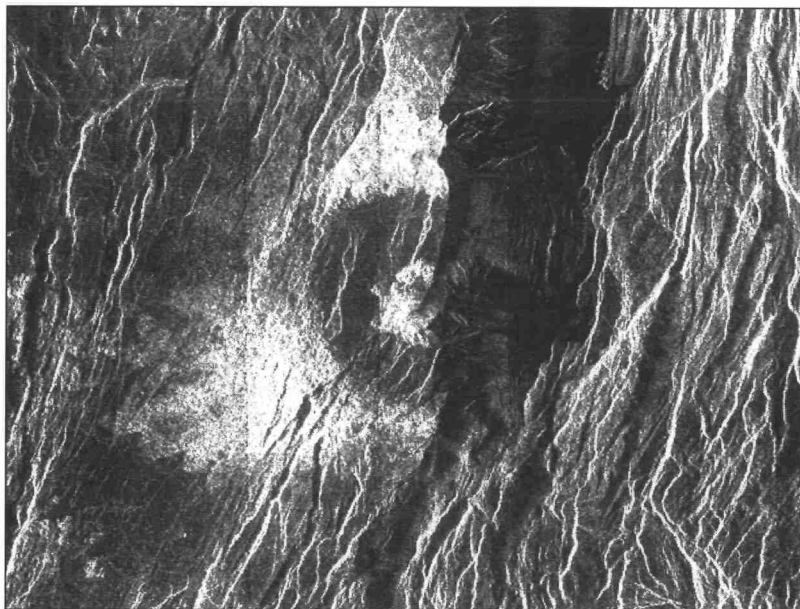


Figure 3.14. : Cratère localisé à $29,91^{\circ}$ N/ $282,9^{\circ}$ E dans la région de Beta, sur Vénus. Image acquise le 12 août 1991 par le capteur RSO du satellite Magellan.
Source : NASA/JPL/Magellan Mission to Venus.

thermographie infrarouge (Desjardins [19]). Cette détection est possible dans des conditions particulières. En effet, afin d'obtenir des résultats qui sont les plus représentatifs de la réalité, les informations doivent être acquises au moment opportun, c'est-à-dire environ une heure avant le lever du Soleil. Malheureusement, sous nos latitudes, l'heure de passage des satellites ne correspond pas au moment souhaité. Il faut donc utiliser les **plates-formes** aéroportées. Sur la figure 3.15, nous proposons une vision nocturne (04h00, heure locale) d'un paysage agricole du Québec méridional. L'**image** a été prise par avion à 5 200 m d'altitude avec une **résolution** spatiale de 11 m de côté. Après traitement, elle nous informe des zones plus ou moins humides. Afin de les faire ressortir, nous avons rehaussé les contrastes entre les **teintes**. Ainsi, les zones plus chaudes en surface sont représentées par des **teintes** pâles. Elles correspondent aux zones plus sèches que les zones foncées qui elles, ont des températures plus froides. L'**inertie thermique** de l'eau engendre ces températures plus froides. Notons enfin un phénomène particulier : l'advection ou, plus précisément, l'effet advectif. Sur cette **image** thermique de nuit, ce phénomène est caractérisé par des corridors de **teinte** plus pâle orientés dans le sens du vent. Il s'agit en fait d'un mouvement horizontal de l'air qui, au passage d'un volume distinct des autres (ici, par la température plus chaude de champs agricoles ou de fermes), modifie ses caractéristiques thermiques et les conserve sur une certaine distance déterminée par la quantité d'énergie transférée lors du passage de l'air dans ce volume.

Dans le domaine spectral des hyperfréquences actives (voir section 2.5), Boisvert [9] a démontré que le radar peut fournir un estimé de l'humidité du sol près de la surface. Elle soutient cependant que, en fonction des techniques culturelles utilisées, la **rugosité de surface** (la **texture**) des cultures constitue une importante source d'erreur.

Cette géographie de la composante minérale par télédétection a donc un champ d'application très diversifié. Elle offre des possibilités uniques de perception à partir de points de vue qui doivent, à l'aube de ce nouveau millénaire, faire partie intégrante de notre culture scientifique.

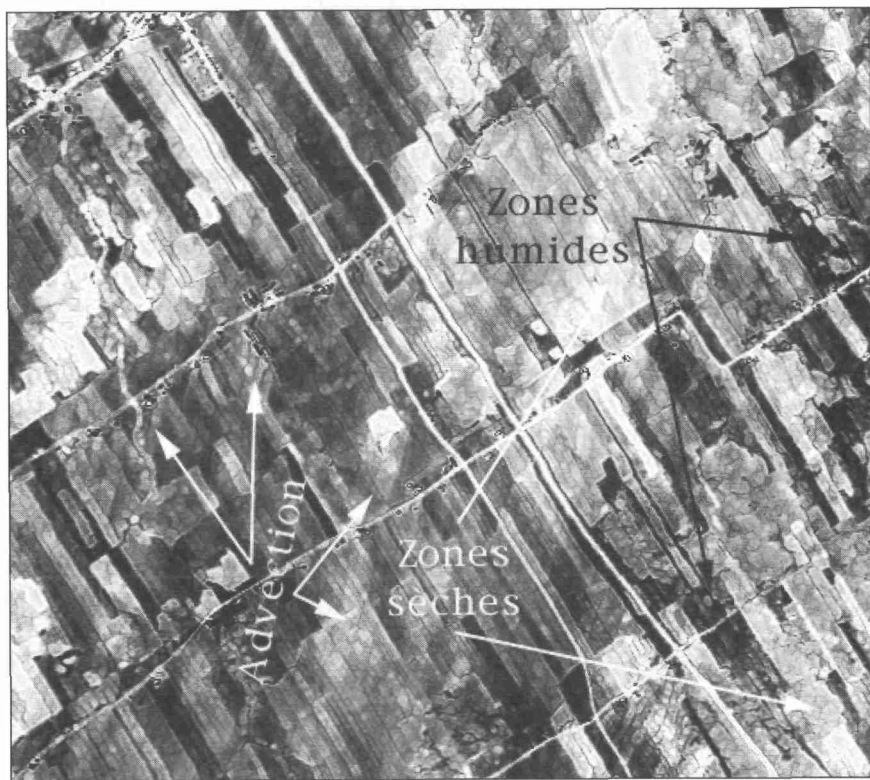


Figure 3.15. : Image thermique de nuit provenant du capteur aéroporté Daedalus 1260 du Centre canadien de télédétection. Elle a été acquise le 20 août 1984, à 30 km au sud de la ville de Trois-Rivières, au Québec.

3.2. L'espace construit

De tout temps, l'être humain a eu besoin de connaître l'utilisation de son territoire afin d'en assurer une meilleure gestion. Un des outils privilégiés pour répondre à ce besoin est, depuis longtemps, la cartographie. Les cartes permettent de voir une synthèse des modes d'utilisation/occupation du sol et ce, à différentes **échelles**. Depuis l'arrivée de la télédétection satellitale, il nous est possible de visualiser les conséquences de l'implantation humaine dans l'oékoumène terrestre. En même temps, elle devient une source de données essentielle dans la perspective d'une vision globale d'un territoire. L'avantage de sa répétitivité dans le temps et de la flexibilité dans sa **résolution** spatiale font en sorte, qu'aujourd'hui, les **images** satellitales sont une source d'information appréciée lorsqu'il est nécessaire d'avoir une vision cartographique de l'inventaire et des changements spatio-temporels de l'utilisation/occupation du sol. Comme dans d'autres champs d'application, la venue de **capteurs** à haute **résolution** ouvre la porte à une plus grande finesse dans l'information recherchée.

3.2.1. Une géographie de l'espace urbain

Depuis les années 1950, l'essor mondial de la population se caractérise par une progression spectaculaire des espaces urbanisés. En effet, d'après Ramade [51] le pourcentage de la population mondiale qui vit dans les villes aura grimpé de 30 %, en 1950, à 65 %, en 2025. Renard [52] précise qu'avec cette pression démographique et l'extension urbaine qui en découle, le développement, la planification et le suivi de la dynamique du territoire relèvent de la première importance.

En conséquence, il est donc nécessaire d'avoir en notre possession des outils ou des aides à la décision performants. La cartographie en est un. Il est essentiel qu'elle soit à jour. Pour y arriver, la télédétection a été explorée et on poursuit aujourd'hui son développement technologique d'une façon telle que les contraintes devenues presque légendaires en matière d'application en milieu urbain s'estompent peu à peu. À cause de la faible **résolution** spatiale des premiers **capteurs** installés sur des satellites, la télédétection appliquée au milieu

urbain a longtemps été boudée par les spécialistes de l'espace urbain. Et pour cause, les premières **images** prises dans le début des années 1970 ne donnaient des informations que sur de grandes généralités du tissu urbain. En conséquence, une cartographie à une **échelle** variant entre 1 : 100 000 et le 1 : 250 000 était possible avec des thèmes englobants tels les espaces verts, l'eau, le réseau routier principal, les quartiers résidentiels et industriels. C'était utile à l'**échelle** régionale mais peu pertinent pour l'**échelle** locale. Pour combler ces besoins à cette dernière **échelle**, les gestionnaires avaient recours à la **plate-forme** aérienne. Cependant, à cause des coûts, cette approche a été délaissée rapidement. Seuls quelques chercheurs l'ont utilisée afin de développer des techniques de détection plus fines. L'arrivée imminente des **capteurs** satellitaires à haute **résolution** devrait cependant changer ce choix. Les hautes **résolutions** spatiales, combinées à des **résolutions** spectrales bien ciblées feront en sorte que la télédétection satellitale s'avèrera un moyen efficace d'acquisition de données. Elle sera en compétition directe avec les photographies aériennes encore aujourd'hui fortement utilisées pour cette **échelle** d'acquisition d'information. Le début du prochain siècle s'annonce comme étant un moment crucial en ce qui concerne l'utilisation de la télédétection en milieu urbain. Il faudra tenir compte de contraintes d'ordre technique bien identifiées par Baudot [5]. Il estime que, pour arriver à un **pixel** pur à 95 % (c'est-à-dire une **signature spectrale** unique), l'objet visé doit avoir 1,6 fois la dimension du **pixel**. De plus, il faut plus d'un **pixel** homogène pour pouvoir identifier de façon très claire un objet. L'auteur estime que, pour l'analyse technique d'un bâtiment de taille moyenne (5 à 10 m), la **résolution** spatiale devrait être de 2 m ou moins, ce qui correspond à l'information que l'on peut obtenir à partir d'une photographie aérienne au 1 : 30 000. Si ce bâtiment est isolé et bien contrasté par rapport à son environnement, nous pouvons espérer extraire des informations utiles à partir de données satellitales ayant une **résolution** spatiale de 5 à 10 m.

En somme, on comprend pourquoi, à l'heure actuelle, les satellites disponibles ne permettent d'offrir des informations utilisables que pour des **échelles** dépassant rarement le 1 : 50 000. Seules les **images** provenant des satellites indiens IRS1-C ou D (environ 6 m) ou de certains satellites russes (système Resurs ou SPIN-2-environ 2 m) peuvent engendrer une cartographie plus fine du territoi-

re urbain. Bientôt, la **résolution** spatiale sera de l'ordre du mètre et c'est à ce moment que la télédétection pourra intervenir de façon efficace en autant que les îlots urbanisés (quadrilatères) soient bien organisés, ce qui n'est pas toujours le cas dans les banlieues de plusieurs villes de pays en développement. La télédétection satellitaire va alors se heurter aux mêmes problèmes de détection, d'identification et d'analyse que ceux qui sont présents lors de l'utilisation de la photographie aérienne. Quelles que soient les données utilisées, les études urbaines par télédétection auront toujours besoin de **données auxiliaires** provenant d'observations sur le terrain.

La contrainte de la résolution spatiale dans le cadre de l'utilisation de la télédétection en milieu urbain sera bientôt levée. Les données satellitaires entreranno directement en compétition avec les photographies aériennes mais avec les avantages de la vision synoptique du territoire étudié, de la régularité de la prise d'information et de la flexibilité en matière de résolution spectrale.

