

UNIVERSITÉ DE TLEMCEM  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE  
L'UNIVERS  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS  
FILIERE : GEOLOGIE  
SPÉCIALITÉ : GE-RESSOURCES



# TELEDETECTION ET INTERPRETATION D'IMAGE

**Kamar Eddine BENSEFIA**  
Maître de conférence (classe B)

---

Cours destiné aux étudiants de  
Master 1 professionnel. Spécialité : Géo-ressources

Mai 2025

# Téledétection et interprétation d'image

Kamar Eddine BENSEFIA

Publié à Tlemcen, Algérie



# TABLE DES MATIERES

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	7
<b>Premier chapitre :</b>	
<b>PRESENTATION DE L'OUTIL TELEDETECTION</b>	
I. DEFINITION DE LA TELEDETECTION	8
II. OBJECTIFS DE LA TELEDETECTION	8
III. TECHNIQUES DE LA TELEDETECTION	9
IV. PROCESSUS ET DOMAINES D'APPLICATIONS	9
A. Processus	9
B. Domaines d'applications	10
V. NOTIONS DE CAPTEURS ET DE VECTEURS	11
<b>Deuxième chapitre :</b>	
<b>BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION</b>	
I. RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE	14
II. SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE	15
III. SIGNATURES SPECTRALES	17
IV. NOTION DE REFLECTANCE	19
A. Types de réflexion électromagnétique	19
B. Signature spectrale et interprétation radiométrique	20
C. Réflectance des minéraux	20
D. Réflectance des roches	21
1. Influence de la composition minéralogique	23
2. Altération des surfaces rocheuses	23
3. Réponse spectrale dans l'infrarouge thermique	23
4. Cas des milieux urbains	24
V. DETECTION PASSIVE ET ACTIVE	25

<b>VI. IMAGE NUMERIQUE DE LA TELEDETECTION</b>	<b>26</b>
A. Résolution spatiale	26
B. Résolution spectrale	26
C. Résolution radiométrique	26
D. Résolution temporelle	26

### Troisième chapitre :

#### LES METHODES DE TRAITEMENT D'IMAGE

<b>I. SIGNIFICATION THEMATIQUE DES CANAUX</b>	<b>27</b>
<b>II. TRAITEMENTS DES DONNEES</b>	<b>27</b>
A. Les prétraitements	28
1. Correction géométrique	28
2. Correction radiométrique	29
B. Les traitements d'amélioration	30
1. Composition colorée (Trichromie)	30
2. Analyse en composante principale classique (amélioration du contraste)	32
C. Les traitements spécifiques	32
1. Analyse en composante principale sélective	32
2. Rapports des bandes	35
3. Filtrage numérique des images	37
4. Conversion RVB en ITS (Intensité, Teinte, Saturation)	38
5. Classification	39
D. Interprétation des images	40
<b>III. CONCEPTS DE LA PHOTO-INTERPRETATION ET ELEMENTS DE LA PHYSIQUE DE LA COULEUR</b>	<b>41</b>
A. La couleur en télédétection	41
1. Base physique de la couleur	41
2. Modèles de représentation des couleurs	42
3. Valeur analytique et opérationnelle	42
B. La trichromie et reproduction polychrome	43
1. Synthèse additive (RVB)	43
2. Synthèse soustractive (CMJN)	44

### Quatrième chapitre:

#### LES DIFFERENTES METHODES D'ANALYSES

<b>I. LES PRINCIPES DE LA PHOTO-INTERPRETATION</b>	<b>45</b>
A. La photo-identification	45
B. La photo-interprétation globale	45
C. La photo-interprétation analytique	45

II. LES CRITERES D'ANALYSE EN PHOTO-INTERPRETATION	46
A. Couleur et tonalité	46
B. Morphologie	46
C. Structure et texture	46
III. FONDEMENTS DE L'INTERPRETATION DES DONNEES	46
CONCLUSION	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50
LISTE DES FIGURES	52
LISTE DES TABLEAUX	53

# AVANT-PROPOS

Dans un contexte marqué par l'évolution rapide des technologies spatiales et numériques, la télédétection s'impose aujourd'hui comme un outil incontournable pour l'observation, l'analyse et la compréhension de notre planète. En géosciences, elle offre une perspective unique sur les phénomènes naturels, permettant une lecture globale et détaillée des paysages, des structures géologiques et des dynamiques environnementales.

Ce polycopié destiné aux étudiants inscrits en Master 1 professionnel. Spécialité : Géo-ressources, a pour ambition de fournir aux étudiants, une introduction structurée et méthodique à la télédétection et à l'interprétation d'images. Il ne s'agit pas seulement de présenter les fondements techniques et scientifiques de la discipline, mais aussi d'en montrer les applications concrètes à travers des exemples, des méthodes de traitement, et des outils d'analyse pertinents.

L'interprétation d'images satellitaires constitue une étape centrale et parfois complexe du processus. Elle mobilise des compétences variées allant de la physique de la lumière à l'analyse spatiale, en passant par la reconnaissance de formes géologiques et géomorphologiques. Cette démarche analytique, qui conjugue rigueur scientifique et intuition géologique, est au cœur de ce document.

Ce support pédagogique a été conçu pour accompagner l'étudiant dans l'acquisition de compétences pratiques, tout en développant une réflexion critique sur les données et leur traitement. Il vise également à sensibiliser aux limites, aux biais et aux perspectives offertes par la télédétection dans les Sciences de la Terre.

Que ce document puisse servir de guide, de référence et de tremplin vers des études et des projets plus approfondis dans ce domaine passionnant, en constante évolution.

# INTRODUCTION

Le présent polycopié est organisé en quatre (04) chapitres avec une introduction. Ces chapitres amplement référenciés sont étoffés par une conclusion générale.

-le premier chapitre réservé à la présentation de l'outil de télédétection,

-le deuxième chapitre est consacré essentiellement aux bases physiques de la télédétection,

-le troisième chapitre a pour objectif d'appréhender les méthodes de traitement d'image,

-enfin le quatrième chapitre qui constitue l'ossature de ce polycopié, correspond aux concepts de la photo-interprétation et quelques notions sur la physique des couleurs d'une part, et vise les différentes méthodes d'analyse d'autre part.

## Premier chapitre :

# PRESENTATION DE L'OUTIL TELEDETECTION

## I. DEFINITION DE LA TELEDETECTION

Les éléments constitutifs de l'écorce terrestre absorbent, réfléchissent ou émettent une quantité d'énergie qui varie en fonction de la longueur d'onde, de l'intensité du rayonnement incident, des propriétés d'absorption des objets, ainsi que de leur position par rapport à une source d'illumination (Scanvic, 1983).

Dans ce contexte, la télédétection est définie comme une discipline ayant pour objet l'exploitation des informations véhiculées par les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par la surface de la Terre ou celle d'autres planètes et captés à distance par des instruments embarqués sur des plateformes aéroportées ou spatiales (Chorowicz, 1980). Elle englobe l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour l'observation, l'analyse et l'interprétation des images obtenues à l'aide de dispositifs situés sur des plateformes aériennes, spatiales, terrestres ou maritimes (ASP, 1983 ; Bariou, 1985 ; Campbell et Wynne, 2011).

Par ailleurs, la télédétection intègre les avancées les plus récentes en matière de recherche spatiale, de physique et d'informatique. Elle constitue aujourd'hui l'un des outils les plus puissants et les plus polyvalents pour l'exploration, la surveillance et la gestion des géo-ressources.

## II. OBJECTIFS DE LA TELEDETECTION

Les objectifs de la télédétection varient en fonction des domaines d'étude et des applications visées. Ils peuvent être regroupés en plusieurs grandes catégories :

-Maîtrise des méthodes et techniques de traitement d'image : Comprendre et appliquer les différentes méthodes de traitement, d'analyse et de photo-interprétation spécifiques aux images issues de la télédétection.

-Assimiler et maîtriser les nouvelles techniques de cartographie et de recherche fondées sur la géo-imagerie.

-Observation et cartographie à grande échelle : Fournir une observation spatiale continue, homogène et à grande échelle de l'environnement terrestre. Contribuer à la surveillance des milieux naturels, à la gestion durable des ressources naturelles et à l'aménagement du territoire.

-Détection et suivi des dynamiques environnementales : Détecter et suivre les changements environnementaux, qu'ils soient d'origine naturelle (érosion, inondation, déforestation, etc.) ou anthropique (urbanisation, pollution, exploitation minière, etc.), sur des échelles temporelles variées.

-Analyse et gestion des risques naturels : Fournir des outils performants pour l'analyse des risques naturels et la gestion des catastrophes majeures. Bénéficier de la rapidité d'acquisition des

données et de la capacité de couvrir de vastes territoires, y compris les zones inaccessibles ou dangereuses.

-Appui à la prise de décision : Mettre à disposition des outils d'aide à la décision pour les acteurs publics et privés dans des domaines variés : environnement, urbanisme, agriculture, géologie, etc.

-Extraction d'informations thématiques précises : Extraire des informations détaillées sur la nature et l'état des surfaces (composition minéralogique, couverture végétale, température, humidité, etc.). Offrir une valeur ajoutée significative pour l'inventaire, la prospection et la gestion des géo-ressources.

### III. TECHNIQUES DE LA TELEDETECTION

La télédétection repose sur un ensemble de techniques permettant l'acquisition, le traitement et l'interprétation de données collectées à distance, généralement à l'aide de capteurs embarqués sur des plateformes spatiales, aériennes, maritimes ou terrestres. Ces techniques varient en fonction du type de capteur utilisé, de la nature du rayonnement électromagnétique exploité, ainsi que des objectifs spécifiques d'observation (CCT, 1995 ; GDTA, 1992).

On distingue principalement deux grandes catégories de télédétection :

-La télédétection passive, qui capte le rayonnement naturellement émis ou réfléchi par les objets terrestres (notamment le rayonnement solaire).

-La télédétection active, qui repose sur l'émission d'un signal (comme les ondes radar ou laser) et l'analyse de son retour après interaction avec la surface observée.

Le traitement numérique des images joue un rôle central dans l'exploitation des données de télédétection (Girard et Girard, 1999). Il permet de corriger les images brutes, d'en extraire des indices biophysiques ou spectraux, de détecter des anomalies ou des objets, et de les classer selon des critères définis. Ces traitements reposent sur des approches statistiques, spectrales, ou de plus en plus, sur des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique.

Enfin, l'intégration des données de télédétection dans des systèmes d'information géographique (SIG) constitue un levier puissant pour l'analyse spatiale, la modélisation environnementale et l'aide à la prise de décision. Elle permet de croiser des couches d'information hétérogènes pour produire des analyses géographiques complexes, utiles dans de nombreux domaines, tels que la gestion des ressources naturelles, l'aménagement du territoire ou la prévention des risques.

### IV. PROCESSUS ET DOMAINES D'APPLICATIONS

#### A. Processus

Dans son ensemble, le processus de télédétection se décompose en sept étapes principales (Fig. 1), chacune jouant un rôle déterminant dans la chaîne d'acquisition et d'exploitation de l'information :

-Source d'énergie ou d'illumination (A) : Toute opération de télédétection commence par une source d'énergie généralement le Soleil, qui émet un rayonnement électromagnétique servant à illuminer la cible. Dans le cas de la télédétection active, cette source est artificielle (ex. : radar).

-Rayonnement et atmosphère (B) : Le rayonnement émis par la source traverse l'atmosphère, où il peut subir des phénomènes d'absorption, de diffusion ou de réflexion. Une interaction atmosphérique secondaire a également lieu lors du trajet de l'énergie réfléchie ou émise depuis la cible vers le capteur.

-Interaction avec la cible (C) : Une fois que le rayonnement atteint la surface terrestre, il interagit avec la cible. Cette interaction dépend des propriétés physiques et chimiques de la surface (albédo, rugosité, humidité, etc.) ainsi que des caractéristiques spectrales du rayonnement.

-Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) : L'énergie réfléchie, absorbée ou émise par la cible est captée à distance par un capteur embarqué, sans contact direct avec l'objet observé. Cette énergie est alors transformée en signal numérique ou analogique.

-Transmission, réception et traitement des données (E) : Les signaux captés sont transmis souvent par liaisons électroniques ou radio vers une station de réception, où ils sont traités pour générer des images numériques ou photographiques exploitables. Ce traitement inclut la correction géométrique, radiométrique et parfois l'extraction automatique d'informations.

-Interprétation et analyse (F) : L'image obtenue est ensuite analysée et interprétée, de manière visuelle ou à l'aide de logiciels d'analyse d'image. Cette étape permet d'extraire les informations pertinentes sur la cible observée, en fonction des objectifs (cartographie, surveillance, modélisation, etc.).

-Application (G) : La dernière étape consiste à exploiter l'information extraite pour répondre à une problématique précise : comprendre un phénomène naturel, détecter un changement, gérer des ressources, planifier l'aménagement d'un territoire, etc. C'est l'étape d'utilisation opérationnelle de la donnée de télédétection.

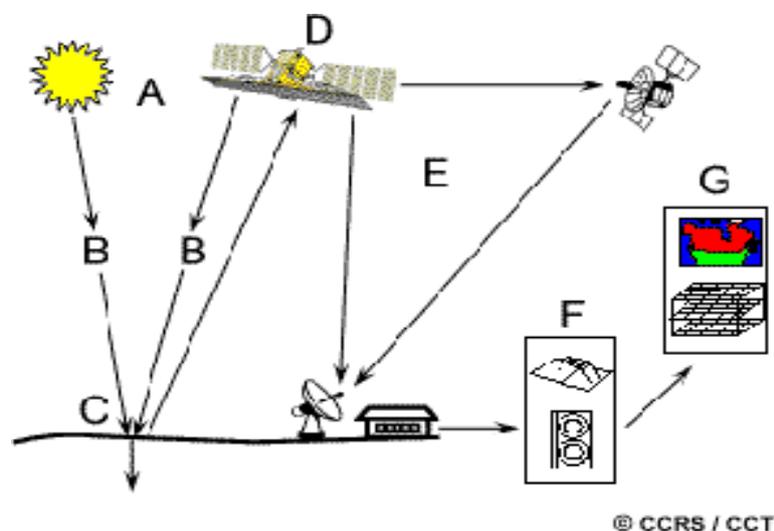


Figure 1 - Processus de la télédétection (Bonn et Rochon, 1992).

## B. Domaines d'applications

En géologie, la télédétection est largement utilisée pour l'acquisition de données géospatiales à grande échelle, offrant une vision d'ensemble des caractéristiques de la surface terrestre. Elle constitue un complément précieux aux méthodes de terrain traditionnelles, en fournissant des

informations détaillées, régulières et cohérentes sur de vastes zones, y compris celles qui sont inaccessibles ou difficiles d'accès (Jensen, 2007).

Dans cette optique, les applications géologiques de la télédétection sont nombreuses et diversifiées. On peut notamment citer :

**-Cartographie géologique :** La télédétection permet d'identifier et de cartographier les formations géologiques, les structures tectoniques, les types de roches ainsi que les minéraux. Grâce à l'imagerie multispectrale et hyperspectrale, elle facilite l'interprétation lithologique et structurale à différentes échelles.

**-Exploration minière et pétrolière :** L'analyse des signatures spectrales des formations géologiques permet de détecter des indices minéraux ou pétroliers, contribuant ainsi à la localisation de sites d'exploration. Cela permet d'optimiser les campagnes de prospection et de réduire les coûts d'exploration sur le terrain.

**-Analyse et gestion des risques géologiques :** La télédétection est un outil clé pour la cartographie et le suivi des aléas géologiques tels que les glissements de terrain, les séismes, ou les volcans. Elle fournit des données essentielles pour l'évaluation des risques, la prévention des catastrophes naturelles et la planification des mesures d'atténuation.

**-Gestion des ressources naturelles :** Elle permet de surveiller l'érosion des sols, les ressources en eau, etc. Ces informations sont indispensables pour une gestion durable des ressources et une évaluation des impacts environnementaux liés aux activités humaines.

**-Suivi des changements environnementaux :** La télédétection joue un rôle essentiel dans le suivi des dynamiques environnementales telles que le changement climatique, la fonte des glaciers, la déforestation, l'expansion urbaine, ou encore l'évolution des littoraux. Elle fournit des données diachroniques permettant de détecter des tendances à long terme et d'adapter les politiques environnementales.

En résumé, la télédétection appliquée à la géologie offre à la fois une vue synoptique et des informations précises sur les caractéristiques géologiques et environnementales de la Terre. Ses applications couvrent un large éventail de domaines, allant de la cartographie géologique à la gestion des ressources naturelles, en passant par l'analyse des risques et le suivi des changements globaux.

Les principales applications de la télédétection en géologie sont résumées dans la figure ci-après (Fig. 2).

## V. NOTIONS DE CAPTEURS ET DE VECTEURS

Un capteur est un dispositif capable de recevoir et de détecter le rayonnement réfléchi ou émis par la surface terrestre, puis de le convertir en un signal utilisable pour l'enregistrement et l'analyse de l'information (Scanvic, 1983).

