

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة العربي بن مهيدي- أم البواقي

## مستخرج محضر اجتماع المجلس العلمي للمعهد

رقم 2023/05

بتاريخ الأول من شهر أكتوبر، لسنة ألفين وثلاثة وعشرون، وعلى الساعة 10.00 صباحا، انعقد المجلس العلمي للمعهد، لدراسة النقاط المدرجة في جدول الأعمال، بعد افتتاح الجلسة من طرف مدير المعهد، تم إعطاء الكلمة إلى المدير المساعد المكلف بالدراسات ما بعد التدرج، البحث العلمي والعلاقات الخارجية، ليقدم الملفات المدرجة في جدول الأعمال.

النقطة رقم 5. المصادقة على تقرير الخبرة لمطبوعة دروس للأستاذ: جقجاق عبد الرازق – أستاذ محاضر

ب-

بعد الاطلاع على تقارير الخبرة المقدمة من طرف الخبراء المعينين لإجراء الخبرة والتي كانت إيجابية (التقارير مرفقة مع المحضر) والمتعلقة بقياس 2 Géomatique appliquée للسنة الأولى ماستر – تخصص: تسيير المدن، تم المصادقة على هاته التقارير (البيانات في الجدول أدناه)

الرقم	اسم ولقب الأستاذ	عنوان الدرس	المستوى	اسم ولقب الخبير	الدرجة	المؤسسة الجامعية
01	جقجاق عبد الرازق	Géomatique appliquée 2	السنة الأولى ماستر – تخصص تسيير المدن -	بولكعيبات عيسى	أستاذ محاضراً	أم البواقي
				زنيبرايح	أستاذ محاضراً	عنابة

رئيس المجلس العلمي للمعهد

أ. بوشمال صالح

رئيس المجلس العلمي  
لمعهد تسيير التقنيات الحضرية  
بوشمال صالح



# Géomatique appliquée 2

Initiation à la Télédétection

## La télédétection

1 Année Master -Gestion des villes-



DJAKJAK Abderraziq

INSTITUT GESTION DES TECHNIQUES URBAINES –OUM EL BOUAGH-

Année universitaire 2023-2024

## Géomatique appliquée 2 : (Initiation à la Télédétection)

### Géomatique appliquée 2 : (Initiation à la Télédétection)

#### Public cible :

Ce polycopie est destiné aux étudiants de la 1ère année Master «GTU» spécialité gestion des villes.

#### **Identification de la matière d'enseignement**

**Semestre : S2**

**Intitulé de l'UE : Unité de Méthodologique. UEM**

**Intitulé de la matière2 : Géomatique appliquée 2**

**Crédits : 3**

**Coefficients : 3**

#### **Objectif général de l'enseignement :**

- Approfondissement des connaissances dans le traitement et l'extraction des informations des images satellitaires
- Maîtrise des outils de la télédétection

#### **Connaissances préalables recommandées**

Notions élémentaires de la photographie aérienne, notions fondamentales de la cartographie et des SIG

#### **Contenu de la matière**

1- Définitions

2- Bases physiques de la télédétection

- le rayonnement électromagnétique
- complexité du signal et milieux perturbateurs
- Comportement spectral des objets (végétation, eau, minéral)

3- Performance des capteurs

- Résolution Spatiale
- Résolution Spectrale
- Résolution Radiométrique
- Résolution temporelle

4- Approche thématique pour l'exploitation des images satellitaires (application sur Logiciel ENVI 5.)

- Présentation et prise en main du logiciel ENVI 5.1
- Histogramme bidimensionnel et croisement des canaux
- Calcul des indices (Végétation, eau, Bâti)

5- Classification supervisée sur les images multispectrales

- réalisation d'une carte d'occupation du Sol
- Mise en page des spatiocartes (sous ENVI, et avec ArcGis)

6- Corrections Géométriques et Analyse Diachronique des images satellitaires

### **Introduction**

Dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG), l'imagerie constitue désormais un élément épistémologique crucial pour la compréhension dynamique des environnements et des territoires. Les professionnels du secteur reconnaissent unanimement que ces représentations visuelles offrent une dimension analytique essentielle, permettant non seulement d'observer les transformations spatiales, mais également de contextualiser des données complexes.

L'évolution technologique récente a significativement amplifié la portée et la précision des ressources imagières. On observe une progression remarquable tant en termes de disponibilité que de richesse informative. L'orthophotographie numérique, traditionnellement considérée comme un socle documentaire, côtoie désormais des technologies d'imagerie satellitaire plus sophistiquées, notamment les systèmes couleur et multispectraux à haute résolution.

Cette mutation technologique se caractérise par une amélioration constante de la fidélité spatiale et spectrale, augmentant substantiellement la capacité d'extraction et d'interprétation des informations géographiques. Les professionnels des SIG disposent ainsi d'outils de plus en plus performants pour décrypter les dynamiques environnementales contemporaines, transformant l'imagerie en un véritable langage scientifique de compréhension territoriale.

En outre, l'imagerie représente une ressource fondamentale pour l'acquisition, la mise à jour et l'évaluation des données spatiales. Les orthophotos et les images satellitaires constituent des sources de données privilégiées permettant une numérisation précise des éléments géographiques structurants.

Les principales caractéristiques cartographiées comprennent les infrastructures linéaires telles que les axes routiers, les zonages d'occupation des sols, les empreintes architecturales et les réseaux de services publics. L'apport essentiel de ces technologies réside dans leur capacité à documenter dynamiquement les mutations territoriales, identifiant avec acuité les zones récemment développées et non encore intégrées aux bases de données géospatiales existantes.

L'optimisation de ces processus de cartographie passe désormais par le développement de méthodes automatisées de traitement d'images. Ces approches algorithmiques visent à réduire significativement la charge de travail traditionnellement fastidieuse associée aux tâches de numérisation manuelle, en proposant des techniques d'extraction de caractéristiques géographiques plus efficaces et précises.

L'analyse spectrale des données d'imagerie représente un domaine scientifique sophistiqué offrant des perspectives méthodologiques pluridisciplinaires pour la caractérisation et la compréhension dynamique des systèmes territoriaux. Cette approche permet une exploration nuancée de l'occupation et de l'utilisation des sols par l'extraction de signatures spectrales précises, autorisant des investigations approfondies dans plusieurs domaines stratégiques.

## **Géomatique appliquée 2 : (Initiation à la Télédétection)**

Les applications scientifiques de cette méthodologie s'étendent à plusieurs secteurs critiques, notamment la cartographie environnementale, l'évaluation infrastructurelle et la surveillance territoriale. Les techniques spectrales permettent une caractérisation détaillée des surfaces, autorisant l'identification précise des matériaux de construction, l'évaluation structurelle des chaussées et l'analyse comparative des transformations spatiales.

La détection diachronique des changements constitue une dimension particulièrement innovante, offrant la possibilité de documenter l'évolution temporelle des territoires par l'analyse comparative d'images collectées à différents moments. Cette approche génère des connaissances scientifiques robustes, directement mobilisables dans plusieurs contextes décisionnels stratégiques : planification territoriale, évaluations environnementales, gestion patrimoniale et communication institutionnelle. Ces méthodologies spectrales avancées représentent ainsi un dispositif analytique performant, permettant une compréhension multidimensionnelle et dynamique des territoires et de leurs transformations.

Dans le cadre de ce polycopié, nous abordons une exploration approfondie du domaine de la télédétection spatiale. L'objectif principal réside dans une analyse systématique et multidimensionnelle des mécanismes inhérents à l'observation satellitaire de notre planète.

Notre démarche vise à déconstruire les principes fondamentaux de ce champ disciplinaire en examinant rigoureusement ses composantes théoriques et pratiques. Nous nous attacherons tout d'abord à une compréhension exhaustive des mécanismes de télédétection, en analysant ses principes structurels, ses avantages technologiques et ses limitations intrinsèques. Une attention particulière sera portée à l'évolution historique et épistémologique de l'observation spatiale terrestre, permettant de contextualiser les développements contemporains.

L'étude portera ensuite sur les fondements physiques sous-jacents à la télédétection spatiale, avec une exploration des principes scientifiques qui gouvernent cette discipline. Une analyse spectrale fine permettra de discriminer et d'interpréter les informations spectrales provenant des diverses couvertures terrestres, offrant ainsi une lecture nuancée des données collectées.

Un volet essentiel de ce polycopié sera consacré à la prise en main des logiciels du traitement des images satellitaires (ENVI, ArcGIS et QGIS), en mobilisant les connaissances apportées à ce domaine, complétant ainsi notre analyse par une dimension empirique et pratique.

## 1. FONDEMENTS DE TELEDETECTION SPATIALE

### 1.1 CONCEPTS DE BASE : DÉFINITION ET OBJECTIFS.

La télédétection spatiale, communément désignée sous le terme anglais Remote Sensing, constitue un domaine scientifique complexe et multidisciplinaire. Cette discipline se caractérise par l'intégration de technologies et de compétences avancées dédiées à l'observation, l'analyse et l'interprétation systématique des phénomènes terrestres et atmosphériques. Ses méthodologies reposent principalement sur l'acquisition de mesures et d'images provenant de plates-formes aériennes et spatiales, offrant ainsi une perspective unique et globale de notre environnement.

Le concept fondamental de la télédétection réside dans sa capacité à acquérir des informations à distance, sans établir un contact physique direct avec l'objet d'étude. Ce principe peut être illustré par une analogie simple : tout comme la lecture de ce texte implique une perception à distance où la lumière traverse un espace pour atteindre le capteur visuel, la télédétection opère selon un mécanisme similaire. Un flux d'informations se propage entre l'objet observé et le capteur, véhiculé par un rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique constitue le vecteur fondamental de transmission informationnelle en télédétection. Ce rayonnement peut provenir soit directement de l'objet observé, soit être réfléchi par celui-ci à partir d'une source externe. Un principe physique fondamental stipule que tous les corps - planètes, organismes vivants, objets inanimés - émettent naturellement un rayonnement électromagnétique. La nature et l'intensité de ce rayonnement dépendent étroitement de la température du corps considéré, établissant ainsi une relation thermodynamique intrinsèque.

Etymologiquement, le mot télédétection, est un néologisme traduit de l'anglais « **remote sensing** », il a été introduit officiellement dans la langue française en 1973. Ce néologisme est composé de deux parties *Télé* signifie « **à distance** » et *détection* veut dire « **découvrir** » ou « **déceler** ». La définition officielle de ce terme est la suivante : « *Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.* » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988.)

Selon cette définition très vaste, la télédétection est la science et l'art d'obtenir des informations sur un objet, une zone ou un phénomène, par l'analyse de données acquises au moyen d'un dispositif qui n'est pas en contact direct avec l'objet, la zone ou le phénomène, faisant l'objet de l'enquête. La collecte de données implique l'utilisation d'instruments appelés *capteurs*, capables de

voir ou de capturer les *relations spectrales* et *spatiales* d'objets et de matériaux observables à une distance considérable de ceux qui sont étudiés (Lillesand et Kiefer, 1994).

Une définition plus précise, et pour nous plus opérationnelle, de la télédétection est la suivante: « *La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information.* » (Centre Canadien de Télédétection)

Cette discipline qui permet d'observer la Terre à distance, sans y toucher, a connu un progrès considérable au cours des décennies précédentes, grâce à l'invention de *vecteurs*, tels que des ballons, des avions ou des satellites, qui permettent de s'éloigner de la surface de la Terre. Elle a également bénéficié du perfectionnement des capteurs, qui sont des appareils capables d'enregistrer le rayonnement électromagnétique *émis* ou *réfléchi* par la surface de la Terre ou de l'atmosphère.

L'avancée technologique dans le domaine de fabrication des capteurs a permis de vulgariser son utilisation dans plusieurs domaines d'applications, certaines d'entre elles la géologie, l'exploitation minière, le pétrole, le gaz, l'océanographie, l'agriculture, l'environnement, la surveillance des catastrophes, la planification urbaine, ...bref, les domaines d'applications se sont multipliés.

Les informations recueillies par le capteur sont ensuite traitées et analysées pour en tirer des conclusions sur les propriétés de l'objet. Ces propriétés peuvent être géométriques, optiques ou physico-chimiques.

Quel que soit le domaine d'applications considérées, une bonne interprétation des données de la télédétection nécessite la compréhension des principes physiques sur lesquels est fondée la technique de télédétection employée.

## 1.2 ÉVOLUTION HISTORIQUE DES SYSTEMES DE TELEDETECTION

Les systèmes de télédétection ont connu une transformation significative au cours des dernières décennies, marquant une évolution technologique remarquable dans la compréhension des dynamiques terrestres. Contrairement aux premières générations de technologies d'observation, les dispositifs actuels offrent des capacités analytiques et spectrales extraordinairement sophistiquées, permettant une exploration nuancée des processus environnementaux globaux.

La génération contemporaine de systèmes satellitaires se distingue par sa capacité à échantillonner virtuellement l'intégralité du spectre électromagnétique avec une précision spatiale remarquable, variant entre 0,5 et 5 000 mètres. Cette résolution technologique représente une avancée cruciale dans la compréhension des mécanismes complexes affectant la dynamique planétaire.

L'intérêt scientifique pour ces technologies transcende la simple observation technique. Les systèmes de télédétection sont désormais des outils essentiels dans l'étude des transformations globales, permettant une surveillance détaillée de phénomènes critiques tels que le changement climatique, la déforestation et la désertification. Leur contribution permet une analyse spatio-temporelle précise des interactions environnementales et anthropiques, offrant ainsi une perspective analytique sans précédent sur l'évolution de notre écosystème planétaire.

L'évolution historique de cette discipline scientifique est intrinsèquement liée au progrès technologique, trouve ses origines dans les innovations techniques du XIXe siècle. Son développement embryonnaire est étroitement corrélé aux avancées en matière d'observation et de cartographie aérienne. Les premières manifestations de cette discipline émergent en France dès 1839, avec l'avènement des photographies aériennes. Rapidement, les scientifiques de l'époque, notamment le directeur de l'Observatoire de Paris, perçoivent le potentiel cartographique de ces nouvelles techniques d'observation. Un moment charnière survient en 1858, lorsque Gaspard Félix Tournachon entreprend un vol en ballon au-dessus de Paris dans l'objectif explicite de cartographier la métropole.

Le contexte militaire a significativement contribué à l'essor de la télédétection. Les *ballons de reconnaissance*<sup>1</sup>, utilisés durant des conflits tels que la guerre de Sécession et la guerre de la Triple Alliance, représentent des précurseurs fondamentaux dans le développement de cette discipline scientifique. Thompson J., dans Miretzky et al, (1971) décrit l'expérience comme suit :

*"La première ascension en ballon a eu lieu en juin 1867. Le ballon était attaché à trois cordes tenues par des soldats pour l'empêcher de s'échapper. L'altitude la plus élevée qu'il atteignit ne dépassa pas 180 perches (156 mètres). Il est transporté au moyen des cordes d'un bout à l'autre du camp allié, les conducteurs étant dirigés par un télégraphe à drapeau, actionné par les aéronautes. Le ballon était toujours maintenu hors de portée, mais il était souvent la cible de tirs. Depuis le ballon, les Alliés ont compté 106 pièces (d'artillerie) et trois mortiers dans les lignes paraguayennes".*

---

<sup>1</sup> Ces dispositifs d'observation aérienne ont ouvert la voie à des méthodologies d'analyse spatiale révolutionnaires pour l'époque.

La fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle ont été marqués par des avancées technologiques significatives dans le domaine de la photographie, notamment dans le contexte de la photographie aérienne. L'évolution des techniques de développement photographique a permis des innovations remarquables en matière de capture d'images à distance.

En 1871, un progrès crucial intervint dans la technologie photographique : la possibilité de différer le développement du négatif après l'exposition. Cette avancée technique a ouvert la voie à la conception d'appareils photographiques plus légers et plus mobiles. Un exemple particulièrement innovant fut le dispositif breveté par **Julius Neubronner** en 1903, qui consistait en un appareil photo miniature fixé sur un harnais porté par des pigeons, démontrant ainsi les potentialités émergentes de la photographie à distance.

Les premières décennies du XXe siècle ont vu l'émergence de techniques de photographie aérienne de plus en plus sophistiquées. En 1906, **G. Lawrence** aux États-Unis développa un système permettant de transporter des caméras d'un poids considérable allant jusqu'à 453,59 kg. Il réalisa des photographies aériennes spectaculaires, notamment des dommages causés par le tremblement de terre de San Francisco, prises à une altitude de 600 mètres. **Wilbur Wright** franchit une étape supplémentaire en 1909, réalisant les premières photographies aériennes depuis un avion au-dessus de Centocelli en Italie.

C'est véritablement pendant la Première Guerre mondiale que la photographie aérienne acquit ses lettres de noblesse scientifiques. Initialement considérée comme une curiosité technologique, elle fut progressivement reconnue comme un outil de renseignement stratégique crucial. Durant les quatre derniers mois du conflit, plus d'un million de photographies aériennes furent produites, témoignant de son importance militaire et scientifique désormais incontestable.

La Seconde Guerre mondiale a constitué un tournant décisif dans le développement technologique de la photographie aérienne, engendrant des innovations significatives dans les domaines optique et méthodologique. Durant ce conflit global, les appareillages photographiques ont connu une évolution rapide et substantielle, avec des progrès notables concernant les objectifs, les montures et les techniques de reconnaissance visuelle.

L'importance stratégique de la photographie aérienne est devenue cruciale pendant le conflit, au point que plus aucune opération militaire majeure n'était désormais entreprise sans une analyse photographique préalable du terrain. Cette transformation doctrinale a profondément modifié les approches tactiques et stratégiques des forces armées, plaçant l'imagerie aérienne au cœur du renseignement militaire.

Consécutivement au conflit, les potentialités de ces techniques photographiques ont rapidement été reconnues dans le domaine civil. Les secteurs de la prospection minière et pétrolière ont particulièrement bénéficié de ces avancées technologiques, intégrant progressivement ces méthodes dans leurs processus d'exploration et de cartographie. Entre les années 1940 et 1950, différentes professions ont systématisé les techniques d'analyse territoriale et de production cartographique. L'interprétation des photographies aériennes est ainsi devenue un champ disciplinaire à part entière, dépassant largement le cadre initial militaire pour s'imposer comme un outil scientifique et technique polyvalent.

La recherche géographique et minérale dans le nord-ouest argentin a connu une avancée significative au début des années 1970, marquant un tournant méthodologique dans l'exploration scientifique régionale. Dans le cadre d'un programme de coopération internationale des Nations Unies, une étude cartographique exhaustive a été entreprise, couvrant un territoire à l'échelle précise du 1:50 000.