En général, la télédétection peut être utile sur le plan urbain pour les considérations suivantes :

Espace construit
Détection et détermination de la dynamique spatiale
Planification dans le développement et le réaménagement
Perception de l'organisation urbaine
Évaluation qualitative des densités de population
Études préalables à l'implantation de grandes surfaces
Inventaire et cartographie du réseau routier
Inventaire et cartographie de l'occupation du sol
Détermination des espaces verts
Détection de contraintes au développement
Détection des îlots de chaleur

Dans une étude récente, Desjardins et Cavayas [20] présentent les possibilités et les limites des **images** satellitaires (TM de Landsat-5) en matière d'occupa-

tion du sol pour une ville d'Amérique du Nord. L'étude portant sur Montréal avait pour objectif spécifique d'évaluer qualitativement la performance des données TM pour la reconnaissance de modes d'utilisation/occupation du sol déterminés par la légende de la carte de la Communauté urbaine de Montréal au 1 : 50 000. Un composé couleur, issu des trois premières **composantes principales** des données TM (à l'exception de la bande thermique TM 6), a été imprimé et une analyse visuelle a été effectuée. Sur la figure 3.16, nous présentons les trois premières composantes principales du secteur nord-est de la ville. Ces **images** ont comme avantage de ne pas contenir de bruits ou d'interférence visuelle nous empêchant de voir d'une façon claire les caractéristiques de taille, de **signature spectrale**, de **texture** et d'**arrangement** du paysage urbain étudié. De plus, l'**analyse en composantes principales** permet d'éliminer la redondance des informations entre les différentes bandes spectrales : c'est pourquoi l'information contenue dans les trois **images** de la figure est en très grande partie distincte et unique.

Après avoir fait le composé couleur de ces trois nouvelles **images**, la phase d'interprétation a été réalisée. Sur le tableau 3.1, nous présentons les résultats de cette recherche. Il s'agit d'une évaluation qualitative du niveau de difficulté pour l'identification des fonctions urbaines retenues. Il faut noter que les critères d'identification retenus pour les fonctions sont les mêmes que ceux utilisés en photo-interprétation, soit la **forme**, la taille, la **signature spectrale** ou **teinte** (couleur), la **texture** et l'**arrangement**.

Les auteurs en arrivent à la conclusion, qu'à cette **échelle**, la télédétection devrait être considérée comme une source importante d'information, au même titre que la photographie aérienne et que différentes enquêtes sur le terrain. Une vision globale du territoire étudié (par la télédétection satellitale) est nécessaire dans le cadre de la planification et de l'aménagement du territoire urbanisé et non urbanisé.

Enfin, plusieurs sources de données devraient être intégrées dans un **système d'information géographique** afin d'améliorer la qualité et la finesse des résultats. En ce sens, un système automatisé d'identification des fonctions

Première composante principale



Deuxième composante principale



Troisième composante principale



Figure 3.16. : Les trois premières composantes principales de l'image TM de Landsat de Montréal acquise le 26 août 1986.

Tableau 3.1. : Identification des fonctions urbaines à partir d'images TM de Landsat pour la ville de Montréal, au Québec.

FONCTION	IDENTIFICATION
Habitat (faible densité)	Aisée avec précision
Habitat (moyenne et forte densités)	Aisée mais sans distinction entre moyenne et forte densités
Commerce de détail	Très difficile à impossible
Centre commercial	Très difficile à impossible
Édifice à bureaux	Impossible
Industrie légère	Relativement aisée
Industrie lourde	Aisée
Carrière	Relativement aisée
Site d'enfouissement	Impossible
Rural	Aisée
Équipement collectif	Très difficile à impossible
Service d'utilité publique	Variable selon la taille
Parc (urbain/régional)	Aisée
Réserve naturelle	Relativement aisée
Golf	Aisée
Cimetière	Impossible
Espace vacant	Relativement aisée

urbaines, utilisant des données multisources et la légende de la carte d'utilisation/occupation du sol de l'île de Montréal a été développé par Baudouin *et al.* [7]. Cette étude a comme avantage de démontrer l'importance de l'intégration de données dans une perspective d'inventaire et de mise à jour en milieu urbain à l'échelle de l'îlot. L'extraction de paramètres radiométriques (lire **signature spectrale**) et géométriques (lire la superficie et la **forme** de l'îlot), dans une perspective de clé d'interprétation, est à la base d'une approche opérationnelle qui leur semble prometteuse.

Pour le cas des villes d'importance dans les pays en développement, l'exemple de Conakry, en Guinée, semble représentatif des possibilités et des limites de la télédétection dans ce type d'environnement urbain. Les recherches de

Renard *et al.* [53] ont démontré que, mis à part le centre ville identifiable par son organisation structurale des rues (plan en damier), le reste semble désorganisé et engendre des difficultés majeures pour la reconnaissance des fonctions urbaines, et ce même avec des photographies aériennes. L'hétérogénéité domine les **signatures spectrales**. D'après ces auteurs, une connaissance intime du territoire étudié constitue la clé principale de la réussite. De plus, l'intégration de données multisources est en fait la seule solution pour une interprétation de qualité. Afin de bien saisir le problème, des sections d'une **image HRV** de SPOT, acquise le 9 février 1993 en mode **panchromatique**, sont présentées sur la figure 3.17. Les secteurs identifiés par le chiffre 1 sur les **images** correspondent à un habitat résidentiel de type « bon standing ». Pourtant, leur **signature spectrale** est fort différente d'un site à l'autre. Celui identifié sur l'**image b)** semble contenir plus de végétation arbustive (caractérisée par une **teinte** foncée). Le secteur 2 correspond à un habitat résidentiel de type « moyen standing ». Enfin, le secteur 3 (sur l'image a) s'identifie à de l'activité mixte du tertiaire. Ces zones ainsi caractérisées sur la carte d'utilisation/occupation du sol de Conakry l'ont été surtout grâce aux **données auxiliaires**.

Donnay [22] résume la problématique de la télédétection urbaine en ces termes :

La télédétection urbaine trouve son originalité, sa richesse, mais aussi sa limite, dans sa totale dépendance vis-à-vis de la technologie et de la méthodologie, dans sa totale dépendance vis-à-vis ses données exogènes, et dans sa totale dépendance en regard de la notion même d'urbanisation.

L'avenir permettra peut-être d'atténuer ces dépendances.

3.2.2. Une géographie de l'espace agricole

Les ressources alimentaires constituent une priorité dans toutes les parties du monde, tant au plan de l'agriculture de subsistance que de celui de l'agriculture à caractère plus industriel. Une gestion de son développement et de son rendement s'avère *nécessaire*, surtout dans le contexte actuel de **développement durable**. Bien que cette préoccupation soit en général bien sentie dans les pays

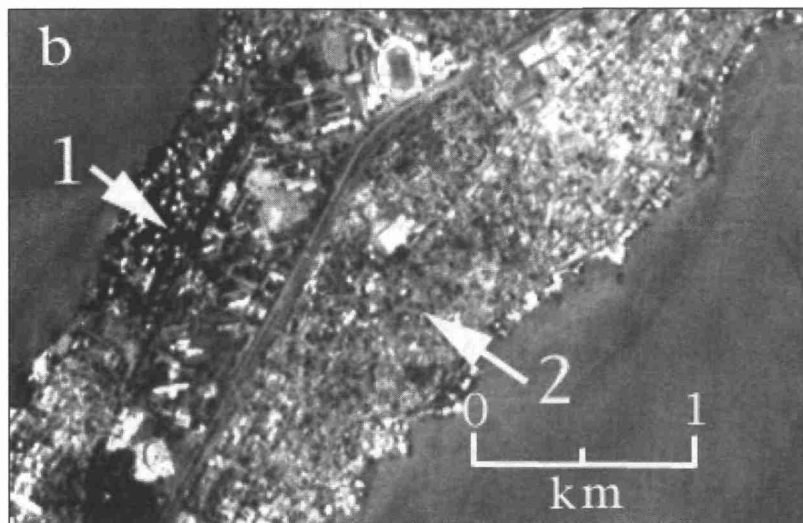


Figure 3.17. : Deux secteurs de la ville de Conakry, en Guinée ayant une organisation structurelle différente : a) le centre ville et b), un secteur périphérique au nord-est du centre ville. Notez que les images sont à la même échelle. Adaptée de Renard et al. [52].

industrialisés, ce n'est pas nécessairement le cas pour plusieurs pays en développement, même si le pourcentage de la population vouée à des pratiques agricoles est très élevé.

L'agriculture aura été, avec la foresterie, un champ de développement privilégié pour la télédétection. Les grands pays producteurs de denrées agricoles ont rapidement saisi les avantages de l'utilisation des données satellitales dans ce domaine.

Au milieu des années 1970, plusieurs systèmes de gestion des informations agricoles ont été mis sur pied et l'outil principal de ce système s'avérait être les **images** satellitales. D'après Myers [46], le marché international des produits agricoles était, depuis trop longtemps, dépendant d'informations souvent erronées au sujet du stock de nourriture disponible à l'**échelle** du globe (incluant les récoltes). Cet état de fait aura engendré des impacts économiques et sociaux parfois désastreux. C'est pourquoi le *USDA (United States Department of Agriculture)* a développé, avec la *NASA* et la *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*, le *LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment)*. Rapidement devenu opérationnel, ce système avait pour but de démontrer que les méthodes, basées sur la télédétection satellitale, pouvaient fournir des données précises dans le temps et dans l'espace sur les cultures et les récoltes de différents pays, notamment l'ex-URSS. Ce système a été utilisé avec succès sur de grandes terres pour l'évaluation du blé d'hiver et de printemps. En ex-URSS, la précision obtenue a été de 94 % avec un coefficient de variation de 3,8 %.

Ces résultats impressionnants incitèrent les chercheurs à pousser plus à fond les recherches en ce sens. Au début des années 1980, le *USDA* proposa *AgRISTAR (Agriculture and Ressource Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing)*. Ce programme de six ans avait comme objectif d'évaluer l'utilité, le coût et les limites de ce système pour l'amélioration de la qualité des informations liées aux cultures et aux récoltes, et ce à l'**échelle** du globe.

Avec les améliorations technologiques, ces méthodes ou systèmes se sont raffinés. Aujourd'hui, plusieurs projets sont en marche. Notons que la corporation

SPOTImage a mis récemment sur pied, avec différents collaborateurs, des projets qui vont dans le sens de ceux précités. Il s'agit d'abord du projet *MARS STAT (Monitoring agriculture by Remote Sensing Statistics)*. L'objectif principal de cette action est de fournir des estimations précoces sur les surfaces agricoles en Europe. Les données acquises par télédétection sont ensuite intégrées dans des bulletins de conjoncture publiés tous les mois. Il s'agit surtout de données de superficie de différentes cultures d'une année à l'autre pour les pays de l'Union européenne. Des développements sont en cours pour implanter une variante de ce projet en Russie. D'autres projets de ce genre sont mis en opération ailleurs. Citons le projet *ALIS (Agricultural Land Information System)*. Il s'agit d'une aide à la gestion des ressources agricoles de l'Égypte. Des organismes tels que SPOTImage, Geosys, Sysame et l'IGN (Institut géographique national) sont impliqués dans ce projet. Il a comme objectifs de mesurer et de suivre l'évolution dans le temps des superficies des principales cultures, de contrôler l'urbanisation sauvage sur les terres agricoles et d'analyser le potentiel de développement de nouvelles terres agricoles.

Les trois **images** présentées sur la figure 3.18 illustrent différentes structures agraires que l'on retrouve au Canada et en France. L'image a) montre la division seigneuriale caractérisée par des terres rectangulaires filiformes, la plupart du temps perpendiculaires aux axes de transport. Dans ce cas, il s'agit du fleuve Saint-Laurent, au Québec. Les terres sont celles de l'Ile-aux-Coudres, localisée à 100 km au nord-est de la ville de Québec. L'**image** b) illustre la division des terres en *township*. Il s'agit de territoires de 100 mi² (256 km²) subdivisés administrativement en 100 carrés de 1 mi (1,6 km) de côté. Cet exemple représente un paysage rural de l'Ouest canadien. L'**image** c) représente un secteur dans la région de Brest, en France. Ce paysage agricole est compartimenté par des bocages qui, à leur tour, sont caractérisés par des parcelles de forme irrégulière souvent limitées par des haies et des enclos.

Nous proposons maintenant un exemple relevant du contrôle des superficies en culture dans une perspective d'obtention d'octrois distribués aux cultivateurs par la PAC (Politique Agricole Commune) de l'Union Européenne. Destinée à la véri-

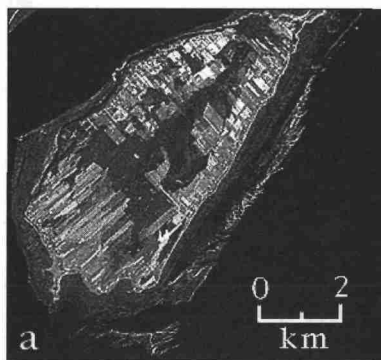


Figure 3.18. : Trois sous-images identifiant des paysages agraires différents : b) provient du Centre canadien de télédétection.
(Série Images du Canada) c) adapté de Le Quéné et al. [36].

fication des superficies couvertes par les principales cultures arables et des plantes fourragères, cette méthode de contrôle par la télédétection (**images** aériennes et satellitaires) est une alternative profitable proposée par rapport à l'évaluation dite traditionnelle par l'intermédiaire des inspections sur le terrain. Elle s'exerce sur un échantillonnage de 5 % de toutes les demandes faites par les agriculteurs dans le cadre du programme. La méthode est simple : il s'agit de comparer les parcelles déclarées dans les demandes des agriculteurs à celles que l'on peut détecter sur les **images**. Cette méthode s'est inspirée du projet MARS développé pour le suivi des cultures par le CCR (Centre Commun de Recherche) de la Commission Européenne. Les **images** satellitaires utilisées proviennent des systèmes SPOT, Landsat et ERS (*European Ressource Satellite*).