Les capteurs utilisés en télédétection peuvent être classés en trois grandes catégories, selon le type de rayonnement qu'ils exploitent :

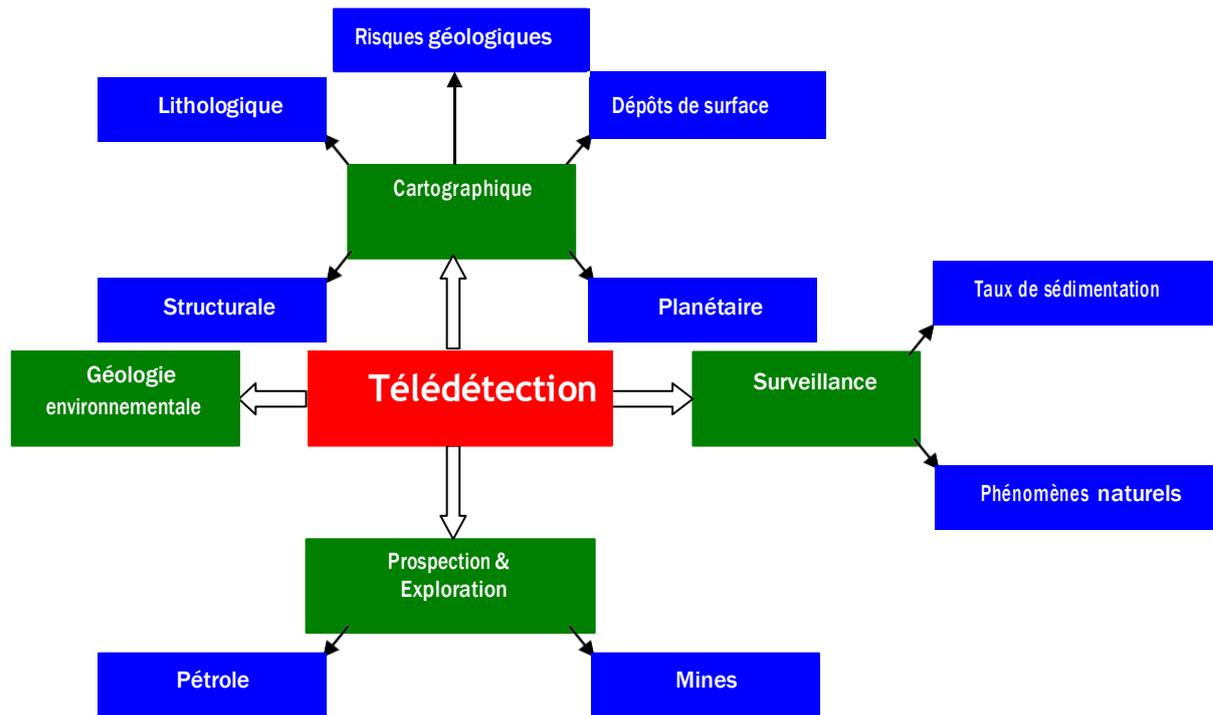


Figure 2 - Domaines d'application de la télédétection en géologie (Sabins, 1997).

-Les capteurs optiques : Ces capteurs nécessitent une source d'illumination naturelle, généralement le rayonnement solaire, et dépendent fortement des conditions météorologiques. Ils fonctionnent dans les domaines spectraux du visible, du proche infrarouge (PIR) et du moyen infrarouge (MIR). Toutefois, ces longueurs d'onde sont partiellement absorbées par la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols, ce qui peut altérer la qualité des données collectées. Leur fonctionnement est donc optimal uniquement en présence de ciel dégagé.

-Les capteurs infrarouges thermiques (IRT) : Ces capteurs détectent le rayonnement émis par la surface terrestre, principalement sous forme de chaleur. Contrairement aux capteurs optiques, ils sont opérationnels de jour comme de nuit, car ils n'ont pas besoin d'une illumination externe. Certains capteurs optiques peuvent également être programmés pour inclure des enregistrements thermiques à des fins spécifiques (ex. : surveillance des incendies ou des sources thermales).

-Les capteurs radar : fonctionnant selon le principe de la télédétection active, ces capteurs émettent leur propre rayonnement micro-onde et analysent le signal réfléchi par la surface. Ils présentent l'avantage d'être indépendants des conditions météorologiques et de l'ensoleillement, ce qui leur permet de fonctionner de jour comme de nuit, même à travers les nuages, la pluie ou la végétation dense.

Par ailleurs, les capteurs peuvent être embarqués sur différents types de vecteurs, selon les objectifs d'observation et la résolution souhaitée. On distingue principalement :

-Les vecteurs aéroportés : ballons, drones, hélicoptères ou avions, utilisés pour des missions ponctuelles, flexibles et à haute résolution.

-Les vecteurs spatiaux : satellites d'observation de la Terre, qui assurent une couverture régulière, à large échelle, avec des capteurs multispectraux, hyperspectraux ou radar (Tabl. 1).

Vecteurs	Types	Plafonds d'altitudes
Aéroportés	Mystère 20	13 700 m
	Aero-Commander	8000 m
Spatiaux	HCMM	620 km
	Landsat-4, -5 et -7	705 km
	ERS	777 km
	RADARSAT	798 km
	SPOT	822 km
	NOAA	850 km
	Landsat-1 à 3	900 km

Tableau 1 - Exemples de capteurs et de vecteurs  
(Chuviesco, 2016).

## Deuxième chapitre :

# LES BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION

### I. LE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

En télédétection, l'acquisition d'informations sur la nature des objets observés repose sur l'exploitation de leurs propriétés physiques, en particulier leurs propriétés optiques. Cette information est transmise par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique, qui sert de vecteur entre l'objet et le système d'observation. Ce dernier capte le rayonnement, puis le transforme en données compréhensibles par l'utilisateur, telles que des images numériques ou des valeurs quantitatives (Bariou, 1985 ; Sabins, 1997 ; GDTA, 1991).

Le rayonnement électromagnétique correspond à la propagation dans l'espace, à la vitesse de la lumière (environ 299 793 km/s), d'une énergie sous forme d'ondes transversales. Ces ondes interagissent avec la matière, permettant ainsi d'obtenir des informations sur les surfaces observées (Fig. 3).

On distingue deux principales sources d'énergie électromagnétique :

- Les sources naturelles : principalement le Soleil et, dans une moindre mesure, la Lune ;
- Les sources artificielles : telles que les lasers ou les systèmes radar, utilisés dans la télédétection active.

Le rayonnement électromagnétique est un ensemble de radiations de nature identique mais de longueurs d'onde différentes. Ces rayonnements sont souvent désignés sous le terme de "lumière", qu'ils soient visibles (ex. : lumière blanche) ou invisibles à l'œil humain (ex. : infrarouge, ultraviolet, micro-ondes, rayons X, etc.).

Chaque radiation électromagnétique est monochromatique, c'est-à-dire caractérisée par une longueur d'onde ( $\lambda$ ) et une fréquence ( $\nu$ ). Une onde électromagnétique est formée par deux champs vectoriels :

- E, le champ électrique,
- B, le champ magnétique,

Ces deux vecteurs sont orthogonaux entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation. L'ensemble se propage dans l'espace avec une variation périodique de leur amplitude, généralement de forme sinusoïdale.

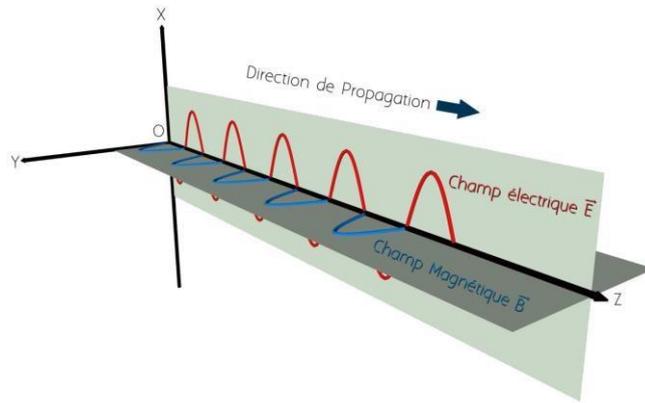


Figure 3 - Composition et propagation d'une onde électromagnétique (Lillesand and Kieffer, 2000).

Lors de sa propagation à travers l'atmosphère, le rayonnement électromagnétique subit différentes modifications physiques. Ces interactions jouent un rôle crucial en télédétection, car elles affectent la quantité et la qualité de l'énergie reçue par les capteurs. C'est précisément dans ces altérations que réside une part précieuse de l'information spectrale sur la nature des objets observés, menant à la notion fondamentale de signature spectrale (Bariou, 1985).

Les principales perturbations atmosphériques affectant le rayonnement électromagnétique sont les suivantes :

- L'absorption : certains gaz présents dans l'atmosphère, tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ) ou le méthane ( $\text{CH}_4$ ), absorbent une partie du rayonnement à des longueurs d'onde spécifiques. Cette absorption limite la transmission du signal vers les capteurs et définit des fenêtres atmosphériques, zones spectrales où l'atmosphère est plus transparente.

- L'émission propre du milieu : l'atmosphère elle-même émet un rayonnement thermique, particulièrement dans l'infrarouge. Cette émission naturelle peut interférer avec le rayonnement émis ou réfléchi par les objets au sol, et doit donc être prise en compte dans l'analyse des données.

- La réfraction et la diffusion : La réfraction modifie la trajectoire du rayonnement lorsqu'il traverse des couches atmosphériques de densité variable. Par contre, La diffusion, quant à elle, est causée par la présence de molécules, de particules ou d'aérosols. Elle entraîne une dispersion de l'énergie dans plusieurs directions, ce qui peut altérer la perception des objets au sol. On distingue notamment la diffusion de Rayleigh (affectant principalement les courtes longueurs d'onde) et la diffusion de Mie (associée aux particules plus grosses comme les poussières ou les gouttelettes d'eau).

Ces interactions influencent la quantité de rayonnement qui atteint le capteur ainsi que sa composition spectrale. Ainsi, chaque objet (végétation, sol, eau, roche, etc.) possède une signature spectrale unique, c'est-à-dire une réponse caractéristique en fonction de la longueur d'onde, qui permet son identification et sa classification à partir des images satellitaires ou aéroportées (Campbell et Wynne, 2011).

## II. LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

En télédétection, plusieurs portions du spectre électromagnétique sont exploitées en fonction des objectifs d'étude et des capteurs utilisés. Ce spectre s'étend des courtes longueurs d'onde, telles que les rayons gamma et les rayons X, jusqu'aux grandes longueurs d'onde, comme les micro-ondes et les ondes radio (Figure 4).

Parmi ces régions, seules certaines sont utilisables en télédétection terrestre, en raison notamment des limitations imposées par l'atmosphère, qui absorbe ou atténue certaines bandes du spectre.

La région la plus courte du spectre utilisée en télédétection se trouve dans l'ultraviolet (UV), située juste au-delà de l'extrémité violette du spectre visible. Bien que peu exploitée dans les applications classiques, cette région présente un intérêt particulier dans certains contextes géologiques ou environnementaux. En effet :

- Certains matériaux de surface, en particulier certaines roches et minéraux, ont la capacité de réagir au rayonnement ultraviolet ;
- Cette réaction se manifeste sous forme de fluorescence, c'est-à-dire l'émission de lumière visible lorsque ces matériaux sont exposés à un rayonnement UV.

Ce phénomène peut être utilisé, par exemple, pour identifier des composés minéralogiques spécifiques, facilitant ainsi la prospection minière ou l'analyse pétrographique (Scanvic, 1983).

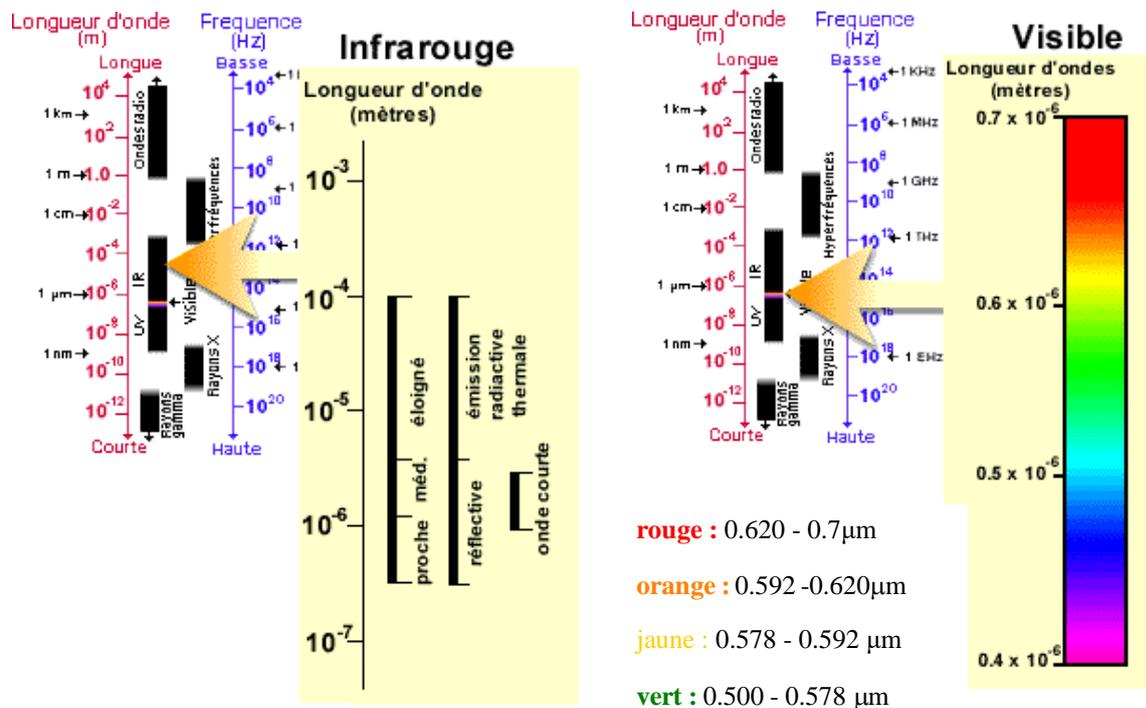


Figure 4 - Le Spectre électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992, modifié).

La lumière visible, qui correspond à la seule partie du spectre électromagnétique perceptible par l'œil humain, se situe dans la région dite du spectre visible. Elle couvre des longueurs d'onde allant d'environ 0,4 à 0,7 micromètre ( $\mu\text{m}$ ). C'est également la seule portion du spectre que nous associons directement aux couleurs : le bleu (vers 0,4  $\mu\text{m}$ ), le vert (environ 0,55  $\mu\text{m}$ ) et le rouge (vers 0,7  $\mu\text{m}$ ).

Au-delà du spectre visible, le domaine de l'infrarouge s'étend approximativement de 0,7 à 100  $\mu\text{m}$ , soit une plage environ cent fois plus large que celle du visible. Il se divise en deux grandes catégories :

-L'infrarouge réfléchi (de 0,7 à environ 3  $\mu\text{m}$ ) : ce rayonnement provient de la réflexion de la lumière solaire sur les surfaces terrestres, tout comme dans le visible. Il est donc utilisé en télédétection passive diurne, notamment pour étudier la végétation, les sols ou l'eau, grâce à la signature spectrale propre à chaque type de matériau.

-L'infrarouge thermique (de 3 à environ 100  $\mu\text{m}$ ) : très différent du visible et de l'infrarouge réfléchi, ce rayonnement est émis par les objets eux-mêmes sous forme de chaleur. Il permet de mesurer la température de surface et est utilisé aussi bien de jour que de nuit pour des applications telles que la surveillance volcanique, la détection d'incendies ou le suivi de la température des océans.

Par ailleurs, la région des hyperfréquences, ou micro-ondes, a suscité un intérêt croissant en télédétection (Fig. 5). Elle englobe les plus grandes longueurs d'onde utilisées, s'étendant approximativement de 1 millimètre à 1 mètre.

Les longueurs d'onde les plus courtes (vers 1 mm) partagent certaines propriétés avec l'infrarouge thermique, notamment leur sensibilité à la température.

Les longueurs d'onde plus longues (proches du mètre) sont comparables aux ondes radio et sont notamment utilisées dans les systèmes radar, capables de pénétrer les nuages, la végétation, voire le sol meuble, et de fonctionner de jour comme de nuit, quelles que soient les conditions météorologiques.