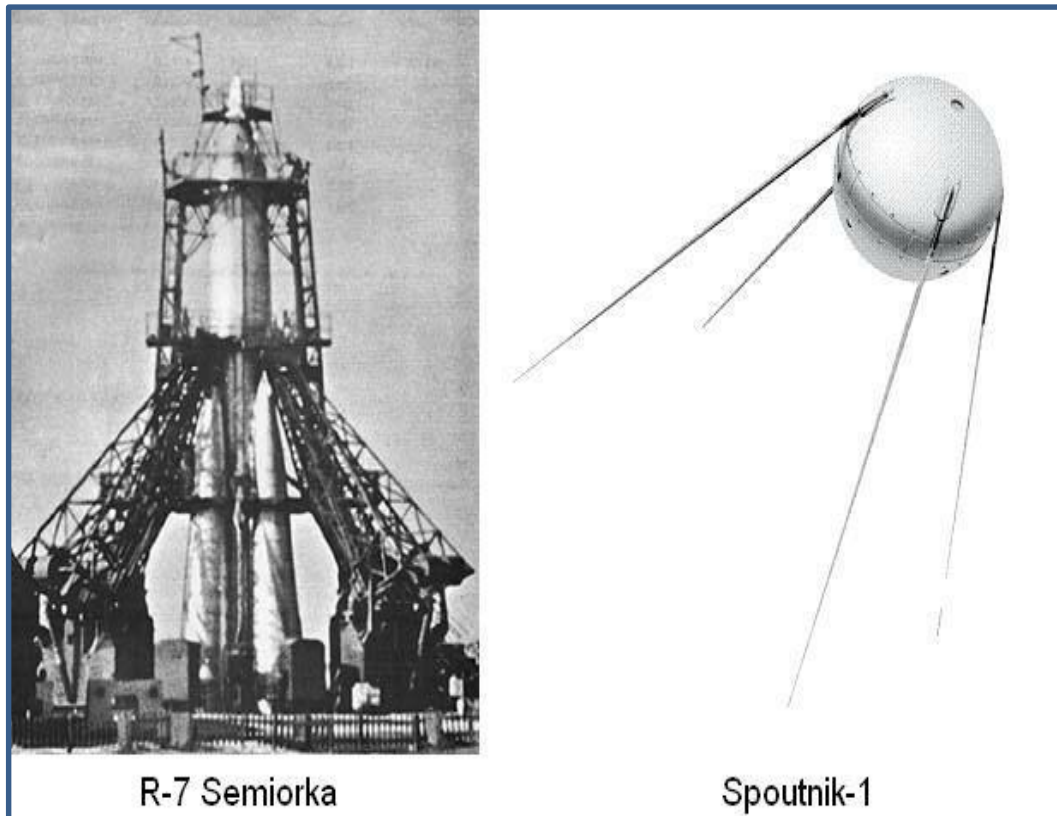
Le projet, piloté par le *Secrétariat national des mines* dont le siège régional était situé à San *Miguel de Tucumán*, avait pour objectif principal la prospection systématique des gisements métalliques, en particulier les réserves de cuivre et d'or. La méthodologie reposait sur une approche photographique aérienne détaillée, produisant des documents cartographiques d'une qualité remarquable.

Les photographies et documents produits lors de cette campagne ont rapidement dépassé leur vocation initiale minière. Ils sont devenus une source documentaire précieuse, offrant des perspectives multidisciplinaires et servant de référence pour diverses disciplines scientifiques, notamment l'archéologie. Les techniques développées lors de ce projet ont ouvert de nouvelles perspectives méthodologiques dans l'exploration et l'analyse territoriale.

Les images satellitaires et les photographies aériennes constituent bien plus que de simples représentations visuelles : elles sont de véritables **documents historiques** capables de capturer un moment précis dans l'espace et le temps. Ces technologies permettent d'enregistrer des situations environnementales extrêmement variées, depuis des récoltes agricoles jusqu'à des événements historiques complexes, offrant ainsi un témoignage visuel objectif et précis.

L'avènement des satellites de reconnaissance s'inscrit dans le contexte géopolitique tendu de la *Guerre froide*. L'administration du président *Eisenhower* a rapidement compris la nécessité de développer des moyens de surveillance aérienne plus sophistiqués, face aux limitations des avions de reconnaissance traditionnels et au développement des missiles intercontinentaux.

Le 4 octobre 1957, l'Union soviétique marquait un tournant historique en lançant **Sputnik I**, le premier satellite artificiel mondial. Pesant **83,6 kg**, ce satellite orbital révolutionnait les technologies spatiales et géopolitiques, transmettant des signaux radio pendant 21 jours. Peu après, *Sputnik II* transportait Laika, la première créature vivante dans l'espace.



**Figure 01** : Lancement du satellite Sputnik I, le 4 octobre 1957

L'émergence des satellites a créé un **nouveau paradigme juridique** international. Aucun accord préexistant ne réglementait le passage des satellites au-dessus des territoires nationaux. Les puissances mondiales ont progressivement établi une distinction juridique claire entre l'espace aérien national et l'espace extra-atmosphérique, ouvrant ainsi une nouvelle dimension géopolitique.

Les programmes spatiaux des années 1960 ont significativement accéléré le développement des technologies de télédétection. Aujourd'hui, ces technologies sont devenues **essentiels** dans de nombreux domaines professionnels, permettant une collecte de données précise et globale.

L'année 1972 marque un tournant paradigmatique dans l'observation scientifique de notre planète avec le lancement du satellite ERTS (ultérieurement dénommé Landsat 1), premier engin spatial dédié à la télédétection des ressources terrestres. Cet événement inaugural inaugure une

nouvelle ère technologique où l'observation distante de la Terre devient non seulement possible, mais progressivement sophistiquée et stratégique.

Plusieurs mutations technologiques majeures ont caractérisé ont vu le jour avec les nouveaux programmes de lancement des satellites, dont : L'amélioration progressive de la *résolution spatiale* des capteurs qu'a permis des observations de plus en plus précises et détaillées de la surface terrestre. Les capteurs ont considérablement élargi leur spectre d'investigation, explorant des domaines électromagnétiques de plus en plus variés et spécialisés. Les années 1990 ont notamment vu l'émergence de satellites équipés de capteurs actifs, particulièrement des radars, élargissant significativement les capacités d'observation, ce qui a permis la *commercialisation et accessibilité* des produits nouveaux, notamment dès le programme SPOT en 1986, qu'a transformé les données de télédétection en un **marché concurrentiel**. Des sociétés privées ont progressivement investi ce domaine, accélérant l'innovation et la diffusion technologique.

L'augmentation exponentielle de la puissance informatique a permis le développement de méthodes de traitement toujours plus sophistiquées. Les données satellitaires sont désormais des auxiliaires indispensables dans des domaines aussi variés que la prévision météorologique, l'étude climatique et la cartographie environnementale. Les images de télédétection, qu'elles proviennent de satellites ou de photographies aériennes traditionnelles, sont aujourd'hui intégralement numérisées et incorporées aux Systèmes d'Information Géographique, illustrant la convergence des technologies d'observation et d'analyse spatiale. L'analyse chronologique proposée par Barrett et Curtis (1999) permet de mettre en lumière les transformations progressives de cette discipline. Il distingue :

- ❖ **Période pionnière et militaire (1925-1945)** : La première phase significative s'étend des années 1920 à 1945, marquée par une utilisation prépondérante des photographies aériennes à des fins militaires. L'innovation technologique trouve son apogée pendant la Seconde Guerre mondiale, où les techniques de reconnaissance photographique deviennent un outil stratégique crucial. Les forces alliées exploitent notamment ces méthodes pour identifier et neutraliser des infrastructures secrètes allemandes, démontrant ainsi la valeur opérationnelle de la photographie aérienne.
- ❖ **Diversification des applications (1945-1960)** : Entre 1945 et 1960, la télédétection connaît une phase de diversification disciplinaire. Les techniques photographiques aériennes s'étendent progressivement à des domaines scientifiques variés, notamment la géologie, l'agriculture, la sylviculture et l'archéologie. Cette période est caractérisée par des missions

photographiques systématiques, notamment au Moyen-Orient, qui établissent les fondements méthodologiques de l'observation territoriale<sup>3</sup>.

❖ **Révolution satellitaire (1960-1980)** : L'avènement des satellites constitue un tournant paradigmatique dans l'histoire de la télédétection. Les développements technologiques permettent désormais une observation globale via des capteurs dépassant les limitations spectrales des photographies conventionnelles<sup>4</sup>. Le lancement de Landsat 1 en 1972 représente un moment charnière, ouvrant l'ère de la télédétection moderne et permettant l'exploration de spectres électromagnétiques jusqu'alors inaccessibles<sup>28</sup>.

❖ **Phases contemporaines (1980-2000)** :

- ✓ Les dernières décennies du XXe siècle sont marquées par deux dynamiques principales :
- ✓ L'organisation systématique des programmes de capteurs à distance
- ✓ Le développement de logiciels spécialisés pour le traitement et l'analyse d'images
- ✓ La période post-1995 se caractérise par une commercialisation croissante de la télédétection, avec l'émergence de projets nationaux de satellites scientifiques.

## 2. BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION

### 2.1 LA LUMIERE ET LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

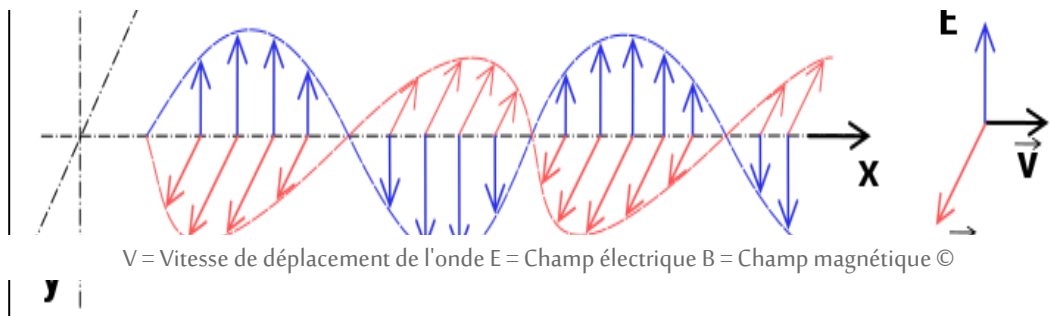
Partant de la définition que « *La télédétection est une technique qui permet d'acquérir des informations sur un objet ou une surface sans avoir besoin de le toucher. Pour ce faire, on utilise un capteur qui mesure le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par l'objet. Le rayonnement électromagnétique est une forme d'énergie qui se propage sous forme de vagues. Il existe différents types de rayonnement électromagnétique, chacun ayant une longueur d'onde et une fréquence spécifiques.* » (SOUDANI KAMEL 2005)

La définition précédente met l'accent sur la nature double de la lumière, qui peut être décrite de deux manières différentes : comme un flux de **particules** ou comme une **onde**. **La théorie corpusculaire** considère la lumière comme étant composée de petites particules, appelées photons. Ces photons ont une énergie proportionnelle à leur fréquence.

**Quant à la théorie ondulatoire** considère la lumière comme étant une onde électromagnétique. Une onde électromagnétique est composée de deux champs, électrique et magnétique, qui oscillent perpendiculairement l'un à l'autre. La fréquence et la longueur d'onde

d'une onde électromagnétique sont inversement proportionnelles. Les deux propriétés principales d'une onde électromagnétique sont sa longueur d'onde<sup>2</sup> et sa fréquence<sup>3</sup>.

Si cette découverte semble aujourd'hui comme une prémisse axiomatique pour nous, Il a fallu environ 200 ans de travail acharné pour découvrir cette percée. Alors comment sommes-nous arrivés à cette découverte ?



**Figure 02 : onde électromagnétique monochromatique**

**Source : Emmanuel Boutet/Wikimedia Commons**

L'étude de la lumière et ses caractéristique, est l'une des plus anciennes branches de la physique et la tentative de déterminer sa nature a donné lieu à de grandes débats. Pour les civilisations anciennes, comme l'école atomiste<sup>4</sup>, vers 450 av. J.-C., postulaient que la vision était produite par l'émission d'images par les objets, et qu'à travers les yeux elles atteignaient notre âme. L'école pythagoricienne, quelques années plus tard, supposait au contraire que la vision était produite par un feu invisible qui explorait les objets.

Sur la base de la théorie précédente, Euclide, vers 300 avant J.-C., introduisit le concept de rayon (émis par l'œil), la propagation rectiligne de la lumière et la loi de la réflexion. Vers la fin du 16 siècle et le début du 17 siècle ont vu de grandes avancées en optique grâce aux contributions de Kepler (1571-1630) et de Galilée (1565-1642). En 1621, *Snell* découvre expérimentalement la loi de la réfraction, et Descartes, en 1638, énonce dans son "Optique" les lois de la réflexion et de la réfraction, mais sans tenir compte de la nature de la lumière.

<sup>2</sup> La longueur d'onde est la distance entre deux points d'une onde qui sont en phase. Elle est mesurée en nanomètres (nm).

<sup>3</sup> La fréquence est le nombre d'ondes qui passent par un point donné en une seconde. Elle est mesurée en hertz (Hz).

<sup>4</sup> L'école atomiste en physique est un courant de pensée qui affirme que la matière est composée d'unités indivisibles appelées atomes. Cette théorie a été développée pour la première fois par les philosophes grecs Leucippe et Démocrite au V<sup>e</sup> siècle avant J.-C.

<sup>5</sup> Willebrord Snell (1591-1626), également connu sous le nom de Snellius, était un mathématicien, astronome et physicien néerlandais. Il est surtout connu pour sa découverte de la loi de réfraction, également connue sous le nom de loi de Snell-Descartes.

À la même époque, *Christian Huygens*<sup>6</sup> (1629-1695) propose la théorie ondulatoire, selon laquelle la lumière est un phénomène *ondulatoire* qui, par analogie avec le son, a besoin d'un support matériel pour se propager, qu'il nomme *éther*. Cette théorie explique les lois de la réflexion et de la réfraction en supposant que la vitesse de propagation est plus lente dans les milieux plus denses.

De sa part, Isaac Newton (1642-1726) a présenté en 1704 le modèle *corpusculaire* de la lumière dans son ouvrage intitulé *Optique*. Il suppose que la lumière est constituée de *particules matérielles*, émises à grande vitesse par les corps et se propageant en ligne droite pour former des rayons lumineux. La réflexion est associée à un choc élastique et l'angle d'incidence est donc égal à l'angle de réfraction. Pour expliquer la loi de la réfraction, il ajouta une hypothèse supplémentaire, supposant que les particules, provenant de l'air, en s'approchant de la surface de séparation, étaient attirées par l'autre milieu, plus dense, ce qui augmentait leur vitesse normale alors que la composante tangentielle n'était pas modifiée. En raison de la grande autorité de Newton, sa théorie corpusculaire a été acceptée pendant plus d'un siècle et la théorie ondulatoire n'a pu s'épanouir qu'au début du 19<sup>e</sup> siècle.

L'acceptation de la théorie ondulatoire est due aux expériences du physicien anglais *Thomas Young* en 1801 sur les interférences lumineuses et aux travaux du physicien français *Augustin Fresnel* sur les interférences et la diffraction, fondés sur un solide développement mathématique. En 1850, *Foucault*<sup>7</sup> mesure la vitesse de la propagation de la lumière dans l'eau et constate qu'elle est plus lente que dans l'air, mettant ainsi fin à la théorie corpusculaire de Newton.

Prédit l'existence d'ondes électromagnétiques se propageant à une vitesse de  $3 \times 10^8$  m/s, obtenue à partir des lois de l'électricité et du magnétisme, qui coïncide avec la valeur de la vitesse de propagation de la lumière. Cela confirme théoriquement que la lumière n'est pas une onde *mécanique* mais une onde *électromagnétique* qui peut se propager sans avoir besoin d'un support matériel. La preuve expérimentale de l'existence des ondes électromagnétiques a été apportée en

---

<sup>6</sup> Christian Huygens (14 avril 1629 – 8 juillet 1695) était un mathématicien, physicien, ingénieur, astronome et inventeur néerlandais considéré comme une figure clé de la révolution scientifique. Il est surtout connu pour ses travaux sur la théorie ondulatoire de la lumière, sa découverte des anneaux de Saturne et son invention de l'horloge à pendule.

<sup>7</sup> Léon Foucault (1819-1868) était un physicien français surtout connu pour ses travaux sur le pendule de Foucault et ses expériences sur la vitesse de la lumière. En 1850, Foucault mena une expérience utilisant un miroir rotatif pour mesurer la vitesse de la lumière. Cette expérience est considérée comme l'une des expériences les plus importantes de l'histoire de la physique, car elle a fourni la preuve définitive que la lumière se déplace plus rapidement dans le vide que dans l'air.

## Géomatique appliquée 2 : (Initiation à la Télédétection)

1887 par le physicien allemand Hertz qui, à l'aide de circuits électriques, a généré et détecté ces ondes.

Les ondes électromagnétiques sont, dans le cas le plus simple, des ondes harmoniques transversales, consistant en l'oscillation de deux champs, l'un électrique et l'autre magnétique, de directions perpendiculaires, toutes deux perpendiculaires à la direction de propagation, se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière dans le vide est une constante universelle, comme l'a postulé Einstein en 1905. En 1963, le National Bureau of Standards a officiellement fixé la vitesse du rayonnement électromagnétique dans le vide à 299 792,8 km/s. Pour la plupart des applications, la vitesse des ondes électromagnétiques est d'environ 300 000 km/s.

