

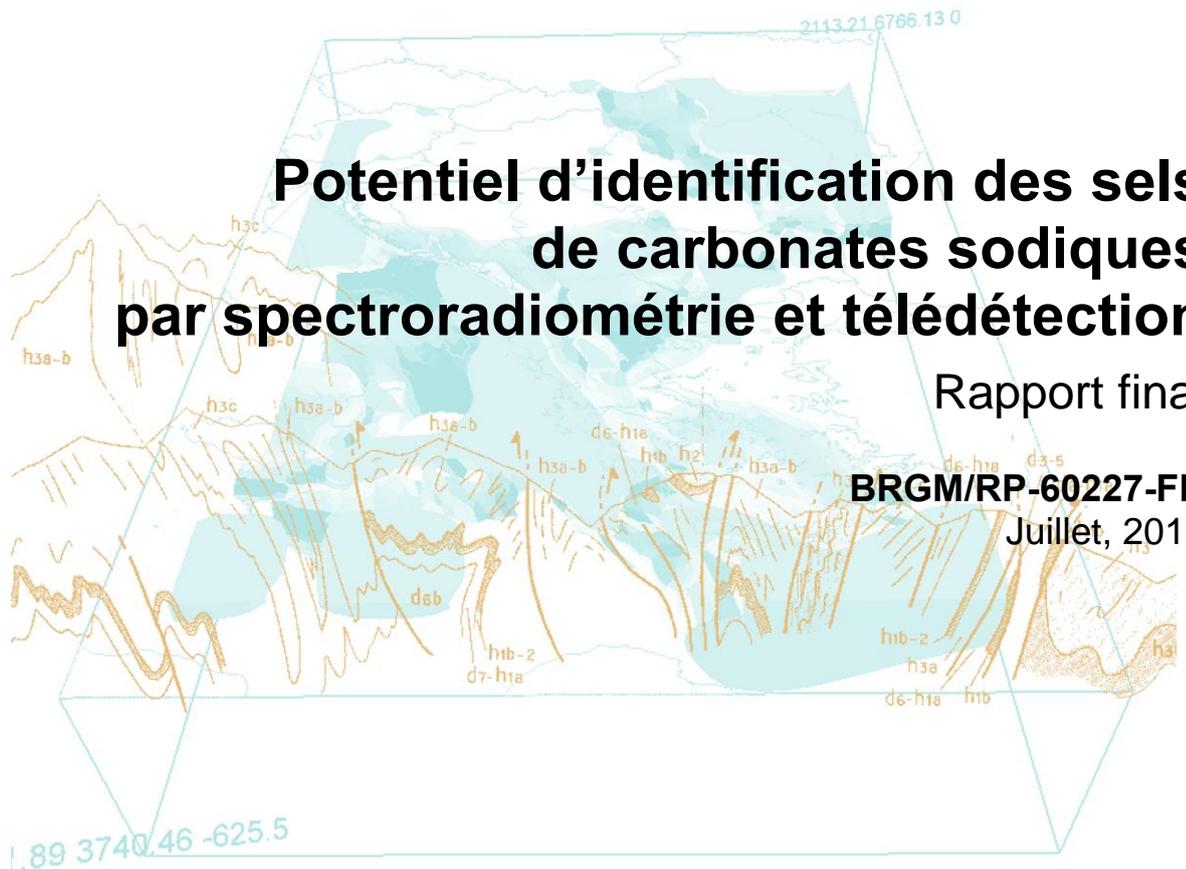


Potentiel d'identification des sels de carbonates sodiques par spectroradiométrie et télédétection

Rapport final

BRGM/RP-60227-FR

Juillet, 2011



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Potentiel d'identification des sels de carbonates sodiques par spectroradiométrie et télédétection

Rapport final

BRGM/RP 60227-FR
Juillet, 2011

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Recherche du BRGM

S. Chevrel

Vérifié par :

Nom : A. Bourguignon

Date : 08/11/2011

Signature :



Approuvé par :

Nom : J.M. Angel

Date : 09/11/2011

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Carbonates sodiques, Spectroradiométrie, Télédétection, ASTER, Lac Magadi, Lac Natron, Kenya, Tanzanie, Chine.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Chevrel S. (2011) - Potentiel d'identification des sels de carbonates sodiques par spectroradiométrie et télédétection. Rapport final. BRGM/RP-60227-FR. 49 p., 28 fig., 5 tabl.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les essais de classification des sels évaporitiques à partir d'images satellitaires ASTER et des spectres de sels de la librairie spectrale USGS ont montré de bonnes capacités de cartographie des sels dans les lacs salés par cette technique. En particulier, à l'exception de la thénardite dont le spectre est proche de celui des sols et roches nues, il n'y a pas de confusion entre les sels et leur environnement, seule la partie des lacs correspondant à ces sels étant cartographiée. Dans tous les cas, on observe une zonation dans les lacs, en forme d'auréole ou non. Ces classifications nécessiteraient toutefois une validation sur le terrain.

Il n'a par contre pas été possible de vérifier si cette méthode pouvait s'appliquer également en zone nue, hors lacs salins en eau

Le manque de disponibilité de spectres de lacs salins disponibles sous forme numérique utilisables par les logiciels d'analyse spectrale de télédétection et les résultats obtenus incitent à orienter les perspectives de développement d'études à ce sujet selon trois axes :

- pallier au manque de données en disposant d'une librairie spectrale numérique extensive représentative de l'ensemble des sels de lacs évaporitiques ;
- améliorer le traitement des données image pour une meilleure classification et valider les résultats ;
- disposer de données images permettant une meilleure discrimination spectrale que les données ASTER.

Sommaire

1. Introduction.....	9
1.1. CADRE	9
1.2. OBJET DE L'ÉTUDE.....	9
1.3. MINÉRAUX ÉVAPORITQUES CONCERNÉS.....	9
2. Notions de spectroradiométrie.....	11
2.1. LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE.....	11
2.2. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE.....	11
2.3. NOTIONS DE REFLECTANCE ET DE SIGNATURE SPECTRALE	12
2.3.1. Interaction du rayonnement électromagnétique à la surface terrestre	12
2.3.2. Signature spectrale	13
3. Acquisition de spectres de réflectance à l'aide d'un spectroradiomètre	17
4. Le capteur ASTER et autres capteurs de télédétection	19
4.1. LE CAPTEUR ASTER.....	19
4.2. COMPARAISON ASTER ET LANDSAT	19
4.3. CAPTEURS HYPERSPECTRAUX.....	20
4.3.1. Capteur hyperspectral.....	20
4.3.2. Imagerie hyperspectrale.....	21
5. Compilation des spectres de réflectance disponibles	23
5.1. SPECTRES SOUS FORME NUMÉRIQUE.....	23
5.2. SPECTRES SOUS FORME ANALOGIQUE.....	23
6. Analyse des spectres disponibles sous forme numérique.....	27
6.1. CAPACITÉ D'IDENTIFICATION SPECTRALE DES MINÉRAUX ÉVAPORITQUES ET INFLUENCE DES FENÊTRES ATMOSPHÉRIQUES. .	27
6.2. INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE SUR LES PROPRIÉTÉS SPECTRALES.....	27