Bien que le nombre total d'**images** achetées ait augmenté entre 1994 et 1996, les gestionnaires du programme ont constaté une diminution de plus de 50 % des coûts par dossier, par parcelle ou par hectare. De plus, grâce à cette méthode, il a été possible d'augmenter le nombre de dossiers vérifiés de près de 300 % en trois ans, passant d'environ 35 000 à plus de 100 000. En 1996, 58 % du minimum requis de déclarations contrôlées ont été faites à partir de cette méthode. Durant l'année précédente, 1,6 million de parcelles (3,8 millions d'hectares) avaient été évaluées. Le coût de revient par hectare était de 4,55 ECU (environ 45 FF), ce qui correspond à une diminution de plus de la moitié par rapport à 1993.

Dans le cadre de ce programme, il devient essentiel d'obtenir des **images** dans des délais très courts, ce qui engendre un problème potentiel de pénurie car ces demandes entrent en compétition, au niveau de la programmation, avec celles fort diversifiées des autres clients. De plus, devant le nombre grandissant de demandes et, *a fortiori*, de besoins en vérification, un délai très bref entre l'acquisition d'une **image** et sa livraison est nécessaire.

L'utilisation de la télédétection en agriculture aura connu des succès importants dans le domaine de l'acquisition, de la gestion et du contrôle des informations concernant les cultures.

Les prévisions et le rendement réel des récoltes à l'échelle du globe constituent l'application la plus remarquable. La nouvelle génération de cap-

teurs satellitaires ne fera qu'améliorer la qualité des informations acquises. Nous devons cependant nous attendre à des coûts d'achat et de manipulation supplémentaires si les décideurs optent pour les capteurs de haute résolution provenant d'entreprises privées.

D'un point de vue plus général, en agriculture, la télédétection peut jouer un rôle non négligeable dans les domaines, suivants :

Espace agricole

Distinction entre différents types de culture (cartographie de l'occupation des sols agricoles, rotation des cultures)

Évaluation et inventaire des superficies cultivées en fonction du type de culture (y compris les zones de friche)

Détermination du niveau de maturité des cultures

Estimation du rendement des cultures (prévision des récoltes)

Assistance dans la détection des stress d'ordre hydrique et biologique des plantes

Évaluation et suivi des conséquences des infestations et des maladies

Suivi des besoins et planification en matière d'irrigation et de drainage

Détection des sources et du cheminement spatio-temporel de la pollution agricole dans les cours d'eau

Aide à l'élaboration de modèles agrométéorologiques

Suivi du gel radiatif des cultures

D'après Bonn [10], les applications actuellement opérationnelles en agriculture n'utilisent qu'une très faible partie du potentiel de la télédétection. Elles s'appuient sur une analyse qualitative et non quantitative des données. Pour les prochaines années, des efforts soutenus devront être mis sur l'aspect quantitatif des informations télédétectées, surtout avec la venue de satellites de haute précision. Au Québec, l'agriculture de précision, concept vieux d'une quinzaine d'années, prend de plus en plus d'ampleur. Il s'agit en fait d'évaluer le rendement des terres en fonction de la variabilité des sols et du rendement à l'échelle de la parcelle. Dans ce concept, on introduit l'application des technologies à référence spatiale. La gestion particulière engendrée par la mise en place de cette technologie amène un contrôle plus rigoureux des terres (Potvin [49]).

3.3. L'espace-temps et l'environnement

Dans la section 3.1, nous avons constaté comment l'écosystème terrestre pouvait subir des modifications en fonction d'agents tels que les conditions météorologiques changeantes qui engendrent des phénomènes du type El Niño. Comme nous le savons maintenant, la dynamique spatiale dans l'atmosphère est suivie par les satellites météorologiques depuis les années 1960 dans le but d'améliorer les prévisions météorologiques et de suivre les phénomènes à potentiel catastrophique tels que les ouragans et les tornades.

Les changements dans le temps de couverts végétaux en fonction des saisons sont particulièrement détectables notamment avec l'utilisation du *NDVI* en Afrique équatoriale. Les satellites météorologiques sont devenus, avec le temps, indispensables pour détecter et analyser ce genre de dynamique. Au Canada, le ministère de l'Environnement est le client le plus important en ce qui concerne l'acquisition de données du **capteur** RSO de Radarsat-I. L'objectif principal est de gérer les glaces des fleuves, des rivières et des grandes étendues d'eau telles que le golfe du Saint-Laurent. Il est essentiel de connaître le mécanisme de formation et de mouvement des glaces, que ce soit les icebergs ou les banquises. Cela constitue un élément essentiel au niveau de la sécurité pour le transport maritime d'hiver et de printemps.

Nous présentons maintenant quelques cas spécifiques.

Notons d'abord la dynamique spatiale de nuages volcaniques provenant du mont Spurr, en Alaska, lors de son éruption le 17 août 1992. Les travaux de Schneider *et al.* [59], ont permis de suivre sur plusieurs milliers de kilomètres et ce, durant 80 heures, ce nuage volcanique au-dessus du Canada et des États-Unis. Ces informations ont d'abord été acquises par le **capteur** AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) du satellite NOAA. L'objectif de cette poursuite en était un de sécurité pour l'aviation. Cette détection se base sur le fait que la **signature spectrale** de ce type de nuage est différente des autres surtout au moment de sa dispersion. D'après les auteurs, il est alors possible de les isoler et de les suivre. Sur la figure 3.19, nous donnons un aperçu du trajet de deux importants nuages volcaniques entre le 17 et le 20 août 1992.

Prenant compte qu'ils se situent souvent à une altitude élevée, ils suivent vraisemblablement une trajectoire déterminée par les courants-jets.

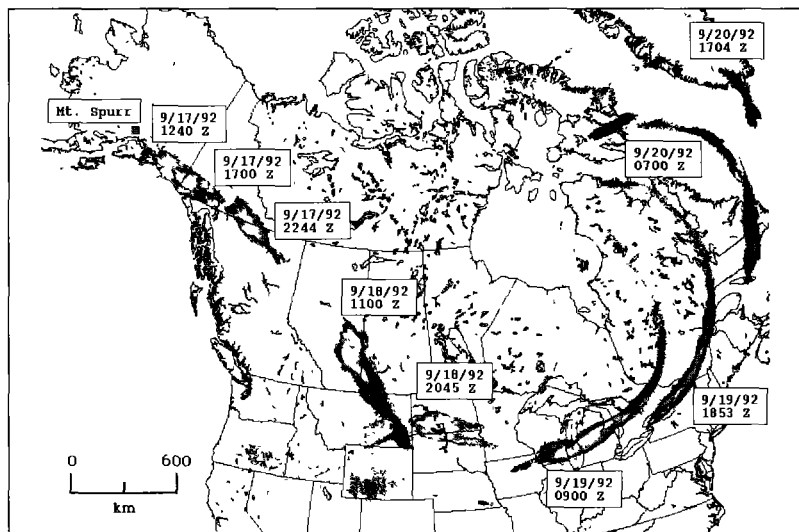


Figure 3.19 . Suivi de nuages volcaniques à l'aide des images du capteur AVHRR du satellite NOAA. Source : Schneider et al. [59].

L'utilité de la télédétection se manifeste aussi dans la reconnaissance et l'ampleur des changements. Citons l'exemple du déplacement de dunes dans un territoire situé dans le sud-est du Maroc. À partir d'images **panchromatiques** HRV de SPOT acquises en 1986 et en 1995, il a été possible d'évaluer l'orientation et la distance sur laquelle certaines dunes se sont déplacées. Les travaux de Desjardins *et al.* (en cours) ont permis de constater que, durant cette période, plusieurs dunes se sont déplacées vers le nord nord-est sur une distance médiane de 104 m, menaçant ainsi des palmeraies situées à quelques kilomètres à l'aval de ces dunes. À l'aide de photographies aériennes de 1958 et de l'**image** satellitale de 1995, les premières observations nous permettent d'af-

firmer qu'en 37 ans, certaines palmeraies ont été ensablées sur 23 % de leur superficie. Sur la figure 3.20, nous illustrons le déplacement à l'intérieur d'un champ de dunes. Les surfaces blanches montrent la situation de 1986 tandis que les surfaces noires indiquent celle de 1995.

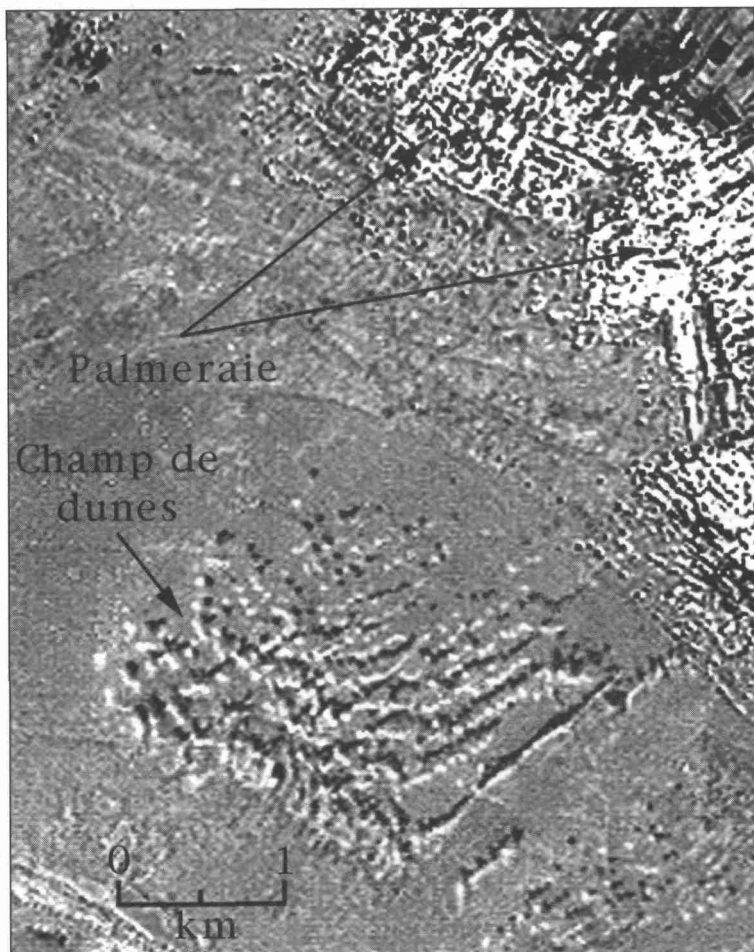


Figure 3.20. : Déplacement de dunes dans la région d'Hanabou, au sud-est du Maroc. Image de différence entre les données de 1986 et de 1995 du capteur HRV panchromatique de SPOT. Source : Office régional de mise en valeur du Tafilalet, Maroc.

Les changements spatio-temporels se détectent aussi au niveau de la végétation. La manifestation la plus tangible est le phénomène de déforestation en Amazonie. Philip M. Fearnside, de l'Institut national de recherches en Amazonie (Brésil) soutient, qu'au Brésil, la destruction de la forêt amazonienne avait fortement diminué entre 1988 et 1991. Cependant, la tendance est à une nouvelle augmentation. En effet, la superficie déboisée est passée de 11 000 km², en 1991, à 14 900 km², en 1994. Ce déboisement vise à créer de nouvelles terres destinées à l'exploitation agricole et à l'élevage de bovins. Sur la figure 3.21, nous montrons une manifestation tangible de ce phénomène. Sur cette **image**, notons que les **teintes** foncées correspondent aux secteurs non altérés, alors que les **teintes** pâles représentent les zones déboisées. Elles sont marquées par des routes d'accès.