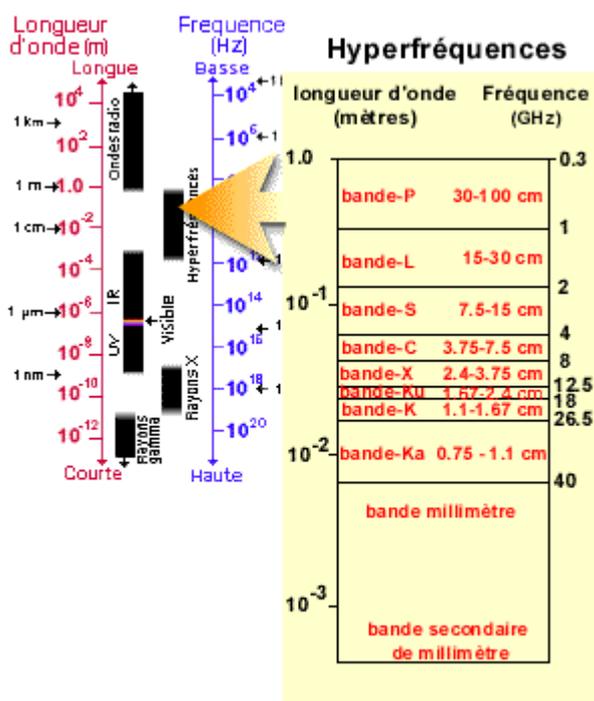


Figure 5 - La région des hyperfréquences (Bonn et Rochon, 1992, modifié).

### III. SIGNATURES SPECTRALES

La modification du signal électromagnétique en fonction de la nature de l'objet observé permet son identification à distance. Cette interaction donne naissance à une combinaison spécifique

d'intensités, variable selon les longueurs d'onde du rayonnement : c'est ce que l'on appelle la signature spectrale de l'objet, également qualifiée de carte d'identité radiométrique (Robin, 1995).

La signature spectrale correspond ainsi au signal réfléchi ou émis par une surface géographique, tel qu'il est capté par un capteur. Ce signal contient des informations précieuses sur la nature et l'état de l'objet, mais celles-ci sont filtrées et intégrées en fonction de deux facteurs :

- Les caractéristiques du capteur (résolution spectrale, type de détection) ;
- La largeur des bandes spectrales utilisées.

La signature spectrale dépend de plusieurs paramètres physiques et contextuels, parmi lesquels :

-La localisation astronomique de la cible : altitude, latitude, date et heure d'acquisition (ces éléments influencent notamment l'angle d'illumination solaire).

-L'environnement géographique immédiat : pente du terrain, ombre portée, texture de la surface, contraste spectral des objets voisins.

-L'état de la surface : présence de poussière, corrosion, altération, vieillissement ou encore le stade de développement phénologique dans le cas de la végétation.

Si les deux premiers paramètres peuvent être modélisés ou corrigés relativement aisément, le troisième reste plus complexe à gérer. Il introduit une variabilité spatio-temporelle importante, rendant la signature parfois instable. C'est pourquoi certains spécialistes remettent en question l'emploi du terme "signature", dans la mesure où il suppose une invariance qui ne correspond pas toujours à la réalité du terrain (GDTA, 1992).

Cependant, Dans le visible et le proche infrarouge, la télédétection repose principalement sur le phénomène de réflexion du rayonnement solaire par la surface terrestre.

En revanche, dans l'infrarouge thermique et les hyperfréquences passives, le signal capté provient essentiellement de l'émission naturelle d'énergie par la surface elle-même.

Par ailleurs, la réflexion du rayonnement solaire dépend de plusieurs caractéristiques physiques de la surface observée, notamment :

-Sa couleur (au sens large, c'est-à-dire la façon dont elle absorbe ou réfléchit certaines longueurs d'onde) ;

-Sa structure géométrique (rugosité, inclinaison, orientation) ;

-Son activité biologique dans le cas des surfaces végétales, qui varient selon le type de végétation, son état physiologique, et les conditions environnementales (Fig. 6).

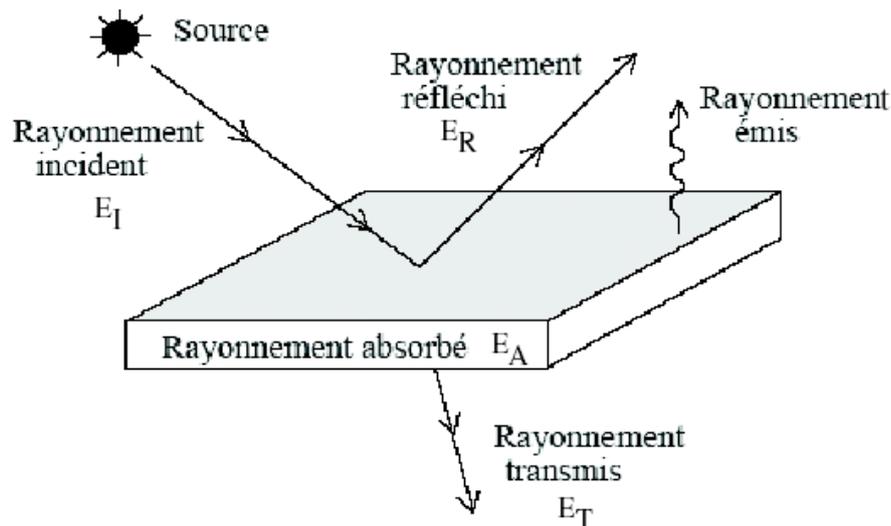


Figure 6 - Interaction entre énergie électromagnétique et la matière (in Gomez, 2004).

#### IV. NOTION DE REFLECTANCE

Les mécanismes de réflexion du rayonnement électromagnétique résultent de toute discontinuité dans les propriétés électromagnétiques du milieu traversé. Lorsque l'onde électromagnétique rencontre une variation brutale de ces propriétés (par exemple, à l'interface entre deux milieux différents), une partie de l'énergie incidente est réfléchi.

Les surfaces naturelles, de par leur complexité et leur irrégularité, ne réfléchissent pas la lumière de manière homogène et isotrope. Cette variabilité a conduit les physiciens à s'intéresser aux propriétés directionnelles de la réflectance, lesquelles varient selon :

- La direction du rayonnement incident (angle solaire) ;
- La position du capteur (angle de visée) ;
- Et la longueur d'onde du rayonnement considéré.

Sous des conditions naturelles, les courtes longueurs d'onde (notamment dans le bleu et l'ultraviolet) sont davantage sujettes à la diffusion atmosphérique, tandis que les longues longueurs d'onde (comme l'infrarouge) sont moins affectées. Lorsque la réflectance est mesurée pour une longueur d'onde spécifique, on parle de réflectance spectrale. En agrégeant ces valeurs sur un ensemble de longueurs d'onde, on obtient la courbe de réflectance spectrale de l'objet étudié (Bonn et Rochon, 1992).

##### A. Types de réflexion électromagnétique

On distingue deux grands types de réflexion selon l'interaction du rayonnement avec le matériau :

- **Réflexions de surface** : Celles-ci dépendent essentiellement des propriétés géométriques de la surface et de la discontinuité du vecteur d'onde. Une surface plane et lisse provoque une réflexion spéculaire (comme un miroir), où l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. Par contre, Une surface rugueuse engendre une réflexion diffuse, dispersant le rayonnement dans plusieurs directions (Fig. 7).

- **Réflexions de volume** : Elles interviennent lorsque le rayonnement pénètre dans le matériau et est réfléchi par des structures internes hétérogènes. Ce type de réflexion dépend fortement de la profondeur de pénétration, de l'hétérogénéité du milieu et de sa transparence aux longueurs d'onde considérées.

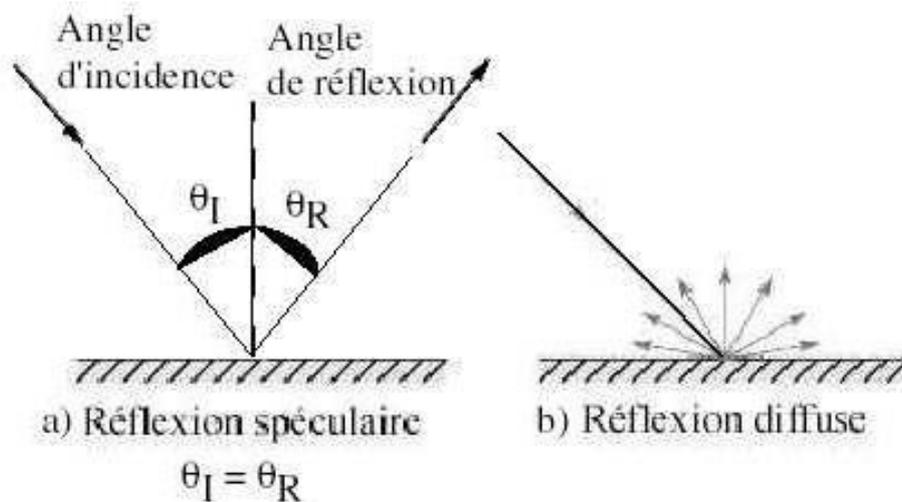


Figure 7 - La réflectance spéculaire (a) et diffuse (b)  
(in Gomez, 2004).

### B. Signature spectrale et interprétation radiométrique

Comme mentionné précédemment, une signature spectrale regroupe l'ensemble des caractéristiques qui conditionnent l'interaction du rayonnement électromagnétique avec un matériau donné. Ces caractéristiques sont à la fois nécessaires et suffisantes pour permettre l'identification d'une surface.

La courbe de réflectance spectrale constitue l'un des éléments clés de cette signature. Si l'on considère la valeur radiométrique d'un pixel dans plusieurs bandes spectrales d'une image, on peut construire une représentation graphique qui constitue la signature spectrale de ce pixel.

Cette courbe peut ensuite être comparée aux signatures spectrales de référence (issues de bases de données ou de mesures de terrain), dans le but de déterminer le thème dominant représenté par le pixel autrement dit, l'entité géographique ou la classe d'objet prédominant dans la cellule élémentaire du sol observée.

Toutefois, Les signatures spectrales sont fondamentales dans les processus de classification assistée par ordinateur. Elles sont exploitées de façon explicite dans les algorithmes supervisés comme la méthode de la distance minimale, ou de manière implicite dans les méthodes non supervisées comme l'algorithme des k-moyennes, qui cherchent à regrouper les pixels selon la ressemblance de leurs profils spectraux (Bariou, 1985 ; GDTA, 1991, 1992).

### C. La réflectance des minéraux

La discrimination des minéraux par télédétection repose sur l'analyse de leur réponse spectrale dans trois principales fenêtres atmosphériques, à savoir, le Visible et Proche Infrarouge (VNIR)(de 0,4 à 1,1  $\mu\text{m}$ ), l'Infrarouge Moyen (SWIR)(de 1,1 à 2,5  $\mu\text{m}$ ) et l'Infrarouge Thermique (TIR)(de 8 à 14  $\mu\text{m}$ ).

Ces domaines spectraux permettent de détecter des bandes d'absorption caractéristiques, associées à la présence d'éléments chimiques, de liaisons moléculaires ou encore de caractéristiques structurales propres aux minéraux.

Dans le domaine VNIR (Visible et Proche Infrarouge), c'est principalement la présence de fer dans les minéraux qui influence la réflectance. Ce fer, sous forme d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$ , produit des bandes d'absorption spécifiques. En effet, les ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) génèrent une bande marquée autour

de 1,1  $\mu\text{m}$ . Par contre, les ions ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ) produisent deux bandes d'absorption nettes vers 0,4  $\mu\text{m}$  et 0,7  $\mu\text{m}$  (Clark, 1993).

Le fer étant l'un des rares éléments présents en concentration suffisante pour influencer le spectre dans cette région, il constitue un excellent traceur spectroscopique dans le VNIR (Kerr, 1989).

L'infrarouge moyen (SWIR), est particulièrement riche en signatures vibratoires liées à la présence de groupes hydroxyles ( $-\text{OH}$ ), d'eau et de carbonates dans les minéraux. Ces éléments entraînent des bandes d'absorption bien définies :

- Les minéraux riches en Al-OH (comme certaines argiles) absorbent vers 2,2  $\mu\text{m}$  ;
- Ceux contenant Mg-OH présentent une absorption autour de 2,35  $\mu\text{m}$  (Clark, 1993).

Cette distinction permet, par exemple, de différencier le pyroxène ( $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ ) du quartz ( $\text{SiO}_2$ ) par une bande à 2,35  $\mu\text{m}$  (présence de Mg), et par les bandes du fer dans le visible et aussi de mettre en évidence la calcite, grâce à ses bandes caractéristiques à 1,87, 1,99, 2,16, 2,33 et 2,52  $\mu\text{m}$  (Gomez, 2004)(Fig. 8).

Le domaine TIR (Infrarouge Thermique), est le seul qui permet de différencier les silicates de manière fiable (Vincent et al., 1975). Cependant, son exploitation est plus délicate car la réponse spectrale dans cette région dépend fortement de la taille des grains, et les bandes d'absorption sont souvent plus larges et complexes à interpréter (Salisbury et al., 1987).

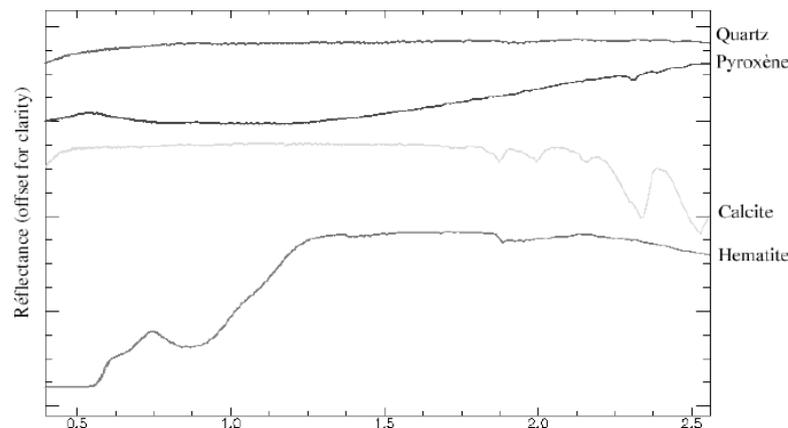


Figure 8 - Signatures spectrales enregistrées au laboratoire de quatre minéraux fréquemment représentés sur Terre : quartz, pyroxène, calcite et hématite (Gomez, 2004).

À partir des courbes de réflectance spectrale issues des travaux de Scanvic (1983) et de la librairie spectrale de l'USGS, plusieurs tendances générales peuvent être observées (Fig. 9 et 10) :

- Les minéraux blancs présentent une réflectance très élevée,
- Les minéraux colorés montrent une dominante spectrale en accord avec leur teinte naturelle (ex. : verts pour les minéraux contenant du cuivre ou du fer),
- Le quartz a une réflectance moyenne (~40 %), avec une légère dominante dans le rouge et l'infrarouge,
- Les minéraux sombres, en raison de leur fort pouvoir absorbant, réfléchissent peu la lumière sur l'ensemble du spectre,
- Les micas (en particulier la biotite) affichent une réflectance faible, avec une absorption supérieure à 65 % sur tout le spectre.

Plusieurs travaux ont été menés sur la caractérisation spectrale des minéraux dans les domaines VNIR et SWIR. Il s'agit des travaux de [Hunt \(1977\)](#) et [Hunt & Salisbury \(1970, 1971\)](#). Ces études ont établi les bases des bibliothèques spectrales actuelles utilisées pour la classification automatisée et la cartographie minéralogique par imagerie hyperspectrale.

#### D. La réflectance des roches

Une roche est un agrégat naturel de minéraux, ce qui implique que sa signature spectrale résulte de la combinaison pondérée des signatures spectrales des minéraux qui la composent ([Gomez, 2004](#) ; [Gomez et al., 2004](#)). L'interprétation spectrale d'une roche dépend donc non seulement de la composition minéralogique mais aussi de facteurs structuraux et environnementaux affectant sa surface.

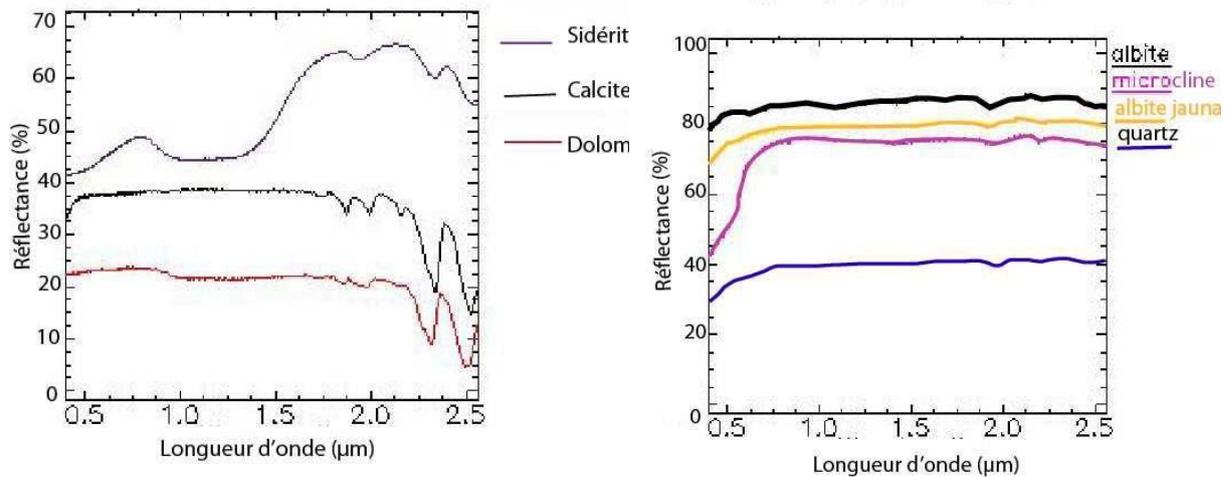


Figure 9 - Spectres de réflectance des minéraux tirés de la librairie spectrale de l'USGS, a) Minéraux carbonatés, b) Feldspaths et quartz (d'après la librairie spectrale de l'USGS).