6.3. RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DES SPECTRES SUR LES 9 BANDES ASTER....	30
7. Acquisition et analyse de spectres spécifiques à l'étude.....	33
8. Essai de cartographie de lacs salés à partir d'images ASTER.....	35
8.1. CORRECTION ATMOSPHERIQUES DES IMAGES.....	35
8.2. IMAGES ASTER DU LAC MAGADI ET DU LAC NATRON.....	37
8.2.1. Scènes disponibles.....	37
8.2.2. Corrections atmosphériques.....	37
8.2.3. Essais de cartographie des sels par classification supervisée.....	37
8.3. IMAGES ASTER DE WULAN AOB AO.....	42
8.3.1. Localisation.....	42
8.3.2. Scènes disponibles.....	42
8.3.3. Corrections atmosphériques.....	43
8.3.4. Essais de cartographie des sels par classification supervisée.....	43
9. Conclusions et perspectives.....	47
9.1. CONCLUSIONS.....	47
9.1.1. Analyse des spectres.....	47
9.1.2. Essais de cartographie à partir d'images ASTER.....	47
9.2. PERSPECTIVES.....	47
9.2.1. Amélioration des connaissances.....	48
9.2.2. Amélioration du traitement des données.....	48
9.2.3. Amélioration de la résolution des images de télédétection.....	48
10. References.....	49

Liste des figures

Figure 1 : Le spectre électromagnétique.....	11
Figure 2 : Le spectre électromagnétique.....	12

Figure 3 : Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.....	13
Figure 4 : Extraction de paramètres bio-géochimiques à partir d'une information spectrale.....	14
Figure 5 : Identification spectrale des principaux minéraux.....	15
Figure 6 : Spectroradiomètre ASD FieldSpec® 3 et son utilisation en lumière naturelle sur le terrain.....	17
Figure 7 : Mesure spectroradiométrique par sonde de contact en illumination artificielle.....	17
Figure 8 : Spectre de garniélite mesuré en illumination artificielle (courbe rouge) et en illumination naturelle (courbe noire).....	18
Figure 9 : Comparaison des bandes spectrales ASTER et Landsat 7 ETM+ (d'après Abrams and Hooks, 2002).....	20
Figure 10 : Fenêtres atmosphériques couvertes par le capteur ASTER.....	20
Figure 11 : Principe d'un spectroradiomètre imageur.....	21
Figure 12 - Comparaison entre la signature spectrale de la kaolinite en laboratoire, avec sa signature à partir d'un capteur multispectral (TM) et d'un capteur hyperspectral (AVIRIS).....	22
Figure 13 : Spectres de minéraux carbonatés et pics d'absorption correspondants, d'après Crowley.....	25
Figure 14 : Spectres de réflectance des minéraux évaporitiques disponibles et fenêtres d'absorption atmosphérique.....	28
Figure 15 : Influence de la granulométrie sur la réflectance des minéraux évaporitiques (< 45 µm (gauche), 45 – 125 µm (milieu), 125 – 500 µm (droite)).....	29
Figure 16 : Spectres de la figure 14 ré-échantillonnés sur les bandes spectrales d'ASTER (longueur d'onde en abscisse).....	30
Figure 17 : Spectres de la figure 14 ré-échantillonnés sur les bandes spectrales d'ASTER (numéro de bande ASTER en abscisse).....	31
Figure 18 : Spectres de réflectance des échantillons Solvay avec indication des pics d'absorption caractéristiques du Trona.....	34
Figure 19 : Spectres de la figure 18 rééchantillonnés sur les bandes ASTER.....	34
Figure 20 : Absorption par l'ozone et diffusion atmosphérique du rayonnement électromagnétique, lors de sa traversée de l'atmosphère.....	35
Figure 21 : Composition colorée fausses couleurs images ASTER lacs Magadi et Natron.....	36
Figure 22 : Principe du Spectral Angle Mapper dans un espace à deux dimensions.....	38
Figure 23 : Classification lac Magadi à partir spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres étalon.....	39
Figure 24 : Classification lac Magadi à partir spectres USGS sur image corrigée avec quatre spectres étalon.....	40
Figure 25 : Classification lac Magadi à partir spectres Solvay sur image corrigée avec quatre spectres étalon.....	41
Figure 26 : Zone d'étude de Wulan Aobao (Bayinwusuzhen).....	42

Figure 27 : Classification Chine à partir spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres étalon, image de mai 2003.	44
Figure 28 : Classification Chine à partir spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres étalon, image de mai 2004.	45

Liste des tableaux

Tableau 1: Minéraux présents dans les lacs à évaporites alcalines, en noir ceux considérés par Eugster et Smith (1965), en gris ceux dont la présence a été signalée sur les mêmes sites.	10
Tableau 2: bandes spectrales du capteur ASTER	19
Tableau 3 : Spectres numériques de minéraux évaporitiques disponibles dans les bibliothèques spectrales USGS, JPL et JHU	23
Tableau 4 : spectres de minéraux carbonatés et pics d'absorption correspondants, d'après Crowley	24
Tableau 5: description et analyses DRX des échantillons Solvay.....	33

1. Introduction

1.1. CADRE

Actuellement, 70 % du carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ et bicarbonate de sodium $[\text{NaHCO}_3]$ mis sur le marché est produit par synthèse (le Procédé Solvay étant largement dominant). Le reste qui correspond au bicarbonate naturel est produit essentiellement par les États-Unis à partir du gisement de Green River. La consommation mondiale de carbonate de sodium augmente en moyenne de 2 % par an.

La production de bicarbonate par le procédé Solvay est consommatrice de charbon (coke), de carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ et de fait émettrice de CO_2 dont la quantité est estimée entre 200 à 400 kg par t de Na_2CO_3 produite. Ainsi, une voie pour diminuer des émissions de CO_2 est de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en fondants pour la verrerie, dont le carbonate de sodium. Pour appuyer cette démarche, Solvay a fait appel au BRGM dans le cadre d'une recherche sous contrat.

En parallèle à la démarche gîtologique qui avait pour objectif de définir des contextes géologiques favorables à la précipitation des carbonates de sodium dont le Trona $[\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ (Rapport n° BRGM/RC-59912-FR intitulé « Les gisements de carbonates sodiques : gîtologie et potentiel minier »), Solvay a souhaité une évaluation sur l'opportunité de l'utilisation des bandes spectrales du capteur satellitaire ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) concernant la prospection du Trona et des sels associés.

1.2. OBJET DE L'ÉTUDE

L'étude a pour objet :

- la compilation de tous les spectres dans la gamme spectrale du visible – proche infrarouge (450 à 2500 nm) disponibles dans la littérature concernant d'une part les minéraux de la « famille des carbonates de sodium » et d'autre part de tous les minéraux accompagnateurs (ex. magadiite $[\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})]$, gaylussite $[\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})]$... ;
- la modélisation de spectres sur les bandes des images satellitaires ASTER ;
- la cartographie des phases minérales correspondantes à partir d'images ASTER sur la région du lac Magadi (Kenya) et Wulan Aobao (Chine).

1.3. MINÉRAUX ÉVAPORITIQUES CONCERNÉS

L'analyse typologique la plus fine des suites minérales des lacs alcalins et qui fait encore autorité à ce sujet, a été faite par Eugster et Smith en 1965 pour le lac

évaporitique de Seales (Californie). Ces auteurs avaient pris en considération 20 sels et composés qui sont les plus représentés dans ces milieux (Tableau 1).