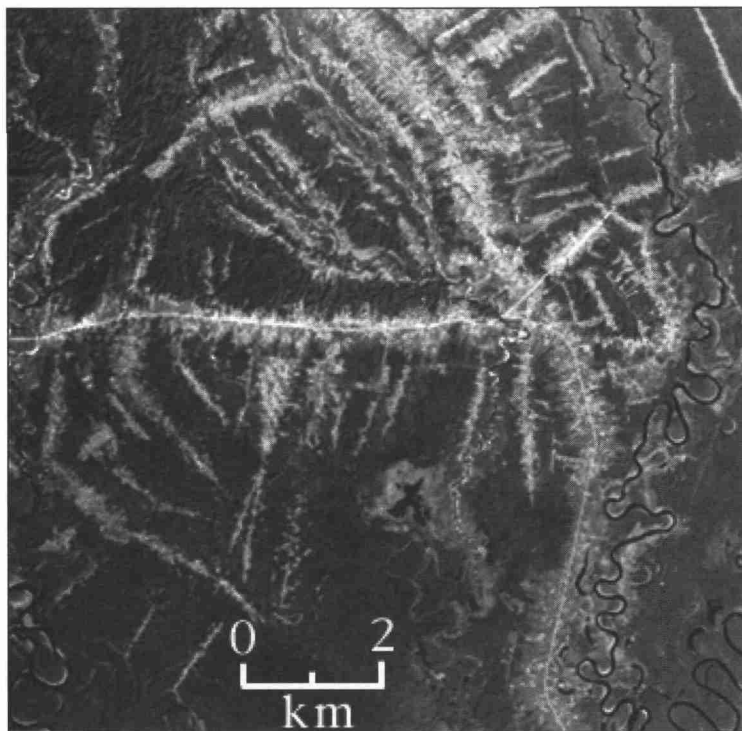


Figure 3.21. Déforestation en Amazonie près de Santa Cruz, en Bolivie. L'image TM de Landsat a été acquise le 30 août 1985. Source : ERIM International.

Le Japon a mis sur pied, en 1995, une vaste étude au sujet des forêts tropicales. Il s'agit du GRFM (*Global Rain Forest Mapping*). Ayant comme partenaires des organismes provenant des États-Unis et du Brésil, les recherches couvrent l'Amazonie, le Sud-est asiatique, l'Afrique centrale et l'Afrique de l'Ouest. Des données **radar** sont utilisées afin de pouvoir cartographier les régions ciblées. Rappelons que le **radar** a comme particularité de pouvoir saisir des informations terrestres et ce, même sous couvert nuageux. L'utilisation de cette technologie est donc nécessaire pour des territoires tels que l'Amazonie.

Les modifications du territoire par l'action humaine sont particulièrement présentes au cours du développement des villes. L'étude des changements de l'occupation du sol en milieu urbain par télédétection suscite de plus en plus d'intérêt auprès des planificateurs. Nous bénéficions de plus de 25 ans d'archives d'**images** satellitales, ce qui constitue une banque de données suffisamment importante dans le temps pour que des changements importants soient détectables. Sur la figure 3.22, nous illustrons ce genre d'information pour la conurbation de Trois-Rivières, Cap-de-la-Madeleine et Trois-Rivières-Ouest. Située à environ 150 km au nord-est de Montréal, au Québec, cette région a subi des changements notables entre 1984 et 1993.

Nous observons sur cette **image** les changements majeurs (en noir).

Il s'agit du passage du végétal au minéral. Les secteurs situés aux extrêmes sont de nouveaux quartiers résidentiels tandis que ceux présents au sud correspondent à des vocations commerciales.

Ces quelques exemples sont indicateurs des possibilités de l'utilisation de la télédétection satellitale provenant de diverses **plates-formes** et de divers **capteurs**. Il s'agit là d'un atout important si l'on considère que les changements dans le milieu naturel et l'espace construit constituent une des constantes préoccupations des décideurs et des gestionnaires du territoire.

Jusqu'à maintenant, il a été question de la dynamique spatiale de la Terre, et plus particulièrement de certaines de ses composantes. Pour l'environnement,

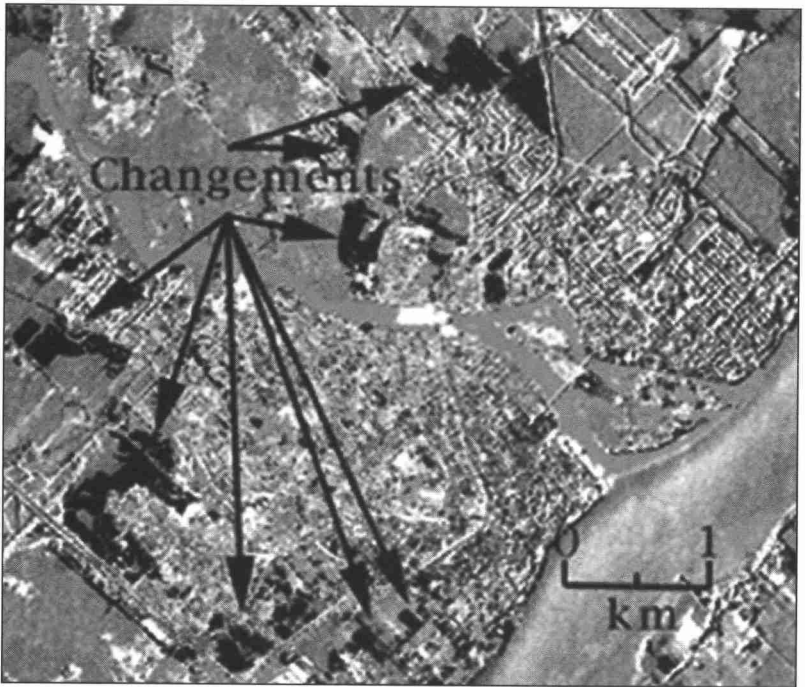


Figure 3.22. : Image montrant les changements de modes d'occupation du sol (en noir) entre 1984 et 1993 pour la conurbation de Trois-Rivières, au Québec, à partir d'images TM de Landsat-5.

il va de soi que ses assises soient basées sur l'évolution d'un paysage, c'est-à-dire sur sa dynamique du changement de ses caractéristiques. Ainsi, des phénomènes tels que la déforestation et la désertification engendrées par l'action humaine sont des opérations qui, non contrôlées, amènent à un déséquilibre dans la nature. La Terre subit donc des modifications profondes dans le comportement du climat et de la dynamique de ses différentes composantes. À titre

d'exemple, le Secrétaire général du Comité congolais de grands barrages affirmait en 1998 dans des journaux locaux que la baisse sensible du niveau d'eau du lac Kivu est attribuée à l'augmentation de la température moyenne observée dans la province du Sud-Kivu depuis 1990, à la suite d'une déforestation incontrôlée. L'agence de protection de l'environnement et le USGS (*United States Geological Survey*) émettaient un communiqué de presse conjoint, le 13 mars 1996, afin d'informer notamment la communauté scientifique que la télédétection jouait un rôle prépondérant dans la reconnaissance de la contamination des eaux du golfe de la Californie par des résidus miniers tels que l'acide et les métaux lourds. En utilisant le **capteur** AVIRIS (*Airborne Visible and Infra-Red Imaging Spectrometer*) installé sur une **plate-forme** aéroportée, les scientifiques en arrivaient à bien distinguer par spectroscopie (en image) la signature des contaminants. Une cartographie fine des résidus diminue les coûts et accélère la mise en place de méthodes de nettoyage des sites contaminés.

Pour ce qui est des sources de pollution atmosphérique, il n'est pas toujours aisé de les détecter dans les pays industrialisés. Bien que certaines soient détectables le jour, plusieurs industries polluent la nuit. Il est cependant possible, grâce notamment à la thermographie infrarouge, de détecter l'origine et les panaches typiques des cheminées d'usine. Il faut cependant des instruments ayant une **résolution** spatiale relativement fine. Sur la figure 3.23, nous observons une source de pollution industrielle présente à environ 10h00 (heure locale) et 04h00 (heure locale). L'**image a)** provient de données aéroportées enregistrées dans la fenêtre du bleu. L'**image b)** a été acquise dans la bande thermique. Sur les deux, nous pouvons constater que l'usine située sur une île émet des gaz polluants le jour et la nuit. Fait à noter sur l'image de nuit, un navire passe près de la rive nord et laisse un sillon à l'arrière. Ce phénomène provient du fait qu'il brise la couche épidermique qui est plus froide que les eaux sous-jacentes ainsi exposées à la surface. Par analogie, nous pouvons supposer qu'il est possible de détecter des navires fautifs qui rejettent des hydrocarbures dans l'eau car, à moins d'un hasard peu probable, la température du liquide ne sera pas identique à celle de l'eau. Grâce à la haute précision radiométrique de certains capteurs (environ 0,1 °C), la détection et le suivi d'une pollution marine sont à la portée de la télédétection thermique.

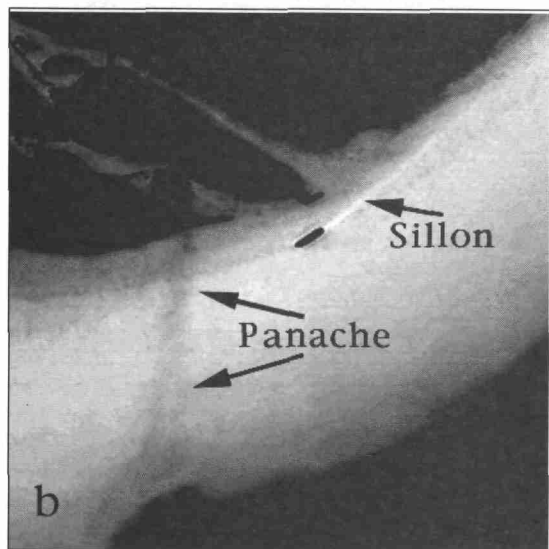
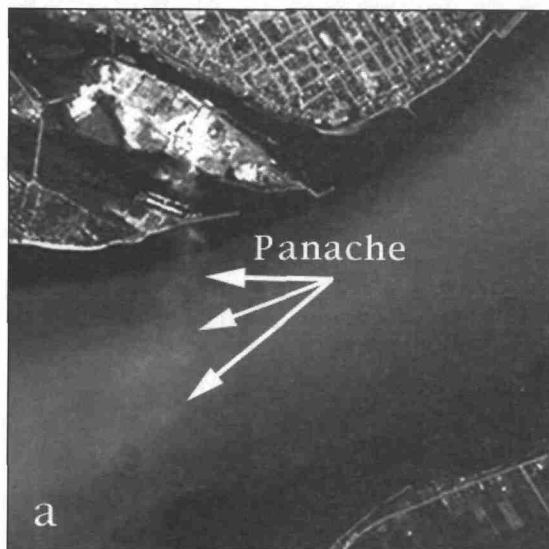


Figure 3.23. : Images thermiques de jour (a) et de nuit (b) provenant du capteur aéroporté Daedalus-1260. Les données ont été acquises dans un intervalle de moins de 12 heures en août 1984 au-dessus de la ville de Trois-Rivières, au Québec. Elles illustrent notamment des panaches de fumée et un sillon de navire identifiant la température sous l'épiderme de l'eau

Ces préoccupations à l'**échelle** locale peuvent faire place aux grands problèmes à l'**échelle** planétaire. La télédétection peut alors suivre des méga-phénomènes qui peuvent modifier d'une façon significative l'équilibre écologique de la Terre. Dans l'exemple qui suit, nous voyons comment la télédétection peut suivre l'évolution de la concentration d'ozone dans les hautes couches de l'atmosphère. Grâce aux **capteurs** des satellites américains Nimbus et russes Meteor, il a été possible de détecter le comportement de la couche d'ozone depuis la fin des années 1970. Actuellement, les détecteurs peuvent prendre des mesures aux 24 heures dans la fenêtre spectrale de l'ultraviolet. Effectuant ces mesures en présence du soleil, il n'est donc pas possible d'obtenir des informations des régions polaires durant l'hiver. Sur la figure 3.24, nous avons un aperçu de l'évolution spatio-temporelle de la concentration d'ozone au-dessus du pôle sud.

Sur ces **images**, plus la concentration est faible, plus la **teinte** est foncée. Nous constatons que le « trou » dans la couche d'ozone est bien présent depuis quelques années. Cette étude fait partie des recherches effectuées dans le cadre du grand projet *Global Change* où les américains ont comme partenaires plusieurs pays répartis à travers le monde, dont le Canada et le Japon. Le Centre canadien de télédétection, en association avec l'Agence spatiale canadienne a même réalisé, au début des années 1990, une encyclopédie interactive sur les changements planétaires (Géoscope).

Voilà en somme quelques manifestations tangibles de la dynamique spatiale de différentes composantes terrestres. Ces macrophénomènes peuvent être suivis à l'aide des satellites météorologiques qui embrassent d'un seul coup d'œil une grande partie de la surface terrestre. Cette dynamique spatiale peut aussi être suivie aux **échelles** régionales et locales et ce, tant aux niveaux de phénomènes naturels qu'anthropiques. Par exemple, la télédétection nous fait saisir de façon remarquable les changements de l'utilisation/occupation du sol dans les grandes capitales de certains pays en développement. Les résultats de recherches à l'ORSTOM (voir Chaume et Champaud [15]) sont des exemples éloquentes de l'apport de la télédétection pour la saisie et la compréhension de l'ampleur de ce problème préoccupant.