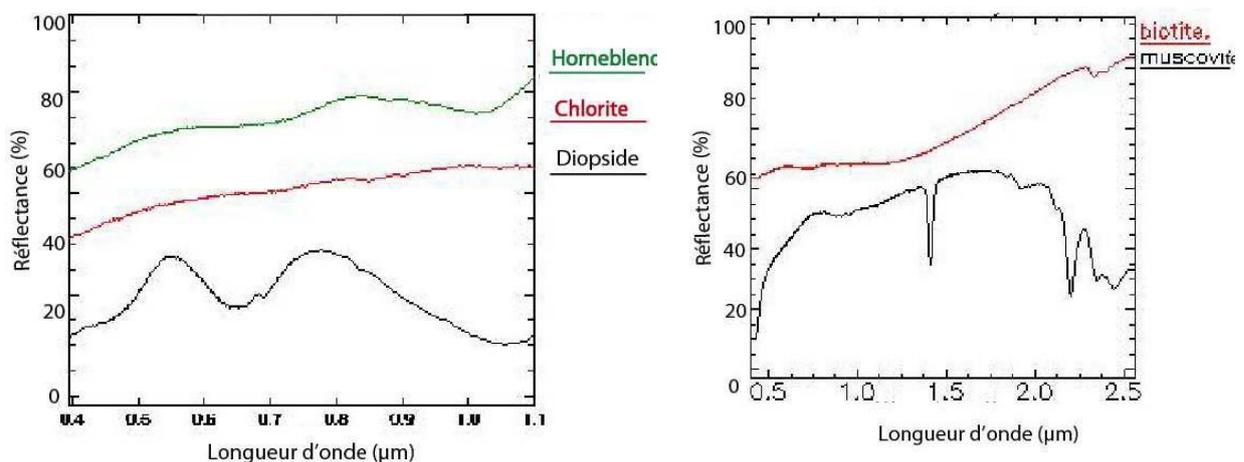


Figure 10 - Spectres de réflectance des minéraux tirés de la librairie spectrale de l'USGS, a) Minéraux sombres, b) Micas (d'après la librairie spectrale de l'USGS).

## 1. Influence de la composition minéralogique

La réflectance globale d'une roche est étroitement liée à la nature et la proportion des minéraux constitutifs. Les roches sombres, telles que les péridotites, présentent une réflectance faible sur l'ensemble du spectre. À l'inverse, les roches claires comme les granites ou les granodiorites ont une réflectance plus élevée, particulièrement marquée dans l'infrarouge proche (Fig. 11).

Les roches colorées manifestent quant à elles une dominante spectrale cohérente avec leur couleur visible, indépendamment de leur réflectance globale. Ainsi, une roche rougeâtre pourra présenter une réflectance accentuée dans la bande du rouge, et une roche verdâtre dans la bande du vert.

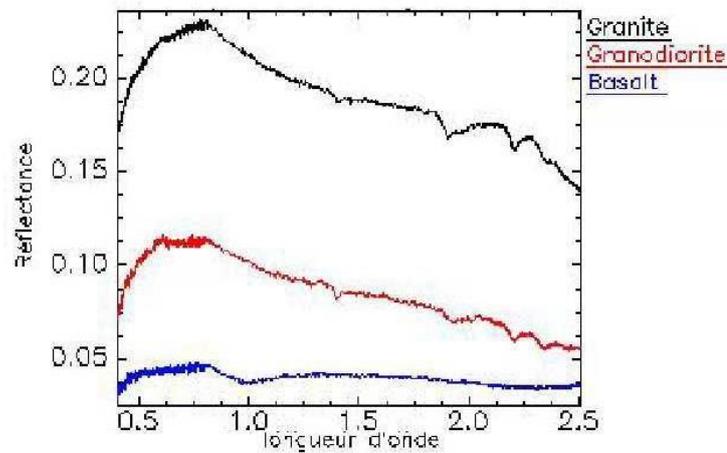


Figure 11 : Spectres de réflectance de quelques roches magmatiques (d'après la librairie spectrale de l'USGS).

## 2. Altération des surfaces rocheuses

Les roches affleurantes sont fréquemment soumises à des phénomènes d'altération atmosphérique (pluie, vent, oxydation), conduisant à la formation d'une patine altéritique. Cette patine est composée en moyenne de 70 % d'argiles, d'oxydes et hydroxydes de fer, et d'oxydes de manganèse. L'impact de cette patine sur la réflectance dépend du type initial de roche :

- Pour les roches sombres, elle tend à augmenter la réflectance ;
- Pour les roches claires, elle réduit la réflectance.

Ces transformations sont d'une importance capitale lors de l'interprétation spectrale de surfaces rocheuses altérées, notamment en cartographie géologique par imagerie hyperspectrale (Gomez, 2004).

## 3. Réponse spectrale dans l'infrarouge thermique

Des travaux de Vincent et al. (1975) sur 26 échantillons de roches ignées ont démontré que des produits d'altération fins, comme les limons argileux, modifient fortement l'émission thermique par rapport à un échantillon frais, en revanche, les produits d'altération ferriques (oxydes de fer), bien qu'influents, ne masquent pas totalement les caractéristiques spectrales majeures liées aux silicates. Cela confirme la robustesse des bandes spectrales silicatées dans l'infrarouge thermique pour l'identification lithologique, même en présence d'altérations superficielles.

#### 4. Cas des milieux urbains

Les surfaces urbaines, par leur composition (béton, bitume, tuiles, matériaux de construction), présentent des signatures spectrales similaires à celles de certaines roches ou sols, notamment dans le VNIR et le SWIR. Cette similitude peut introduire des ambiguïtés lors de la classification spectrale automatisée, en particulier dans des zones géologiquement complexes ou densément urbanisées.

Ainsi, pour la reconnaissance et la différenciation des roches à partir de leurs propriétés spectrales. Les signatures spectrales varient en fonction de la composition minéralogique, de la texture, de la couleur et de l'état de surface des roches (Scanvic, 1983 ; Chorowich et Deroin, 2010 ; Gomez, 2004). Ces signatures sont principalement analysées dans trois domaines du spectre électromagnétique : le Visible et Proche Infrarouge (VNIR), l'Infrarouge Moyen (SWIR) et l'Infrarouge Thermique (TIR) :

**Les Roches ignées** : formées par solidification du magma, présentent des comportements spectraux fortement influencés par leur composition et couleur :

-Dans la région spectrale VNIR (0.4 – 1.1  $\mu\text{m}$ ) : Les roches claires comme le granite présentent une réflectance élevée ; Les roches sombres comme le basalte ou la péridotite montrent une faible réflectance. Enfin, le fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) entraîne des bandes d'absorption caractéristiques à 1.1  $\mu\text{m}$ , 0.7  $\mu\text{m}$  et 0.4  $\mu\text{m}$ .

-Pour le SWIR (1.1 – 2.5  $\mu\text{m}$ ) : La présence d'altérations minérales (argiles, hydroxydes) est identifiable mais peu marquée dans les roches ignées fraîches. Par contre, les minéraux avec liaisons Al-OH et Mg-OH peuvent induire des bandes d'absorption à 2.2  $\mu\text{m}$  et 2.35  $\mu\text{m}$ .

-En ce qui concerne le TIR (8 – 14  $\mu\text{m}$ ) : C'est le domaine le plus efficace pour l'identification des silicates présents dans ces roches. L'émissivité thermique peut être fortement modifiée par l'altération de surface, notamment la présence d'argiles ou de limons.

**Les Roches métamorphiques** : résultent de la transformation de roches préexistantes sous l'effet de la température et de la pression.

-Le domaine spectral VNIR : Il y a une réflectance variable. En effet, les quartzites (claires) ont une réflectance élevée, tandis que les schistes ou gneiss (souvent sombres) ont une faible réflectance.

-Le SWIR : Très bon domaine pour la détection de micas, chlorites, etc. La Bandes d'absorption est marquées à 2.2  $\mu\text{m}$  et 2.35  $\mu\text{m}$ .

-La région du TIR : Le comportement est similaire aux roches ignées si la surface est peu altérée. Néanmoins, la texture et l'orientation des minéraux peuvent faire varier la réponse thermique.

**Les Roches sédimentaires** : Issues de la compaction de sédiments, elles sont souvent plus hétérogènes et riches en minéraux hydratés.

-La région du VNIR : Les roches claires comme le calcaire ou le grès présentent une bonne réflectance. Par ailleurs, les roches riches en matières organiques comme les shales ont une réflectance faible.

-Pour le SWIR : Il permet la détection des argiles dans les bandes à 2.2  $\mu\text{m}$  (Al-OH) et 2.35  $\mu\text{m}$  (Mg-OH) ainsi que les carbonates, la calcite par exemple est détectée dans les bandes à 1.87, 1.99, 2.16, 2.33 et 2.52  $\mu\text{m}$ :

-Enfin le domaine du TIR : Révèle les silicates et carbonates, mais l'altération de surface modifie fortement l'émissivité. Les patines d'oxydes ou d'argiles peuvent masquer certaines caractéristiques.

En somme, l'étude des signatures spectrales des roches selon leurs types permet une identification à distance efficace en télédétection (Scanvic, 1983). Le VNIR permet de discriminer les roches selon leur couleur, leur contenu en fer et leur réflectance globale. Il est utile pour détecter la présence de fer, la teinte colorée, et distinguer les types de roches sombres et claires. Le SWIR est crucial pour identifier les minéraux hydroxylés, carbonates et produits d'altération. Enfin le TIR reste le domaine le plus spécifique pour détecter les silicates et de l'émissivité thermique qui permet d'analyser la composition minéralogique fine, bien qu'il soit sensible à l'état de surface, mais nécessite des capteurs spécifiques et une bonne correction atmosphérique.

Ainsi, chaque domaine spectral complète les autres, et une analyse multi-spectrale intégrée permet une interprétation géologique beaucoup plus précise.

## V. DETECTION PASSIVE ET ACTIVE

La télédétection passive repose sur la détection du rayonnement électromagnétique naturellement émis ou réfléchi par les surfaces terrestres. Ce rayonnement provient principalement du Soleil (dans les domaines visible, infrarouge réfléchi et proche infrarouge) et de la Terre elle-même (dans le domaine de l'infrarouge thermique). Les capteurs passifs enregistrent donc ce rayonnement en fonction des propriétés spectrales des objets au sol, ce qui permet de caractériser leur composition, leur état ou leur activité biologique (Girard et Girard, 1999 ; GDTA, 1991, 1992 ; Jensen, 2007).

Exemple : Les satellites comme Landsat ou Sentinel-2 utilisent des capteurs passifs pour observer les variations de végétation, d'humidité des sols ou la nature des roches.

La télédétection active, quant à elle, repose sur des capteurs équipés d'une source d'émission propre, qui envoie un signal (généralement sous forme d'ondes radar ou de faisceaux laser) vers la surface terrestre. Ce signal est ensuite réfléchi ou diffusé par la surface, puis capté à nouveau par le capteur. Cette méthode permet une acquisition d'informations indépendante des conditions d'éclairage naturel, ce qui est particulièrement utile :

- En l'absence de lumière solaire (acquisition nocturne) ;
- En présence de couverts nuageux denses ;
- Pour des applications topographiques précises (par exemple, les données d'altitude issues du LiDAR ou du radar interférométrique).

Exemple : Le système LiDAR (Light Detection And Ranging) est utilisé pour cartographier finement la végétation ou le bâti, tandis que les satellites radar comme Sentinel-1 ou RADARSAT sont utilisés pour surveiller les inondations, les glissements de terrain ou les mouvements du sol.

## VI. L'IMAGE NUMERIQUE DE LA TELEDETECTION

En télédétection, une image numérique est le produit final obtenu à partir de signaux enregistrés par des capteurs embarqués sur des satellites ou des vecteurs aéroportés (avions, drones). Ces capteurs détectent des formes d'énergie électromagnétique telles que la réflectance du rayonnement solaire, l'émission thermique de la surface terrestre ou encore la rétro-diffusion radar et les convertissent en valeurs numériques exploitables par l'utilisateur.

Chaque pixel de l'image représente une unité élémentaire de surface au sol, dont la valeur numérique indique l'intensité du signal mesuré dans une bande spectrale spécifique (Caloz et al., 2001).

L'analyse et l'interprétation des images numériques dépendent de plusieurs résolutions, chacune représentant un aspect distinct de la qualité de l'information :

### A. La résolution spatiale

C'est la taille au sol représentée par un pixel dans l'image. Une résolution de 10 mètres signifie que chaque pixel couvre une zone de 10 m × 10 m au sol. Elle détermine le niveau de détail spatial observable ; plus elle est fine, plus les objets sont reconnaissables.

### B. Résolution spectrale

Elle décrit le nombre, la position et la largeur des bandes spectrales dans lesquelles les mesures sont effectuées. Une image multispectrale de Sentinel-2 contient 13 bandes couvrant le visible, le proche infrarouge et le SWIR. Plus la résolution spectrale est élevée, plus la discrimination entre objets de natures différentes est précise, grâce à leur signature spectrale.

### C. Résolution radiométrique

Elle représente la capacité du capteur à détecter de faibles variations d'énergie. Une image codée sur 8 bits permet 256 niveaux de gris ( $2^8$ ), alors qu'une image sur 16 bits offre 65 536 niveaux ( $2^{16}$ ). Une haute résolution radiométrique améliore la finesse des contrastes, surtout dans des zones à faible dynamique spectrale.

### D. Résolution temporelle

Elle indique la fréquence d'acquisition des images sur une même zone géographique. Sentinel-2 offre un passage tous les 5 jours à l'équateur (avec ses deux satellites). Une bonne résolution temporelle est essentielle pour le suivi de phénomènes dynamiques : végétation, inondations, changements d'occupation du sol, etc.

## Troisième chapitre :

# LES METHODES DE TRAITEMENT D'IMAGE

### I. SIGNIFICATION THEMATIQUE DES CANAUX

Chaque bande spectrale véhicule une information spécifique, en fonction de sa sensibilité à une gamme particulière de longueurs d'onde. Les capteurs multispectraux et hyperspectraux enregistrent différentes radiations électromagnétiques, qui interagissent avec les surfaces terrestres selon leurs caractéristiques physiques (composition, humidité, texture, etc.).

Ces interactions permettent d'extraire des données précieuses pour l'analyse thématique, en particulier dans les domaines de la végétation, de l'eau, des sols ou encore de la géologie. Ainsi, chaque canal spectral possède une utilité bien définie en télédétection (Gerard, 2010).

Le tableau ci-dessous présente un résumé des principaux canaux utilisés, leur domaine spectral approximatif, ainsi que leur signification thématique au sens large :

Canal	Domaine spectral	Signification thématique
Bleu	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$	Pénétration en milieu aquatique, analyse des zones côtières, détection des sédiments.
Vert	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$	Santé de la végétation (chlorophylle), observation des plans d'eau.
Rouge	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$	Végétation, sols nus, différenciation des cultures, humidité des sols.
Infrarouge proche (NIR)	0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$	Vigueur de la végétation, identification des cultures, humidité des sols.
Infrarouge moyen (SWIR)	1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$ 2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$	Minéraux argileux, teneur en eau, types de roches, humidité du sol.
Infrarouge thermique (TIR)	10,4 - 12, 5 $\mu\text{m}$	Température de surface, sources thermiques naturelles ou anthropiques
Radar (micro-ondes)	1 mm - 1 m	Structure du sol, humidité, rugosité, végétation, topographie, indépendamment de la couverture nuageuse.

Tableau 2 - Signification des canaux utilisés en télédétection (Bonn et Rochon, 1992).

### II. TRAITEMENTS DES DONNEES

Le traitement des données d'images a pour objectif principal de faciliter leur interprétation en rendant l'information visuelle plus accessible et plus significative. La première étape de ce processus

est généralement le prétraitement, qui vise à corriger les défauts géométriques ou radiométriques des images afin d'en améliorer la qualité et la fiabilité.

Une fois cette phase de prétraitement complétée, les images corrigées peuvent faire l'objet de traitements numériques adaptés à l'objectif d'analyse. Ces traitements permettent d'extraire, de mettre en évidence ou de classer les informations contenues dans les données.