Nom	Composition	Nom	Composition
Halite	NaCl	Adulaire	$KAlSi_3O_8$
Trona	$Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$	Analcime	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$
Nahcolite	$NaHCO_3$	Borax	$NaB_4O_7 \cdot 10H_2O$
Aragonite/calcite	$CaCO_3$	Galeite	$Na_2SO_4 \cdot Na(F, Cl)$
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	Phillipsite	$KCa(Al_3Si_3O_{16}) \cdot 6H_2O$
Gaylussite	$Na_2CO_3 \cdot CaCO_3 \cdot 5H_2O$	Schairerite	$Na_2SO_4 \cdot Na(F, Cl)$
Pirssonite	$Na_2CO_3 \cdot CaCO_3 \cdot 2H_2O$	Teepleite	$Na_2B_2O_4 \cdot 2NaCl \cdot 4H_2O$
Mirabilite	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	Tinacolnrite	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$
Thenardite	Na_2SO_4		
Bukeite	$2Na_2SO_4 \cdot Na_2CO_3$		
Northupite	$Na_2CO_3 \cdot MgCO_3 \cdot NaCl$		
Tychite	$2Na_2CO_3 \cdot Na_2SO_4 \cdot 2MgCO_3$		
Hanksite	$9Na_2SO_4 \cdot 2Na_2CO_3 \cdot KCl$		
Aphthitalite (Glaserite)	$K_3Na(SO_4)_2$		
Wegscheiderite	$Na_2CO_3 \cdot 3NaHCO_3$		
Natron	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$		
Thermonatrite	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$		
Shortite	$Na_2CO_3 \cdot 2CaCO_3$		
Eitelite	$Na_2CO_3 \cdot MgCO_3$		
Synthetic composant	$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$		

Tableau 1 : Minéraux présents dans les lacs à évaporites alcalines, en noir ceux considérés par Eugster et Smith (1965), en gris ceux dont la présence a été signalée sur les mêmes sites.

2. Notions de spectroradiométrie

2.1. LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le rayonnement électromagnétique est décrit sous la forme d'une onde électromagnétique correspondant à la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique (l'un étant perpendiculaire à l'autre) en ligne droite à partir d'une source constituée par un mouvement alternatif de charges électriques (Figure 1).

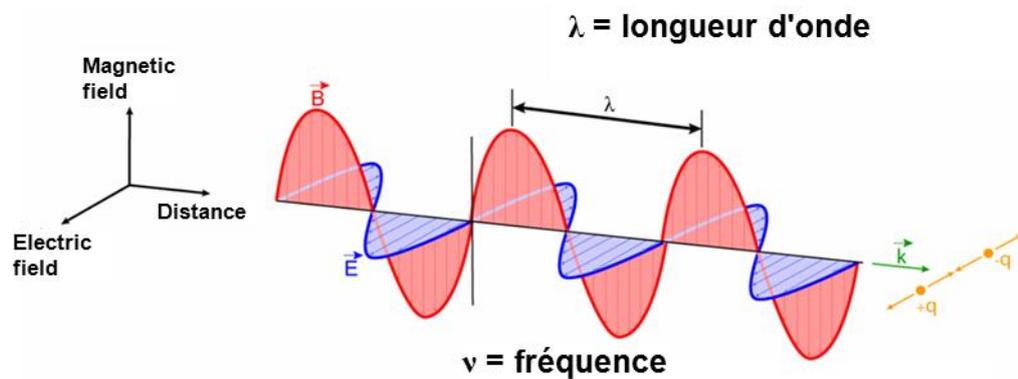


Figure 1 : Le spectre électromagnétique.

2.2. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le spectre électromagnétique est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en terme de fréquence, d'énergie des photons ou encore de longueur d'onde associée, les trois grandeurs ν (fréquence), E (énergie) et λ (longueur d'onde).

Ces trois grandeurs sont liées deux à deux par la constante de Planck h et la vitesse de la lumière c , selon les formules :

$$E = h\nu$$

$$c = \lambda\nu$$

En spectroradiométrie et télédétection, la source de rayonnement est le soleil.

Le spectre électromagnétique désigne toute la gamme des longueurs d'onde de toutes les radiations électromagnétiques connues (Figure 2).

En spectroradiométrie de réflectance, on s'intéresse à la gamme de longueur d'onde couvrant la partie visible proche infrarouge du spectre soit de 350 à 3 500 nanomètres (0,35 à 2,5 μm).

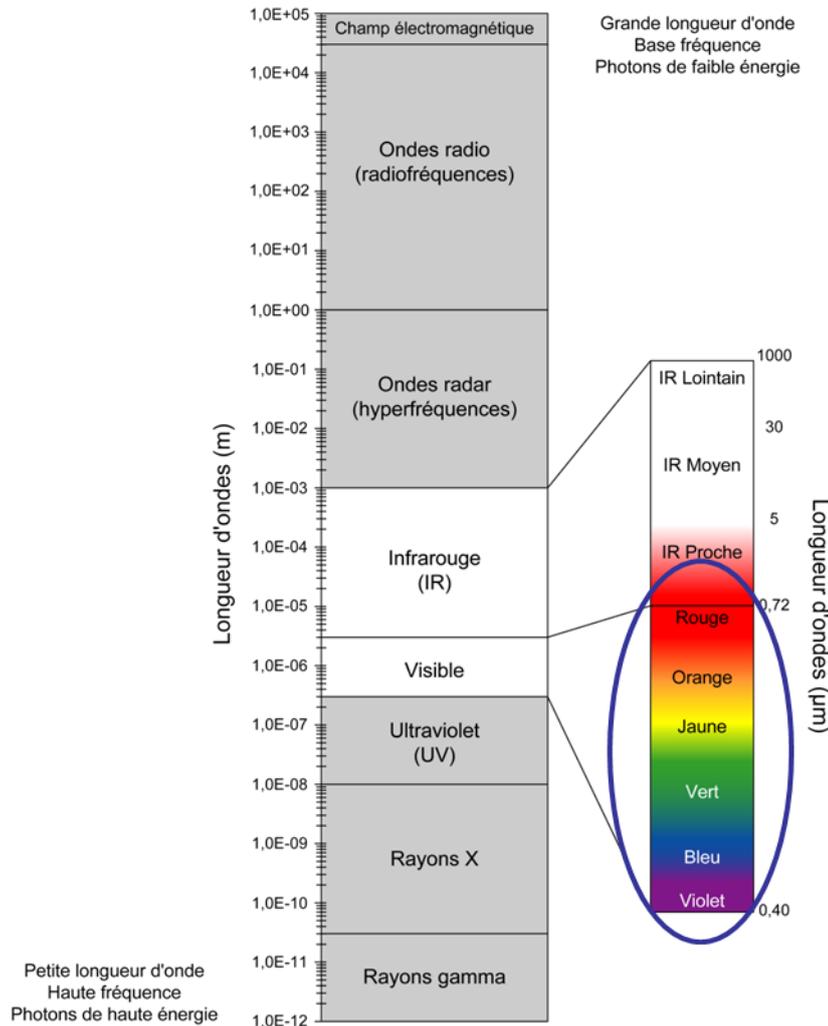


Figure 2 : Le spectre électromagnétique.

2.3. NOTIONS DE REFLECTANCE ET DE SIGNATURE SPECTRALE

2.3.1. Interaction du rayonnement électromagnétique à la surface terrestre

L'énergie du rayonnement électromagnétique incident est absorbée, transmise ou réfléchi par tout objet de la surface terrestre

Selon le principe de la conservation de l'énergie, pour une longueur d'onde λ donnée, l'énergie incidente totale (E_T) est égale à la somme des énergies réfléchi (E_R), absorbée (E_A) et transmise (E_{Tr}) :

$$E_{T(\lambda)} = E_{A(\lambda)} + E_{Tr(\lambda)} + E_{R(\lambda)}$$

On définit la réflectance, pour une longueur d'onde donnée, comme le rapport de l'énergie réfléchi à l'énergie incidente totale :

$$R = E_{R(\lambda)} / E_{T(\lambda)}$$

La réflectance est donc définie comme le rapport entre l'énergie réfléchiée par une surface et l'énergie incidente reçue par cette même surface pour une longueur d'onde donnée.