Après avoir admis la double nature de la lumière (en tant qu'onde électromagnétique dans les phénomènes de propagation et en tant que corpuscule dans l'interaction de la lumière avec la matière), une classification des ondes électromagnétiques (spectre électromagnétique) est établie et certaines méthodes permettant de déterminer la vitesse de propagation de la lumière sont expliquées. Vient ensuite l'étude de la propagation de la lumière, considérée comme un rayonnement électromagnétique qui stimule le processus de la vision, c'est-à-dire dans le cadre de l'optique physique. Les différentes longueurs d'ondes de la lumière sont données dans la figure suivante :

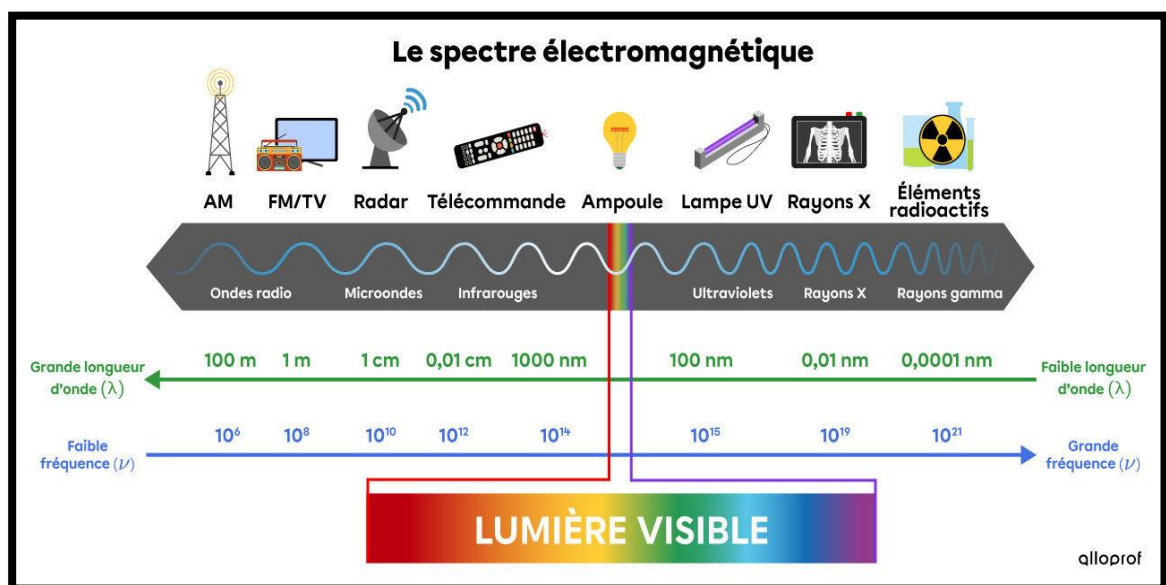


Figure 03 : Spectre du rayonnement électromagnétique solaire

Source : <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-spectre-electromagnetique>

Selon la théorie corpusculaire, la lumière est constituée de particules élémentaires appelées **photons**. Ces photons ont une énergie qui est proportionnelle à leur fréquence. La longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles. Cela signifie que si la longueur d'onde augmente, la fréquence diminue. A cet effet l'énergie d'un photon est donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Les ondes de faibles longueurs d'onde, comme les rayons X, sont donc les plus énergétiques.

**Exemples :**

- La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 400 et 700 nm.
- Les rayons X ont une longueur d'onde comprise entre 0,01 et 10 nm.
- Les ondes radio ont une longueur d'onde comprise entre 1 mm et 1 km.

Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu<sup>8</sup> émet du rayonnement électromagnétique<sup>9</sup>. Un corps noir<sup>10</sup> est un objet idéal qui absorbe toute l'énergie qu'il reçoit. Un corps noir à une température T émet une quantité d'énergie appelée luminance spectrale<sup>11</sup> à une longueur d'onde  $\lambda$  et dans une direction quelconque selon la loi de Planck. La loi de Planck s'exprime de la manière suivante :  $L\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^{hc/\lambda kT} - 1)$

Où :

- $L\lambda(T)$  est la luminance spectrale à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la température T
- h est la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$ Joule)
- c'est la vitesse de la lumière (299 792 458 m/s)
- k est la constante de Boltzmann ( $1,380\ 649 \times 10^{-23}$  J/K)
- T est la température en kelvins (1 Kelvin = -272.15 Celsius)

Selon la loi de **Wien**<sup>12</sup> qui stipule que la longueur d'onde maximale d'émission d'un corps noir est inversement proportionnelle à sa température absolue.

---

<sup>8</sup> Le zéro absolu est la température la plus basse possible, à laquelle la matière n'a plus d'énergie thermique. Sa valeur est de -273,15 °C.

<sup>9</sup> Le rayonnement électromagnétique est une forme d'énergie qui se propage sous forme de vagues. Il existe différents types de rayonnement électromagnétique, chacun ayant une longueur d'onde et une fréquence spécifiques.

<sup>10</sup> Un corps noir est un objet idéal qui absorbe toute l'énergie qu'il reçoit. Il n'existe pas de corps noir parfait, mais certains objets, comme le charbon de bois, s'en approchent.

<sup>11</sup> La luminance spectrale est la quantité d'énergie émise par unité de surface, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde.

<sup>12</sup> Wilhelm Wien (1864-1928) était un physicien allemand surtout connu pour ses travaux sur le spectre du corps noir et sa découverte de la loi de Wien. En 1893, Wien a publié un article dans lequel il a dérivé une équation pour le spectre du corps noir, qui est la distribution du rayonnement électromagnétique émis par un absorbeur et un émetteur parfaits de rayonnement.

Exemples :

- Un corps noir à la température de la surface du soleil (5505 K) émet une quantité d'énergie maximale à une longueur d'onde de 500 nm, qui correspond à la lumière visible.
- Un corps noir à la température de (293 K) émet une quantité d'énergie maximale à une longueur d'onde de 10 000 nm, qui correspond à l'infrarouge.

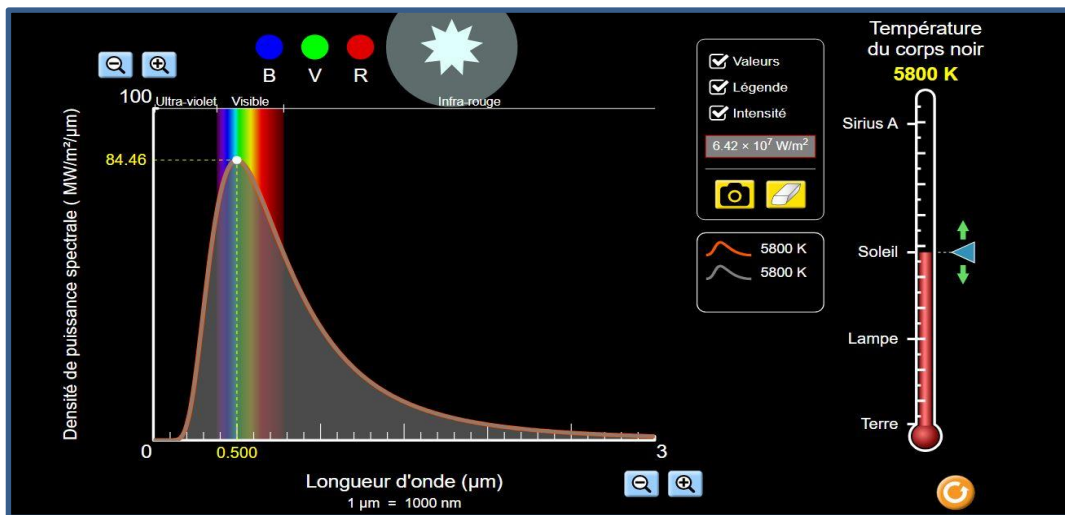


Figure 04 : luminance spectrale d'un corps noir pour différentes températures

Source : <https://sites.uclouvain.be/didacphysique/didacphys/animations>

Le Soleil et la Terre sont tous deux des corps noirs, mais ils ont des températures différentes. Le Soleil a une température de 5770 °K, tandis que la Terre a une température de 300 °K. En raison de leur différence de température, les deux corps émettent du rayonnement électromagnétique avec des longueurs d'onde différentes. Le Soleil émet un maximum de rayonnement dans la bande verte du spectre visible, tandis que la Terre émet un maximum de rayonnement dans l'infrarouge thermique.<sup>13</sup>

## 2.2. COMPLEXITE DU SIGNAL MILIEUX PERTURBATEURS : INTERFERENCES RAYONNEMENT EM –MATERIE

L'une des caractéristiques essentielles des *rayonnements ionisants* (photons, neutrons, particules chargées, etc.) est leur capacité à pénétrer et à interagir avec la matière. Lors de ces interactions, le rayonnement perd *tout ou partie* de son énergie au profit du milieu qu'il traverse par le biais de différents mécanismes d'interaction qui dépendent essentiellement du *type de rayonnement*, de *son énergie* et *des propriétés du milieu matériel* avec lequel il interagit.

<sup>13</sup> L'infrarouge thermique est une forme de rayonnement invisible qui est perçu par la peau comme de la chaleur. Par conséquent, la Terre émet de la chaleur sous forme de rayonnement infrarouge thermique.

Ces processus d'interaction des rayonnements avec la matière sont à l'origine des effets des rayonnements (en particulier des effets biologiques sur les êtres vivants) et déterminent les conditions de propagation des rayonnements dans un milieu matériel.

L'interaction du rayonnement avec un matériau donné dépend principalement de sa charge électrique et de sa masse. Il est donc nécessaire de faire la distinction entre : des particules sans masse et non chargées (photons, c'est-à-dire rayonnement gamma et rayons X), des particules chargées "légères" (rayonnement bêta), des particules chargées "lourdes" (rayonnement alpha), ou les particules de masse sans charge (neutrons).

#### **A. INTERFERENCES AU COURS DE LA TRAVERSEE DES COUCHES ATMOSPHERIQUES**

Lors de son passage à travers l'atmosphère le rayonnement électromagnétique interagit avec les différents composants de ce dernier. Ces interactions peuvent être divisées en deux catégories principales : *la diffusion et l'absorption*.

La diffusion est un processus par lequel le rayonnement est *réfléchi* de manière aléatoire par les atomes, les molécules et les particules atmosphériques. Cela se produit lorsque le rayonnement interagit avec les électrons de ces particules. La diffusion est responsable de la couleur bleu du ciel.

Dans l'atmosphère, la diffusion de *Rayleigh*<sup>14</sup> est principalement causée par les molécules de gaz ou aux fines particules de poussière. Elle se produit particulièrement dans les couches supérieures de l'atmosphère, où la concentration de molécules de gaz est plus faible. La diffusion de Rayleigh affecte principalement les courtes longueurs d'onde, c'est-à-dire les couleurs bleue et violette. Quant à l'absorption est un processus par lequel le rayonnement est *absorbé* par les atomes, les molécules et les particules atmosphériques. Cela se produit lorsque le rayonnement interagit avec les orbites électroniques de ces particules. L'absorption est responsable de la couleur des couchers de soleil.

La figure ci-dessous montre que le rayonnement électromagnétique est *atténué*<sup>15</sup> de manière sélective par *les composés atmosphériques*<sup>16</sup>. Les longueurs d'onde qui sont moins absorbées par l'atmosphère sont appelées *fenêtres atmosphériques*<sup>17</sup>. Ces fenêtres sont utilisées en télédétection pour collecter des informations sur les surfaces terrestres.

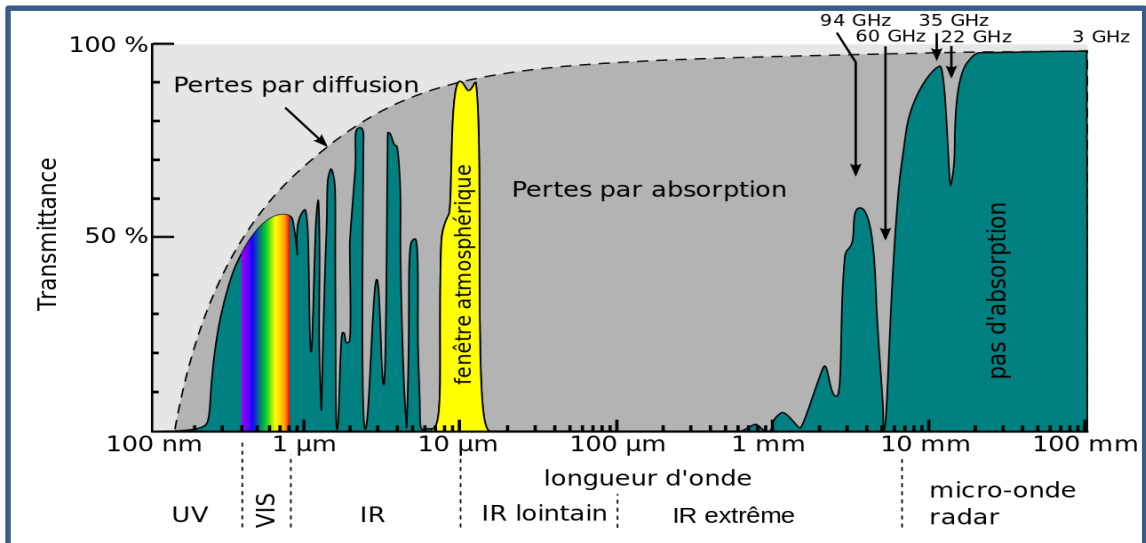
---

<sup>14</sup> En 1871, John William Strutt Rayleigh fournit une explication de la couleur du ciel en la reliant à la diffusion de la lumière par les molécules d'air.

<sup>15</sup> L'atténuation est la diminution de l'intensité du rayonnement électromagnétique lorsqu'il traverse un milieu.

<sup>16</sup> Sont les gaz, les vapeurs et les particules qui se trouvent dans l'atmosphère.

<sup>17</sup> Les fenêtres atmosphériques sont les intervalles de longueurs d'onde qui sont moins absorbées par l'atmosphère.



**Figure 05 :** Spectre de transmission de l'atmosphère (fenêtres atmosphériques)

Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%AAtre\\_atmosph%C3%A9rique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%AAtre_atmosph%C3%A9rique)

En télédétection, les longueurs d'onde utilisées sont principalement le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge moyen, l'infrarouge thermique et les hyperfréquences ou micro-ondes. Les principales bandes spectrales utilisées sont :

- Le visible (400 à 700 nm) est utilisé pour identifier les objets en fonction de leur couleur.
- Le proche infrarouge (700 à 1300 nm) est utilisé pour détecter la végétation et la température.
- L'infrarouge moyen (1300 à 3000 nm) est utilisé pour détecter l'humidité du sol et la température.
- L'infrarouge thermique (3000 à 15000 nm) est utilisé pour détecter la température des objets.
- Les hyperfréquences ou micro-ondes (1 millimètre à 1 mètre) sont utilisées pour détecter la présence d'eau.

**Exemples :**

- Les satellites météorologiques utilisent le visible pour identifier les nuages et les précipitations.
- Les satellites d'observation de la Terre utilisent le proche infrarouge pour cartographier la végétation.
- Les satellites d'observation de l'environnement utilisent l'infrarouge moyen pour surveiller l'humidité du sol.

- Les satellites d'observation de la Terre utilisent l'infrarouge thermique pour surveiller les températures de surface.
- Les radars météorologiques utilisent les hyperfréquences pour détecter les précipitations.

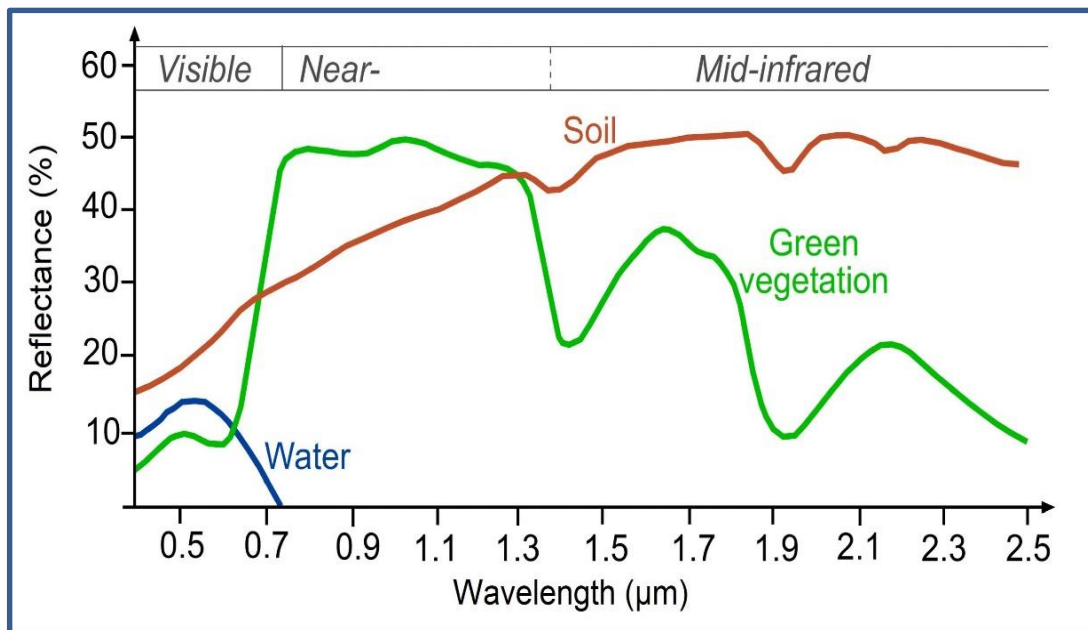
## **B. INTERFERENCES RAYONNEMENT ET SURFACES TERRESTRES**

Tout objet (quel que soit le rayonnement qu'il émet) reçoit un rayonnement, principalement solaire, qui, selon le type d'objet considéré, peut suivre trois voies : **réfléchie** (le rayonnement est renvoyé dans l'espace) **absorbée** (le rayonnement traverse l'objet et en augmente l'énergie) **transmise** (le rayonnement est transmis aux objets situés derrière lui). L'interaction du rayonnement avec l'atmosphère et les objets terrestres, dépendra de la longueur de l'unité métrique et des caractéristiques de ce corps.

La partie du champ de rayonnement qui a traversé l'atmosphère sans être absorbée ni diffusée dans l'espace atteint désormais la surface de la Terre. Pour toute longueur d'onde pertinente pour la télédétection, une seule des deux choses suivantes peut désormais arriver à chaque photon individuel : **il peut être absorbé par la surface de la Terre ou il peut être réfléchi vers l'espace.**

La probabilité de réflexion plutôt que d'absorption est appelée **réflectance** de surface et dépend du matériau présent sur la surface ainsi que de la longueur d'onde du rayonnement entrant. Chaque matériau de surface possède une « **signature** » unique qui définit la proportion de **rayonnement réfléchi** pour chaque longueur d'onde. Par exemple, L'eau reflète une petite quantité de longueurs d'onde bleues et vertes (généralement environ 5 à 10 % selon la turbidité), moins de longueurs d'onde rouges et presque aucune longueur d'onde infrarouge. La végétation, en revanche, réfléchit environ la moitié de tous les rayonnements infrarouges entrants, à l'exception de certaines longueurs d'onde spécifiques qui sont efficacement absorbées par l'eau liquide contenue dans les feuilles.