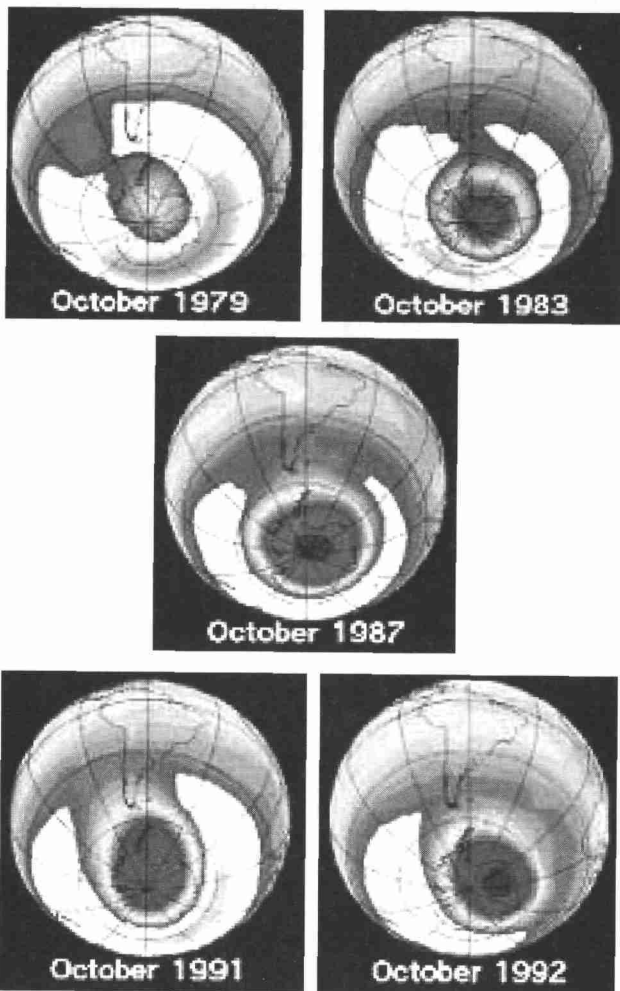


Figure 3.24. : Moyennes mensuelles des concentrations d'ozone au-dessus du pôle sud pour certains mois d'octobre sur une période de 13 ans. Source : NASA/GSFC.

La télédétection trouve son utilité dans la reconnaissance et l'analyse de phénomènes dynamiques qui contribuent à l'évolution d'un milieu naturel donné, à sa modification profonde, à sa destruction et à sa renaissance. La diversité des plates-formes, leur répétitivité dans l'acquisition de l'information et la polyvalence dans la résolution des capteurs font en sorte qu'il est possible, à l'aube du nouveau millénaire, de produire des informations de l'échelle locale à l'échelle planétaire, et ce sur une grande période de temps.

En général, la dynamique spatiale de la Terre peut être étudiée à l'aide de l'outil télédétection dans les domaines suivants :

Atmosphère	Eau	Végétation	Minéraux	Espace construit
Description et analyse des transferts d'énergie Conditions et prévisions du temps Etat de santé des gaz de l'atmosphère Suivi stationnaire d'importantes perturbations Evaluation des variations de l'épaisseur optique des aerosols Elaboration de profils de température dans le temps et l'espace	Surveillance de l'évolution particulière tel le El Niño Etude des changements d'un réseau hydrographique Suivi des inondations Evaluation du déplacement des glaces (icebergs et banquises) Suivi d'agents polluants Etude de la dynamique des courants marins Suivi des températures de l'eau et conséquences sur le milieu halieutique	Constataions des effets de déforestation et d'abus du pâturage sur la végétation Surveillance des grandes infestations et de leurs conséquences dans le temps sur le couvert végétal Suivi de la réousse des arbres après une coupe Evaluation de la dynamique des feux de forêts et de brousses Suivi de la rotation des cultures Détection et suivi de l'évolution de maladies qui affectent les cultures Dynamique des friches Extension des plantations ou des algues	Suivi de la dynamique des déserts Constats et analyse de la stabilité des versants Description et étude de la dynamique des traits de zôre Appréhension et suivi des activités volcaniques Mouvements des glaciers lo-ux et impacts sur la morphologie du terrain Suivi du processus de sédimentation Suivi de la dynamique des terres humides	Planification du territoire Détection des changements dans l'utilisation/occupation du sol Visualisation de l'impact des grandes oeuvres tels les barrages Identification des nouveaux axes de transports et conséquences sur l'utilisation/occupation du sol Conséquences de l'urbanisation (et de la déforestation) sur le régime thermique au sol Evaluation des surfaces de verdure dans les espaces urbains Suivi des maladies dans les cultures Conservation et dégradation des sols agricoles

Chapitre 4

Les moyens de détection : l'équipement

De tout temps, les êtres humains ont toujours été fascinés par une extension d'eux-mêmes faite d'un autre matériau qu'eux.

Marshall McLuhan

Après avoir cerné l'objet d'étude dans une perspective de champs d'application de la télédétection, nous nous attarderons maintenant sur le matériel nécessaire à la détection des informations numériques et visuelles. Les principaux équipements utilisés en télédétection sont les **plates-formes**, les **capteurs** ainsi que le support électrotechnique nécessaire à la production d'une **image** numérique. Le matériel utilisé pour le traitement de ce type d'**image** sera présenté dans le prochain chapitre.

4.1. Les plates-formes

Les **plates-formes** couramment utilisées en télédétection sont les satellites et les avions. Notons cependant que d'autres types sont parfois utilisés dans le cadre de projets précis. En effet, des ballons captifs ou dirigeables, des hélicoptères, des ultra-légers et même des mâts et des nacelles montés sur un camion peuvent supporter l'infrastructure nécessaire à l'acquisition de données.

En télédétection, une plate-forme se définit comme étant tout objet mobile ou immobile qui peut contenir des instruments (détecteurs ou capteurs) servant à enregistrer des informations spatiales et spectrales provenant d'objets divers.

4.1.1. Les satellites

Dans le premier chapitre, nous avons remarqué comment l'évolution des **plates-formes** avait fait en sorte que nous sommes passés d'un satellite d'observation de la Terre (ERTS-1) à une possibilité de plus de trente en l'an 2000.

À l'**échelle** mondiale, on doit considérer aujourd'hui cette évolution comme exponentielle. Nous pouvons penser obtenir, maintenant ou dans un avenir très rapproché, des informations provenant de satellites gérés par des instances gouvernementales ou privées de plusieurs pays. Cette progression ne s'est pas faite sans heurts. La télédétection a connu ses jours sombres au plan des satellites d'observation de la Terre. Depuis les cinq dernières années, il y a eu plusieurs pertes de satellites importants. Notons entre autres le satellite météorologique NOAA-13 et les satellites d'observation terrestre LANDSAT-6, SPOT-3, ADEOS, TRW LEWIS et EARLY BIRD. Retenons cependant les succès suivants : les satellites météorologiques DMSP-5D S-14, GOES-10, METEOSAT-7 et les satellites d'observation terrestre ORBVIEW-2, IRS-1D, TRMM et SPOT-4. La grande quantité de **plates-formes** qui sont actuellement opérationnelles et celles qui devraient être lancées incessamment démontre un regain de confiance envers la télédétection. La liste imposante de ces **plates-formes** (tableau 4.1) se traduit économiquement par des investissements dans l'ordre des milliards de dollars. L'état de santé de la télédétection se manifeste aussi par la vive compétition qui s'est installée à l'**échelle** mondiale. Pendant longtemps, au niveau civil, les États-Unis ont été les seuls à s'intéresser à la télédétection. Après l'arrivée de la France, plusieurs pays se sont impliqués dans ce domaine. On peut nommer l'Inde, le Japon, la Russie, le Canada, la République populaire de Chine et, bientôt, le Brésil et l'Australie. La présence de plus en plus grande des investissements privés est aussi un fait notable. De grandes entreprises comme SPOTImage, *Space Imaging/EOSAT*, *Earthwatch* et *West Indian Space*, ont en effet investi plusieurs centaines de millions de dollars dans la télédétection.

Ces investissements seront rentables en autant que le produit soit fiable et rapidement utilisable. L'implication financière et politique du gouvernement américain dans le programme Landsat-7 fait en sorte que nous pouvons espérer une réduction de prix appréciable pour des images à résolution spatiale moyenne. En effet, les exigences gouvernementales font en sorte que le prix pour les données brutes provenant de Landsat-7 ne devrait pas dépasser 475,00\$US (*Landsat-7 Data Policy*). Dans un autre ordre d'idées, rappelons que le premier satellite d'observation de la Terre date de 1972. Prévu pour un an, il continuait d'acquérir des données six ans plus tard. Il est donc intéressant de remarquer

que, souvent, certains satellites opérationnels dépassent largement leur espérance de vie. Les exemples des **plates-formes** Landsat-5 et SPOT-1 qui ont été lancées il y a plus de 12 ans et qui sont encore actives aujourd'hui démontrent un niveau d'endurance qui dépasse toutes les prévisions (figure 4.1). Leur durée de vie ne devait être que de quelques années.

Tableau 4.1. : Présentation de certaines plates-formes satellitaires et de leurs principales caractéristiques.

PLATE-FORME	PAYS	CAPTEURS PRINCIPAUX	ALTITUDE (KILOMÈTRES)	ORBITER	RÉPÉTITIVITÉ (JOURS)
ADEOS-1	JAPON	AVNIR OCTS	800	Héliosynchrone	41
CTA CLARK	ÉTATS-UNIS	Panchromatique Multibande	475	Héliosynchrone	4-20
IKONOS-A	ÉTATS-UNIS	Panchromatique Multibande	680	Héliosynchrone	3-11
EO-1	ÉTATS-UNIS	LAC, WIS ALIMS, GIS	705	Héliosynchrone	16 (LAC)
EOS AM-1	ÉTATS-UNIS	ASTER, CERES, MODIS, MOPITT	705	Héliosynchrone	16
ERS-2	EUROPE	AMI (SAR) ATSR-M	785	Héliosynchrone	3-35
IRS-1D	INDE	Panchromatique WiFS, LISS-3	904	Héliosynchrone	5-24
JERS-1	JAPON	SAR OPS	570	Héliosynchrone	44
LANDSAT-5	ÉTATS-UNIS	MSS TM	705	Héliosynchrone	16
LANDSAT-7	ÉTATS-UNIS	ETM+	705	Héliosynchrone	16
ORBVIEW-2	ÉTATS-UNIS	Panchromatique Multibande	700	Héliosynchrone	1
QUICKBIRD-1	ÉTATS-UNIS	Panchromatique Multibande	600	Héliosynchrone	1-4
RADARSAT-1	CANADA	RSO: Std, Fin, ScanSAR, Étendue	798	Héliosynchrone	3-7-24
RESURS-O1	RUSSIE	MSU-SK	678	Héliosynchrone	21
SPOT-4	FRANCE	PAN, HRV VÉGÉTATION	832	Héliosynchrone	4-26

Tableau 4.1. (suite)

Quelques satellites à vocation particulière					
PLATE-FORME	PAYS	CAPTEURS PRINCIPAUX	ALTITUDE (KILOMÈTRES)	ORBITE	ÉPÉTITIVITÉ (JOURS)
GMS-5	JAPON	VISSR	36 000	Géostationnaire	30 min
GOES-12	ÉTATS-UNIS	Imager	36 000	Géostationnaire	30 min
GOMS-0	RUSSIE	STR	36 000	Géostationnaire	30 min
METEOSAT-7	EUROPE	Multibande	36 000	Géostationnaire	30 min
NOAA-14 (TIROS-N)	ÉTATS-UNIS	AVHRR	870	Héliosynchrone	1
OKEAN-4 (SICH-1)	RUSSIE (UKRAINE)	MSU-S, MSU-MSLR	650	Héliosynchrone	1/2

Lorsque nous examinons la diversité des **résolutions** spectrales associées à différents **capteurs** (figure 4.2), la représentation des **résolutions** ne peut se faire que par l'**échelle** logarithmique car sa portée va de la fenêtre du bleu jusqu'au domaine des hyperfréquences. Notons la grande concentration des bandes dans le visible et le proche infrarouge, ce qui dénote les secteurs spectraux où la demande de la part des utilisateurs est actuellement la plus forte. La compétition y est donc très vive. Pour les satellites d'observation terrestre, nous trouvons souvent une bande panchromatique et au moins cinq autres bandes. Pour ce qui est des satellites à vocation météorologique, la portée est plus grande. Les informations sont acquises dans le visible, l'infrarouge réfléchi et l'infrarouge thermique. C'est le cas des capteurs installés sur les satellites METEOSAT-7 et NOAA-14. Quant aux satellites ERS-2 et Radarsat-I, leur résolution spectrale est confinée à la bande C (5,6 cm).

Les capteurs couvrent une grande diversité de **résolutions** spatiales (figure 4.3) ce qui répond de plus en plus aux problèmes d'**échelle** souvent mentionnés par le passé, notamment pour des préoccupations où le découpage du territoire est de petite dimension. Compte tenu du développement actuel, nous pouvons estimer qu'au tournant du siècle, nous serons capables de produire des documents ou des cartes dont la précision sera comparable à celle que l'on trouve sur les produits actuellement fabriqués à partir de méthodes plus conventionnelles.