C'est une grandeur sans unité comprise entre 0 et 1 (ou souvent exprimée en pourcentage de 0 à 100 %) et est fonction de :

- la longueur d'onde ;
- la nature du matériau.

2.3.2. Signature spectrale

En mesurant l'énergie réfléchiée ou émise par une cible en fonction de la variation de la longueur d'onde, on obtient un spectre de réflectance spécifique ou signature spectrale de cette cible. En comparant les signatures de différents objets, il est possible de les distinguer les uns des autres (Figure 3).

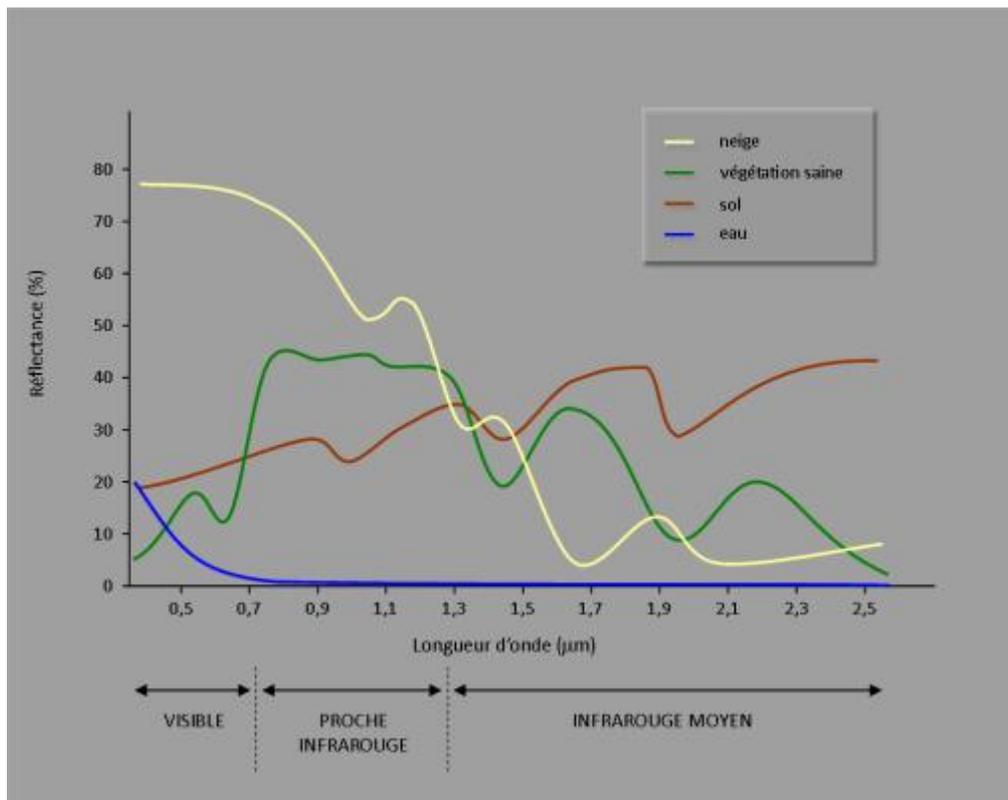


Figure 3 : Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.

La signature spectrale est caractérisée par des pics d'absorption, caractéristiques des objets. La position (longueur d'onde), la forme et la symétrie de ces pics permettent de

caractériser la composition de ces objets, tandis que la profondeur des pics d'absorption donne une information quantitative sur les matériaux présents.

La Figure 4 montre les régions du spectre électromagnétique utilisables pour l'extraction de paramètres biogéochimiques de la surface terrestre.

La partie visible et proche infrarouge du spectre permet de caractériser et d'identifier les oxy-hydroxydes de fer (Figure 5), tandis que la plupart de minéraux sont identifiables par leurs caractéristiques spectrales (forme du spectre = pics d'absorption ou de réflectance) dans la partie du spectre comprise entre 2,0 et 2,4 μm (moyen infrarouge ou short wave infrared).

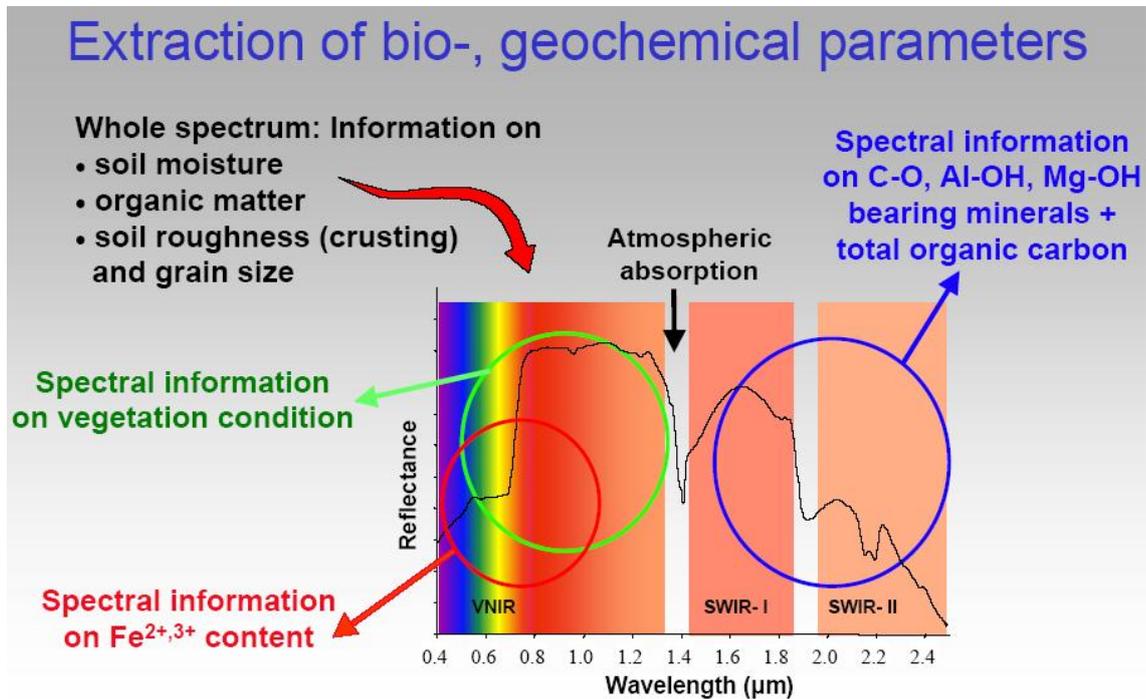


Figure 4 : Extraction de paramètres bio-géochimiques à partir d'une information spectrale.