Ces signatures spectrales sont généralement représentées sous forme de graphiques, avec les longueurs d'onde le long de l'axe des x et la réflectance le long de l'axe des y (comme figure 5). À l'exception des longueurs d'onde spécifiques qui sont efficacement absorbées par l'eau liquide contenue dans les feuilles.

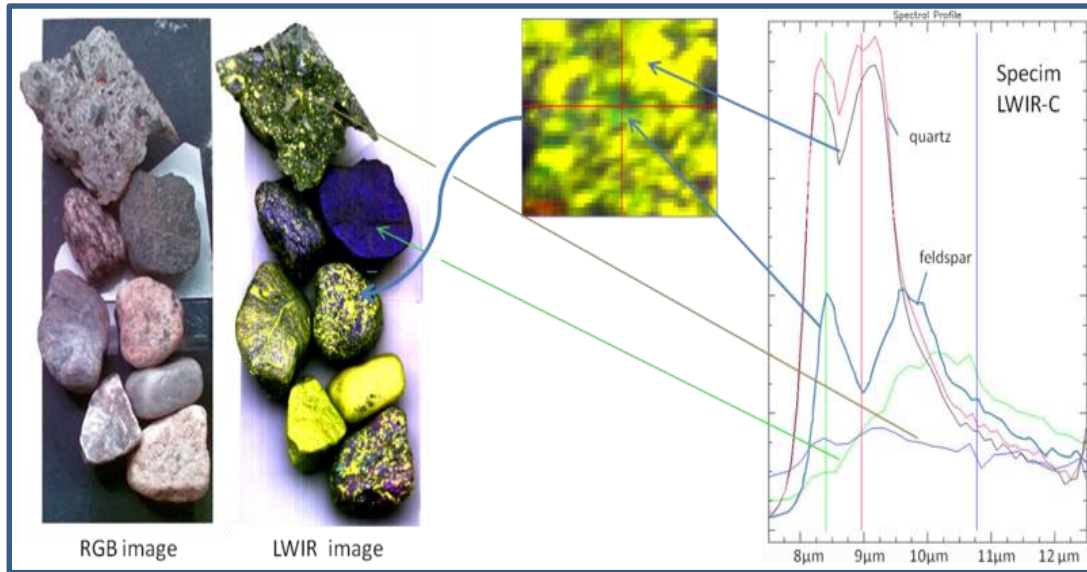


**Figure 06 :** Signatures spectrales de types courants définis de matériaux à la surface de la Terre.

Source :<https://seos-project.eu/classification/classification-c01-p05.fr.html>

Les signatures spectrales nous permettent de différencier les différents matériaux à la surface de la Terre lorsque nous regardons une image satellite. Comme la montre la figure ci-dessous, l'eau a une réflectance proche de zéro aux longueurs d'onde supérieures à  $0,7 \mu\text{m}$  ( $700 \text{ nm}$ ), tandis que le sol et la végétation verte ont des réflectances d'environ  $40\%$  à  $1,3 \mu\text{m}$ . Par conséquent, mesurer la quantité de rayonnement réfléchi dans le système Terre-Atmosphère à  $1,3 \mu\text{m}$  sera particulièrement utile pour différencier l'eau des deux types de surface terrestre. De même, des mesures à des longueurs d'onde autour de  $1,4 \mu\text{m}$  (où l'eau liquide dans la végétation est un puissant absorbeur) ou  $1,9 \mu\text{m}$  peuvent être efficaces pour différencier le sol de la végétation verte.

À titre d'exemple plus détaillé, les signatures spectrales se sont révélées efficaces pour les études et la prospection géologiques à grande échelle, car différents minéraux (qui peuvent être caractéristiques de différentes conditions souterraines) peuvent être identifiés grâce à leurs signatures spectrales uniques.



**Figure 07** : Exemples de signatures spectrales de minéraux.

Source : par Aappo Roos, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 .

La partie du champ de rayonnement réfléchi par la surface de la Terre doit naturellement reculer à travers l'atmosphère, avec *réfraction, diffusion et absorption* ultérieures, avant de pouvoir être mesurée par un capteur spatial. Bien que les capteurs aéroportés et spatiaux présentent de nombreux avantages et inconvénients relatifs, la capacité des capteurs aéroportés à mesurer le champ EMR réfléchi avant qu'il n'ait à traverser l'atmosphère une seconde fois constitue un avantage évident.

### 2.3 QUANTITES PHYSIQUES MESUREES EN TELEDETECTION

Les quantités physiques mesurées en télédétection sont celles qui peuvent être décrites par des propriétés du rayonnement électromagnétique. Ces propriétés comprennent l'intensité, la longueur d'onde, la polarisation et la phase. On définit les quantités suivantes :

**Energie rayonnante  $Q_e$**  : est la quantité d'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique. Elle est mesurée en joules (J). L'énergie rayonnante peut être calculée à l'aide de la formule suivante :  $Q_e = f * P$

Où :

- $Q_e$  : est l'énergie rayonnante (J)
- $f$  : est la fréquence du rayonnement électromagnétique (Hz)
- $P$  : est la puissance du rayonnement électromagnétique (W)

L'énergie rayonnante peut également être exprimée en fonction de l'intensité et de la durée du rayonnement électromagnétique :  $Q_e = I * t$

Où :

- $Q_e$  : est l'énergie rayonnante (J)
- $I$  : est l'intensité du rayonnement électromagnétique ( $W/m^2$ )
- $t$  : est la durée du rayonnement électromagnétique (s)

**Le flux énergétique  $\Phi_e$**  : est la quantité d'énergie rayonnante transportée par une surface par unité de temps. Il est mesuré en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). Le flux énergétique peut être calculé à l'aide de la formule suivante :  $\Phi_e = Q_e / t$

Où :

- $\Phi_e$  : est le flux énergétique ( $W/m^2$ )
- $Q_e$  : est l'énergie rayonnante (J)
- $t$  : est la durée du rayonnement électromagnétique (s)

**La densité de flux énergétique  $F_e$**  : est la quantité d'énergie rayonnante qui traverse une surface par unité de temps et par unité de surface. Elle est mesurée en watts par mètre carré par hertz ( $W/m^2/Hz$ ). La densité de flux énergétique peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$F_e = \Phi_e / f$$

Où :

- $F_e$  : est la densité de flux énergétique ( $W/m^2/Hz$ )
- $\Phi_e$  : est le flux énergétique ( $W/m^2$ )
- $f$  : est la fréquence du rayonnement électromagnétique (Hz)

**La luminance énergétique  $L_e$**  : est la puissance par unité de surface et par unité d'angle solide du rayonnement électromagnétique passant ou étant émis en un point d'une surface, et dans une direction donnée. Il s'agit de la fonction de base du domaine radiatif, toutes les autres quantités s'en déduisant. La luminance énergétique est mesurée en watts par mètre carré par stéradian ( $W/m^2/sr$ ).

Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante :  $L_e = I_e / \cos(\theta)$

Où :

- $L_e$  est la luminance énergétique ( $W/m^2/sr$ )
- $I_e$  est l'intensité énergétique ( $W/m^2$ )
- $\theta$  est l'angle entre la direction de la propagation du rayonnement électromagnétique et la normale à la surface

### 3. ACQUISITION DE DONNEES DE TELEDETECTION

L'acquisition de données de télédétection est le processus d'obtention de mesures du rayonnement électromagnétique *émis* ou *réfléchi* par la surface de la Terre. Ces données de peuvent être collectées à l'aide d'une variété de *vecteurs*, notamment des satellites, des avions et des drones.

Ces vecteurs sont équipés par des capteurs sensibles au rayonnement électromagnétiques. Ces capteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

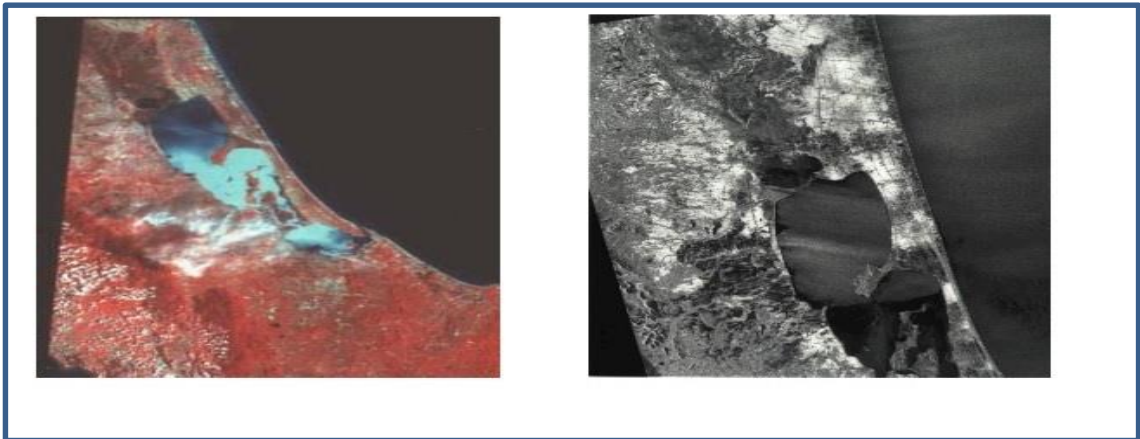
- ❖ **Capteurs actifs** : Ce type de capteur est utilisé pour des applications telles que la cartographie radar et la surveillance des conditions météorologiques. Ils génèrent un rayonnement électromagnétique d'une fréquence et d'une puissance définie, qui est ensuite réfléchi ou absorbé par la surface de la Terre. Le rayonnement réfléchi ou absorbé est ensuite collecté par le capteur et utilisé pour créer une image de la surface de la Terre.

#### Exemples de capteurs actifs

- ✓ Radar : le radar utilise des ondes radio pour créer des images de la surface de la Terre.
- ✓ LiDAR : le LiDAR utilise des impulsions laser pour créer des images de la surface de la Terre.
- ✓ Infrarouge thermique : l'infrarouge thermique utilise le rayonnement infrarouge pour créer des images de la température de la surface de la Terre.
- ❖ **Capteurs passifs** : sont utilisés pour des applications telles que l'imagerie satellitaire et la surveillance de l'environnement. Ils ne produisent pas leur propre rayonnement électromagnétique, mais collectent simplement le rayonnement électromagnétique émis par la surface de la Terre. Le rayonnement collecté est ensuite utilisé pour créer une image de la surface de la Terre.

#### Exemples de capteurs passifs

- ✓ Imagerie visible : l'imagerie visible utilise la lumière visible pour créer des images de la surface de la Terre.
- ✓ Imagerie infrarouge : l'imagerie infrarouge utilise le rayonnement infrarouge pour créer des images de la surface de la Terre.
- ✓ Imagerie ultraviolette : l'imagerie ultraviolette utilise le rayonnement ultraviolet pour créer des images de la surface de la Terre.



**Figure 08 :** Exemples des images satellitaires obtenues par des capteurs du satellite LANDSAT

**Source :** National research concil of Thaïlande

Par rapport aux autres vecteurs utilisés dans l'acquisition des données en télédétection, les satellites offrent un certain nombre d'avantages par rapport aux autres capteurs de télédétection, à cet effet se sont devenus les vecteurs les plus sollicités dans plusieurs domaines de recherche, notamment en raison des apports suivants :

- Couverture globale : les satellites peuvent couvrir la Terre entière, ce qui permet d'obtenir des images de n'importe quel endroit du monde.
- Résolution spatiale élevée : les satellites peuvent fournir des images avec une résolution spatiale élevée, ce qui permet de distinguer des détails fins sur la surface de la Terre.
- Résolution temporelle élevée : les satellites peuvent collecter des données à intervalles réguliers, ce qui permet de suivre les changements sur la surface de la Terre au fil du temps.
- Coût abordable : le coût de la télédétection satellitaire a diminué au fil des ans, ce qui la rend plus accessible à un plus grand nombre de chercheurs.

Selon leurs orbites autour de la terre, Les satellites d'observation peuvent être classés en trois types :

- Les satellites géostationnaires : sont situés à une altitude de 35 786 kilomètres au-dessus de l'équateur. Ils tournent à la même vitesse que la Terre, ce qui leur permet de rester au-dessus du même point sur la surface de la Terre. Les satellites géostationnaires sont souvent utilisés pour les télécommunications, la météorologie et la surveillance.
- Les satellites en orbite polaire : sont situés sur une orbite qui traverse les pôles de la Terre. Ils tournent autour de la Terre en une journée, ce qui leur permet de couvrir l'ensemble de la surface de la Terre. Les satellites en orbite polaire sont souvent utilisés pour la cartographie, l'environnement et la surveillance.

- Les satellites en orbite basse : sont situés à une altitude inférieure à 2 000 kilomètres au-dessus de la Terre. Ils tournent autour de la Terre en quelques heures, ce qui leur permet de fournir des images à haute résolution. Les satellites en orbite basse sont souvent utilisés pour l'observation de la Terre, l'imagerie militaire et la surveillance.

#### **4. PERFORMANCE DES CAPTEURS**

Chaque satellite d'observation est doté d'un nombre de capteurs, qui sont les éléments indispensables à la mesure des grandeurs physiques. Dans le domaine de la télédétection la fiabilité d'un capteur dépend de sa capacité d'acquérir plus de données sur les phénomènes et les objets étudiés. Les données collectées par ces capteurs sont transformées en images (format Raster), à l'aide d'un processus appelé **déconvolution**. La déconvolution permet de corriger les distorsions introduites par le capteur et l'atmosphère.

L'exploitation des rasters obtenues dans tel ou tel domaine est dépend de ses qualités, qui s'appelle conventionnellement la résolution. La résolution d'un raster est une mesure de la taille des pixels d'une image raster. Elle est mesurée en pixels par unité de distance. Une résolution plus élevée signifie que les pixels sont plus petits et que l'image est plus détaillée.

La résolution d'un raster est déterminée par plusieurs facteurs, notamment :

- La taille du capteur : un capteur plus grand permet de capturer plus de détails, ce qui se traduit par une résolution plus élevée.
- La distance entre le capteur et la cible : une distance plus courte entre le capteur et la cible permet de capturer plus de détails, ce qui se traduit également par une résolution plus élevée.
- La longueur d'onde du rayonnement électromagnétique utilisé : les longueurs d'onde plus courtes permettent de capturer plus de détails, ce qui se traduit par une résolution plus élevée.

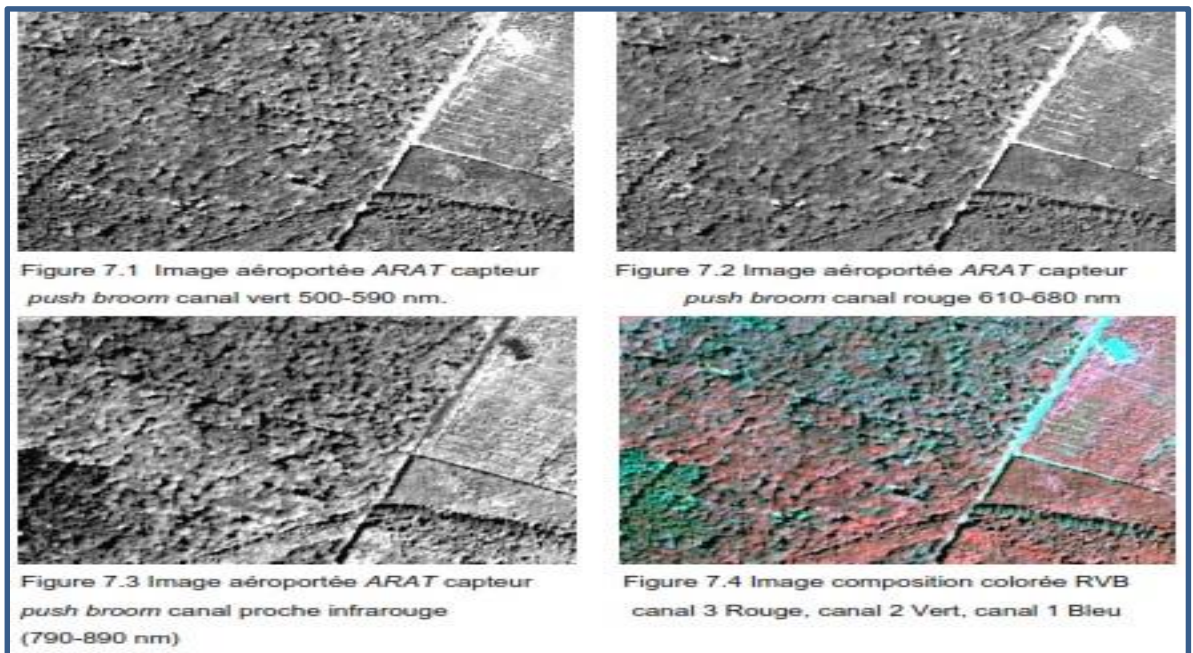
La résolution d'un raster est un facteur important à prendre en compte lors de l'utilisation d'images raster. Une résolution plus élevée permet de distinguer des détails plus fins, ce qui peut être important pour certaines applications, telles que l'identification d'objets ou la mesure de changements.

Il existe deux types de résolution pour les images raster :

- **Résolution radiométrique** : la résolution radiométrique est la précision avec laquelle une image raster peut représenter les valeurs des pixels. Une résolution radiométrique plus élevée signifie que l'image peut représenter des différences de valeurs plus subtiles.

- **La résolution spectrale** : est le nombre de bandes spectrales utilisées par un capteur. Une résolution spectrale plus élevée signifie que le capteur peut mesurer le rayonnement électromagnétique sur une gamme plus large de longueurs d'onde. (SPOT panchromatique dans la bande visible 510-730 nm, SPOT XS canal vert 500-590 nm, canal rouge 610-680 nm et canal proche infrarouge 790-890 nm ; Radar ERS-1 Micro-onde bande C 5 GHz ; JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) bande L 1.28 GHz, etc.

Les images suivantes de la forêt de Haguenau (juillet 1998) ont été acquises à différentes longueurs d'onde avec une résolution au sol de 2 m à l'aide du radiomètre Push broom, embarqué sur l'avion ARAT (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection) du CNES (Raffy et al., Raffy & Soudani).



**Figure 09** : Exemples des images satellitaires obtenues par des capteurs du satellite LANDSAT

Source : National research concil of Thaïlande

- **Résolution spatiale** : la résolution spatiale est la taille des pixels d'une image. Une résolution spatiale plus élevée signifie que les pixels sont plus petits et que l'image est plus détaillée. Il est de 10 m × 10 m pour la bande panchromatique de SPOT, 20 m × 20 m pour les bandes XS de SPOT, 30 m × 30 m pour LANDSAT Thematic Mapper, 1 km × 1 km pour NOAA-AVHRR (National Oceanographic and Atmospheric Administration, Advanced Very High Resolution Radiometer), 30 m × 30 m pour ERS-1 et 18 m × 18 m pour JERS-1.