De manière générale, on distingue deux grandes catégories de traitements :

-Les traitements d'amélioration dits « standard » : ils sont applicables à la majorité des images, quels que soient le capteur ou l'objectif. Ils incluent notamment le rehaussement de contraste ou la combinaison de bandes spectrales (composition colorée).

-Les traitements spécifiques : ils sont conçus pour faire ressortir certaines informations ciblées, en particulier à des fins thématiques. Dans le domaine de la géologie, ils permettent par exemple de mettre en évidence des formations géologiques particulières, des types de roches, ou encore des structures tectoniques.

## A. Les prétraitements

### 1. Correction géométrique

Les images acquises par les systèmes d'observation de la Terre ne peuvent pas être directement superposées à des cartes topographiques, car elles sont affectées par des déformations géométriques.

Ces distorsions résultent de plusieurs facteurs, notamment :

- Des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite ;
- La rotation de la Terre pendant le temps d'enregistrement de l'image ;
- Les effets du relief terrestre ;
- Ou encore l'angle oblique de prise de vue, utilisé par certains capteurs.

Certaines de ces déformations, comme celles dues à la rotation terrestre ou à la visée oblique, sont prévisibles. Leur impact peut donc être modélisé et corrigé à l'aide d'algorithmes adaptés. Par ailleurs, les satellites sont généralement équipés de systèmes permettant de détecter et d'enregistrer de très légers mouvements du satellite. Ces données sont utilisées en priorité pour ajuster la trajectoire du satellite, mais elles peuvent également servir à appliquer des corrections géométriques aux images acquises.

Les fournisseurs d'images satellitaires proposent le plus souvent des produits ayant subi des corrections de base, réalisées à partir des paramètres orbitaux connus. Par exemple, pour les images SPOT, il est possible d'acheter :

- Des images non corrigées géométriquement (niveau 1A) ;
- Ou des images dont les déformations systématiques ont été corrigées (niveau 1B), ce qui permet une précision de localisation d'environ 500 mètres, sans avoir besoin d'informations précises sur le terrain.

Pour obtenir une précision supérieure, il est nécessaire d'utiliser des points d'ancrage géoréférencés (identifiés sur une carte ou relevés sur le terrain à l'aide d'un GPS). Grâce à cette méthode, les images SPOT peuvent atteindre une précision de l'ordre de 50 mètres et être projetées

dans un système cartographique donné, ce qui les rend superposables à une carte topographique (Bonn et Rochon, 1992).

Dans les régions montagneuses ou à fort relief, une autre source majeure de distorsion est liée aux parallaxes induites par le relief, particulièrement marquées lorsque les images sont captées en oblique. Sur la Figure 12, le point A correspond à la position cartographique réelle du sommet d'une montagne, tandis que le point B indique la position apparente de ce sommet sur l'image satellitaire. La distance entre A et B représente la parallaxe due au relief.

Pour corriger ce type de déformation, il est indispensable de disposer d'un modèle numérique de terrain (MNT) : un fichier informatique contenant l'altitude de chaque pixel de l'image. En théorie, dans des conditions optimales, il est possible de corriger les images satellitaires de sorte que les erreurs résiduelles soient inférieures à la taille d'un pixel (par exemple, 10 mètres pour une image SPOT-P). Toutefois, dans la pratique, ces conditions idéales sont rarement réunies.

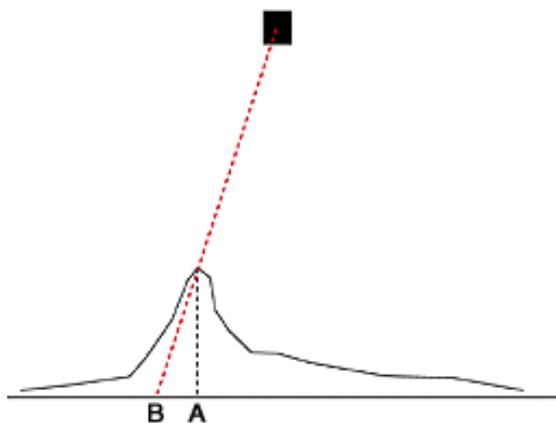


Figure 12 - Principe de la correction géométrique.

## 2. Correction radiométrique

Dans l'idéal, un système d'observation de la Terre serait doté d'un spectro-radiomètre parfait, capable de mesurer avec précision et de manière uniforme la quantité d'énergie réfléchie par les objets situés à la surface terrestre.

Cependant, en pratique, plusieurs sources de perturbations altèrent la qualité radiométrique des données enregistrées. Tout d'abord, la lumière solaire qui éclaire la surface terrestre est elle-même modifiée par son passage à travers l'atmosphère, qui peut atténuer ou diffuser une partie du rayonnement. De plus, l'éclairage n'est pas homogène : les objets ne sont pas tous éclairés sous le même angle, ce qui influence leur réflectance apparente (Bariou, 1985).

Ensuite, la lumière réfléchie par les objets doit à son tour traverser l'atmosphère avant d'atteindre les capteurs du satellite. Ce second passage est également source d'altération, car les gaz atmosphériques et les particules en suspension (comme les poussières) peuvent absorber ou diffuser certaines longueurs d'onde, modifiant ainsi les propriétés spectrales du signal réfléchi.

À cela s'ajoutent les perturbations électroniques introduites lors du traitement du signal par les capteurs embarqués. En conséquence, il est souvent difficile d'obtenir des valeurs radiométriques précises et comparables à partir des données brutes enregistrées par les satellites.

Or, dans certaines applications, il est indispensable de calibrer les données radiométriquement, notamment lorsqu'on souhaite comparer :

- Des images acquises par des capteurs différents ;
- Ou des images issues du même capteur à des dates différentes ;

Plusieurs méthodes ont été développées pour tenter de corriger ces altérations :

-Certaines approches s'appuient sur des modèles mathématiques complexes, qui décrivent les principales interactions radiatives entre le rayonnement solaire, l'atmosphère et la surface terrestre. Bien que ces modèles soient puissants, leur utilisation exige la connaissance précise de plusieurs paramètres atmosphériques (comme la composition chimique, l'humidité, l'épaisseur optique des aérosols, etc.) au moment et au lieu exacts de la prise de vue – une information rarement disponible en pratique.

-D'autres méthodes reposent sur l'observation de cibles de référence dont la réflectance est bien connue. Des surfaces naturelles comme les niveaux des mers, les calottes glaciaires ou les régions désertiques sont fréquemment utilisées (Fig. 13).

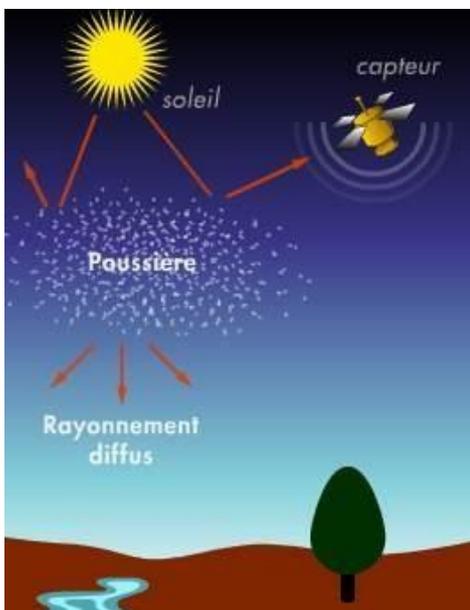


Figure 13. Principe de la correction radiométrique (Jensen, 2007).

## B. Les traitements d'amélioration

### 1. Composition colorée (Trichromie)

La composition colorée est une technique très utilisée en géologie (Tabl. 3), permettant de créer une image composite en fausses couleurs. Elle consiste à affecter une couleur additive (rouge, vert, bleu) ou soustractive (cyan, magenta, jaune) à trois canaux choisis, qu'il s'agisse de bandes spectrales originales ou transformées (ex. : ACP, ratios, etc.).

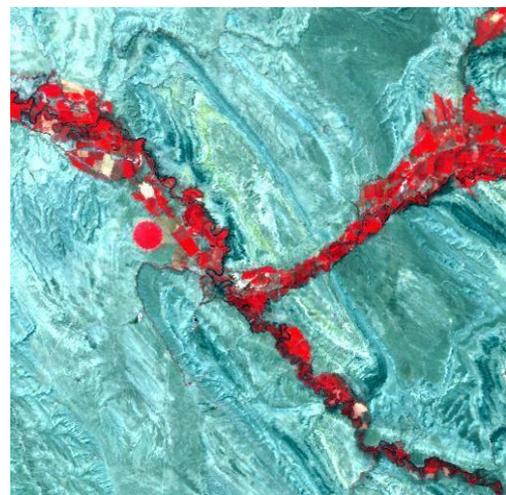
Cette superposition chromatique produit une image trichrome, dans laquelle les contrastes colorés facilitent l'identification visuelle de certaines unités lithologiques (Fig. 14), formes de relief, zones de végétation ou anomalies structurales. C'est un outil fondamental pour l'interprétation visuelle.

RGB	Description
321	Image en couleur naturelle
432	Image en fausses couleurs. La végétation apparaît en rouge
453	La limite entre terre/eau est très nette. Bon pour l'étude des sols et de la végétation
742	Souvent utilisée en géologie. Bon pour étudier les régions désertiques
753	Le sable, le sol et les minéraux montrent une multitude de couleurs
541	Utilisée en agronomie. La végétation apparaît en vert clair
754	Très utiles en géologie. La végétation apparaît en bleu
731	Les roches apparaissent dans une multitude de couleur

Tableau 3 - Différentes combinaisons de la composition colorée et leurs utilités.



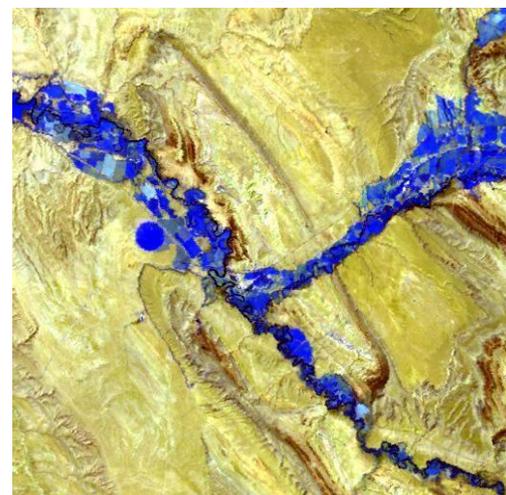
321



432



731



754

Figure 14 - Exemples de quelques compositions colorées.

Par ailleurs, les caractéristiques des images optiques de type Landsat 7 ETM+, qui prends en considération les bandes spectrales, la résolution spatiale et les longueurs d'ondes permet à l'utilisateur de définir plusieurs combinaison de composition colorée utilisée en géologie (Tabl. 4).

Bandes de fréquences du capteur ETM+	Bandes spectrales	Résolution spatiale	Longueur d'onde
Bande 1	Bleu (visible)	30m	0,45-0,5 µm
Bande 2	Vert (visible)	30m	0,52-0,6 µm
Bande 3	Rouge (visible)	30m	0,63-0,69 µm
Bande 4	IRproche	30m	0,75-0,9 µm
Bande 5	IR moyen	30m	1,5-1,7 µm
Bande 6/1	IR Thermique	60m	10,4-12,5 µm
Bande 6/2	IR lointain	120m	
Bande 7	IR moyen	30m	2,08-2,35 µm
Bande 8	Panchromatique (vert-rouge-IR)	15m	520-900nm

Tableau 4 - Caractéristiques des bandes Landsat 7 ETM+ (USGS, 2021).

## 2. Analyse en composante principale classique (amélioration du contraste)

Les images multispectrales, comme celles acquises par le capteur ASTER ou TM, contiennent une grande redondance d'information. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode de réduction dimensionnelle permettant de condenser l'information spectrale en un nombre réduit de néo-bandes non corrélées appelées composantes principales.

- La première composante (ACP1) concentre la majeure partie de la variance (souvent jusqu'à 90 %) et met en évidence des structures géologiques majeures, notamment les linéaments.

- Les composantes suivantes (ACP2 et ACP3) révèlent des caractéristiques géomorphologiques, utiles pour l'interprétation de la structure du terrain.

- Les autres composantes (ACP4, ACP5 et ACP6) montrent des redondances radiométriques illisibles (Fig. 15).

Cette méthode permet après la création de la composition colorée de l'ACP, de mieux discriminer les objets géologiques en réduisant le bruit et les redondances des bandes originales (Fig. 16).

## C. Les traitements spécifiques

### 1. Analyse en composante principale sélective

Certains groupes de bandes sont plus pertinents pour l'analyse géologique :

- Les bandes ETM+ 1, 2 et 3 (spectre visible) sont souvent fortement corrélées et peuvent être regroupées ;

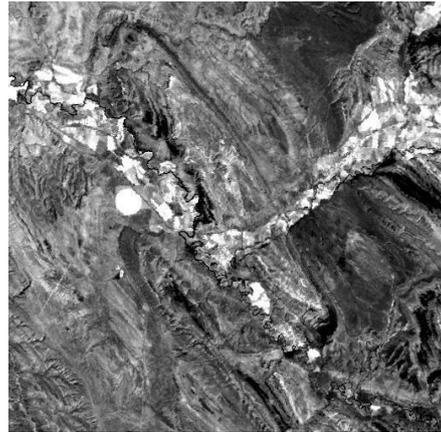
- Les bandes 5 et 7 (infrarouge moyen) forment un second groupe ;

- La bande 4 (infrarouge proche) est souvent traitée indépendamment (Fig. 17).

Donc, trois zones spectrales distinctes peuvent après l'utilisation de la composition colorée (Fig. 18) montrer des détails d'ordre lithologiques et structuraux absents dans l'ACP classique.



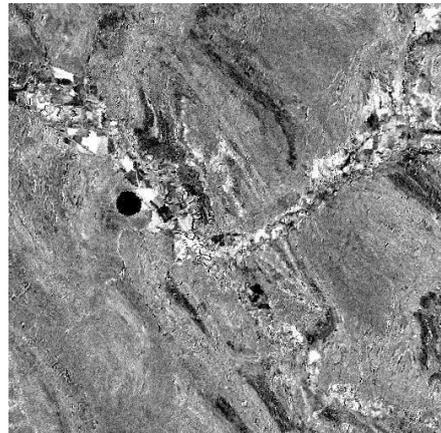
ACP1



ACP2



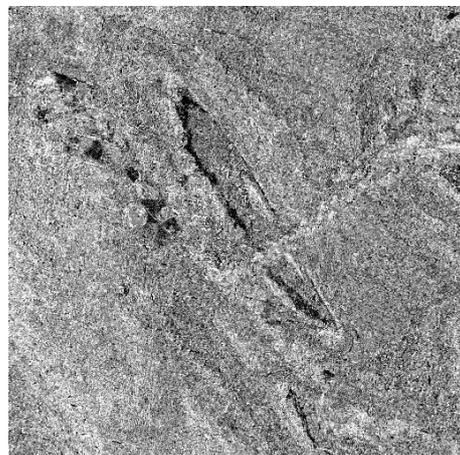
ACP



ACP4



ACP5



ACP6

Figure 15 - Analyse en composante principale classique.

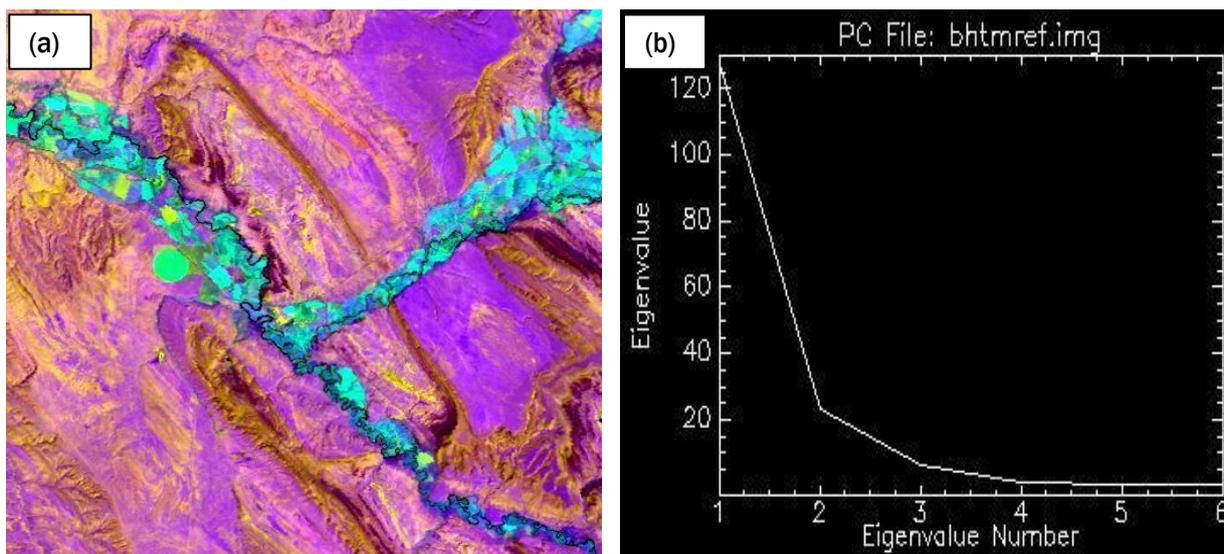


Figure 16 - Composition colorée de l'ACP classique (a) et la courbe représentative de l'ACP (b).