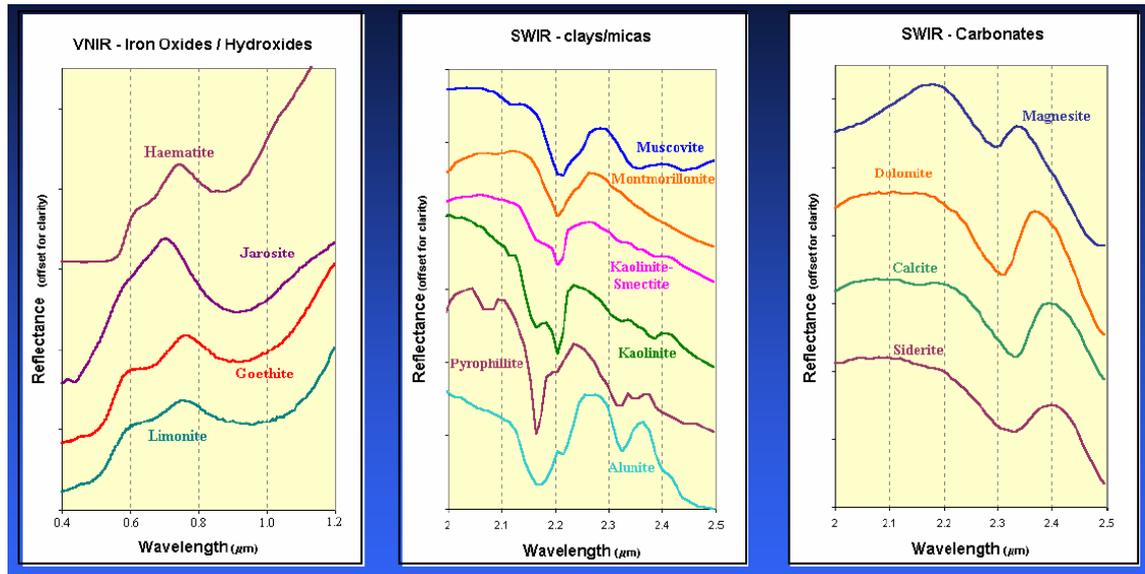


Figure 5 : Identification spectrale des principaux minéraux.

3. Acquisition de spectres de réflectance à l'aide d'un spectroradiomètre

Le BRGM dispose d'un spectroradiomètre de terrain ASD FieldSpec® 3 (Analytical Spectral Device). Ce spectroradiomètre couvre la gamme spectrale de 350 à 2 500 nm et permet de mesurer des spectres de réflectance soit en lumière naturelle sur le terrain (Figure 6), à l'aide d'une fibre optique (IFOV¹ = 25°), soit, par contact avec la cible, en illumination artificielle sur le terrain ou en laboratoire (Figure 7). Le spectromètre mesure un spectre continu (2151 points d'échantillonnage entre 350 et 2 500 nm).



Figure 6 : Spectroradiomètre ASD FieldSpec® 3 et son utilisation en lumière naturelle sur le terrain.

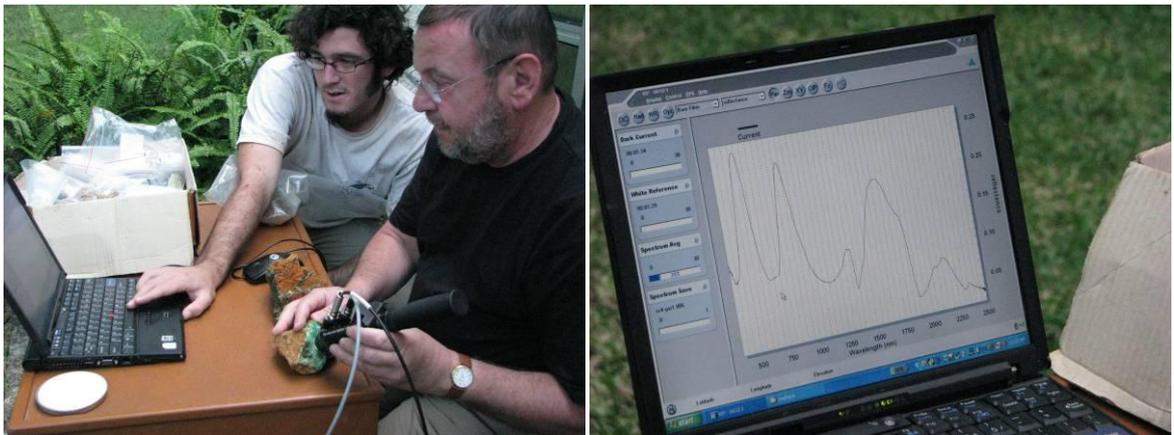


Figure 7 : Mesure spectroradiométrique par sonde de contact en illumination artificielle.

¹ IFOV (Instantaneous Field Of View) définit un cône dans lequel est effectuée la mesure.

L'utilisation de ce spectroradiomètre permet de générer des bibliothèques spectrales de terrain spécifiques des matériaux de la zone d'étude et des mélanges spectraux susceptibles d'y être rencontrés.

La mesure par contact en lumière artificielle permet de s'affranchir des perturbations dues à l'atmosphère (présence d'eau et d'aérosols) et d'obtenir un spectre continu sur l'ensemble de la gamme spectrale mesurée. La mesure en lumière naturelle, plus proche de celle effectuée par le capteur aéroporté ou satellitaire, est perturbée par les effets de l'atmosphère et implique d'éliminer une partie non exploitable du spectre. Comme mentionné plus haut, les perturbations dues à l'atmosphère lors des mesures en conditions naturelles sont clairement visibles en Figure 8 pour le même échantillon de garniérîte, où l'on remarque une perturbation du signal entre 1 345-1 400 nm, 1 810-1 935 nm et au-delà de 2 400 nm.

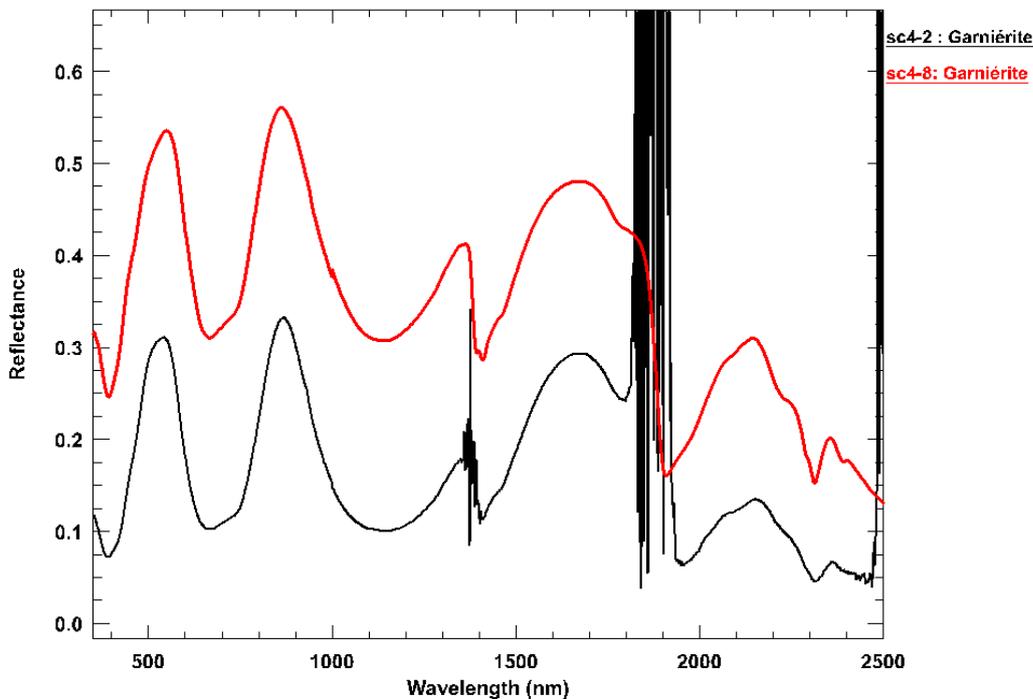


Figure 8 : Spectre de garniérîte mesuré en illumination artificielle (courbe rouge) et en illumination naturelle (courbe noire).