La largeur de la bande balayée, le long d'un parcours correspondant à la trace du satellite, définit la fauchée au sol. Elle est de 60 km pour SPOT, 185 km pour Landsat TM, 2800 km pour NOAA-AVHRR, 100 km pour ERS-1 et 75 km pour JERS-1. La figure ci-dessous correspond à six images d'un même endroit à des résolutions spatiales différentes.



**Figure 10** : Illustration de l'effet de la résolution spatiale des images

**Source : (Radiant Earth Foundation)**

Outre ces trois types de résolutions, s'ajoute un troisième type, c'est la résolution temporelle. La résolution temporelle ou répétitivité correspond à la fréquence à laquelle les données sont collectées. Une résolution temporelle plus élevée signifie que les données sont collectées plus fréquemment.

La résolution temporelle est un facteur important à prendre en compte lors du choix d'un capteur pour une application donnée. Elle est déterminée par plusieurs facteurs, notamment :

- La durée du cycle orbital : le cycle orbital est le temps que met un satellite pour faire une orbite complète autour de la Terre. Un cycle orbital plus court signifie que le satellite peut collecter des données plus fréquemment.
- La couverture du capteur : la couverture du capteur est la zone de la surface de la Terre qui peut être observée par le capteur. Une couverture plus large signifie que le satellite peut collecter des données sur une plus grande zone plus fréquemment.

- La capacité de stockage du capteur : le capteur doit être capable de stocker les données collectées. Une capacité de stockage plus élevée signifie que le capteur peut collecter des données pendant une période plus longue.

La résolution temporelle est importante pour certaines applications, telles que la surveillance des changements environnementaux ou la détection des événements d'urgence. Une résolution temporelle plus élevée permet de suivre les changements plus rapidement et de détecter les événements plus tôt. Le tableau ci-dessous donne quelques caractéristiques des principaux satellites d'observation de la terre :

Satellite	Niveau de produit	Type	Fauchée	Bande spectrale  Polarisation	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Sentinel-1	GRD	Radar C	250 km	VV+VH	10 m	6 à 12 jours
Sentinel-2	Level-1C	Optique	290 km	13 bandes	10 à 60 m	5 à 10 jours
ALOS	RTC	Radar L	70 km	HH+HV	10 à 20 m	46 jours
Pléiades	Niveau 0	Optique	20 km	B-V-R-PIR-P	P : 0,5 m MS : 2 m	1 à 7 jours

**Tableau 01 : Quelques caractéristiques des principaux satellites d'observation de la terre**

**Source : (Catry et al., 2018)**

## 5. COMPORTEMENT SPECTRALE DES OBJETS : (VEGETATION, EAU, MINERAL)

### 5.1 COMPORTEMENT SPECTRALE DE L'EAU

La caractéristique la plus distinctive de la courbe de réflectance de l'eau est qu'elle absorbe l'énergie incidente dans les longueurs d'onde du proche infrarouge (700-1300 µm) et de l'infrarouge moyen (1300-1300 µm). La réflectance de l'eau est complexe et dépend de plusieurs facteurs interdépendants. Par exemple, l'épaisseur de la masse d'eau (profondeur), la teneur en matières en suspension et la rugosité de l'eau.

La réflectivité la plus élevée de l'eau claire se produit dans le spectre bleu (400-500 µm) et diminue vers l'infrarouge. Elle diminue vers le proche infrarouge (700-1300 µm) (figure 15). Les variations dans les spectres de l'eau sont détectées dans les longueurs d'onde les plus courtes.

Les variations des spectres de l'eau sont détectées dans les courtes longueurs d'onde du visible (bleu, 400-500  $\mu\text{m}$  et vert, 500-600  $\mu\text{m}$ ). Les eaux contenant de grandes quantités de sédiments en suspension et de plancton, produisent une augmentation de la réflectance dans le visible. En outre, la réflectance de l'eau varie en fonction de la teneur en chlorophylle. L'augmentation de la teneur en chlorophylle entraîne une diminution de la réflectance dans le bleu.

Une augmentation de la teneur en chlorophylle entraîne une diminution de la réflectance dans le bleu et une augmentation de la réflectance dans le vert. La neige a un comportement spectral différent de celui de l'eau, avec une réflectivité très élevée dans les bandes visibles (0,4-0,5) et dans l'infrarouge (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ) diminue vers le proche infrarouge.

En résumé, il existe de nombreuses relations complexes dans le spectre de l'eau, et la surveillance de la qualité de l'eau peut être très bien utilisée dans la détermination de différents éléments pour différentes disciplines (biologie, géologie, exploitation minière, environnement, etc.)

## **5.2 COMPORTEMENT SPECTRALE DE LA VEGETATION**

La courbe de réflectance spectrale typique de la végétation verte et saine présente des pics et des vallées. Les plantes utilisent l'énergie solaire pour convertir l'eau et le dioxyde de carbone en glucides et en oxygène par le processus de photosynthèse. Le catalyseur de la photosynthèse est la chlorophylle, un composé organique complexe contenant du fer. La fonction de la chlorophylle est d'absorber la radiation solaire.

La chlorophylle a une forte absorption entre 0,45 et 0,67  $\mu\text{m}$  avec un maximum à 0,5  $\mu\text{m}$ . C'est pourquoi nos yeux perçoivent la végétation saine de couleur verte, en raison de l'absorption très élevée de l'énergie des longueurs d'onde bleue et rouge par les feuilles des plantes et de la réflexion très élevée de l'énergie verte.

Lorsque une plante subit un stress de quelque nature que ce soit, la production de chlorophylle diminue ; ce qui entraîne une diminution de l'absorption dans les bandes bleue et rouge. Ainsi, la réflexion dans le rouge augmente, donnant à la plante une apparence jaunâtre (combinaison de rouge et de vert).

La réflectance de la végétation augmente vers l'infrarouge proche, avec une forte augmentation dans les plages de 0,7 à 1,3  $\mu\text{m}$ , où la feuille d'une plante réfléchit 40 à 50 % de l'énergie incidente. Ensuite, elle montre des augmentations à 1,6 et 2,2  $\mu\text{m}$ . La courbe présente des minima à 1,4, 1,9 et 2,7  $\mu\text{m}$  en raison de l'absorption de l'eau dans la feuille à ces longueurs d'onde.

Sur une image de télédétection, les données radiométriques sont appelées comptes numériques (CN) car elles sont exprimées en niveaux de gris allant de 0 à 255 (image dite en 8 bits). Ces comptes numériques peuvent être transformés en luminance (L) ou en réflectances  $\rho$  (en % du rayonnement incident). Le passage des comptes numériques aux luminances et aux réflectances est une opération souvent compliquée car elle nécessite l'emploi d'équations de calibration propres au capteur et de modèles de corrections atmosphériques. Les données radiométriques peuvent être utilisées sous forme de canaux bruts ou d'indices combinant les canaux rouge et proche infrarouge, respectivement XS2 et XS3 du satellite SPOT, TM3 et TM4 du satellite LANDSAT Thematic Mapper, canaux 1 et 2 du satellite NOAA-AVHRR. Ces indices sont mathématiquement exprimés de manière à utiliser le contraste important entre ces deux bandes. Ce contraste résulte de la forte absorption du rayonnement dans le rouge et de la forte réflectance dans le proche infrarouge (figure 9).

La complexité structurale des couverts et la multitude des facteurs externes perturbateurs (géométrie de visée et élévation solaire, effets atmosphériques et propriétés optiques du sol) sont à l'origine de la multiplicité des indices. Ils sont classés en deux catégories (Baret & Guyot, 1991 ; Goel & Quin, 1994) :

1. Indices caractérisés par une pente : RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), etc.
2. Indices caractérisés par une distance : WDV (Weighted Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index).

Ces différents indices correspondent généralement à des relations géométriques dans le plan rouge /proche infrarouge. Bien que mathématiquement différents, certains indices véhiculent les mêmes informations spectrales et discriminent de manière équivalente les couverts végétaux.

❖ **L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** : signifie Normalized Difference Vegetation Index, également appelé Normalized Difference. Est un indice calculé à partir de données d'imagerie satellitaire. Il est utilisé pour mesurer la densité et la santé de la végétation. Le NDVI est calculé en utilisant deux bandes spectrales : la bande rouge et la bande infrarouge proche.

La bande rouge est absorbée par la chlorophylle, tandis que la bande infrarouge proche est réfléchiée par les feuilles des plantes. En soustrayant la bande rouge de la bande infrarouge proche et en divisant par la somme de ces deux bandes, on obtient le NDVI. Le NDVI est un indice compris

entre -1 et 1. Les valeurs négatives correspondent à l'eau ou aux roches, tandis que les valeurs élevées correspondent à une végétation dense et saine.

Cet indice est calculée comme suit :  $NDVI = (R - NIR) / (R + NIR)$  Où :

- NIR (PROCHE INFRAROUGE): lumière réfléchiée dans le spectre proche infrarouge ;
- R (RED) : lumière réfléchiée dans la gamme rouge du spectre.

Selon cette formule de calcul de NDVI, la densité de végétation sur le certain point de l'image est égale à la différence des intensités de lumière réfléchiée dans le domaine rouge et infrarouge divisée par la somme de ces intensités.

❖ **L'indice de végétation par différence pondérée (WDVI)** :signifié Weighted Distance Vegetation Index, est un indice de végétation utilisé pour mesurer la quantité de végétation dans une zone donnée. Il est calculé selon la formule suivante :

$$WDVI = (2 * NIR - RED) / (NIR + RED) \text{ où}$$

- NIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge et
- RED est la réflectance dans la bande rouge.

Le WDVI est similaire à l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), mais il donne plus de poids à la bande proche infrarouge. Cela le rend plus sensible aux changements de la couverture végétale, en particulier dans les zones où les niveaux d'humidité du sol sont élevés.

Le WDVI présente un certain nombre d'avantages par rapport aux autres indices de végétation, notamment :

- ✓ Il est plus sensible aux changements du couvert végétal dans les zones à forte humidité du sol.
- ✓ Il est moins sensible aux effets atmosphériques.
- ✓ Il est plus précis dans l'estimation de l'indice de surface foliaire (LAI).

Le WDVI est utilisé dans diverses applications, notamment :

- ✓ Surveillance de la croissance et de la santé des cultures
- ✓ Évaluation de la déforestation et de la dégradation des forêts
- ✓ Cartographie du couvert végétal et de l'utilisation des terres
- ✓ Étudier les effets du changement climatique sur la végétation

### 5.3 COMPORTEMENT SPECTRALE DU SOL

Certains facteurs qui affectent la courbe de réflectance du sol sont le volume d'humidité, la texture superficielle et la granulométrie, la présence d'oxyde de fer et le contenu de matière organique. Le volume d'humidité produit une diminution générale de la réflectance, produisant des bandes d'absorption à 1,4, 1,9 et 2,7  $\mu\text{m}$  (les sols argileux et sableux produisent des bandes d'absorption à 1,4 et 1,9  $\mu\text{m}$ , tandis que les sols limoneux produisent des bandes d'absorption à 1,4, 1,9 et 2,7  $\mu\text{m}$ ) (Figure 15). Le volume d'humidité est lié à la texture superficielle. Les sols grossiers et sableux ont un bon drainage, ce qui entraîne un faible contenu en eau et une forte réflectance. En revanche, les sols avec des sédiments fins auront un drainage médiocre et un relativement haut contenu en eau, ce qui donnera une faible réflectance.

En résumé, plus le contenu en humidité du sol est élevé, plus la valeur de réflectance est faible. D'un autre côté, en l'absence d'eau, les sols grossiers apparaîtront plus sombres que les sols de textures fines. D'autres deux facteurs qui réduisent la réflectance des sols sont la texture superficielle et le volume de matière organique. La présence d'oxyde de fer dans les sols produit une diminution de la réflectance, au moins dans la longueur d'onde visible.

La courbe de réflectance du sol est une représentation de la quantité de lumière réfléchiée par un sol en fonction de la longueur d'onde. Elle est influencée par une variété de facteurs, notamment :

- Le volume d'humidité : L'eau absorbe la lumière dans la région du visible, ce qui entraîne une diminution de la réflectance du sol.
- La texture superficielle et la granulométrie : La texture du sol est déterminée par la taille des particules qui le composent. Les sols argileux ont une texture fine, tandis que les sols sableux ont une texture grossière. La granulométrie est la distribution des tailles de particules dans un sol. Les sols avec une granulométrie plus fine ont une réflectance plus élevée que les sols avec une granulométrie plus grossière.
- La présence d'oxyde de fer : L'oxyde de fer est un pigment qui absorbe la lumière dans la région du visible, ce qui entraîne une diminution de la réflectance du sol.
- Le contenu de matière organique : La matière organique est un matériau qui absorbe la lumière dans la région du visible, ce qui entraîne une diminution de la réflectance du sol.

En cartographiant la courbe de réflectance du sol, il est possible d'identifier différents types de sols et de suivre les changements dans les sols au fil du temps. Cela peut être utilisé pour surveiller la santé des sols, la pollution et les changements climatiques.

**Exemples :**

- Les sols argileux ont une réflectance plus élevée que les sols sableux. Cela est dû à la taille plus fine des particules qui composent les sols argileux.
- Les sols avec un contenu élevé d'oxyde de fer ont une réflectance plus faible que les sols avec un contenu faible d'oxyde de fer. Cela est dû à l'absorption de la lumière par l'oxyde de fer.
- Les sols avec un contenu élevé de matière organique ont une réflectance plus faible que les sols avec un contenu faible de matière organique. Cela est dû à l'absorption de la lumière par la matière organique.

## **7. PRETRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES**

Le prétraitement des images satellitaires est une étape cruciale avant leur utilisation opérationnelle. Il vise à compenser les erreurs inhérentes à l'acquisition et à l'enregistrement des données. Ces techniques de correction sont essentielles pour garantir la précision et la fiabilité des informations extraites.

### **7.1 CORRECTION GEOMETRIQUE DES IMAGES SATELLITES**

#### **7.1.1 SOURCES DE DISTORSIONS GEOMETRIQUES**

Les images satellites brutes présentent des distorsions géométriques significatives qui nécessitent l'application d'algorithmes de correction. Ces distorsions proviennent de multiples facteurs complexes, notamment les variations d'altitude, la vitesse du satellite, son attitude, la différence de vitesse de balayage du miroir, la rotation terrestre pendant l'enregistrement, la courbure de la terre et les déplacements du relief.

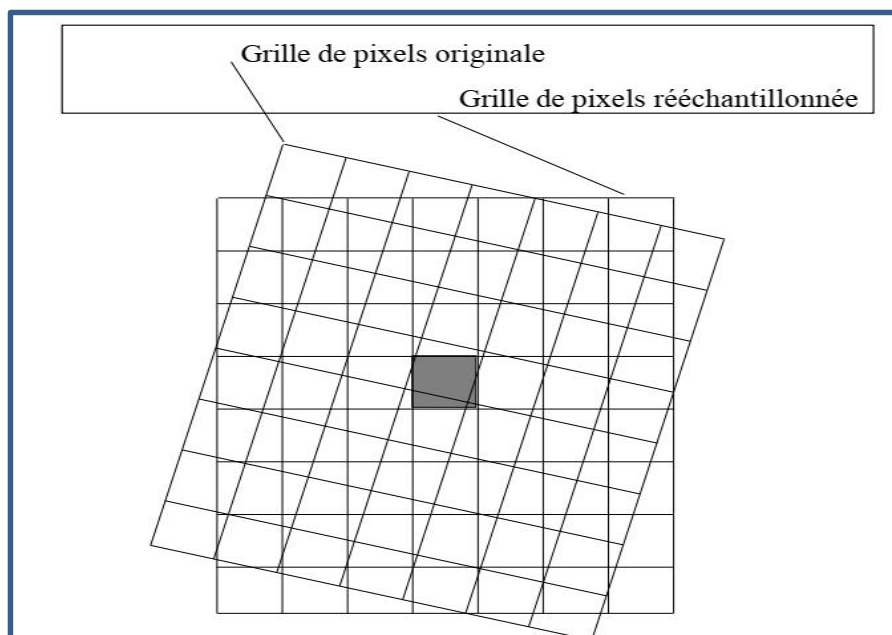
#### **7.1.2 TYPES DE DISTORSIONS ET CORRECTIONS**

Certaines distorsions sont **systematiques**, suivant un modèle prévisible et donc facilement corrigibles. D'autres sont aléatoires ou spécifiques à chaque image, requérant des informations supplémentaires pour leur correction. Les paramètres tels que la vitesse au sol, l'attitude et l'altitude sont généralement contrôlés et corrigés avant la commercialisation des images.

#### **7.1.3 PROCESSUS DE REECHANTILLONNAGE**

Le rééchantillonnage implique de superposer une grille cartographique régulière à l'image satellite oblique. Cette opération nécessite des **points de contrôle au sol** (GCP) identifiables, dont les coordonnées sont connues dans la projection cartographique souhaitée. Plusieurs algorithmes de rééchantillonnage existent :

1. **Rééchantillonnage du plus proche voisin** : Le rééchantillonnage du plus proche voisin prend simplement la valeur du pixel le plus proche dans l'image originale. Les valeurs originales sont conservées, mais l'image souffre d'une certaine erreur de déplacement
  - Conserve les valeurs originales
  - Prend la valeur du pixel le plus proche
  - Génère un léger déplacement d'erreur
2. **Interpolation bilinéaire** : Utilise la moyenne pondérée des quatre pixels les plus proches. Cela modifie les mesures originales du rayonnement réfléchi et génère une image plus lisse que l'originale.
  - Utilise la moyenne pondérée des quatre pixels les plus proches
  - Produit une image plus lisse
  - Modifie les mesures originales de rayonnement
3. **Convolution cubique** : Il utilise les 16 pixels environnants pour attribuer de nouvelles valeurs aux pixels de l'image rééchantillonnée. Étant donné que l'interpolation bilinéaire et la convolution cubique transforment les mesures de rayonnement originales, il est préférable de les appliquer après l'analyse de l'image.
  - Utilise 16 pixels environnants
  - Attribue de nouvelles valeurs aux pixels
  - Transforme les mesures de rayonnement originales



**Figure 11** : Rééchantillonnage géométrique des pixels originaux inclinés sur une grille de carte.

Le rééchantillonnage des images satellitaires est un processus complexe qui impacte significativement la qualité et la précision des données spatiales. Lorsqu'un enregistrement satellite initialement capté avec une résolution de 20 mètres par pixel est soumis à un rééchantillonnage, il devient techniquement possible de modifier la taille des pixels selon différentes configurations désirées.