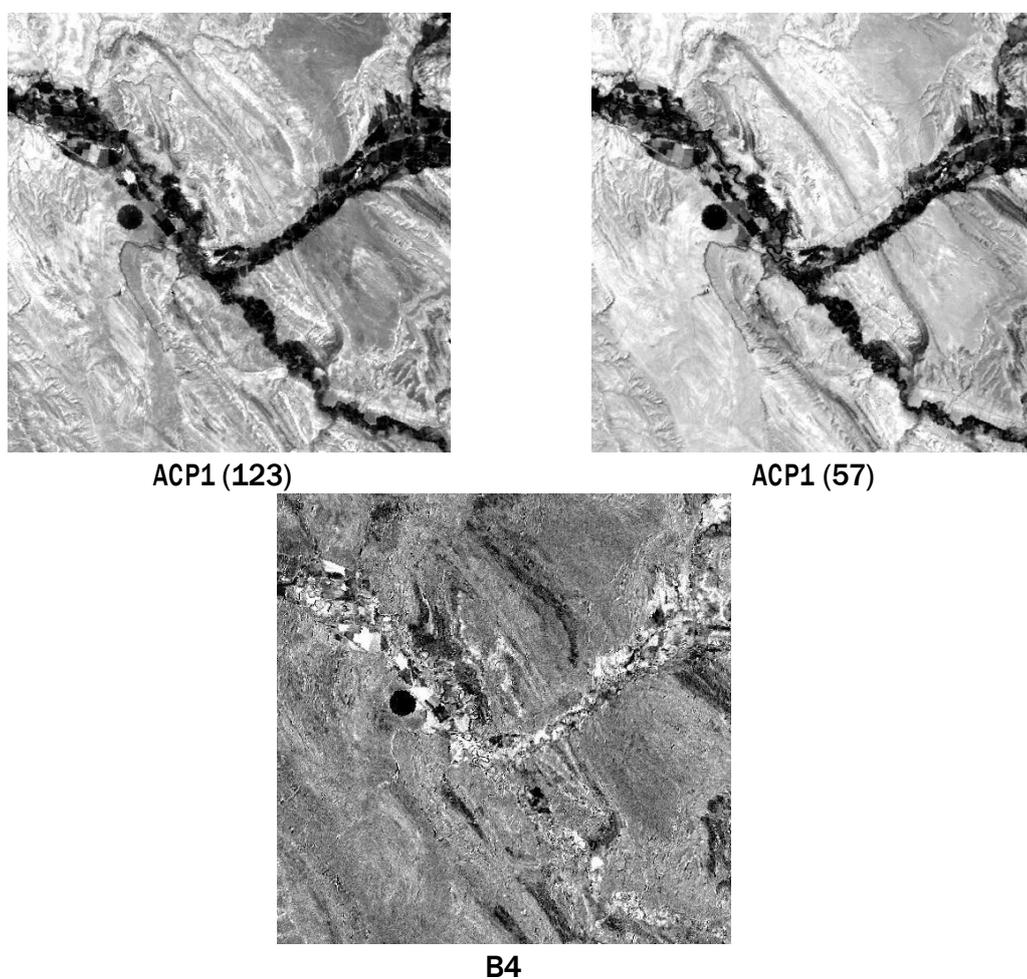


Figure 17 - Analyse en composante principale sélective.

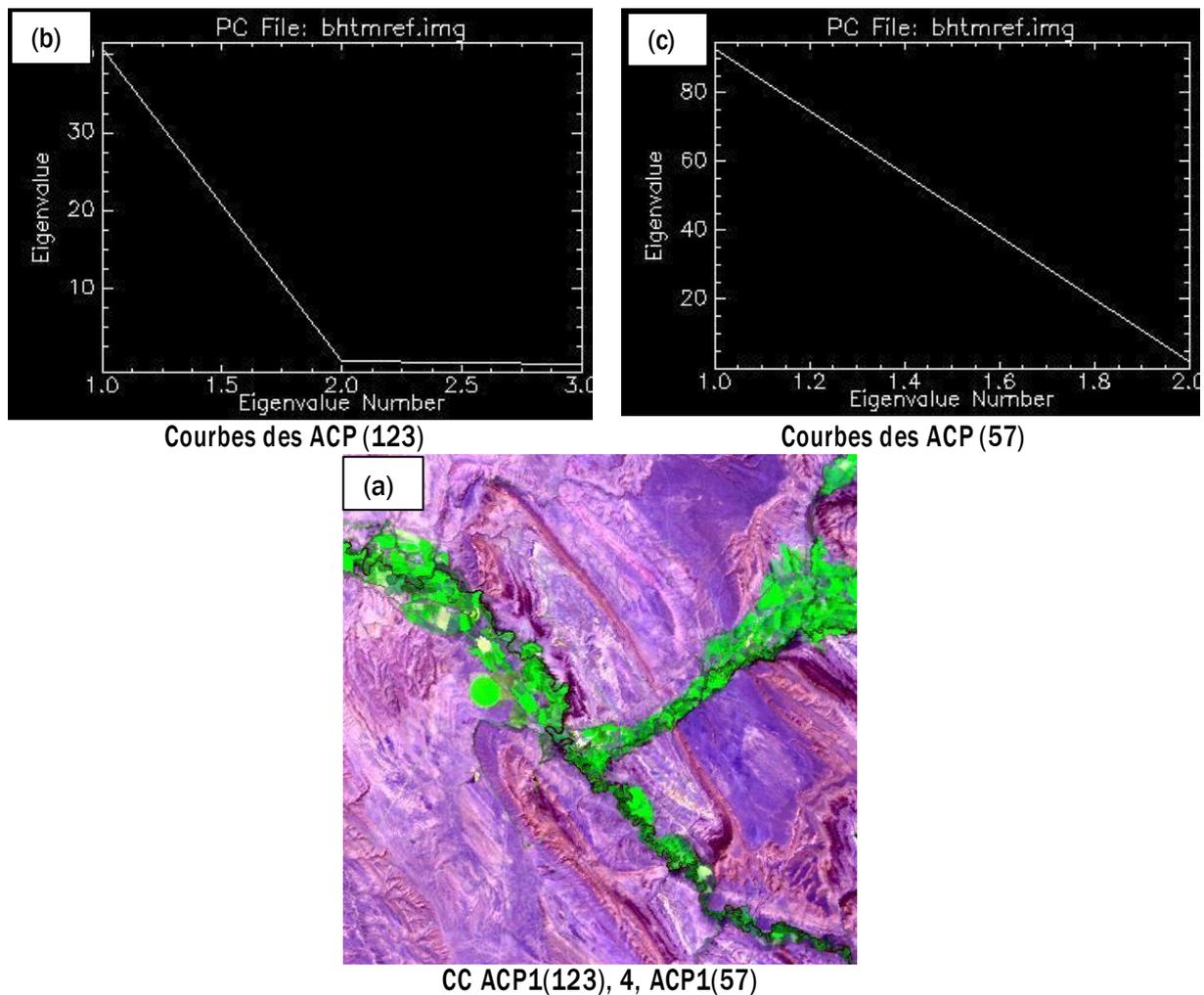


Figure 18 - Composition colorée de l'ACP sélective (a) et les courbes représentatives des ACP (b) et (c).

## 2. Rapports des bandes

Le traitement par ratios consiste à diviser les valeurs d'un canal par celles d'un autre pour chaque pixel. Ce type de transformation met en évidence certains contrastes spectraux subtils, souvent invisibles dans les images originales.

Les images ratio permettent notamment :

- De faire ressortir des anomalies géologiques ou des différences minéralogiques ;
- De réduire les effets topographiques liés à l'orientation et à l'élévation du relief ;
- D'améliorer la discrimination spectrale entre différentes unités géologiques.

Le choix des canaux à combiner dépend de l'objectif géologique visé (Tabl. 5), chaque matériau terrestre ayant une signature spectrale propre (Fig. 19).

Rapport	Description
5/7	Bonne discrimination des roches riches en Al-Oh
3/1	Bonne discrimination des roches ayant subies une altération hydrothermale et pour les oxydes de fer
1/2, 2/1, 5/4	Bonne discrimination des roches riches en oxydes de fer
7/5	Bonne discrimination des argiles

Tableau 5 - Quelques rapports de bandes utilisés en géologie.

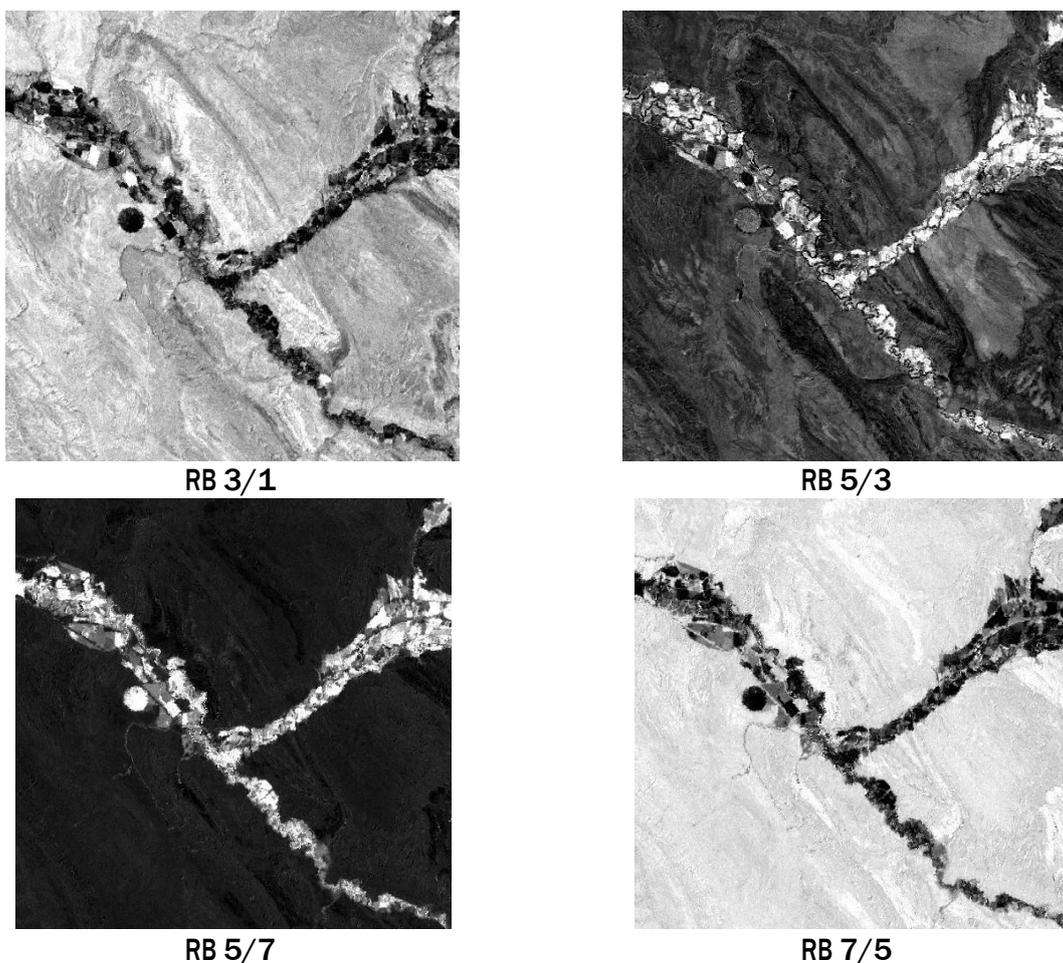


Figure 19 - Exemples de quelques rapports des bandes.

Toutefois, les compositions colorées des bandes ratios (Fig. 20) utilisées en télédétection géologique sont résumés dans le tableau ci-après :

Composition colorée des rapports	Description
[3/1, 5/4, 7/5]	Bonne identification des compositions des matériaux de surface
[3/5, 1/5, 5/7]	Bonne cartographie des serpentines
[5/7, 4/5, 1/3]	
[7/3, 5/2, 4/7]	Bonne discrimination de la lithologie
[5/3, 3/1, 7/5]	

Tableau 6 - Composition colorée des rapports des bandes utilisés en géologie.

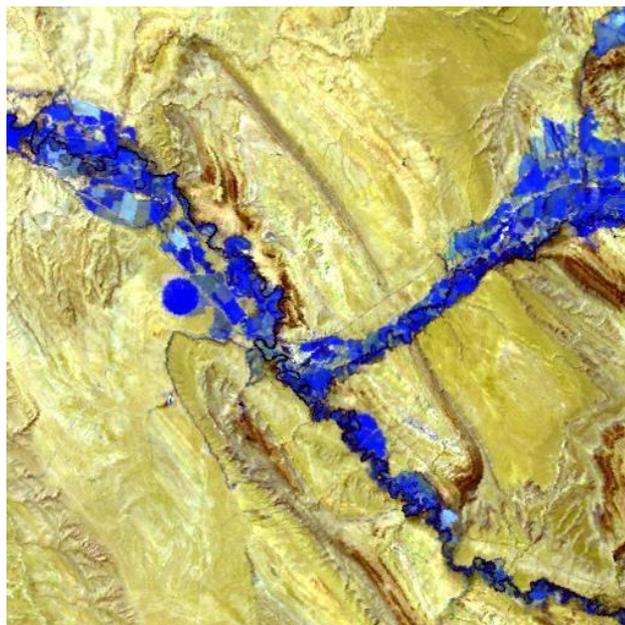


Figure 20 - Composition colorée des rapports des bandes (5/3, 3/1, 7/5).

### 3. Filtrage numérique des images

Le filtrage spatial est une opération mathématique appliquée à l'image dans le but d'extraire certaines caractéristiques directionnelles.

-Les filtres passe-haut sont utilisés pour accentuer les discontinuités radiométriques un outil précieux pour l'analyse des structures linéaires (linéaments, failles, fractures) ;

-Le filtre directionnel et de Sobel, unidirectionnel, permet de détecter les ruptures selon une direction donnée (Tabl. 7) : les pixels avec des valeurs nulles correspondent souvent aux axes de linéaments (Fig. 21);

Ces filtres permettent d'automatiser l'interprétation structurale en accentuant les directions dominantes des fractures géologiques présentes dans le substrat.

Classe de direction											
Nord-Ouest/Sud-Est			Nord-Est/Sud-Ouest			Nord-Sud			Est-Ouest		
0	-1	-2	2	1	0	1	0	-1	1	2	1
-1	0	1	1	0	-1	2	0	-2	0	0	0
-2	1	0	0	-1	-2	1	0	-1	-1	-2	-1

Tableau 7 - Les filtres directionnels de SOBEL.

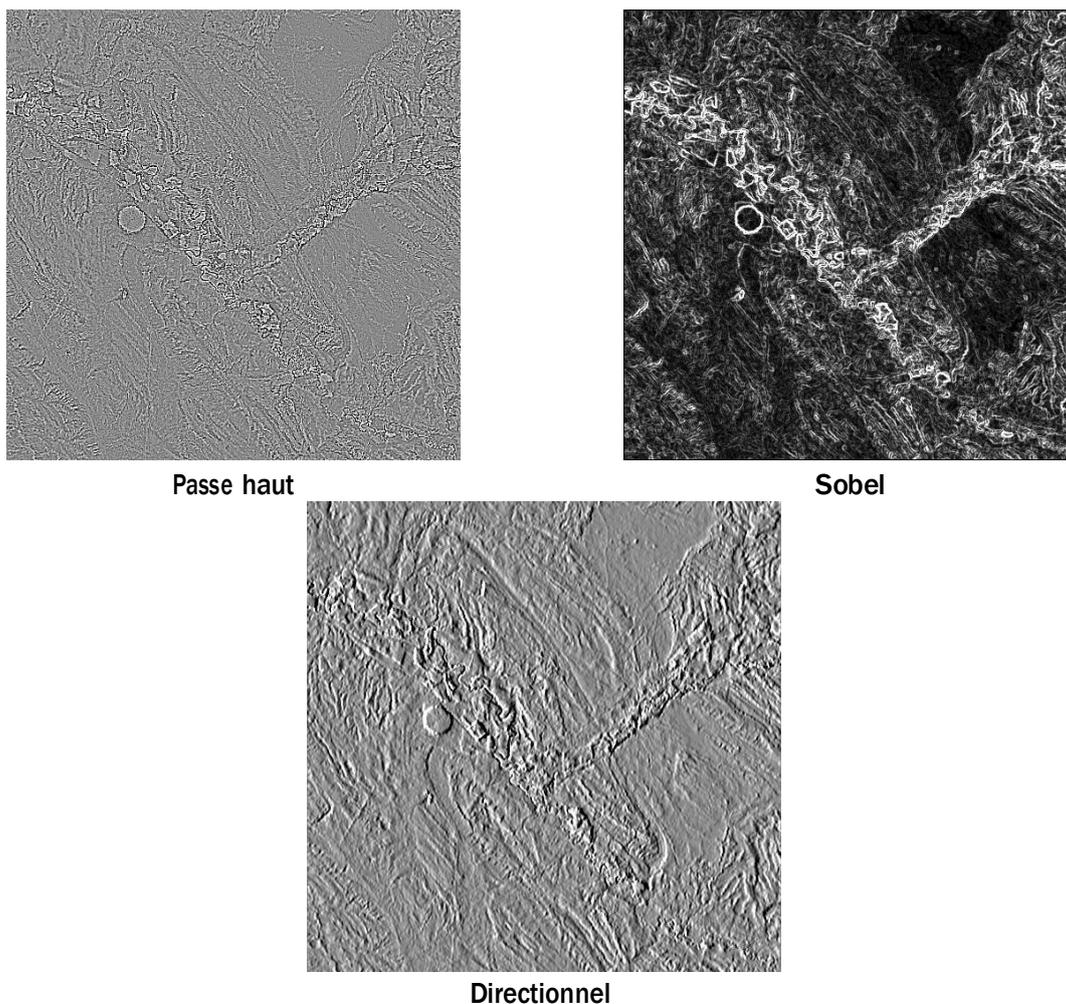


Figure 21 - Filtrés utilisés en géologie.