4. Le capteur ASTER et autres capteurs de télédétection

4.1. LE CAPTEUR ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) est un capteur à bord du satellite TERRA lancé en décembre 1999.

ASTER couvre une large gamme spectrale avec 14 bandes depuis le visible jusqu'à l'infrarouge thermique (Tableau 2). La résolution spatiale au sol varie avec les bandes spectrales : 15 m dans le visible et le proche infrarouge (VNIR), 30 m dans l'infrarouge moyen (SWIR), et 90 m l'infrarouge thermique (TIR). Chaque scène ASTER couvre une surface de 60 x 60 km.

Subsystem	Band No.	Spectral Range (μm)	Spatial Resolution, m	Quantization Levels
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
	9	2.360-2.430		
TIR	10	8.125-8.475	90	12 bits
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

Tableau 2 : Bandes spectrales du capteur ASTER.

L'intérêt du capteur ASTER réside dans les 6 bandes spectrales couvrant le moyen infrarouge (bandes 4 à 9) où se situe le maximum de capacité de discrimination des minéraux.

4.2. COMPARAISON ASTER ET LANDSAT

Comparé à Landsat Thematic Mapper (Landsat 4 and 5 TM) et Landsat Enhanced Thematic Mapper (Landsat 7 ETM+), ASTER montre une amélioration de la résolution

spectrale (Figure 9). En particulier ASTER offre de meilleures capacités de discrimination minérale dans le moyen infrarouge (OH-bearing minerals, argiles, phyllosilicates, amphiboles, sulfates, carbonates) (Figure 10).

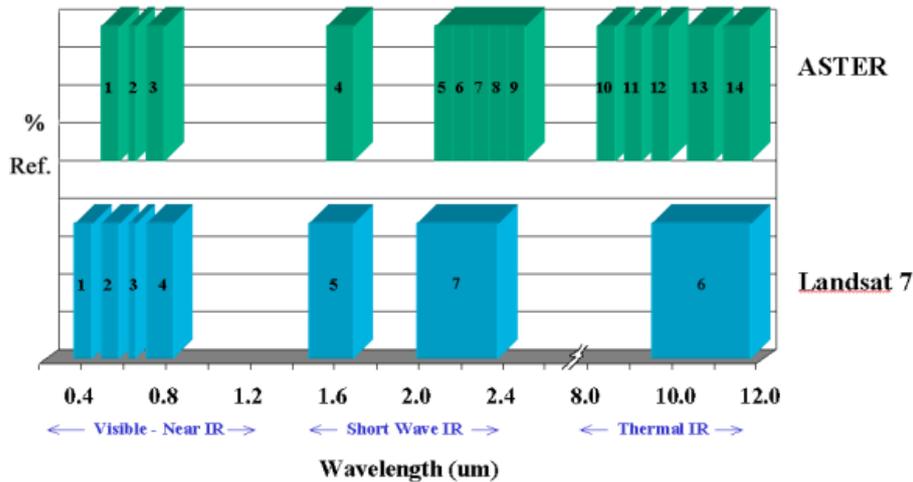


Figure 9 : Comparaison des bandes spectrales ASTER et Landsat 7 ETM+ (d'après Abrams and Hooks, 2002).

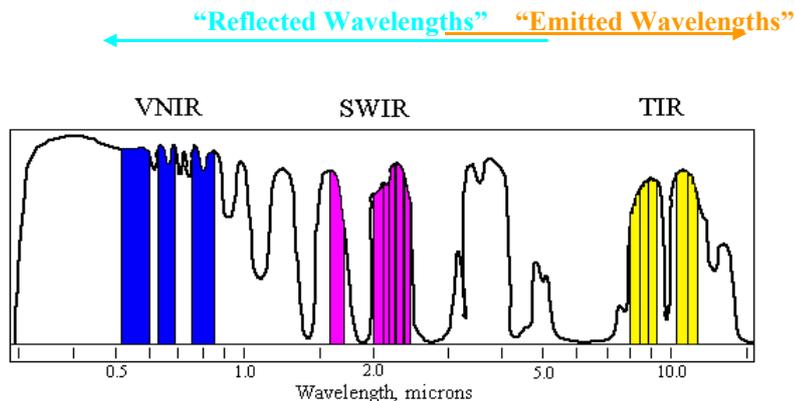


Figure 10 : Fenêtres atmosphériques couvertes par le capteur ASTER.

4.3. CAPTEURS HYPERSPECTRAUX

4.3.1. Capteur hyperspectral

Le terme d'hyperspectral désigne un système (au sol, aéroporté ou satellitaire) observant une cible sur au moins 100 bandes spectrales, étroites et théoriquement contiguës. Les mesures au sol sont effectuées à l'aide d'un spectroradiomètre portable (mesures sur le terrain ou en conditions de laboratoire). Elles permettent des mesures ponctuelles de la réflectance de la surface terrestre. Les systèmes aéroportés ou satellitaires (ou spectroradiomètres imageurs) fournissent des images hyperspectrales.

Ils permettent d'obtenir une image de la réflectance de la surface terrestre couvrant la surface imagée.

4.3.2. Imagerie hyperspectrale

L'imagerie hyperspectrale ou spectroscopie imageante, est une technique qui permet l'identification à distance des constituants de la surface terrestre d'après leurs caractéristiques spectrales. Un spectroradiomètre imageur utilise une technique de télédétection passive (mesure de la réflectance de la surface terrestre) où chaque pixel de l'image contient l'information spectrale dans chacune des bandes spectrales = « cube hyperspectral ». Le principe d'un capteur hyperspectral, ou spectroradiomètre imageur, est présenté en Figure 11.

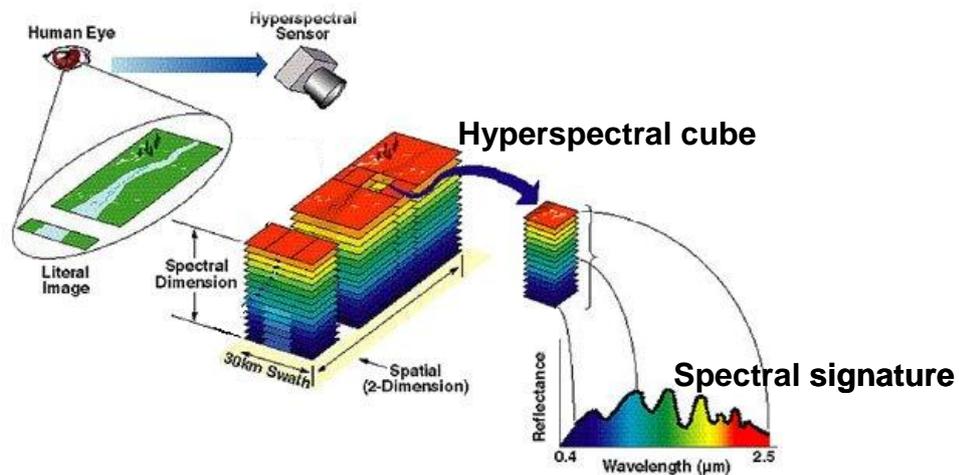


Figure 11 : Principe d'un spectroradiomètre imageur.