Cependant, ce processus n'est pas aussi simple qu'une simple transformation géométrique. En effet, les techniques de rééchantillonnage impliquent l'intégration d'informations provenant d'une zone plus étendue que le pixel original. Cette caractéristique a pour conséquence directe une réduction de la résolution spatiale de l'image.

Autrement dit, bien que le rééchantillonnage offre une flexibilité dans le redimensionnement des pixels, il entraîne une perte inévitable de détails et de précision spatiale. Les algorithmes utilisés collectent et moyennent les informations de rayonnement réfléchi sur une surface plus large, ce qui atténue la netteté et la définition initiales de l'image satellitaire.

Le processus de rééchantillonnage des images constitue une technique intéressante de manipulation visuelle. Lorsque des images sont redimensionnées pour être visualisées sur différents supports, qu'il s'agisse de supports papier ou numériques, une transformation subtile de leur structure pixellaire intervient.

Cette transformation produit un effet visuel particulier : l'image semble gagner en netteté et en définition. En réduisant la taille des pixels, certaines caractéristiques originelles sont estompées, ce qui rapproche l'image d'une représentation plus proche des photographies aériennes. Cependant, cette amélioration est purement perceptive et non substantielle.

Il est crucial de comprendre que ce processus ne représente qu'une augmentation apparente de la résolution spatiale. La résolution réelle demeure intrinsèquement liée à la taille des pixels originaux. Dans la majorité des cas, le rééchantillonnage conduit même à une résolution inférieure à celle de l'image initiale, malgré l'impression visuelle de netteté accrue.

## **7.2 CORRECTION RADIOMETRIQUE DES IMAGES SATELLITES**

La correction radiométrique est un processus essentiel dans le traitement des images satellitaires qui vise à standardiser les mesures de radiance. Les mesures brutes sont initialement influencées par deux facteurs principaux : les caractéristiques intrinsèques du capteur et les conditions environnementales lors de l'acquisition de l'image.

L'objectif principal de cette correction radiométrique est de garantir une comparaison précise et fiable des données d'imagerie, en éliminant les variations instrumentales et contextuelles qui pourraient fausser l'interprétation des résultats.

### 7.2.1 PRINCIPES DE LA CORRECTION

Lorsque l'objectif est de comparer des images provenant de différents capteurs ou de réaliser un suivi temporel des changements, une normalisation est indispensable. La méthode standard consiste à convertir les nombres numériques (DN) - généralement compris dans une plage de 0 à 255 - en valeurs absolues de radiance.

#### **Méthode de transformation**

La transformation repose sur une relation linéaire entre la réponse du capteur et la radiance spectrale absolue. Cette conversion s'appuie sur la sensibilité spécifique du capteur pour une bande de longueur d'onde donnée. Les informations techniques nécessaires à cette correction sont généralement fournies par les organisations responsables de la distribution des images satellitaires.

#### **1. Correction des Conditions Atmosphériques**

La correction des conditions atmosphériques est un processus crucial lors du traitement de scènes satellitaires. La présence de brume nécessite une attention particulière, avec des méthodes spécifiques pour compenser son influence. Une approche courante consiste à utiliser des **Ground Control Points (GCP)** dont la réflectance est nulle, comme l'eau dans les bandes du proche infrarouge. En soustrayant les réflexions atmosphériques enregistrées au-dessus de l'eau, on peut obtenir une correction partielle.

**2. Limites de la Correction Atmosphérique :** Cependant, cette méthode présente des limitations significatives. L'hypothèse d'une répartition uniforme de la brume sur la scène est souvent inexacte. Pour des études nécessitant une précision absolue, une approche plus complexe est requise. Celle-ci implique la transformation des valeurs numériques (DN) en radiance absolue, nécessitant des mesures radiométriques précises au sol simultanément au passage du satellite.

**3. Influence de la Topographie :** La topographie joue un rôle important dans l'enregistrement satellitaire. L'angle d'incidence solaire et l'orientation des surfaces modifient significativement la réflexion captée. Un même objet peut apparaître différemment selon sa position topographique. Des **corrections radiométriques** sont donc essentielles pour normaliser la radiance en fonction d'angles d'incidence et de réflexion prédéterminés.

**4. Problématique du Bruit :** Le bruit représente un signal indésirable dans l'acquisition d'images satellitaires. Il peut provenir de diverses sources : dysfonctionnements du capteur, interférences électroniques entre composants, ou problèmes de transmission et de stockage des données. Ces perturbations peuvent altérer significativement la qualité et la précision des images satellitaires, nécessitant des techniques de filtrage et de correction sophistiquées.

Lors de la transmission ou du stockage de données, les sources systématiques sont généralement bien connues et les corrections sont appliquées automatiquement avant que les clients n'y accèdent. Dans de nombreuses applications, des corrections précises ne sont pas toujours indispensables. Bien que la cartographie puisse être améliorée par des corrections, celles-ci ne deviennent vraiment nécessaires que lors de l'étude de changements temporels ou spatiaux impliquant plusieurs images de capteurs.

Des corrections radiométriques de base peuvent être demandées lors de la commande de données satellitaires. L'étirement du contraste représente une méthode fréquente d'amélioration des images, particulièrement pour les interprétations manuelles sur support papier. Ce processus s'apparente aux manipulations de contraste traditionnellement utilisées en photographie.

Les images des capteurs satellitaires possèdent normalement une capacité d'enregistrement de 256 nuances de gris, où 0 représente le noir et 255 le blanc. Cependant, une scène typique ne couvre généralement pas la totalité de cette gamme. Par exemple, une scène normale peut présenter des niveaux de réflexion variant entre 60 et 180, laissant ainsi certaines plages de valeurs inoccupées.

L'objectif de l'étirement du contraste est d'exploiter la totalité de la gamme des niveaux de gris. Dans sa forme linéaire la plus simple, la valeur la plus faible de la scène est assignée à zéro et la valeur la plus élevée à 255. Les valeurs intermédiaires sont réparties uniformément, créant ainsi un espacement plus significatif entre les valeurs de pixels par rapport à l'image originale.

Il existe de nombreuses techniques d'amélioration d'images, allant d'algorithmes complexes à des méthodes simples de réorganisation des données. Chaque technique vise à produire des images optimisées pour des applications spécifiques, bien qu'un examen exhaustif de ces méthodes dépasse le cadre du présent document.

## **8. STOCKAGE ET TRAITEMENT DES IMAGES MULTISPECTRALES**

Les systèmes de photographie numérique et de capteurs satellites produisent des fichiers de données dont le format a évolué au fil du temps. Initialement très variables, ces formats ont progressivement été normalisés, avec l'émergence du format TIFF comme standard, notamment sous sa version géoréférencée GEO-TIFF après correction géométrique.

### **8.1 DEFIS DE VISUALISATION DES DONNEES MULTISPECTRALES**

Les capteurs multispectraux génèrent des images contenant au moins quatre bandes spectrales, ce qui pose un défi technique majeur. Les systèmes informatiques traditionnels ne sont conçus que pour afficher trois canaux de couleur, rendant impossible la représentation directe de toutes les données.

#### **8.1. La technique des fausses couleurs (FCC)**

Pour résoudre cette limitation, les experts ont développé la technique des fausses couleurs (FCC). Cette méthode réaffecte astucieusement les bandes spectrales :

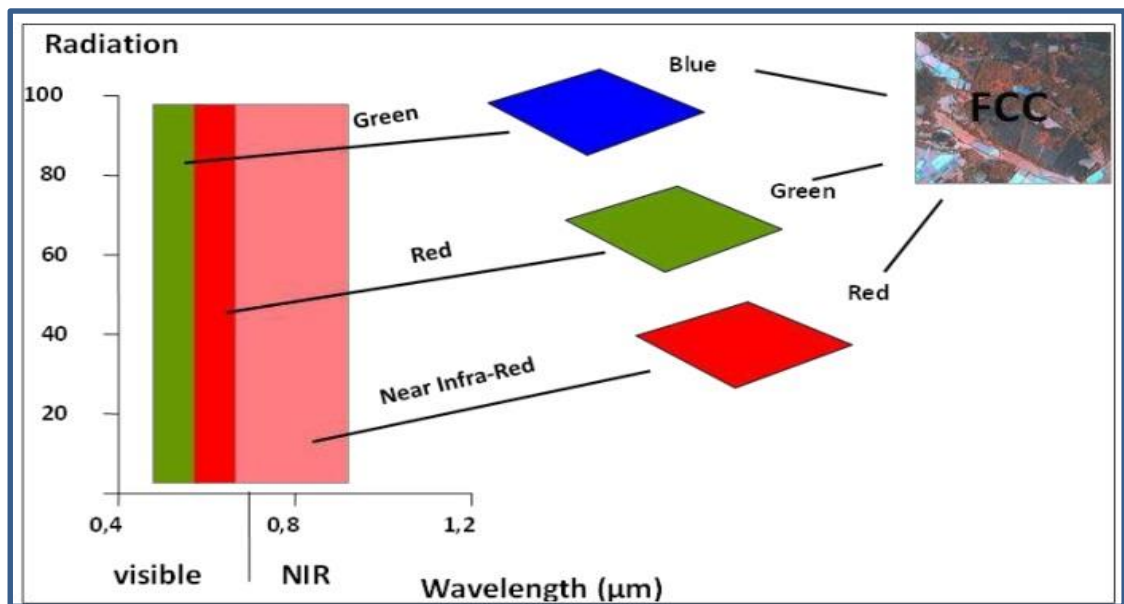
- ✓ Le rayonnement vert est associé au bleu
- ✓ Le rayonnement rouge est associé au vert
- ✓ Le rayonnement proche infrarouge est associé au rouge

Cette approche permet de visualiser des informations spectrales normalement invisibles, bien que l'image résultante puisse sembler contre-intuitive. Par exemple, des roches schisteuses apparaîtront bleues, tandis que la végétation sera représentée en rouge.

#### **Évolution de l'interprétation des images**

L'interprétation des images satellites a connu une transformation significative. Initialement surestimées, ces technologies ont d'abord privilégié l'interprétation manuelle, puis ont basculé vers un traitement numérique automatique. Aujourd'hui, une approche hybride est préférée : un traitement informatique préliminaire suivi d'une interprétation manuelle fine.

Les logiciels de classification informatique progressent constamment, devenant particulièrement performants avec les données hyperspectrales comportant plus de 100 bandes. Néanmoins, cette expertise reste encore l'apanage d'une communauté d'utilisateurs spécialisés.



**Figure 12 :** Les enregistrements des rayonnements dans les parties verte, rouge et proche infrarouge du spectre sont reproduits en bleu, vert et rouge lorsqu'ils sont imprimés ou affichés sur un écran d'ordinateur. La coloration des objets connus sera différente de ce que nous voyons normalement - un exemple est la végétation qui est reproduite en rouge, car la réflexion de la végétation saine est importante dans la bande de rayonnement proche infrarouge

## 8.2 TRAITEMENT NUMERIQUE DES DONNEES : EFFICACITE ET APPLICATIONS

Le traitement numérique des données informatiques représente aujourd'hui un outil technologique puissant et polyvalent. Les ordinateurs offrent désormais des capacités remarquables pour le traitement d'images, permettant des opérations complexes telles que la correction géométrique, radiométrique et l'analyse comparative entre différentes bandes spectrales.

L'évolution technologique a considérablement simplifié l'accès aux systèmes de traitement d'images. Un utilisateur disposant de compétences techniques peut désormais réaliser des manipulations et des corrections précises, optimisant ainsi l'analyse des données. La combinaison de données issues de sources multiples devient possible grâce aux technologies numériques, enrichissant significativement les résultats d'interprétation.

Un atout majeur réside dans l'utilisation de données multispectrales enregistrées sur plusieurs bandes de longueur d'onde. Les objets naturels présentent des propriétés de réflexion variables selon le spectre, permettant leur identification et différenciation par des traitements spécifiques. Les concepteurs de satellites ont intégré cette complexité dans la conception des capteurs modernes.

A titre d'exemple, la cartographie de la végétation illustre parfaitement ces capacités technologiques. Traditionnellement complexe en raison des similitudes spectrales, cette analyse a été révolutionnée par le traitement numérique. L'indice de densité normalisé de la végétation (NDVI)

permet désormais de mettre en évidence la biomasse verte en combinant les réflexions dans les bandes infrarouge et rouge, une manipulation impossible avec des données photographiques classiques.

### **8.3 INTERPRETATION MANUELLE DES IMAGES**

L'interprétation des images présente des caractéristiques uniques qui distinguent l'intervention humaine des méthodes automatisées. Les interprètes humains possèdent un avantage significatif dans l'identification des motifs et des objets, grâce à leur capacité cognitive complexe de reconnaissance visuelle. Cependant, cette approche n'est pas exempte de limites, notamment la subjectivité inhérente qui peut influencer l'analyse.

Pour minimiser les biais interprétatifs, notamment lors de comparaisons temporelles, les experts recommandent l'utilisation de mesures physiques objectives. Cette stratégie permet de réduire l'impact des variations subjectives et de garantir une analyse plus précise.

Les Fausses Couleurs Composites(FCC) se distinguent fondamentalement des photographies aériennes traditionnelles. Contrairement à la photographie standard qui reproduit une réflexion moyenne sur un large spectre, les FCC sont composées de trois bandes de longueurs d'onde distinctes : verte, rouge et infrarouge.

La représentation chromatique des FCC est particulièrement intéressante :

- ✓ Le rayonnement vert est associé à la couleur bleue
- ✓ Le rayonnement rouge correspond à la couleur verte
- ✓ Le rayonnement proche infrarouge est traduit par la couleur rouge

Cette configuration permet de générer une image similaire à une photographie couleur infrarouge, avec une caractéristique remarquable : la végétation apparaît en rouge, sa saturation augmentant proportionnellement à la densité de couverture végétale.

## **9. EXEMPLES DE SATELLITES**

### **9.1 LES SATELLITES LANDSAT : PIONNIERS DE LA TELEDETECTION SPATIALE**

La série de satellites LANDSAT représente une avancée majeure dans le domaine de l'observation de la Terre depuis l'espace. Développée par les États-Unis, cette famille de satellites a révolutionné la collecte de données géographiques grâce à des technologies innovantes.

Le système LANDSAT se distingue par son mécanisme unique de capture d'images, utilisant un miroir à balayage qui permet d'enregistrer des données avec une grande précision. Lancé en 1972, ce premier satellite marquait le début d'une nouvelle ère dans l'observation satellitaire à haute résolution.

La première génération de satellites LANDSAT, équipée de capteurs MSS (Multi Spectral Scanning), présentait des capacités techniques remarquables pour l'époque. Ces capteurs étaient capables d'enregistrer le rayonnement dans quatre bandes de longueur d'onde différentes, avec une résolution géométrique de 80 x 80 mètres. Cette performance technique a ouvert la voie à de nombreuses applications dans les domaines de la cartographie, de la géologie et de l'environnement.

La deuxième génération de satellites LANDSAT, devenue opérationnelle en 1984, représente une avancée significative dans la télédétection spatiale. Cette génération introduit deux capteurs principaux : le MSS et le Thematic Mapper (TM), qui offre une amélioration notable de la résolution radiométrique. Le capteur TM enregistre le rayonnement dans sept bandes spectrales et propose une résolution spatiale plus précise, avec des pixels de 30 x 30 mètres. Chaque scène LANDSAT couvre une zone de 185 x 185 km au sol.

Lancé en 1972, le programme LANDSAT constitue le plus long programme continu d'enregistrement de données terrestres. La version actuelle, Landsat 7, équipé de l'ETM+ (Enhanced Thematic Mapper), a été mise en orbite en 1999 et permet de générer des images avec une résolution de 15 mètres. La NASA prévoit la mission de continuité des données Landsat (LDCM), programmée pour fin 2012, qui conservera des caractéristiques similaires à son prédécesseur.

La future mission LDCM apportera plusieurs améliorations techniques. Elle maintiendra une résolution géométrique maximale de 15 mètres, avec une résolution thermique de 100 mètres. Le système élargira la couverture radiométrique et ajoutera de nouveaux canaux pour diversifier ses applications, notamment dans les domaines terrestres et marins. La résolution temporelle, constante pour la famille Landsat, reste de 15 jours entre deux images séquentielles.

## **9.2 SATELLITES SPOT**

La famille de satellites SPOT, lancée en 1986, représente une avancée significative dans la technologie des capteurs de télédétection. Ces satellites sont équipés d'un système de capteurs innovant appelé High Resolution Visible (HRV), qui offre des capacités d'imagerie remarquables.

Les satellites SPOT se distinguent par leur configuration unique de deux capteurs parallèles capables de fonctionner selon deux modes d'acquisition différents. En mode panchromatique, les pixels atteignent une résolution au sol de 10 x 10 mètres, tandis que le mode multispectral propose des pixels de 20 x 20 mètres. Cette flexibilité permet une capture d'image précise et détaillée.

Un aspect remarquable des capteurs HRV est leur mobilité. Ils peuvent enregistrer des données de manière verticale et oblique, offrant une résolution temporelle de 15 jours. La possibilité de capturer des images obliques permet des enregistrements fréquents d'une même zone et la création de paires stéréoscopiques.

L'innovation de SPOT s'étend à la cartographie topographique. Les images satellites peuvent désormais être utilisées avec les mêmes instruments que la photogrammétrie aérienne. Récemment, le processus de cartographie a été encore amélioré grâce à des logiciels spécialisés de traitement des données numériques satellitaires.

Bien que les satellites SPOT offrent des performances remarquables, il est reconnu que les données de LANDSAT présentent une résolution radiométrique souvent supérieure, ce qui peut être crucial dans certaines applications de télédétection.



**Figure 13** : À gauche, une image LANDSAT 7 de Philadelphie, États-Unis, d'une résolution de 15 m, et à droite, une image SPOT 5 à haute résolution de 2,5 m de l'aéroport de Tripoli, Libye.

### 9.3 AUTRES SATELLITES

ASTER est un satellite japonais polyvalent lancé en 1999, capable d'enregistrer 14 bandes spectrales du visible à l'infrarouge thermique. Sa résolution au sol varie entre 15 et 90 mètres selon les bandes, avec une capacité de revisite de 16 jours et des possibilités d'imagerie stéréoscopique.