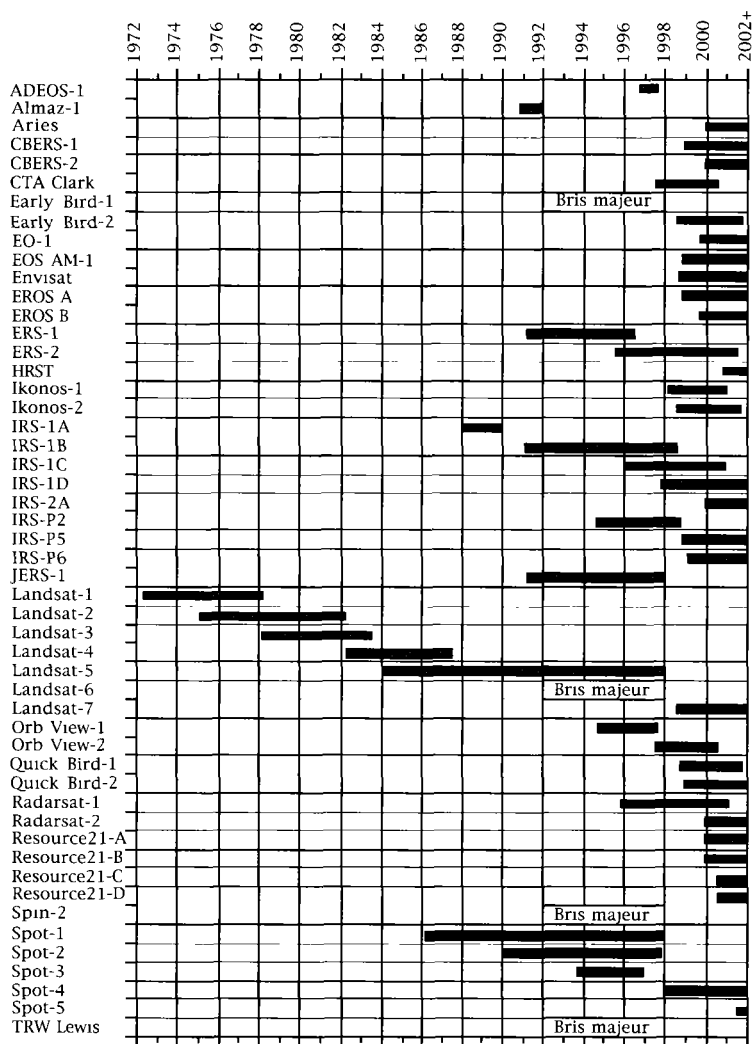


Figure 4.1. : Durée et espérance de vie pour différentes plates-formes.

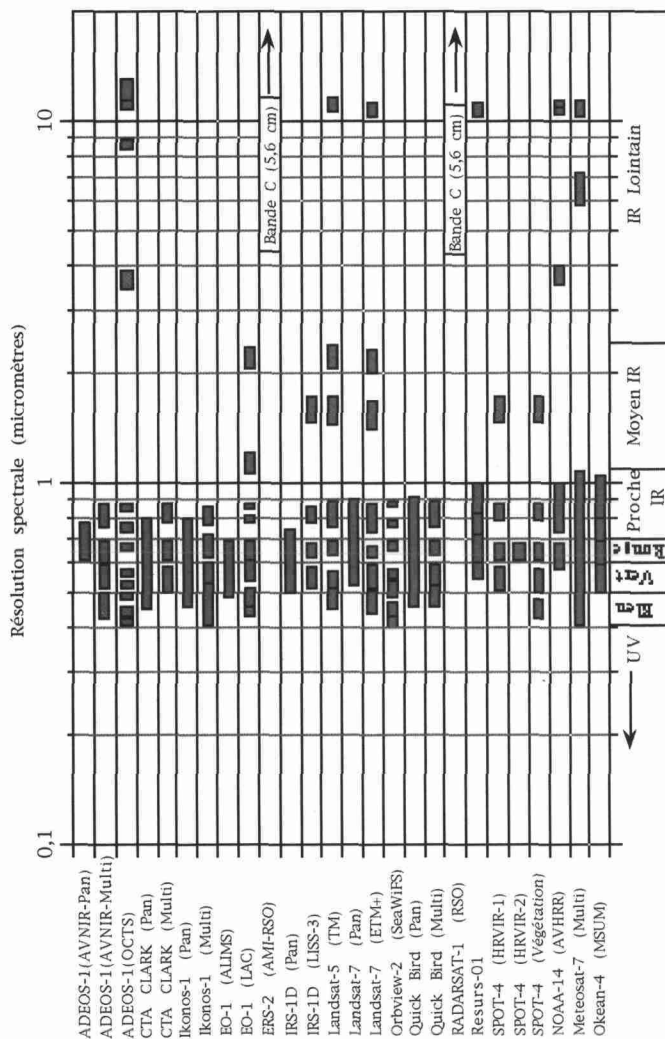


Figure 4.2. : Résolution spectrale de quelques capteurs installés sur divers satellites.

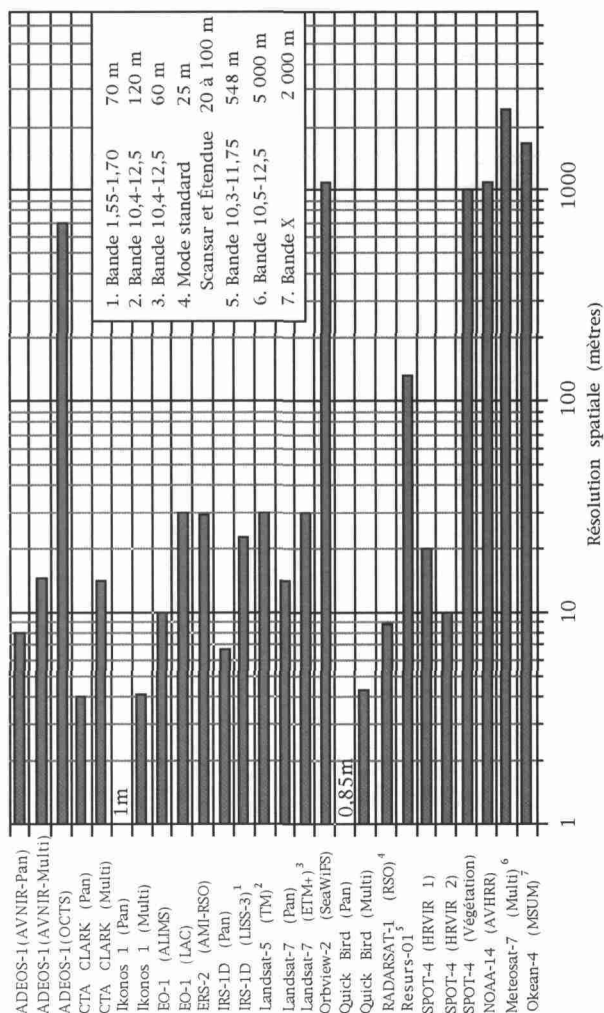


Figure 4.3. : Résolution spatiale de quelques capteurs installés sur divers satellites.

Les satellites de télédétection nous offriront de l'information numérique pouvant couvrir autant l'hémisphère terrestre que l'îlot urbain et ce, avec une régularité qu'aucune autre **plate-forme** ne possède. Souvent, elle pourra le faire à partir de **capteurs** à géométrie variable qui, en plus d'améliorer la **résolution** temporelle, permettent de voir le paysage en stéréoscopie. Techniquement, la télédétection satellitaire entrera directement en compétition avec la **photographie** aérienne. Ses avantages liés à la répétitivité, à la **résolution** spectrale et à ses possibilités de transformation de la **réflectance** en valeurs de **luminance** pourraient jouer en sa faveur.

Une autre caractéristique importante des **capteurs** est leur empreinte au sol (figure 4.4) c'est-à-dire la dimension linéaire que couvre l'image sur le terrain. Leur niveau de flexibilité s'est développé avec l'arrivée des **capteurs** à géométrie variable. Le plus connu est le HRV de SPOT qui permet de couvrir une distance linéaire variant de 60 km en visée nadirale à 117 km à son angle de prise de vue maximal. Il a été suivi de plusieurs autres dont le ERS-2 et Radarsat-I. L'empreinte au sol varie donc entre quelques kilomètres et le diamètre terrestre, montrant ainsi encore une fois la grande versatilité de ces capteurs et le choix que l'utilisateur peut avoir pour répondre à ses besoins.

La configuration des **plates-formes** est en général très diversifiée. Dans tous les cas, nous trouvons cependant quatre composantes. Il s'agit des capteurs, du module de commande, de l'antenne de transmission des données et des panneaux solaires (figure 4.5).

Un autre type de **plate-forme** a été longtemps utilisé pour fin d'expérimentation en télédétection. Dans la section historique, nous avons mentionné que les satellites habités des années 1960 et 1970 avaient parfois été utilisés à des fins d'expérimentation de télédétection multibande. Mentionnons les programmes *GEMINI*, *APOLLO*, *SKYLAB* et, plus récemment, la navette spatiale américaine. De cette dernière, retenons son utilisation pour l'acquisition d'information dans les hyperfréquences actives par l'intermédiaire des **capteurs SIR** (*Shuttle Imaging Radar*): *SIR-A*, *SIR-B* et *SIR-C*. Sur la figure 4.6, nous pouvons voir une partie d'une des navettes où le capteur *SIR-C* est déployé.

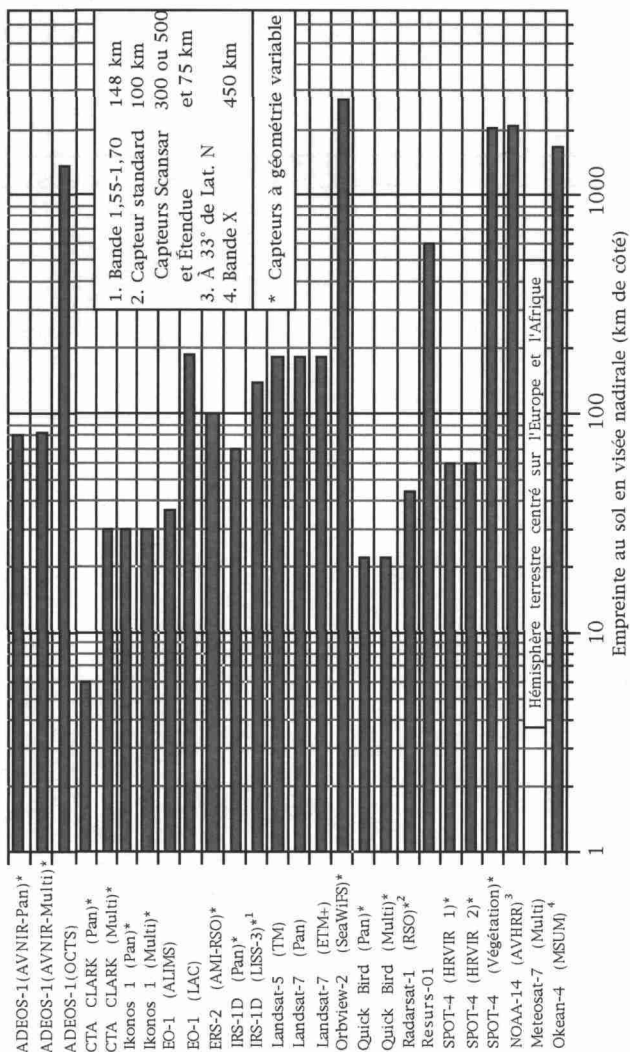


Figure 4.4. : Empreinte au sol de quelques capteurs installés sur divers satellites.

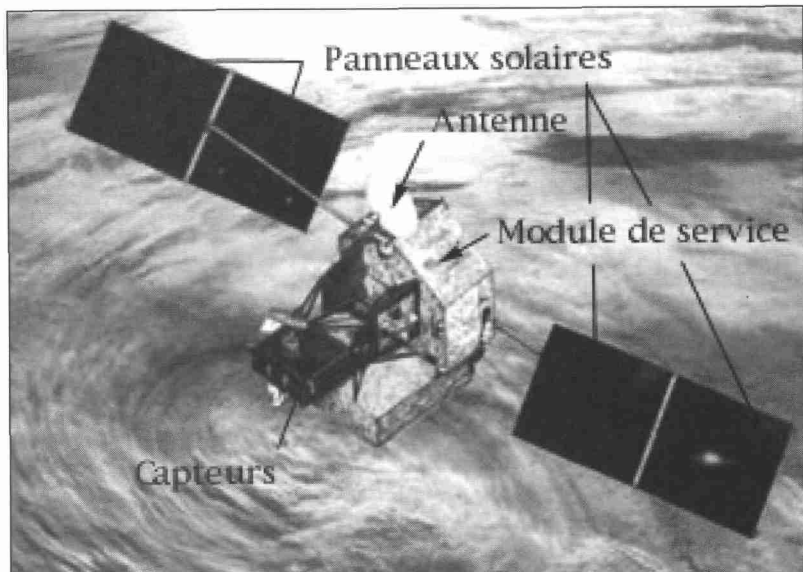


Figure 4.5. : Représentation artistique du satellite TRMM. Source : NASA.