Les capteurs hyperspectraux répondent aux caractéristiques suivantes :

- large gamme spectrale : 450 - 2500 nm, couvrant :
 - VNIR (Visible – proche infrarouge) sensible aux caractéristiques spectrales de l'eau et de la végétation, ainsi que des oxydes de fer,
 - SWIR1 (moyen infrarouge entre 1 et 2 µm) sensible aux absorptions vibrationnelles,
 - SWIR2 (moyen infrarouge de 2 à 2,5 µm) sensible à l'absorption transitionnelle ;
- nombreuses bandes spectrales : de 100 à plus de 250 ;
- bandes spectrales très étroites : < 20 nm, idéalement < 10 nm.

Un spectre image « continu » correspond à chaque pixel de l'image, reflétant les caractéristiques spectrales de l'ensemble des constituants de la surface imagée (pixel impur). Cette information peut être utilisée pour détecter, classer, identifier, voire quantifier les matériaux présents dans la surface imagée (Figure 12). L'étroitesse et le

grand nombre de bandes spectrales permettent la détection de minimes variations de signatures spectrales.

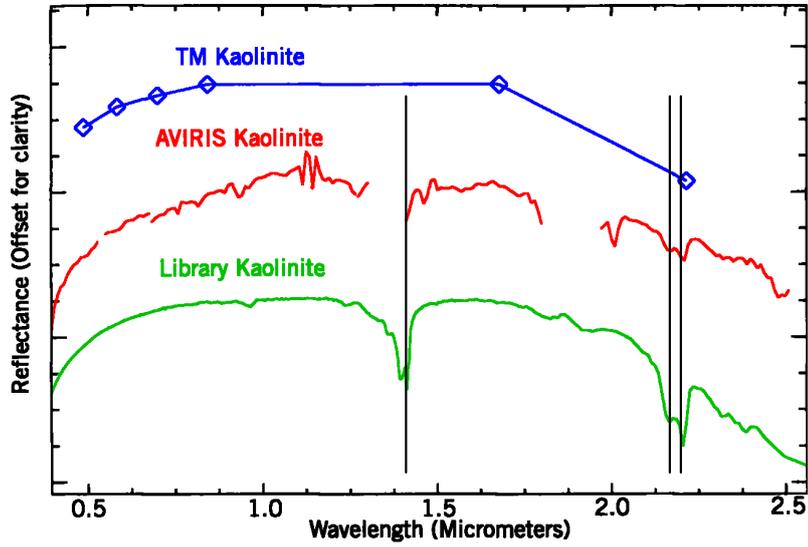


Figure 12 : Comparaison entre la signature spectrale de la kaolinite en laboratoire, avec sa signature à partir d'un capteur multispectral (TM) et d'un capteur hyperspectral (AVIRIS).

5. Compilation des spectres de réflectance disponibles

5.1. SPECTRES SOUS FORME NUMÉRIQUE

Les recherches ont porté sur les bibliothèques spectrales USGS, JPL (Jet Propulsion Laboratory) et JHU (John Hopkins University), toutes trois sous forme numérique.

Le Tableau 3 montre que très peu de spectres sont disponibles sous forme numérique permettant leur traitement avec les logiciels de traitement d'images (images ASTER ou autres), puisque seuls parmi les minéraux de la famille des carbonates de sodium (en gras dans le tableau) le Trona (USGS et JPL) et la Gaylussite (JPL) sont présents dans les bibliothèques spectrales.

mineral	formule	spectre USGS (0.3951 - 2.56 µm) 425 bandes	spectre JPL 1 (0.4 - 2.5 µm) 826 bandes <45 micrometers grainsize	spectre JPL 2 (0.4 - 2.5 µm) 826 bandes 45-125 micrometers grainsize	spectre JPL 3 (0.4 - 2.5 µm) 826 bandes 125-500 micrometers grainsize	Spectre JHU (2.07948 à 25.044201 µm) 2287 bandes
Halite	NaCl	1	Halite Halite	Halite Halite	Halite Halite	
Anhydrite	CaSO4	1	Anhydrite SO-1A	Anhydrite SO-1A	Anhydrite SO-1A	1
Thenardite	Na2SO4	2				
Mirabilite	Na2SO4 - 10H2O	1				
Natron	Na2CO3 - 10H2O					
Borax	NaB4O7 - 10H2O		Borax B-6A	Borax B-6A	Borax B-6A	
Colemanite	Ca2B6O11 - 5H2O	1	Colemanite B-1A	Colemanite B-1A	Colemanite B-1A	
gypse	CaSO4 - 2H2O	2	Gypsum SO-2B	Gypsum SO-2B	Gypsum SO-2B	6
Trona	Na3H(CO3)2·2H2O	1	Trona C-4A	Trona C-4A	Trona C-4A	
Nahcolite	NaHCO3					
Gaylussite	Na2CO3·CaCO3·5H2O	1				
Pirssonite	Na2CO3·CaCO3·2H2O					
Northupite	Na2CO3·MgCO3·NaCl					
Tychite	2Na2CO3· Na2SO4·2MgCO3					
Hanskite	9Na2SO4·2Na2CO3·KCl					
Wegscheiderite	Na2CO3·3NaHCO3					
Thermonatrite	Na2CO3·H2O					
Shortite	Na2CO3·2CaCO3					
Eitelite	Na2CO3·MgCO3					
burkeite	2Na2SO4·Na2CO3					

Tableau 3 : Spectres numériques de minéraux évaporitiques disponibles dans les bibliothèques spectrales USGS, JPL et JHU.

Tous les spectres de ces bibliothèques sont disponibles via le logiciel de traitement d'images ENVI

5.2. SPECTRES SOUS FORME ANALOGIQUE

J.K. Crowley (1991) a publié une série de spectres des minéraux évaporitiques, présentant les spectres et répertoriant tous les pics d'absorption pour chaque minéral

dans la gamme 0,4 à 2,5 μm . On y trouve notamment (Tableau 4) les carbonates de sodium comme le Trona, la Nahcolite, la Gaylussite, la Pirssonite et la Burkeite.