IKONOS, également lancé en 1999, offre une haute résolution avec des pixels de 1 mètre en mode panchromatique et 4 mètres en mode multispectral. Il couvre les bandes bleue, verte, rouge et infrarouge, et permet la création de cartes topographiques précises avec une fréquence de revisite de 3 à 5 jours.

GeoEye 1, considéré comme le plus performant en 2008, propose une résolution exceptionnelle de 0,4 mètre en panchromatique et 1,6 mètre en multispectral. Il enregistre les données spectrales classiques et dispose de capacités stéréoscopiques avec une période de revisite de 2 à 8 jours.

QuickBird, lancé en 2001, capture des données dans les bandes bleue, verte, rouge et proche infrarouge. Sa résolution atteint 0,6 mètre en panchromatique et 2,5-3 mètres en multispectral, avec un retour sur une même zone tous les 3,5 jours.

World View 2, mis en orbite en 2009, représente une avancée significative avec 8 bandes multispectrales, dont 4 standards et 4 nouvelles (bord rouge, côtier, jaune, proche infrarouge 2). Sa résolution de 0,5 mètre lui permet de collecter des données sur 1 million de kilomètres carrés quotidiennement, avec une période de retour d'environ 3 jours.



**Figure 14** : À gauche, une image IKONOS de la capitale nigériane Abuja, à droite une image Worldview 2 de Bangkok, Thaïlande, résolution de 0,5 m.

#### **9.4 PERSPECTIVES FUTURES**

Les futurs satellites s'orienteront vers des résolutions radiométriques plus précises. L'augmentation de la résolution géométrique atteint déjà le niveau des photographies aériennes, laissant présager un remplacement progressif des systèmes aéroportés.

Les avantages des instruments spatiaux sont multiples : coûts relativement moins élevés, production continue de données et capacité à distinguer des objets similaires grâce à des bandes spectrales de plus en plus fines. Il est probable que les données satellitaires deviennent la source principale pour les inventaires et projets cartographiques à l'avenir.

## **10. CLASSIFICATION DES IMAGES MULTISPECTRALES (ENVI et Qgis)**

### **10.1 PRISE EN MAIN DU LOGICIEL ENVI**

Les professionnels des SIG reconnaissent aujourd'hui que l'imagerie est un élément crucial pour comprendre les dynamiques mondiales et environnementales. La disponibilité et la puissance des images ne cessent de croître, offrant des perspectives de plus en plus riches et détaillées. L'orthophotographie numérique et l'imagerie satellitaire haute résolution sont désormais des sources d'information incontournables, dont la fidélité spatiale et spectrale s'améliore constamment.

L'une des applications primordiales de l'imagerie est la collecte et la mise à jour des données géographiques. Les professionnels utilisent des orthophotos et des images satellites pour numériser précisément des éléments tels que les routes, les zones d'occupation des sols, les empreintes de bâtiments et les infrastructures. Des méthodes automatisées permettent désormais de réduire considérablement les tâches fastidieuses de numérisation.

Au-delà de la cartographie, l'imagerie permet des analyses spectrales avancées. Les professionnels peuvent désormais :

- Cartographier l'utilisation des sols
- Mesurer et surveiller les conditions environnementales
- Évaluer l'état des infrastructures
- Identifier des matériaux de construction
- Détecter des changements temporels

Ces analyses sont essentielles pour les modèles d'aménagement du territoire, les études d'impact environnemental et la communication avec les parties prenantes. Le logiciel ENVI représente une avancée significative dans le traitement des images géographiques. Sa version 5.1 propose des outils performants pour :

- La détection de changements
- La classification d'images
- L'orthorectification
- L'extraction d'objets

Ces fonctionnalités permettent une intégration fluide des données d'imagerie dans les systèmes SIG, facilitant l'analyse et la compréhension des dynamiques spatiales.

## **10.2 ACCES AUX DONNEES GEOGRAPHIQUES ET SUPPORT DES BASES DE DONNEES**

ENVI est un logiciel polyvalent capable de traiter une large gamme de données géographiques. Il supporte de nombreux types d'images provenant de différents capteurs, notamment des images panchromatiques, multispectrales, hyperspectrales, radar, thermiques, LiDAR, et bien d'autres. Sa flexibilité se manifeste par sa capacité à lire plus de 70 formats de données différents, incluant HDF, GeoTIFF, JPEG et JPEG2000.

L'un des points forts d'ENVI réside dans ses fonctionnalités d'entreprise qui facilitent l'accès aux images. Les utilisateurs peuvent rapidement récupérer des données à partir de serveurs conformes aux normes OGC et JPIP, que ce soit au sein d'une organisation ou sur Internet. Cette connectivité est cruciale à l'ère où les entreprises et organisations centralisent leurs données images sur des serveurs dédiés.

Le logiciel ENVI offre une intégration remarquable avec différents systèmes de gestion de données géographiques. Il permet notamment :

- L'accès aux fichiers depuis et vers la géodatabase ArcGIS
- La prise en charge des géodatabases personnelles, de fichiers et d'entreprise
- L'ouverture, l'analyse et la sauvegarde de données directement dans ces bases
- Standards OGC et services de cartographie

Le logiciel supporte deux standards essentiels de l'Open Geospatial Consortium :

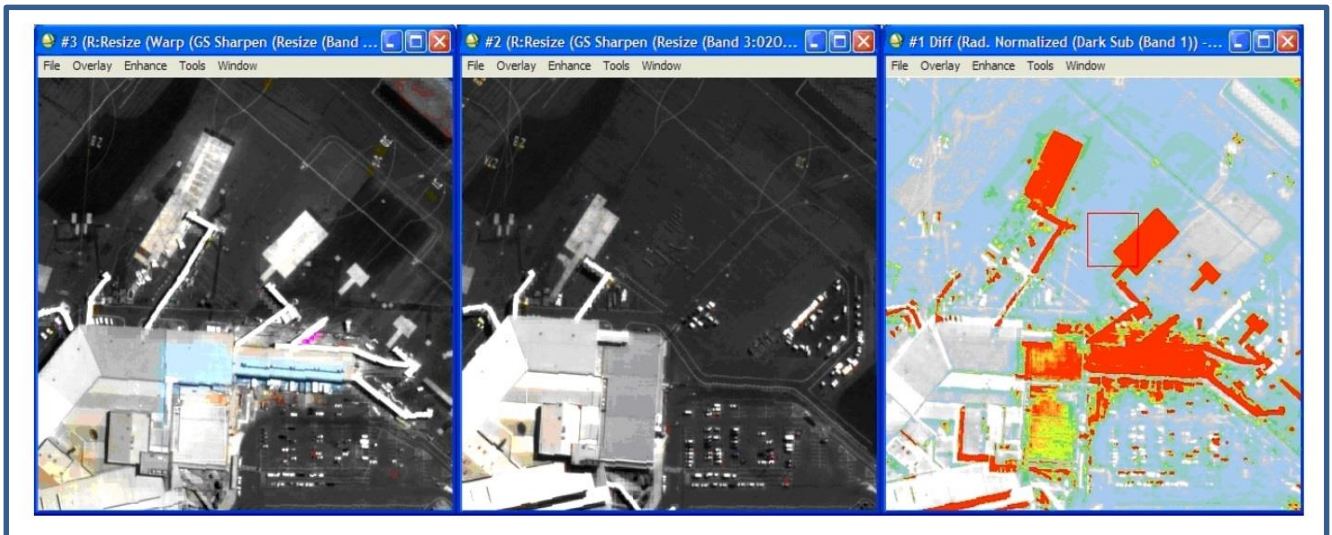
- Web Map Service (WMS) : Un protocole permettant de générer et combiner dynamiquement des cartes pour l'affichage.
- Web Coverage Service (WCS) : Un protocole spécialisé dans la fourniture de données matricielles géographiques, facilitant les analyses quantitatives.

## **10.3 DETECTION DES CHANGEMENTS**

L'analyse de détection des changements s'appuie sur un large éventail de méthodes visant à identifier, décrire et quantifier les différences entre des images prises à différents moments et dans des conditions variées. Les utilisateurs peuvent recourir à divers outils ENVI, soit individuellement, soit en combinaison, pour mener à bien ce type d'analyse.

Dans le cadre d'une étude de détection des changements, deux approches principales sont distinguées : les changements absolus et les changements relatifs. La détection des changements absolus met en lumière ce qui a changé, par exemple lorsqu'une zone forestière est convertie en

prairie. En revanche, la détection des changements relatifs indique qu'une modification a eu lieu sans préciser sa nature exacte. ENVI propose une gamme étendue de méthodes adaptées à différents types d'analyses. L'utilisateur peut ainsi sélectionner la méthode la plus appropriée pour répondre

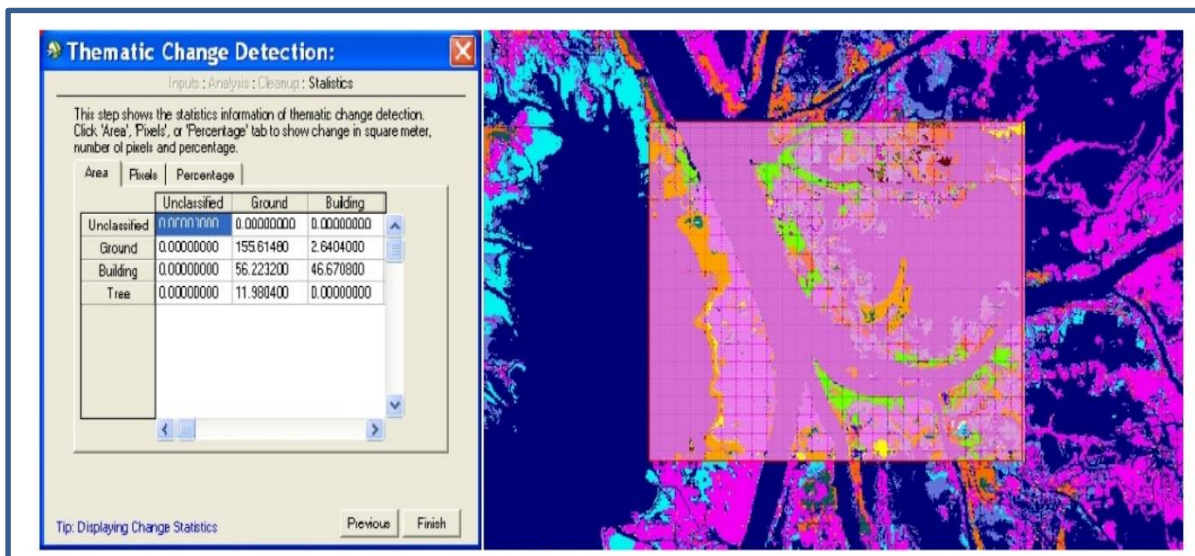


**Figure 15** : Détection des changements de rapport d'image : L'image de gauche montre l'"état initial" ou la scène "avant", et l'image du milieu montre l'"état final" ou la scène "après". L'image de droite montre un résultat de détection de changement de rapport d'image, avec les zones de construction de nouveaux bâtiments les plus modifiées en rouge.

### 10.3.1 CHANGEMENT THEMATIQUE

Le processus de détection des changements thématiques repose sur plusieurs étapes. Tout d'abord, une classification individuelle est réalisée pour chaque image concernée. Une fois cette étape terminée, une détection soustractive des changements est appliquée en comparant les deux images issues de la classification.

Le résultat obtenu est une image illustrant les changements thématiques, qui met en évidence les transitions d'une classe à une autre. Cette approche permet de mieux comprendre l'évolution des régions classifiées au fil du temps, comme illustré dans la figure ci-dessous.



**Figure 16** : la détection des changements thématiques opère sur les images de classification, en soustrayant la classification du temps 1 de la classification du temps 2.

#### 10. 4 CLASSIFICATION DES IMAGES

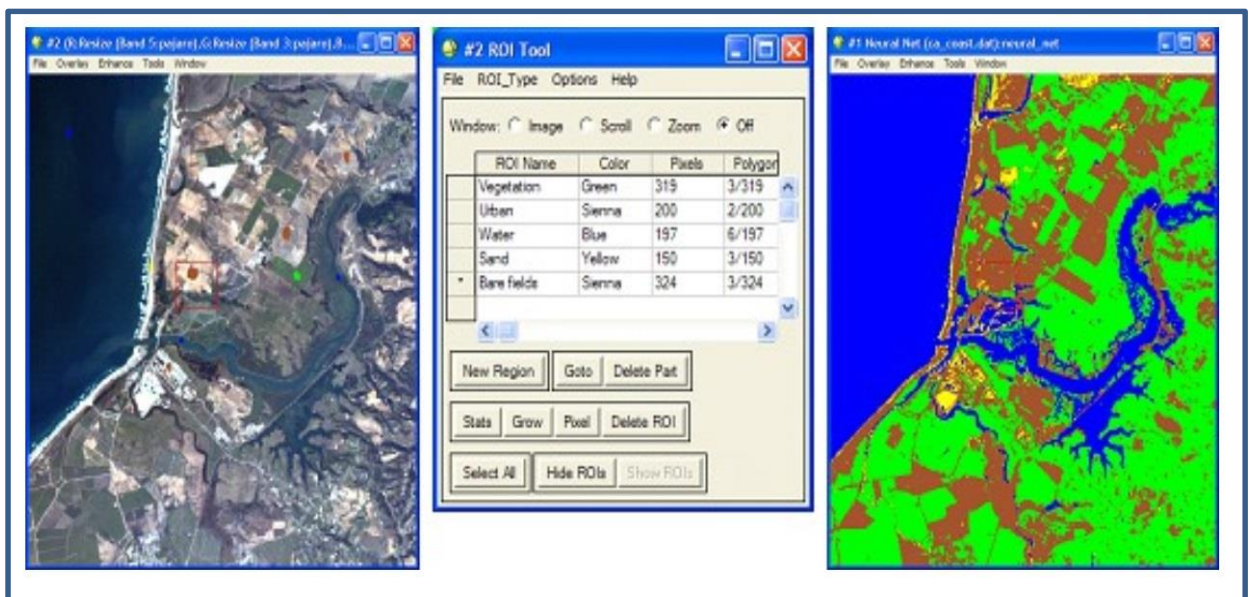
La classification des images dans ENVI offre une variété de méthodes pour traiter les données panchromatiques, multispectrales et hyperspectrales. Ces méthodes permettent de classer automatiquement les pixels d'une image en différentes classes spécifiques. Une fois classées, ces données peuvent être converties en couches vectorielles, compatibles avec divers formats vectoriels comme les shapefiles ou intégrées dans une géodatabase ArcGIS. Les images issues de la classification servent souvent de cartes de référence pour des applications telles que la détection des changements, le suivi des nouveaux développements ou encore la quantification des types d'occupation du sol.

L'objectif principal de la classification est d'identifier des groupes homogènes de pixels qui représentent différentes caractéristiques ou classes d'occupation du sol. Chaque pixel est affecté à une classe spécifique, comme l'eau, la forêt, les zones urbaines ou les champs agricoles. Cela permet de produire une carte thématique dérivée de l'image originale. ENVI propose deux approches principales pour la classification, selon que l'utilisateur dispose ou non de données d'entraînement :

- ❖ **Classification supervisée** : L'utilisateur sélectionne des échantillons représentatifs appelés zones d'entraînement, correspondant aux différents types de couverture terrestre présents dans l'image. Ces zones servent à entraîner les algorithmes de classification pour reconnaître chaque classe dans l'espace multispectral ou hyperspectral. Une fois les zones d'entraînement définies, ENVI applique la classification à l'ensemble de l'image. Les méthodes de

classification supervisée disponibles dans ENVI incluent plusieurs techniques avancées, telles que :

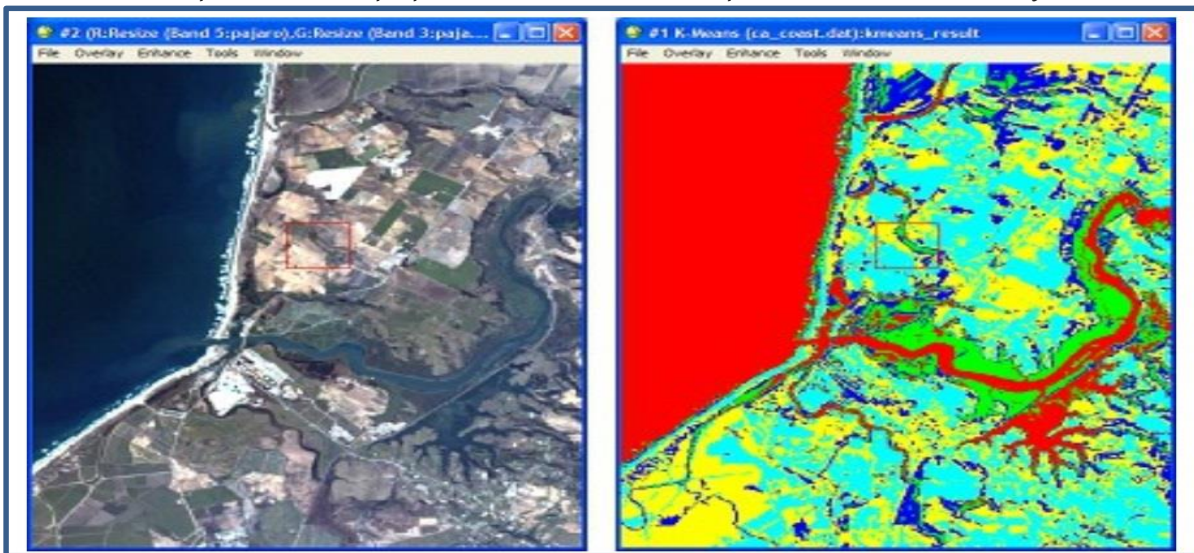
- Parallélépipède
- Distance Mahalanobis
- Maximum de vraisemblance
- Distance minimale
- Mapper d'angle spectral (SAM)
- Divergence d'information spectrale (SID)
- Machine à vecteurs de support (SVM)
- Encodage binaire
- Réseau neuronal
- Le gagnant rafle tout



**Figure 17 :** L'image d'entrée originale est présentée à l'extrême gauche. En utilisant l'outil de région d'intérêt (ROI) d'ENVI (au centre), l'utilisateur peut dessiner des zones représentatives sur l'image. Le résultat d'une carte de classification par réseau neuronal est présenté à droite.