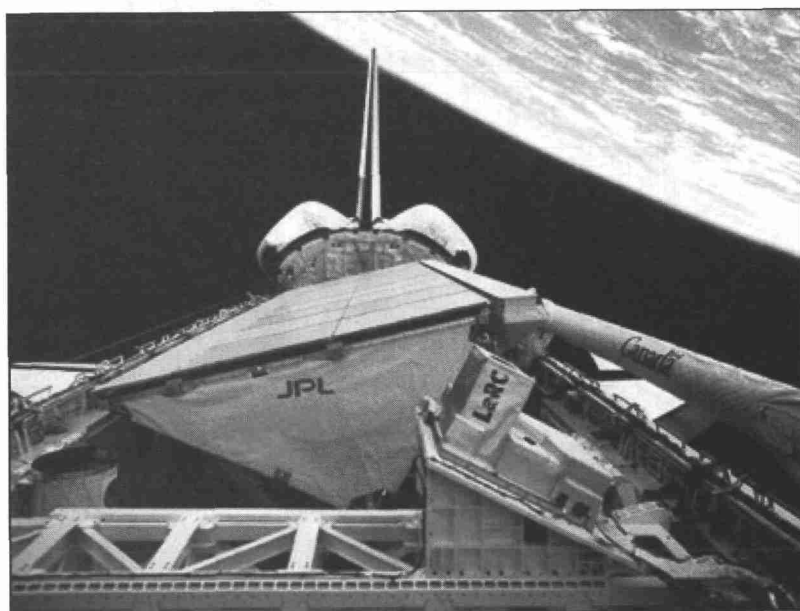


Figure 4.6. : Navette spatiale américaine en position d'acquisition d'image. Source : NASA.

4.1.2. Les plates-formes aéroportées

Bien qu'encore utilisé pour la prise de **photographies** aériennes sur de petites ou de grandes surfaces, l'avion est de moins en moins privilégié comme **plate-forme** d'acquisition de données. Par exemple, avant l'entrée en opération du satellite Radarsat-I, le Centre canadien de télédétection a utilisé pendant plusieurs années un avion bimoteur de type moyen courrier (Convair 580) afin d'acquérir des données multibandes dans le cadre de projets d'envergure nationale et internationale. Durant les dernières années de son utilisation par ce Centre, il servait surtout à obtenir des données numériques dans le domaine des hyperfréquences actives (Bande C). Plusieurs de ces projets avaient pour objectif de simuler les données numériques et visuelles de Radarsat-I. En général, les avions servent encore pour des projets ponctuels. Citons les exemples des couvertures systématiques de territoires pour fin de gestion et de surveillance gouvernementale, et des nouveaux besoins en matière d'agriculture de précision. Dans ce dernier cas, l'avion a des avantages intéressants : possibilité de prendre des images à **résolution** fine sous les nuages et ce, presque en temps réel. Notons enfin des expérimentations de **capteurs**. À titre d'exemple, le *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*, de Pasadena en Californie, expérimente un **capteur** hyperspectral (*AVIRIS*) installé sur un ER-2 (U2 modifié) de la *NASA (National Aeronautic and Space Administration)*. L'Institut géographique nationale (IGN) de France possède plusieurs avions polyvalents (figure 4.7). Ils sont en général utilisés pour acquérir des **photographies**.



Figure 4.7. : Plate-forme aéroportée de type moyen courrier.
Source : Institut géographique national (IGN).

Dans l'exemple présenté sur la figure 4.7, on observe un appareil de type FOKKER F27-MK700 à cabine pressurisée. Ce bimoteur turbopropulsé de 29 m de longueur a une autonomie d'environ 4,5 h et il est utilisé pour des fins scientifiques durant environ 300 h par année. Sa charge utile est très complète. Elle va des **capteurs** météorologiques aux appareils de télédétection (spectromètre balayeur à 4 bandes similaires à celles des HRV de SPOT).

4.2. Les capteurs

En général, les capteurs employés pour des fins de télédétection se subdivisent en deux catégories : les capteurs passifs et les capteurs actifs.

4.2.1. Les capteurs passifs

Les capteurs passifs sont actuellement les instruments de détection les plus utilisés en télédétection. Le plus connu est, sans doute, **la caméra photographique**.

Les capteurs passifs sont techniquement développés afin de pouvoir détecter l'énergie naturelle réfléchie ou émise par un objet dans la partie du spectre électromagnétique qui va de l'ultra-violet jusqu'aux hyperfréquences passives.

Ces instruments sont habituellement appelés **radiomètres imageurs**. Sur les figures précédentes (figures 4.2, 4.3, 4.4), nous avons décrit notamment les **résolutions** spatiales et spectrales de différents capteurs. Les plus couramment utilisés sont le AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) des satellites de la série NOAA, le HRV (Haute résolution visible) des SPOT et le TM (*Thematic Mapper*) de Landsat. Il existe plusieurs systèmes de détection ou de formation d'**image**. Les technologies les plus couramment utilisées sont les **systèmes à balayage optique et mécanique** et les **systèmes à barrette de détecteurs**.

Jusqu'à maintenant, la télédétection nous a habitués à travailler avec des informations numériques provenant de **capteurs** multispectraux. C'est ce qu'on retrouve sur les **plates-formes** satellitaires opérationnelles telles celles de Landsat et de SPOT. Aujourd'hui, l'intérêt des développeurs se tourne de plus

en plus vers les **capteurs** hyperspectraux. Il s'agit en fait d'un système de détection d'énergie véhiculée par les ondes dont la longueur varie en général entre 400 et 2 500 nanomètres (nm), c'est-à-dire entre 0,4-2,5 μm . La nuance entre les préfixes multi et hyper tient au fait que l'intervalle entre les fenêtres est beaucoup plus fin dans le dernier cas. Par exemple, un des **capteurs** hyperspectraux développés il y a une dizaine d'années fut le *AVIRIS* (*Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer*). Il possède 224 bandes spectrales tandis qu'un **capteur multibande** comme le *ETM +* (*Enhanced Thematic Mapper*) du futur Landsat-7 n'en possède que 8 si l'on inclut la bande **panchromatique**. À titre indicatif, le satellite TRW Lewis, qui n'est jamais devenu opérationnel à cause d'un bris majeur, possédait le **spectromètre imageur HSI** (*HyperSpectral Imager*) développé par la compagnie américaine TRW Inc. Il avait comme caractéristique principale d'enregistrer des données sur 384 canaux (ou bandes spectrales) différents. Au niveau aéroporté, plusieurs **plates-formes** sont équipées du **capteur** hyperspectral *CASI* (*Compact Airborne Spectrographic Imager*). Il peut enregistrer de l'information terrestre sur 284 canaux entre 400 et 1000 nanomètres (nm). Les avantages majeurs de cette technologie sont de rehausser d'une façon remarquable la finesse de la **signature spectrale** des objets et de raffiner la détection de particularités spécifiques d'objets. Les exemples présentés à la section 5.3.1 proviennent de **spectromètres imageurs** hyperspectraux.

4.2.2. Les capteurs actifs

Il existe un intérêt de plus en plus grandissant envers les informations acquises dans le domaine des hyperfréquences. Le fait que l'on puisse « voir » la surface terrestre, même en présence d'une couverture nuageuse, constitue l'attrait principal de cette fenêtre du spectre.

Les capteurs actifs peuvent se définir comme étant des instruments qui émettent artificiellement de l'énergie sous forme d'impulsion à fréquence temporelle régulière et qui ont la capacité d'enregistrer le signal rétrodiffusé par les objets qui ont été en contact avec cette énergie. En télédétection, ce genre de capteur permet de produire des images.

L'exemple du principe de fonctionnement est présenté sur la figure 4.8. Dans ce cas, le signal reçu au capteur à partir de la maison est d'une forte puissance du fait que la réflexion est unidirectionnelle. Dans le cas d'une surface plane comme un lac, le signal de retour est nul si sa surface n'est pas rugueuse (eau calme). Pour un arbre, le signal rétrodiffusé se fait dans plusieurs directions et a une puissance à l'arrivée au récepteur moins grande que celle de la maison. Ces facteurs varient en fonction de la rugosité à la surface et de la teneur en eau des feuilles ou des aiguilles.

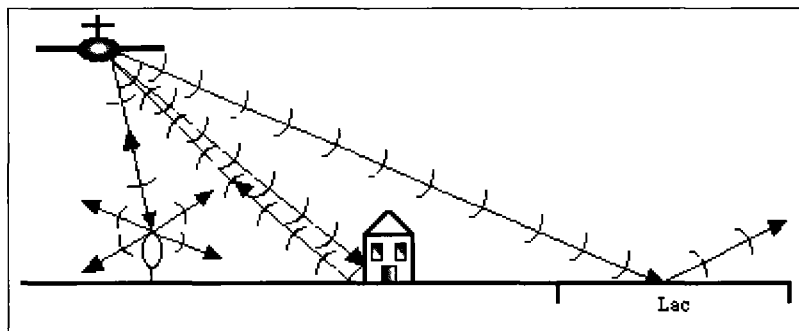


Figure 4.8. . Représentation schématique du principe du capteur actif.

L'émetteur-récepteur le plus courant est le radar à synthèse d'ouverture (RSO) ou, en anglais le *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Dans la définition de ces acronymes, le terme **radar** signifie *Radio Detection and Ranging*. L'expression **synthèse d'ouverture** signifie que nous avons une petite antenne qui transmet un signal relativement large, au même titre qu'une grande antenne (qu'il est pratiquement impossible d'installer sur les plates-formes). D'après Sabins [57], il est possible d'y arriver du fait que cette technique tient compte du déplacement apparent des objets causé par le mouvement de l'avion. Nous trouvons ce type de capteur sur des satellites tels que le Radarsat canadien et les ERS européens.

Un autre système du même type est parfois utilisé pour des relevés bathymétriques : il s'agit du lidar (*Light Detection and Ranging*). Comme son nom l'indique, cet émetteur-récepteur possède un rayon laser (*Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation*) qui illumine l'objet par l'intermédiaire d'une lumière cohérente monochromatique. Il est habituellement installé sur des avions.

4.3. L'enregistrement de l'information

L'information enregistrée par les **capteurs** passe par différentes étapes : 1) l'enregistrement analogique ou numérique et l'emmagasinage des données sur la **plate-forme**. 2) leur réception au sol, 3) leur mise en forme. Il est aussi possible d'arrimer des données provenant de **capteurs** différents.

4.3.1. Le support électrotechnique

Bonn et Rochon [11] nous offrent une vision synoptique des principaux types d'enregistrement : les **balayeurs optiques et mécaniques** ainsi que le **système à barrette de détecteurs**. D'autres systèmes plus récents sont disponibles pour saisir les informations. Notons le **scanneur** de documents analogiques équipé de *C C D* (*Charge Coupled Devices*) - habituellement un périphérique d'un ordinateur - qui les transforme en fichiers numériques, la **caméra vidéo** avec capteurs *C C D* à surface de silicone et la **caméra numérique** qui ressemble à un appareil photographique conventionnel à l'exception que l'information est enregistrée aussi à partir du système *C C D* au lieu d'une pellicule standard. Ce mode de captage est de plus en plus populaire, même pour les appareils destinés au marché commercial. Ils enregistrent l'information dans les bandes du visible et du proche infrarouge.

4.3.2. Les stations de réception au sol

Au début, l'information enregistrée par les **capteurs** installés sur les **plates-formes** satellitaires était envoyée sous forme de signal analogique vers une **station de réception au sol**. Aujourd'hui, avec la prolifération des satellites d'observation et les progrès technologiques, le signal est souvent converti avant

l'envoi sous forme numérique sur la **plate-forme**. Du fait que les satellites peuvent couvrir toute la surface terrestre, ces stations de réception de données sont réparties sur les cinq continents. Citons celles de Gatineau au Canada, de Toulouse en France, d'Alice Springs en Australie. Robin [54] nous informe qu'il existe aujourd'hui une quinzaine de stations opérationnelles pour les satellites SPOT. La transmission des données se fait en temps réel si la **plate-forme** est à la portée de la **station de réception**. Sinon, les satellites sont munis d'enregistreurs à bord qui emmagasinent momentanément les données du territoire demandé.