#### 4. Conversion RVB en ITS (Intensité, Teinte, Saturation)

Ce traitement consiste à convertir les composantes de couleur Rouge, Vert et Bleu (R.V.B.) en un espace colorimétrique différent, basé sur l'Intensité, la Teinte et la Saturation (I.T.S.). Cette transformation permet de produire des représentations plus proches des couleurs naturelles.

L'un des principaux avantages de cette conversion réside dans la possibilité de remplacer la composante d'intensité par une autre image ou un autre canal thématique. Ainsi, les composantes de teinte et de saturation conservent l'information colorimétrique, tandis que l'intensité peut être substituée, par exemple, par un canal issu d'une analyse en composantes principales, un canal infrarouge, ou une image ratio, selon l'objectif recherché. Ce type de substitution permet de valoriser visuellement des informations spécifiques, tout en conservant un rendu chromatique intuitif et informatif (Fig. 22).

Les relations mathématiques entre les composantes RVB et leurs équivalents en ITS sont généralement établies à l'aide d'équations arithmétiques standard, comme présentées dans le Tableau 4. Ces formules permettent une conversion réversible, facilitant ainsi la manipulation avancée des couleurs dans les traitements d'image (Tabl. 8).

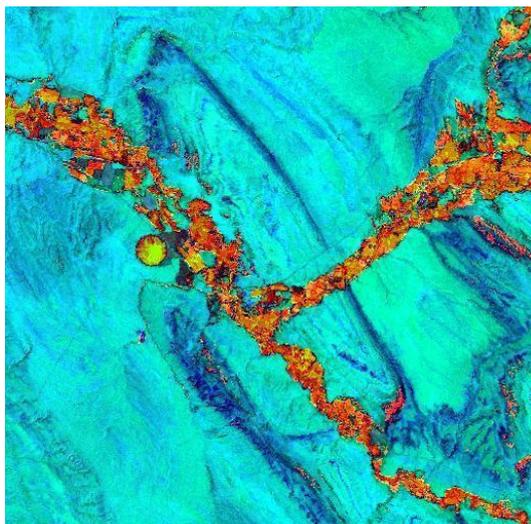


Figure 22 - Transformation RVB-ITS.

Système I.T.S	EQUATION ARITHMETIQUE
Intensité	$I=R+B+V$
Teinte	$H= (V-B)/ (I-3B)/I$
Saturation	$S= (I-3B)/I$

Tableau 8 -. Calcul de l'intensité, de la teinte et de la saturation par les équations arithmétiques. (I : intensité, R : rouge, B : bleue, V : verte, H : teinte, S : saturation) (Lillesand et al., 2015).

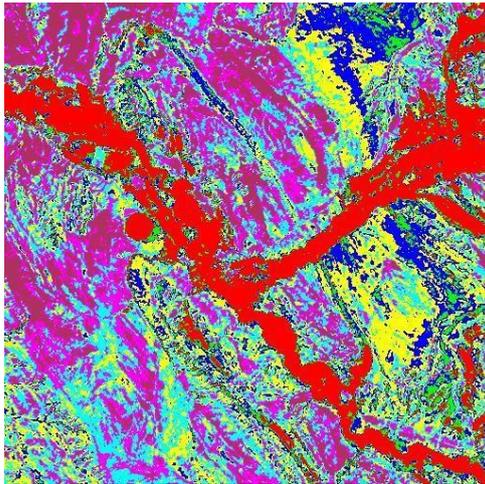
## 5. Classification

La classification est un processus de reconnaissance automatique basé sur les réflectances enregistrées par les capteurs. L'algorithme de classification regroupe les pixels en fonction de leurs similarités spectrales, permettant ainsi d'identifier automatiquement les différentes thématiques présentes dans une image.

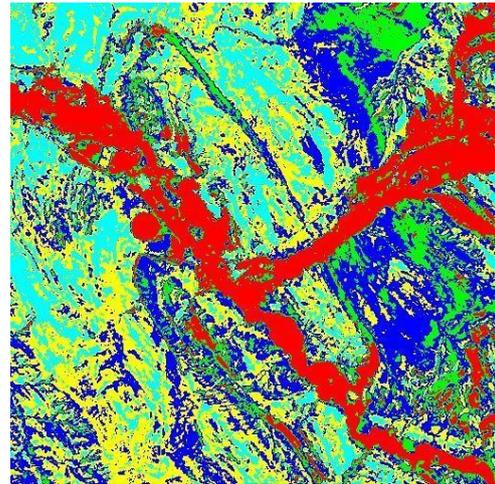
Il existe deux grandes catégories de classification :

-La classification non supervisée, qui s'effectue de manière entièrement automatisée. Cette méthode est rapide, mais ses résultats peuvent s'éloigner de la réalité du terrain. Notons que les algorithmes les plus utilisés sont ISO-DATA et K-MEANS (Fig. 23).

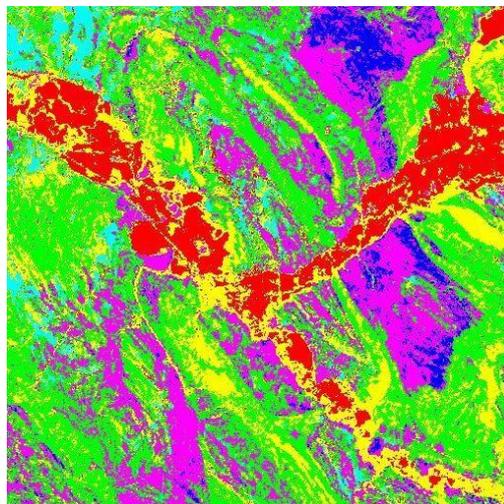
-La classification supervisée, dans laquelle l'utilisateur fournit un certain nombre de paramètres d'ordre spatial ou thématique. Bien que plus lente à exécuter, elle permet d'atteindre une précision pouvant dépasser 90 % par rapport aux observations réelles. La méthode la plus efficace est celle de : Maximum de vraisemblance.



Classification non supervisée ISO DATA



Classification non supervisée K MEANS



Classification supervisée par maximum de vraisemblance

Figure 23 - Classification supervisée et non supervisée.

#### D. Interprétation des images

À l'origine de la télédétection, seule la photographie aérienne était disponible, sans aucune notion d'image numérique ni de traitement informatique. Les images étaient interprétées visuellement par des spécialistes expérimentés, qui, à l'aide de papier calque et de crayons de couleur, extrayaient manuellement une grande quantité d'informations.

Les premières images satellitaires étaient également sous forme photographique, mais elles ont rapidement été remplacées par des images numériques, ouvrant la voie à des méthodes d'analyse automatisée, rendues possibles grâce à la montée en puissance des ordinateurs.

Deux grandes approches se sont ainsi développées en parallèle :

- Le traitement visuel des photos aériennes analogiques. ;
- Le traitement numérique des images satellitaires.

Cette distinction est cependant artificielle. En effet, il est tout à fait possible de visualiser et interpréter des images numériques de manière manuelle, tout comme on peut numériser des photographies analogiques pour leur appliquer des traitements numériques.

La différence fondamentale entre ces deux approches réside dans la nature de l'analyse :

-La classification numérique attribue à chaque pixel un type de matériau de surface (ou couverture) en fonction de sa signature spectrale ;

-L'interprétation visuelle, quant à elle, repose non seulement sur la couleur (donc aussi sur la signature spectrale), mais également sur la forme, la taille, la texture et la disposition spatiale des objets.

A titre d'exemple, une classification supervisée pourrait confondre les discontinuités images. A titre d'exemple, un dyke basaltique avec des coulées de basaltes de leur réponse spectrale similaire. Une telle confusion serait peu probable en interprétation visuelle, car la forme et le contexte spatial des deux objets sont très différents.

De plus, alors que les méthodes de classification sont généralement limitées à l'identification des types de couverture du sol, l'interprétation visuelle permet une lecture beaucoup plus riche : elle peut identifier la structure, la texture est les unités images en fonction des variations des couleurs. Notons, qu'il est possible de combiner les deux méthodes (classification supervisée et interprétation visuelle).

Le principal inconvénient de la photo-interprétation reste sa lenteur et le fait qu'elle nécessite des interprètes hautement qualifiés. Cependant, ces dernières années, des outils d'assistance à l'interprétation visuelle ont vu le jour, exploitant la puissance de calcul des ordinateurs.

Inversement, certains concepts issus de l'interprétation visuelle (comme la reconnaissance des formes ou l'analyse des textures) commencent à être intégrés dans les logiciels d'analyse d'image. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite une puissance de calcul élevée, et les résultats restent encore limités et expérimentaux.

### III. CONCEPTS DE LA PHOTO-INTERPRETATION ET ELEMENTS DE LA PHYSIQUE DE LA COULEUR

#### A. La couleur en télédétection

La couleur est une perception visuelle résultant de l'interaction entre la lumière et l'œil humain, en fonction de la longueur d'onde de la lumière réfléchie ou émise par les objets. Elle constitue une composante fondamentale de la vision, interprétée par le cerveau à partir des signaux captés par les photorécepteurs de la rétine.

#### 1. Base physique de la couleur

Sur le plan physique, la couleur correspond à une portion spécifique du spectre électromagnétique, couvrant principalement les longueurs d'onde comprises entre environ 380 nanomètres (nm) pour le violet et 750 nm pour le rouge (Boynton, 1979 ; Fairchild, 2013)

## 2. Modèles de représentation des couleurs

Plusieurs systèmes ont été développés pour décrire et représenter la couleur :

- Modèle RGB (rouge, vert, bleu) : basé sur la synthèse additive, utilisé en affichage numérique ;
- Modèle CMJN (cyan, magenta, jaune, noir) : basé sur la synthèse soustractive, utilisé principalement en impression (Fig. 24);
- Système CIELAB : un modèle perceptuellement uniforme qui tente de représenter les couleurs comme les perçoit l'œil humain, indépendamment de l'appareil de capture ou de restitution.

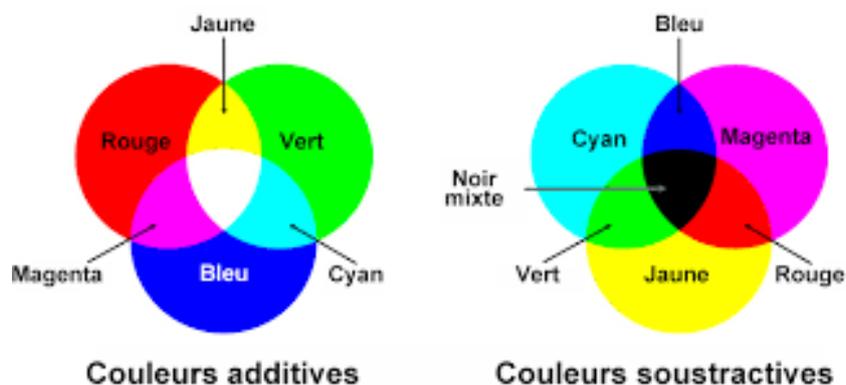


Figure 24 - Modèles RGB et CMJN.

La perception des couleurs est également contextuelle, influencée par l'éclairage, l'environnement immédiat, ou encore des phénomènes d'adaptation visuelle (Evans, 1948 ; Palmer, 1999).

En télédétection, la couleur constitue une traduction visuelle des données spectrales collectées par les capteurs et chaque pixel d'une image satellitaire est associé à une ou plusieurs valeurs numériques correspondant à l'intensité du rayonnement réfléchi (ou émis) dans une ou plusieurs bandes spectrales. Ces bandes peuvent appartenir au :

- Domaine visible (rouge, vert, bleu) ;
- Proche infrarouge (NIR) ;
- Infrarouge moyen (MIR) ;
- Ou encore au thermique, selon les capteurs.

## 3. Valeur analytique et opérationnelle

Cette manipulation des bandes spectrales n'est pas uniquement destinée à améliorer la lisibilité des images : c'est un outil d'analyse puissant, fondé sur les propriétés spectrales spécifiques des matériaux terrestres (Wyszecki et Stiles, 2000). Par exemple :

- Une végétation dense et saine présente une forte réflectance en proche infrarouge, faible dans le rouge ;
- Une surface urbaine renvoie des signatures spectrales contrastées dans les bandes visibles, souvent marquées par des tons gris, blancs ou bleuâtres ;

Ainsi, la couleur joue un rôle crucial pour la classification visuelle des types d'occupation du sol (forêts, cultures, zones urbaines, étendues d'eau, etc.) ; la détection des changements environnementaux dans le temps (déforestation, expansion urbaine, inondation, etc.) et l'interprétation rapide de phénomènes naturels ou anthropiques à l'aide d'images multispectrales ou hyperspectrales.

Comme l'ont souligné [Lillesand et al. \(2015\)](#) ainsi que [Campbell & Wynne \(2011\)](#), la capacité de la couleur à traduire des signatures spectrales en éléments visuellement exploitables lui confère une valeur scientifique et opérationnelle essentielle en télédétection optique.

## B. La trichromie et reproduction polychrome

La trichromie est un principe fondamental de la perception des couleurs, selon lequel toute couleur visible peut être reproduite par la combinaison de trois couleurs primaires. Ce principe repose sur la physiologie de l'œil humain, qui contient trois types de photorécepteurs (les cônes), chacun sensible à une plage spécifique de longueurs d'onde :

- Les cônes L (Long) : sensibles aux longueurs d'onde longues, correspondant au rouge.
- Les cônes M (Medium) : sensibles aux longueurs d'onde moyennes, correspondant au vert.
- Les cônes S (Short) : sensibles aux longueurs d'onde courtes, correspondant au bleu.

Ces trois types de cônes permettent à notre cerveau de reconstruire toute la palette des couleurs à partir des signaux qu'ils reçoivent, selon une logique de combinaison proportionnelle ([Hunt, 2004](#)).

En pratique, cette base physiologique a conduit au développement de deux grands modèles de synthèse colorimétrique :

-La synthèse additive (RVB : Rouge, Vert, Bleu) Utilisée pour les écrans, l'éclairage, la télévision et la vidéo. Elle consiste à additionner des lumières colorées. Plus on ajoute de lumière, plus le résultat est clair. Le blanc est obtenu par la superposition des trois couleurs primaires à pleine intensité.

### 1. Synthèse additive (RVB)

Dans les systèmes d'affichage numériques (écrans d'ordinateurs, téléviseurs, smartphones), la couleur est produite par la synthèse additive. Un écran couleur est constitué d'un ensemble de pixels, chacun composé de trois sous-pixels ou photosites : un rouge, un vert et un bleu.

L'œil humain étant incapable de distinguer les très petits éléments à courte distance, les lumières des trois sous-pixels sont perçues comme un mélange unique. En jouant sur l'intensité de chaque composante, on peut produire des millions de couleurs :

- Rouge + Vert = Jaune ;
- Rouge + Bleu = Magenta ;
- Vert + Bleu = Cyan ;
- Rouge + Vert + Bleu = Blanc ;
- Aucun = Noir.

Par exemple, si le sous-pixel rouge et le bleu sont activés au maximum et que le vert est éteint, l'œil perçoit une couleur violette.

Ce principe est à la base de tous les systèmes vidéo en couleur, et permet une reproduction fidèle et dynamique des images colorées.

## 2. Synthèse soustractive (CMJN)

En impression (presse, imprimantes, magazines), on utilise la synthèse soustractive. Contrairement à l'écran qui émet de la lumière, l'impression fonctionne avec la lumière ambiante réfléchi. Les encres utilisées absorbent (soustraient) certaines longueurs d'onde de la lumière blanche :

- Cyan absorbe le rouge ;
  - Magenta absorbe le vert ;
  - Jaune absorbe le bleu.
- de seulement quatre couleurs d'encre, finement dosées.