- ❖ **Classification non supervisée :** Cette méthode repose sur une technique automatisée qui identifie des groupes naturels, ou clusters, en fonction de la luminosité des pixels sur plusieurs bandes spectrales. Contrairement à la classification supervisée, cette approche ne nécessite pas de classes prédéfinies. L'utilisateur doit ensuite interpréter et étiqueter les groupes identifiés par l'algorithme.

Les méthodes de classification non supervisées disponibles dans ENVI comprennent deux approches principales : **K-Means** et **ISODATA**. La méthode **K-Means** repose sur le regroupement des données en un nombre prédéfini de classes, en minimisant la variance au sein de chaque groupe. Elle nécessite que l'utilisateur spécifie le nombre de classes souhaitées, et l'algorithme répartit les pixels en fonction de leur similarité spectrale. Quant à la méthode **ISODATA** (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), elle est une version plus flexible et avancée. Contrairement à K-Means, ISODATA ajuste dynamiquement le nombre de classes en fusionnant ou divisant les groupes en fonction de critères prédéfinis, ce qui permet une meilleure adaptation aux données analysées.

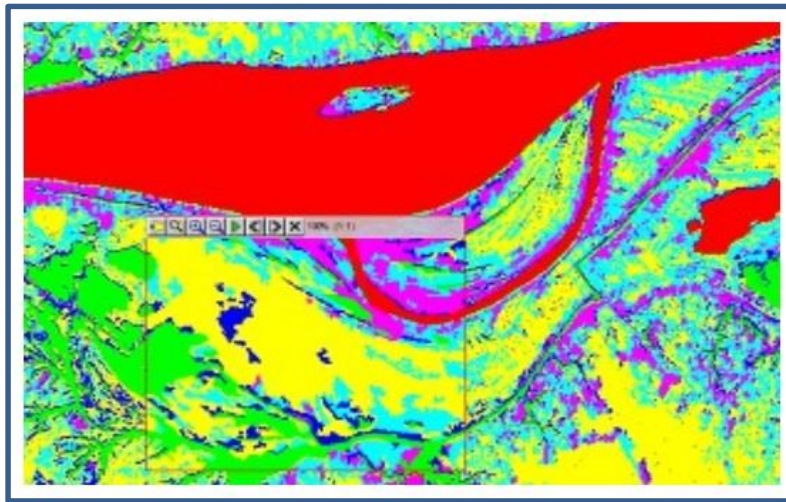


**Figure 18 :** L'image d'entrée est représentée à gauche et le résultat du K-Means est représenté à droite. La méthode de classification non supervisée effectue un regroupement automatique.

#### 10.4.1 NETTOYAGE APRES LA CLASSIFICATION

Après avoir réalisé une classification d'image, l'étape suivante dans le processus consiste à nettoyer les données obtenues. En effet, les résultats de la classification présentent souvent des pixels isolés appartenant à une classe, dispersés au sein d'une zone plus vaste correspondant à une autre classe. Ce nettoyage est essentiel, que ce soit pour préparer les données à une exportation vers un fichier vectoriel ou pour améliorer leur affichage visuel (comme illustré dans la figure 6).

Pour réduire ce type de désordre dans les résultats de classification, ENVI met à disposition plusieurs outils performants. Parmi eux, on retrouve le regroupement, le tamisage et l'analyse majoritaire. Ces techniques permettent de produire des résultats plus homogènes et lissés, ce qui facilite non seulement la visualisation dans les systèmes d'information géographique (SIG), mais aussi l'analyse spatiale.



**Figure 19** : l'exécution d'un filtre de nettoyage post-classification permet de lisser les résultats de la classification. Un filtre de nettoyage post-classification permet de lisser les résultats de la classification.

### 10.5 EXTRACTION DES CARACTERISTIQUES

L'extraction des caractéristiques représente un défi crucial dans le traitement des images géospatiales, nécessitant des méthodes efficaces et précises pour identifier et localiser des éléments spécifiques. Les méthodes traditionnelles de numérisation manuelle sont chronophages et peu pratiques, particulièrement lors du traitement de vastes zones. Face à ces limitations, le module ENVI Feature Extraction (ENVI Fx) propose une approche innovante basée sur les objets, spécialement conçue pour les images à haute résolution spatiale avec un contenu spectral restreint. Cette solution technologique permet aux professionnels des systèmes d'information géographique (SIG) d'automatiser l'extraction d'objets spatiaux, en réduisant significativement les processus manuels.

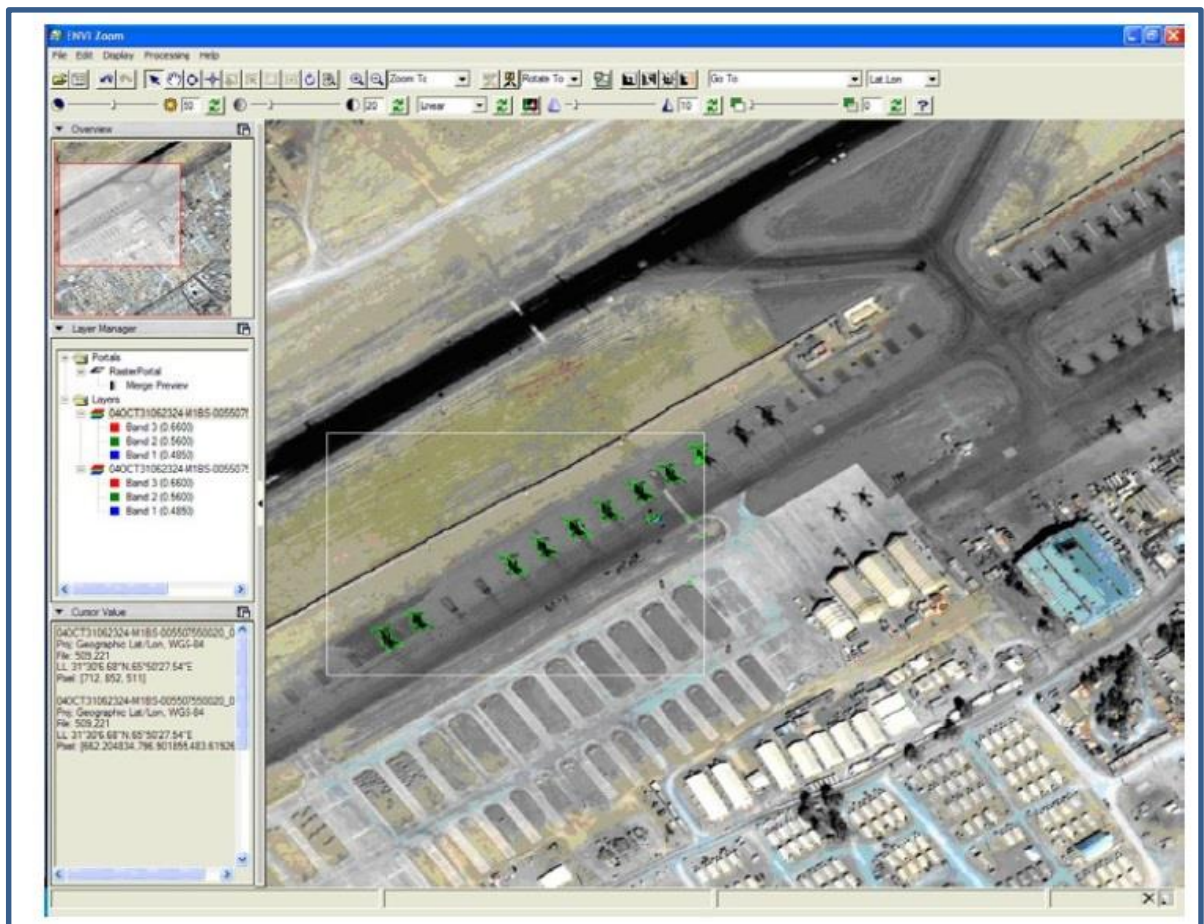
ENVI Fx se distingue par sa capacité à extraire une diversité remarquable de caractéristiques, incluant des éléments urbains et naturels tels que véhicules, bâtiments, routes, ponts, rivières, lacs et champs. Sa méthodologie repose sur une analyse multidimensionnelle combinant des critères spatiaux, spectraux et texturaux, et peut être enrichie par l'intégration de données d'élévation LiDAR pour optimiser la précision des résultats. Les principaux avantages d'ENVI Fx résident dans sa polyvalence et son efficacité : recherche et dénombrement de caractéristiques sur de grandes images, mise à jour automatique de couches vectorielles, classification d'images pour des rapports et analyses, et accélération substantielle des processus de numérisation traditionnels.

Le module d'extraction d'objets d'ENVI représente une avancée significative dans l'analyse d'images géospatiales, en proposant une approche novatrice basée sur l'identification et la définition d'objets. Cette méthode se distingue par sa capacité à fournir des résultats précis, même lorsque le nombre de bandes spectrales est limité. Dans le contexte actuel de l'imagerie haute résolution,

## Géomatique appliquée 2 : (Initiation à la Télédétection)

qu'elle soit panchromatique ou multispectrale, cette technique offre une flexibilité remarquable dans l'extraction de différents types d'objets.

Un élément particulièrement innovant de cet outil réside dans son portail de prévisualisation dynamique. Cette fonctionnalité permet aux utilisateurs de visualiser instantanément les résultats des ajustements de paramètres, avec la possibilité de redimensionner et déplacer la fenêtre sur l'image. Cette approche interactive garantit une localisation précise des éléments d'intérêt dans l'ensemble de la scène. De plus, une fois les paramètres optimaux définis, le processus peut être automatiquement reproduit sur une collection complète d'images, offrant ainsi un gain de temps et d'efficacité significatif pour les professionnels de l'analyse spatiale.



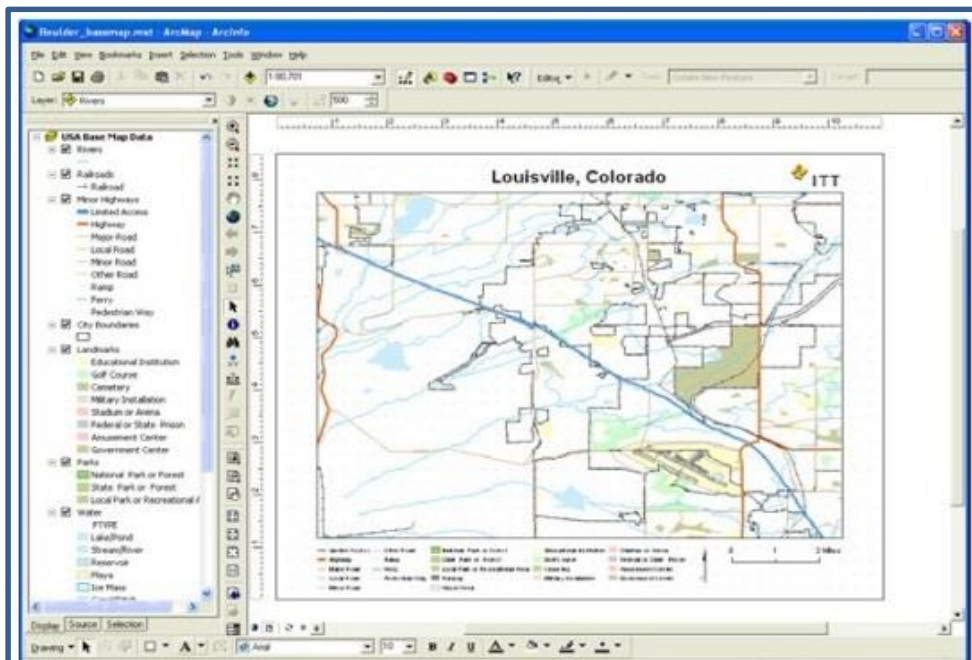
**Figure 20 :** Dans cette scène, les hélicoptères sur le tarmac sont facilement délimités puis extraits à l'aide d'ENVI Fx. Les résultats sous forme de fichiers de forme (shapefile) peuvent être utilisés pour une analyse plus poussée dans ENVI ou ArcGIS.

## 10.6 PARTAGE DES DONNEES

Le partage et l'interopérabilité des données sont au cœur des fonctionnalités d'ENVI, un logiciel SIG hautement intégratif. Sa conception permet une collaboration fluide entre utilisateurs, offrant de multiples options de partage et d'exportation de données géospatiales. Les images traitées peuvent être facilement converties dans des formats vectoriels et matriciels standards, facilitant la présentation et le travail collaboratif.

Un point fort d'ENVI réside dans son interaction native avec les géodatabases ArcGIS. Les utilisateurs bénéficient d'une interopérabilité complète, pouvant importer des données depuis différents types de géodatabases (personnelles, fichiers, entreprise), réaliser des analyses d'images, puis réexporter les résultats. Cette flexibilité s'étend à la possibilité de transférer directement des données vers ArcMap pour un affichage rapide.

La synergie entre ENVI et ArcMap se manifeste également par des capacités d'analyse partagée. Les fichiers de couches peuvent être ouverts et manipulés dans les deux environnements, permettant des traitements avancés comme l'extraction d'entités en utilisant des fichiers de couches comme délimitations. Ces fonctionnalités intégratives font d'ENVI un outil puissant pour les professionnels travaillant avec des données géospatiales complexes.



**Figure 21** : Fichiers de couches et données de la carte de base affichés dans ArcMap.

## Géomatique appliquée 2 : (Initiation à la Télédétection)

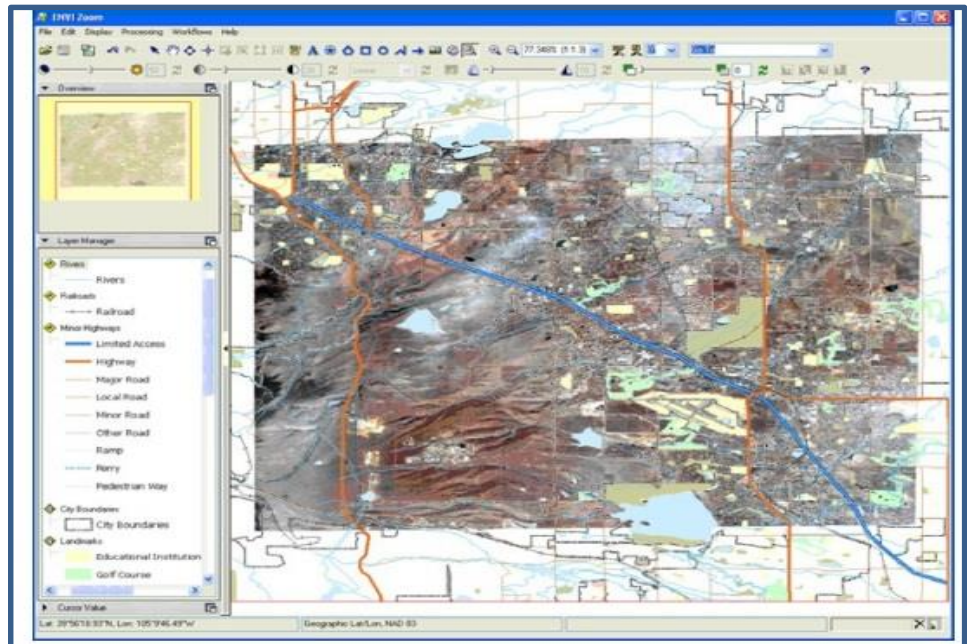


Figure 22 : Le même Les fichiers de couches affichés dans ArcMap peuvent être ouverts dans ENVI, en conservant les mêmes propriétés. Les fichiers de couches peuvent alors être utilisés dans le cadre d'options d'analyse d'images dans ENVI.

## **Conclusion :**

La télédétection spatiale est une discipline scientifique qui a connu une évolution remarquable depuis ses débuts. Son histoire reflète les progrès technologiques majeurs dans l'observation et l'analyse de notre planète.

Les origines de la télédétection remontent à 1839 avec l'apparition des premières photographies aériennes en France. L'utilisation des ballons pour la reconnaissance aérienne, notamment pendant les conflits militaires, a marqué les premiers pas de cette technologie. Les développements photographiques de la fin du XIXe siècle ont permis des innovations cruciales, comme l'appareil photo miniature de Julius Neubronner en 1903.

Les deux guerres mondiales ont joué un rôle catalyseur dans l'évolution de la télédétection. La photographie aérienne est devenue un outil stratégique essentiel, particulièrement pendant la Seconde Guerre mondiale où elle s'est révélée indispensable pour les opérations militaires. Cette période a vu l'émergence de techniques d'analyse territoriale sophistiquées.

### Révolution Satellitaire

Le lancement de Spoutnik I en 1957 marque un tournant historique dans l'histoire de la télédétection. Cette avancée a été suivie en 1972 par Landsat 1, premier satellite dédié à l'observation des ressources terrestres. Ces développements ont ouvert la voie à une nouvelle ère d'observation globale de notre planète.

Aujourd'hui, la télédétection s'appuie sur des technologies de pointe permettant une observation précise de la Terre. Les applications se sont diversifiées, couvrant des domaines comme la cartographie environnementale, la surveillance territoriale, la gestion urbaine et l'analyse des changements climatiques. L'intégration des images satellitaires dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) a révolutionné notre capacité à comprendre et gérer notre environnement.

**Quelques références bibliographiques**

- Chorwicz J. & Derouin J.P., La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique, Collection Géoscience, 20045. Un ouvrage qui présente l'état de l'art dans le domaine de la télédétection appliquée aux sciences de la Terre.
- Drury S.A., Images of the Earth: A Guide to Remote Sensing, Oxford Science Publications, Oxford, 19986.
- Egan W.G., Optical Remote Sensing: Science and Technology, Dekker, New York, 20046.
- McCloy K.R., Resource Management Information Systems: Remote Sensing, GIS and Modelling, Taylor & Francis, 20066.
- Robin M., La Télédétection. Des satellites aux systèmes d'information géographiques, Nathan, Paris, 1995.
- Wilmet J., Télédétection aérospatiale. Méthodes et applications, S.I.D.E.S., Fontenay-sous-Bois, 1996.
- J. B. Campbell, *Introduction to Remote Sensing*, Taylor & Francis, Londres, 1996
- S. A. Drury, *Images of the Earth : A Guide to Remote Sensing*, Oxford Science Publications, Oxford, 1998
- W. G. Egan, *Optical Remote Sensing : Science and Technology*, Dekker, New York, 2004
- M. C. Girard & C. M. Girard, *Traitement des données de Télédétection*, Dunod, Paris, 1999
- K. R. McCloy, *Resource Management Information Systems : Remote Sensing, GIS and Modelling*, Taylor & Francis, 2006
- M. Robin, *La Télédétection. Des satellites aux systèmes d'information géographiques*, Nathan, Paris, 1995