Les stations peuvent être au départ très complètes et complexes. Elles sont parfois équipées pour connaître l'état de fonctionnement de la **plate-forme** et des **capteurs**. De plus, et c'est ce qui se fait de plus en plus aujourd'hui, les stations au sol commandent au satellite de prendre des informations sur des régions particulières pour des fins spécifiques, en fonction des besoins de la clientèle. En somme, les responsables des satellites d'observation de la Terre ne gardent plus les **capteurs** en opération sur une base permanente. Les stations au sol permettent aussi de les contrôler en fonction de leur **tangage** et de leur **roulis** potentiel, de leur altitude, leur azimuth et leur vitesse.

Examinons un exemple de **station de réception** d'images au service de la cartographie et de la gestion des ressources. Il s'agit du système STAR/IMSAT du Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'Université du Québec à Chicoutimi, au Canada. Cette station fait la poursuite et le captage sur 2400 km de largeur des 3 à 4 satellites TIROS en opération. Quatre lectures de jour et quatre lectures de nuit sont possibles. Le rayon d'action de l'antenne parabolique mobile en mode haute **résolution** (pixels de 1,1 km) s'étend, du nord au sud de la Terre de Baffin (au nord du Canada) à Cuba (dans les Antilles). D'est en ouest, elle couvre de l'Islande à Vancouver (en Colombie-Britannique, au Canada). L'information est captée sur un étalement de 10 bits (1 024 niveaux de gris) et en cinq bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge thermique. Les données sont enregistrées au Laboratoire à l'aide de stations de travail SUN équipées des logiciels appropriés. Le produit est, par la suite, raffiné à l'aide de logiciels de traitement d'images tels que *PCI* et *Dimple*. Des imprimantes pouvant faire des sor-

ties grand format (jusqu'à environ 1 m de largeur) sont branchées sur le système en réseau. Un tel type de système est à la portée de plusieurs laboratoires car il est peu coûteux et ne nécessite que peu d'entretien.

4.3.3. Du signal analogique à l'information numérique

L'enregistrement se fait sous forme de signal électrique. Par la suite, il est numérisé. Pour les données provenant des satellites, il arrive souvent que leur transfert doive passer par un satellite de relais. Ce dernier a, entre autres, la fonction d'amplifier le signal. Aux États-Unis, le satellite de relais **géosynchrone TDRSS** (*Tracking and Data Relay Satellite System*) est couramment utilisé à cette fin. Le signal peut aussi être envoyé directement à la **station de réception**. Habituellement enregistrées sur 8 bits, c'est-à-dire 2^8 (256 niveaux d'information), les données numériques peuvent être codées sur un plus grand étalement. Par exemple, celles du capteur *SeaWiFS* le sont sur 10 bits, celles d'*AVIRIS* sur 12 bits et celles des *ERS* sur 16 bits. Pour fin de traitement, il est souvent utile de représenter les données sous forme d'histogrammes de fréquence. Par la suite, elles sont associées à des niveaux de gris pour fin de représentation visuelle. La figure 4.9 illustre les étapes de transformation du signal analogique à l'image numérique.

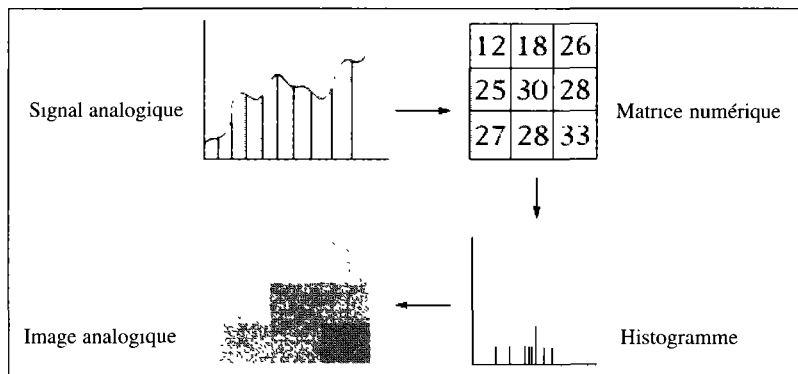


Figure 4.9. Étapes fondamentales préalables à l'analyse visuelle.

La question de format sous lequel les données numériques sont enregistrées est essentielle dans la perspective d'extraction d'information. Les plus utilisés sont communément appelés *BIL* (*band Interleaved by Line*) et *BSQ* (*Band SeQuential*). Comme son nom l'indique en anglais, le format *BIL* est caractérisé par l'emmagasinement en ligne. À partir du tableau 4.2, nous montrons comment les **valeurs numériques** (VN) des pixels sont enregistrées sur le support (CD-ROM, cassettes de 4 et 8 mm) ; cet exemple suppose que nous avons 4 bandes spectrales. Pour le format *BSQ*, chaque bande constitue un fichier enregistré dans un ordre logique.

Tableau 4.2. : Représentation du format *BIL* pour les quatre premiers pixels d'une image.

	Pixel 1	Pixel 2	Pixel 3	Pixel 4
Ligne 1	VN Bande 1	VN Bande 1	VN Bande 1	VN Bande 1
Ligne 1	VN Bande 2	VN Bande 2	VN Bande 2	VN Bande 2
Ligne 1	VN Bande 3	VN Bande 3	VN Bande 3	VN Bande 3
Ligne 1	VN Bande 4	VN Bande 4	VN Bande 4	VN Bande 4
Ligne 2	VN Bande 1	VN Bande 1	VN Bande 1	VN Bande 1
Ligne 2	VN Bande 2	VN Bande 2	VN Bande 2	VN Bande 2
Ligne 2	VN Bande 2	VN Bande 2	VN Bande 2	VN Bande 2
Ligne 2	VN Bande 3	VN Bande 3	VN Bande 3	VN Bande 3

En fonction de la technique d'encodage, les bases de données sont habituellement accompagnées de fichiers d'entête (normalement écrits en langage *ASCII*) où l'on retrouve des **données auxiliaires** parfois utiles. Entre autres, on peut noter la date de prise d'information, l'heure, l'**angle solaire**, l'**angle de visée**, l'organisation des données, les **coordonnées** géographiques, le mode d'enregistrement.

4.3.4. L'arrimage des données de divers capteurs

En télédétection appliquée, il est souvent nécessaire d'obtenir des données provenant de diverses sources. Pour extraire des données plus riches en information dans une perspective de meilleure interprétabilité, il devient pertinent de

combiner les avantages de la **résolution** spatiale de certains **capteurs** avec les avantages de la **résolution** spectrale d'autres **capteurs**. C'est le cas entre l'image acquise en mode **panchromatique** du HRV de SPOT et une ou plusieurs bandes du mode **multibande** du même **capteur** ou du TM de Landsat. Les résultats sont souvent saisissants.

Plusieurs techniques ont été développées afin d'en arriver à fusionner les données. Idéalement, des **corrections radiométriques** et **géométriques** préalables devraient être réalisées afin d'éliminer les sources de **bruit** (ex : effets de l'atmosphère) et les différences de positionnement spatial des éléments composant les images. Comme nous verrons dans le prochain chapitre, la tâche n'est pas toujours facile ou utile. Pour nos préoccupations immédiates, il faut cependant s'assurer, qu'elles sont superposables au niveau géométrique pour la zone d'intérêt. Sur la figure 4.10, nous montrons deux images de la section du « Tombolo » de la ville de Conakry, en Guinée. L'image A illustre le secteur en bande rouge XS2 du HRV de SPOT corrigé géométriquement afin d'être superposable à l'image panchromatique (B). Les deux images ont bénéficié d'un rehaussement de contraste. Par addition des valeurs numériques, nous obtenons l'amalgame des deux images (C). Ce simple procédé arithmétique allie à la fois la finesse spatiale du mode **panchromatique** (10 m) et la diversité des informations spectrales que l'on peut obtenir du mode **multibande**. Un examen plus attentif des îlots urbains nous permet de percevoir cette plus grande richesse d'information. En effet, tout en conservant le réseau de voies de circulation, nous pouvons constater une plus grande portée dans les **teintes** de gris à l'intérieur de ces îlots. Dans cet exemple, l'apport de la couleur améliorerait de façon tangible la perception visuelle des nuances du paysage urbain. Il est cependant bon de constater que, même en représentation de niveaux de gris, on constate l'intérêt de produire des images nouvelles à partir de ce procédé.

D'autres avenues existent afin d'arrimer les données provenant de différents capteurs. Elles nécessitent cependant la couleur. Selon Jensen [33], la manière la plus simple est le procédé de substitution de bande dans l'affichage couleur en mode RVB (rouge, vert, bleu) ou *RGB (red, green, blue)*. Tout en s'assurant

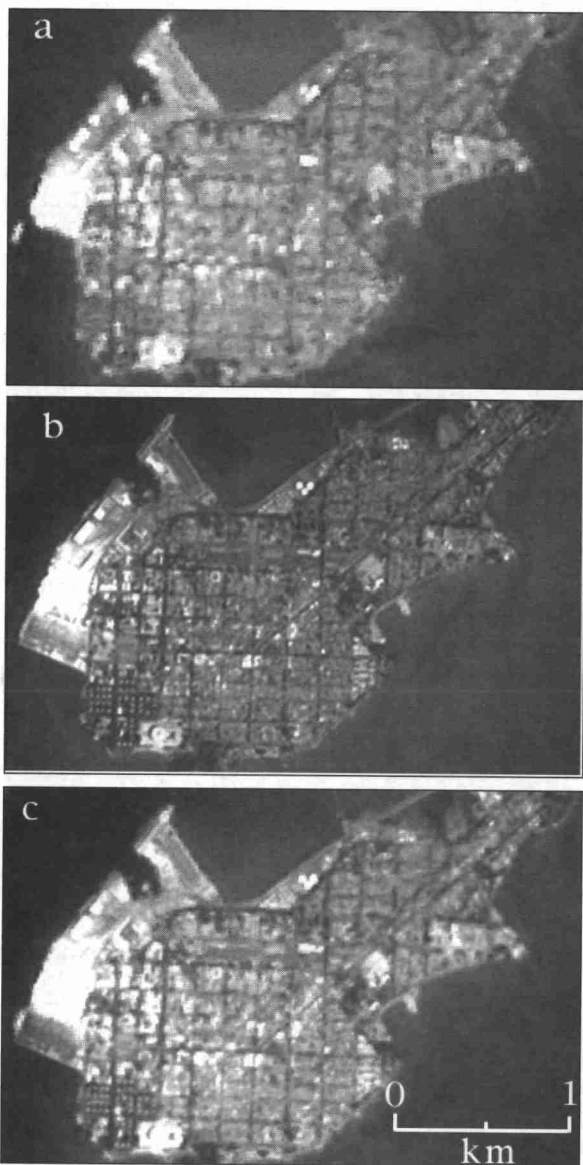


Figure 4.10. : Images HRV de SPOT d'une partie de la ville de Conakry, en Guinée acquises en mars 1990 pour l'image multibande (a) et en février 1993 pour l'image panchromatique (b). L'image c) représente l'amalgame de a) et de b).
Adapté de Renard et al. [52].

que les données sont superposables soit par procédé de **correction géométrique** (comme ci-haut) ou par rééchantillonnage de pixels (ex : conversion des pixels de 20 m de côté à 10 m de côté), il s'agit de remplacer une des bandes nécessaires pour le composé couleur par une bande à **résolution** spatiale plus fine. Par exemple, dans la combinaison des bandes XS3 (dans la bande du rouge), XS2 (dans la bande du vert) et XS1 (dans la bande du bleu), nous remplaçons la XS2 dans le canal du vert par la bande **panchromatique**. Le nouveau **composé couleur** qui en résulte met en lumière les qualités radiométriques et la finesse spatiale des données. Cette substitution est aussi réalisable à l'intérieur de l'univers ITS (canal intensité, canal **teinte**, canal saturation). Enfin, nous pouvons remplacer une des trois **composantes principales** issues de données brutes par une bande à résolution plus fine. L'avantage de la **composante principale** est de réunir, dans trois canaux, la très forte majorité des informations. Souvent, la dernière composante ne possède que très peu d'information originale. Elle peut être remplacée par la bande **panchromatique** du HRV de SPOT. Souvent, la deuxième composante reflète ce que l'on peut détecter dans le visible. Il devient aussi pertinent d'effectuer une substitution de cette composante par la bande **panchromatique** qui couvre, elle aussi, la fenêtre du visible. En somme, plusieurs formes de substitution et de combinaisons sont possibles.

L'arrimage des informations de divers **capteurs** est aussi utile entre les données satellitales, aériennes et de terrain (radiomètres portatifs). L'essentiel de son potentiel d'application réside dans l'amélioration de la définition du contenu des **pixels** et dans la validation lors de la phase interprétation. À ce titre, les travaux de Desjardins *et al.* [21] présentent un exemple pertinent. Il est cependant rare d'obtenir en même temps des informations de bonne qualité au-dessus et sur un territoire prédéterminé par l'intermédiaire d'un satellite, d'un avion et d'instruments au sol. De plus, cette approche est coûteuse en temps de préparation et en argent (frais de terrain et de prise d'images aériennes).