## Cinquième chapitre :

# LES DIFFERENTES METHODES D'ANALYSES

### I. LES PRINCIPES DE LA PHOTO-INTERPRETATION

La photo-interprétation repose sur la capacité à reconstituer le relief à partir de deux prises de vue d'une même scène, capturées depuis des points légèrement différents. Ce couple stéréoscopique, appelé stéréogramme, permet de percevoir la profondeur et le relief, avec ou sans instrument optique. Pour faciliter cette perception en trois dimensions, on utilise des instruments appelés stéréoscopes, dont les deux types principaux sont :

- Les stéréoscopes de poche (compacts, portatifs) ;
- Les stéréoscopes à miroirs (plus complexes, plus précis) ;

La base de toute photo-interprétation thématique est la lecture des photographies aériennes, qui permet une analyse du paysage, une délimitation des morphologies et une mise en relation avec des structures géologiques (Scanvic, 1983).

Cette analyse s'appuie sur plusieurs éléments visuels : tonalités, couleurs, formes, textures et structures, afin de produire une esquisse photo-géologique, véritable document d'orientation.

#### A. La photo-identification

La photo-identification est une simple lecture de l'image. Elle comprend plusieurs étapes :

- Détection : repérer un objet dans son environnement. Elle dépend du capteur, de la qualité d'image, de l'échelle d'analyse et du prétraitement ;
- Identification : reconnaître un objet par analogie avec des formes connues ;
- Analyse : combinaison de détection et identification ;
- Interprétation : elle repose sur les connaissances du photo-interprète pour donner un sens aux éléments repérés.

#### B. La photo-interprétation globale

L'objet détecté est identifié à son rôle, à sa fonction ou à une de ses caractéristiques. Exemple ; la densité de drainage renseigne directement sur la perméabilité du terrain (la perméabilité est appréhendée indirectement). (Haddouche, 2009)

#### C. La photo-interprétation analytique

Il s'agit de documenter de manière systématique tous les objets reconnus sur l'image. Le but est de produire un ensemble cohérent de documents descriptifs (légende, croquis, cartes, etc.) permettant une compréhension thématique du territoire étudié.

## II. CRITERES D'ANALYSE EN PHOTO-INTERPRETATION (partie à développer en TP)

### A. Couleur et tonalité

La tonalité dépend de la quantité de lumière réfléchie par l'objet. Elle est cruciale dans l'interprétation, notamment en niveaux de gris. Par contre, la couleur apporte un avantage considérable : l'œil humain peut distinguer jusqu'à 1000 fois plus de nuances en couleur que dans l'échelle des gris.

Néanmoins, certains contextes (zones arides, patines ferrugineuses) peuvent uniformiser les teintes, rendant l'interprétation plus complexe.

### B. Morphologie

La morphologie renvoie aux caractéristiques géométriques des objets : forme, mode d'affleurement, taille. C'est une aide précieuse pour l'interprétation géologique.

La forme du relief peut être révélatrice d'événements géologiques spécifiques, à condition que le photo-interprète ait une bonne connaissance des processus géodynamiques. Ainsi, un interprète efficace est aussi un géologue compétent.

### C. Structure et texture

Les structures et textures sont liées à la variabilité spatiale de la couleur, de la forme ou de la taille des objets trop petits pour être discernés individuellement. Ces éléments dépendent de l'échelle d'analyse et de la résolution de l'image et reflètent des propriétés géologiques ou pédologiques. Par exemple :

- Lisse : dalle calcaire ;
- Grain fin : granite fin ;
- Grain moyen/grossier : roches volcaniques ou sédimentaires diverses.

Lorsque les roches sont recouvertes, la texture résulte de l'organisation des éléments de surface (végétation, sol, eau...), et constitue des réseaux texturaux indicateurs de processus géologiques ou géomorphologiques.

Par ailleurs, la démarche systématique d'analyse prend en considération la perception des objets, la détection et l'identification ainsi que l'analyse de la transparence (visibilité à travers les couches superficielles).

## III. FONDEMENTS DE L'INTERPRETATION DES DONNEES

L'interprétation d'images satellitaires consiste à :

- Identifier les objets recherchés (avec un certain degré de certitude) ;
- Cartographier ces objets ;
- Éviter les confusions en identifiant aussi les éléments non recherchés.

Cela implique une connaissance large des objets naturels et anthropiques, qu'ils soient :

- Géomorphologiques (reliefs, formes de terrain) ;
- Géologiques (failles, plis, lithologies) ;
- Biophysiques (végétation, eau, sol).

Une interprétation pertinente repose sur une compréhension géomorphologique et géologique cohérente du terrain observé (Chorowicz & Deroin, 2003).

De ce fait, l'interprétation des objets non structuraux doit prendre en considération d'une part, les objets géomorphologiques élémentaires (vallée, colline, sommet aigu,...) et les objets géomorphologiques composés d'autre part:

- Biochimiques (karstification, glaciaires d'érosion,...) ;
- Gravités (mouvements des terrains) ;
- Eaux (réseaux de drainage, lacs, étangs, marais dépôts fluviaux) ;
- Vents (dunes, regs, erg,...) ;
- Glaces (dépôts fluvio-glaciaires, moraines,...) ;
- Littoral (plages, cordons littoraux, estuaires deltas,...).

Par ailleurs, les objets structuraux définis sur le terrain et identifier sur les images sont de deux types :

-Objets structuraux élémentaires : (traces lithologiques, formations lithostratigraphiques, pendages (MNT), diaclases, failles) ;

-Objets structuraux composés (plis, zones de failles, charriages, chevauchements, discordances, corps magmatiques et métamorphiques, Impacts des météorites, Linéaments).

La recherche des éléments, leurs définitions et leur structuration nécessitent cinq (5) phases d'entraînement :

### 1. PHASE 1 : Les ressources d'informations

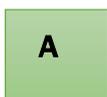
Quand on doit cartographier une zone ou une région, il en faut rechercher toutes les sources de renseignements (cartes topographiques ; cartes géologiques ; cartes écologiques ; cartes d'occupation du sol ; les ouvrages décrivant la zone ou la région sous un quelconque aspect ; la couverture aérienne ou spatiale existante ;...etc.

### 2. PHASE 2 : Imagination

Il faut à ce moment-là imaginer la réalité terrain à travers l'image ou la photographie aérienne. On va donc essayer de placer chacun des éléments reconnus dans une structure plus ou moins préétablie. On obtiendra, donc, un ensemble plus ou moins cohérent.

### 3. PHASE 3 : Détermination des zones homogènes

On peut repérer ces zones soit par un symbole (lettre, chiffre, signe,...etc.),



soit par une limite que l'on dessine.

### 4. PHASE 4 : Le terrain

Le travail de terrain, qui est la phase fondamentale, va utiliser encore l'image (ou la photographie aérienne) qui sert donc de document d'orientation et de document de report.

Le travail sur terrain avec ce type de document (image ou photo aérienne) permet aussi de contrôler la validité des hypothèses faites au bureau (zones d'apprentissage ou d'entraînement).

Le terrain représente, donc, la phase essentielle de la photo-interprétation. Il permet de vérifier si l'ensemble pré établi est, ou non, cohérent avec la réalité terrain.

#### **5. PHASE 5 : Analyse des corrélations**

Il faut analyser les corrélations déterminées sur le terrain entre les éléments du sol et les éléments sur image ou photo aérienne.

L'étude de ces corrélations amène à établir une nouvelle structure à partir de laquelle sera établie la carte thématique : Carte de végétation ; carte pédopaysagique ; Carte d'occupation du sol ;....etc.

## CONCLUSION

La télédétection constitue aujourd'hui un outil fondamental pour l'analyse, la compréhension et la gestion de l'environnement terrestre. Grâce aux capteurs embarqués sur satellites et aéronefs, elle permet d'acquérir des données multispectrales et multitemporelles à grande échelle, ouvrant ainsi la voie à une observation continue, rapide et non intrusive des territoires.

L'interprétation d'image, qu'elle soit visuelle ou numérique, repose sur l'exploitation des signatures spectrales des objets, mais également sur l'analyse de critères tels que la couleur, la texture, la structure ou la morphologie. Tandis que les classifications automatiques permettent un traitement massif et rapide des données, la photo-interprétation offre une finesse d'analyse irremplaçable, notamment grâce à l'expertise humaine capable d'intégrer le contexte, la forme ou encore la logique spatiale des éléments représentés.

La complémentarité entre méthodes numériques et interprétation visuelle constitue la clé d'une analyse fiable et efficace, adaptée aux exigences scientifiques, environnementales et opérationnelles actuelles. Ainsi, la maîtrise des outils de télédétection et des techniques d'interprétation d'image s'impose comme un savoir-faire incontournable dans de nombreux domaines : géologie, urbanisme, agriculture, gestion des ressources naturelles, ou encore surveillance des risques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ASP (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY) (1983)**- Manual of Remote Sensing. Vol 1 : Theory, instruments and techniques, 1232 p.

**BARIOU R. (1985)**- Rayonnement électromagnétique. Dossier de télédétection n4. Université de Rennes, 66 p.

**BONN F. et ROCHON G. (1992)**- Précis de Télédétection, Principes et Méthodes' Ed. UREF/AUPELF Québec (Canada) 485p.

**BOYNTON RM. (1979)**- Human Color Vision. Holt, Rinehart and Winston.

**CALOZ R., BONN F. & COLLET C. (2001)** - Précis de télédétection. Volume 3. Traitements numériques d'images de télédétection. AUPELF-UREF. Les presses de l'université du Québec, ISBN 2-7605-1145-6, 386 p.

**CAMPBELL, J. B., & WYNNE, R. H. (2011)**- Introduction to Remote Sensing (5th ed.). Guilford Press. CCT (CENTRE CANADIEN DE TELEDETECTION) (1995)- Notions fondamentales de télédétection. 266 p.

**CHOROWICH J. (1980)** - Mise à jour des notions utilisées par les géologues en télédétection. Société géologique de France, 5, 203-206.

**CHORWCZ J. et DEROIN JP (2003)**- La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique'Ed. scientifique GB (France), 141p.

**CHUVIECO E. (2016)**- Fundamentals of Satellite Remote Sensing (2<sup>nd</sup> ed). CRC Press, Taylor and Francis.

**CLARK, R.N. (1980)** - A Large Scale Interactive One Dimensional Array Processing System, Pub. Astron. Soc. Pac., 92, 221-224.

**EVANS RM. (1948)**- An introduction to Color. Ed Wiley.

**FAIRCHILD MD. (2013)**- Color Appearance Models. (3rd ed). Wiley.

**GDTA (GROUPEMENT POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE).**

- Télédétection : outils et méthodes. Cahiers Pédagogiques, Version n° 1.2. juin 1992 ; 77 p.
- Télédétection : bases physiques et technologiques, Version n° 1.2. juin 1991 ; 66 p.
- Télédétection : bases physiques et technologiques, Version n° 1.2. juin 1992 ; 86 p.

**GERARD (M-C), (2010)**-Traitement des données de télédétection Environnement et ressources naturelles'. Ed. Dunod Paris (France), 555p.

**GIRARD M-C & GIRARD C-M.** (1999) - Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 1999. ISBN: 2 10 004 1851.

**GOMEZ, C. (2004)** - Potentiels des données de télédétection multisources pour la cartographie géologique: Application à la région de Rehoboth (Namibie). Thèse de Doctorat de l'Université Claude Bernard - Lyon 1, 174 pp.

**GOMEZ, C., DELACOURT, C., ALLEMAND, P. & LEDRU, P. (2004)** - Potentials and Limitations of Coupling ASTER and Airborne Geophysical Data for Improvement of Geological Mapping in Arid Region (Namibia, Rehoboth Region), Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology III, edited by Manfred Ehlers, Hermann J. Kaufmann, Ulrich Michel, Proceedings of SPIE 5239, 98-108.

**HADDOUCHE, D.(2009).** La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride en Algérie : Cas de la région de Naâma » . *Thèse Doctorat Sciences, Univ Tlemcen 211 p.*

**HUNT, R. W. G.** (2004)- The Reproduction of Colour (6th ed.). Wiley.

**JENSEN, J. R.** (2007)- Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

**KERR, Y.;** (1989) - Quelques exemples de réponses spectrales : Cours GDTA ENSG ; 232-276.

**LILLESAND, T.M. & KIEFFER, R. W. (2000)**- Remote sensing and Image interpretation, 4e edition. Wiley

**LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., & CHIPMAN, J. W.** (2015)- Remote Sensing and Image Interpretation (7th ed.). Wiley.

**PALMER SE. (1999)**- Vision Science : Photons to Phenomenology. MIT Press. **ROBIN, M. (1995)** - La télédétection. Eds. Nathan Université, 318 pp.

**SABINS, F. F. (1997)**- Remote Sensing: Principles and Interpretation (3rd ed.). Waveland Press.

**SALISBURY J, WALTER L & VERGO, N. (1987)** - Mid Infrared (2.1-25 M) Spectral Minerals : First Edition, Report 87-263, United States Geological Survey.

**SCANVIC J.Y. (1983)** - Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. Manuels et méthodes .BRGM. 1983. France. 158 p.

**USGS (United States Geological Survey). (2021)** – Landsat 7, Sciences Data Users Handbook. URL: <http://LLwww.usgs.gov>.

**VINCENT R, ROWAN L, GILLESPIE R & KNAPP C (1975)** - Thermal-Infrared Spectra and Chemical Analyses of Twenty-Six Igneous Rock Samples, Remote Sensing of Environment, 199-209.

**WYSZECKI, G., & STILES, W. S.** (2000). Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae (2nd ed.). Wiley.

## LISTES DES FIGURES

	Pages
Figure 1 - Processus de la télédétection (Bonn et Rochon, 1992).	10
Figure 2 - Domaines d'application de la télédétection en géologie (Sabins, 1997).	12
Figure 3 - Composition et propagation d'une onde électromagnétique (Lillesand and Kieffer, 2000).	15
Figure 4 - Le Spectre électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992, modifié).	16
Figure 5 - La région des hyperfréquences (Bonn et Rochon, 1992, modifié).	17
Figure 6 - Interaction entre énergie électromagnétique et la matière (in Gomez, 2004).	19
Figure 7 - La réflectance spéculaire (a) et diffuse (b)(in Gomez, 2004).	20
Figure 8 - Signatures spectrales enregistrées au laboratoire de quatre minéraux fréquemment représentés sur Terre : quartz, pyroxène, calcite et hématite (Gomez, 2004).	21
Figure 9 - Spectres de réflectance des minéraux tirés de la librairie spectrale de l'USGS, a) Minéraux carbonatés, b) Feldspaths et quartz (d'après la librairie spectrale de l'USGS).	22
Figure 10 - Spectres de réflectance des minéraux tirée de la librairie spectrale de l'USGS, a) Minéraux sombres, b) Micas (d'après la librairie spectrale de l'USGS).	22
Figure 11 : Spectres de réflectance de quelques roches magmatiques (d'après la librairie spectrale de l'USGS).	23
Figure 12 - Principe de la correction géométrique.	29
Figure 13. Principe de la correction radiométrique (Jensen, 2007).	30
Figure 14 - Exemples de quelques compositions colorées.	31
Figure 15 - Analyse en composante principale classique.	33
Figure 16 - Composition colorée de l'ACP classique (a) et la courbe représentative de l'ACP (b).	34
Figure 17 - Analyse en composante principale sélective.	34
Figure 18 - Composition colorée de l'ACP sélective (a) et les courbes représentatives des ACP (b) et (c).	35
Figure 19 - Exemples de quelques rapports des bandes	36
Figure 20 - Composition colorée des rapports des bandes (5/3, 3/1, 7/5)	37
Figure 21 - Filtrés utilisées en géologie.	38
Figure 22 - Transformation RVB-ITS.	39
Figure 23 - Classification supervisée et non supervisée.	40
Figure 24 - Modèles RGV et CMJN.	42

## LISTES DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1 - Exemples de capteurs et de vecteurs ( <a href="#">Chuviesco, 2016</a> ).	13
Tableau 2 - Signification des canaux utilisés en télédétection ( <a href="#">Bonn et Rochon, 1992</a> ).	27
Tableau 3 - Différentes combinaisons de la composition colorée et leurs utilités.	31
Tableau 4 - Caractéristiques des bandes Landsat 7 ETM+ ( <a href="#">USGS, 2021</a> ).	32
Tableau 5 - Quelques rapports de bandes utilisés en géologie.	36
Tableau 6 - Composition colorée des rapports des bandes utilisés en géologie.	36
Tableau 7 - Les filtres directionnels de SOBEL.	37
Tableau 8 - Calcul de l'intensité, de la teinte et de la saturation par les équations arithmétiques. (I : intensité, R : rouge, B : bleue, V : verte, H : teinte, S : saturation) ( <a href="#">Lillesand et al., 2015</a> ).	39