Mineral	Absorption Band Positions, μm	Percent Reflectance at 2.5 μm
<i>Borates</i>		
Borax	0.976, 1.172, 1.428, 1.476, 1.774, 1.926, 2.140, 2.264	6
Colemanite	0.960, 1.168, 1.412, 1.556, 1.956, 2.104, 2.196	27
Inderite	0.960, 1.212, 1.408, 1.440, 1.464, 1.916, 1.976, 2.096, 2.136, 2.160, 2.212	18
Meyerhofferite	0.964, 1.412, 1.476, 1.520, 1.908, 1.976, 2.068, 2.136, 2.188, 2.232, 2.432	27
Probertite	1.400, 1.428, 1.960, 2.104, 2.240, 2.320, 2.460	25
Teepleite	0.988, 1.236, 1.404, 1.444, 2.074, 2.260, 2.456	22
Tincalconite	0.972, 1.156, 1.420, 1.470, 1.924, 2.148	22
Ulexite	0.968, 1.238, 1.428, 1.464, 1.948, 2.120, 2.168, 2.236	11
<i>Carbonates</i>		
Calcite	2.335	48
Burkeite	2.364	51
Gaylussite	1.488, 1.564, 1.778, 1.964, 2.126, 2.316, 2.440	19
Nahcolite	1.850	11
Natron	0.996, 1.236, 1.486, 1.970	18
Pirssonite	1.576, 1.752, 1.994, 2.090, 2.476	32
Trona	1.220, 1.446, 1.518, 1.734, 1.940, 2.038, 2.214, 2.388	13
<i>Chlorides</i>		
Antarcticite	1.000, 1.204, 1.454, 1.512, 1.808, 1.972, 2.058, 2.420	8
Bischofite	0.974, 1.182, 1.444, 1.556, 1.824, 1.952, 2.012	3
Carnallite	0.996, 1.216, 1.456, 1.520, 1.760, 1.976, 2.260, 2.454	11
Halite	1.432, 1.936	61
Kainite	1.000, 1.224, 1.470, 1.492, 1.518, 1.772, 1.964, 1.992, 2.084, 2.192	9
Sinjarite	0.984, 1.192, 1.432, 1.456, 1.492, 1.768, 1.952, 2.184, 2.308, 2.464	24
CaCl ₂ · 4H ₂ O	0.996, 1.204, 1.452, 1.812, 1.970, 2.320, 2.452	28
<i>Sulfates</i>		
Bassanite	0.964, 1.160, 1.420, 1.468, 1.768, 1.912, 2.094, 2.252, 2.474	32
Bloedite	1.464, 1.698, 1.790, 1.948, 2.074, 2.428	20
Epsomite	0.990, 1.260, 1.460, 1.486, 1.634, 1.760, 1.956	3
Eugsterite	1.436, 1.928, 1.962, 2.068, 2.192, 2.480	48
Gypsum	0.992, 1.196, 1.440, 1.484, 1.530, 1.740, 1.768, 1.936, 1.964, 2.208, 2.262, 2.416, 2.474	18
Hexahydrate	0.976, 1.232, 1.436, 1.462, 1.572, 1.932, 1.960	6
Leonite	1.532, 1.624, 1.656, 1.752, 1.988, 2.068, 2.442	44
Mirabilite	0.992, 1.224, 1.448, 1.464, 1.548, 1.768, 1.946, 2.180, 2.236, 2.484	19
Pentahydrate	0.984, 1.188, 1.224, 1.458, 1.556, 1.932, 1.976	6
Picromerite	1.524, 1.654, 1.992, 2.072, 2.422	23
Polyhalite	1.216, 1.476, 1.512, 1.588, 1.776, 1.940, 1.976, 2.024, 2.240, 2.374, 2.446	40
Starkeyite	0.972, 1.202, 1.436, 1.460, 1.548, 1.596, 1.938, 2.412	9
Syngenite	1.496, 1.574, 1.772, 1.988, 2.076, 2.184, 2.326, 2.420	62
Thernardite	1.410, 1.922	63

Refer to Figures 1–8 for band locations. Reflectance values given at 2.5 μm .

Tableau 4 : Spectres de minéraux carbonatés et pics d'absorption correspondants, d'après Crowley.

Ces spectres n'existent toutefois que sous forme analogique (Figure 13) et il serait nécessaire de les numériser pour pouvoir les utiliser dans des bibliothèques spectrales

dédiées au traitement numérique de spectres et d'images (les recherches sur internet n'ont pas permis de trouver des bibliothèques spectrales numériques pour ces minéraux).

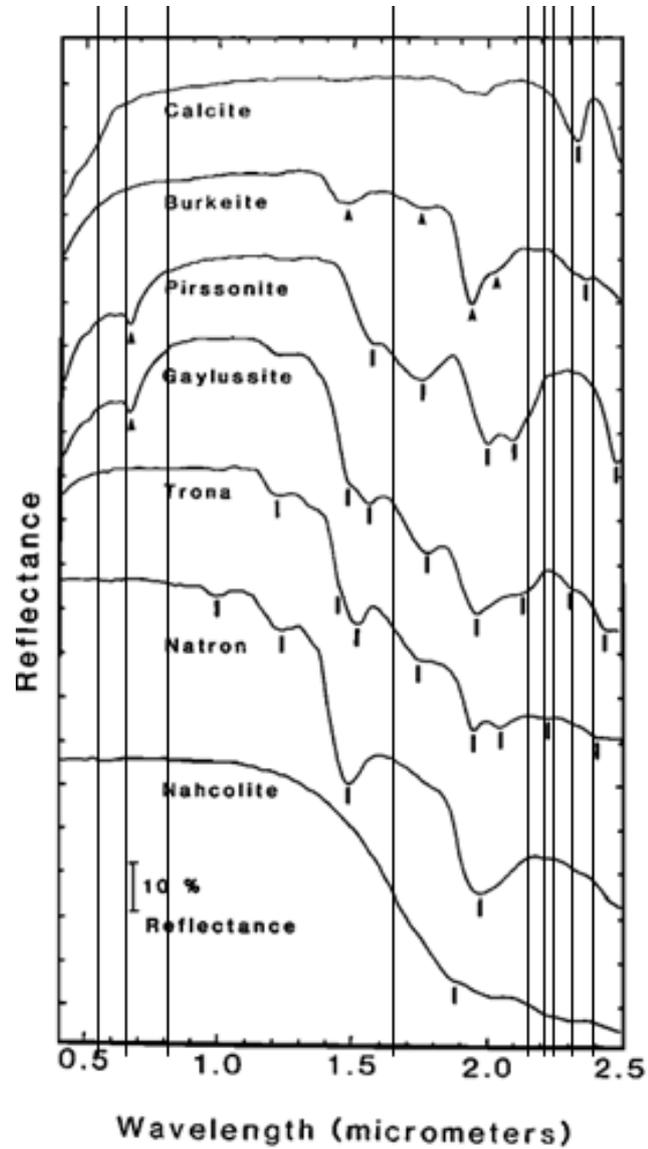


Figure 13 : Spectres de minéraux carbonatés et pics d'absorption correspondants, d'après Crowley.

Les lignes verticales représentent la position approximative du centre des bandes ASTER.

6. Analyse des spectres disponibles sous forme numérique

6.1. CAPACITÉ D'IDENTIFICATION SPECTRALE DES MINÉRAUX ÉVAPORITIQUES ET INFLUENCE DES FENÊTRES ATMOSPHÉRIQUES

La Figure 14 regroupe l'ensemble des spectres USGS (caractères minuscules) et JPL (caractères majuscules) disponibles.

On note des figures spectrales suffisamment discriminantes pour identifier les minéraux sélectionnés, à l'exception de la halite qui, très réfléchante, présente peu d'absorption caractéristique.

La transmission du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère est perturbée par l'absorption d'une partie de ce rayonnement en raison de la présence de gaz (O_3 , H_2O , CO_2). Cette absorption joue pour le rayonnement incident comme pour le rayonnement réfléchi par la surface terrestre. Cela concerne les gammes de longueur d'onde 1,35-1,42 μm et 1,8-1,95 μm qui ne sont pas utilisables en télédétection. Ces domaines ont été reportés sur la Figure 14 (rectangles bleus).

On constate que les figures d'absorption caractéristiques permettant d'identifier les minéraux sélectionnés ne sont pas pénalisées par ces fenêtres d'absorption atmosphérique.

6.2. INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE SUR LES PROPRIÉTÉS SPECTRALES

La Figure 15 montre les spectres JPL (mesures en laboratoire pour trois granulométries différentes : < 45 μm (gauche), 45-125 μm (milieu), 125-500 μm (droite)).

Cette figure met en évidence :

- une décroissance de la réflectance (surtout dans le SWIR) lorsque la granulométrie augmente ;
- que la forme globale des spectres est conservée, mais que les pics d'absorption sont moins marqués lorsque les matériaux sont plus grossiers (plus proches des conditions de terrain).

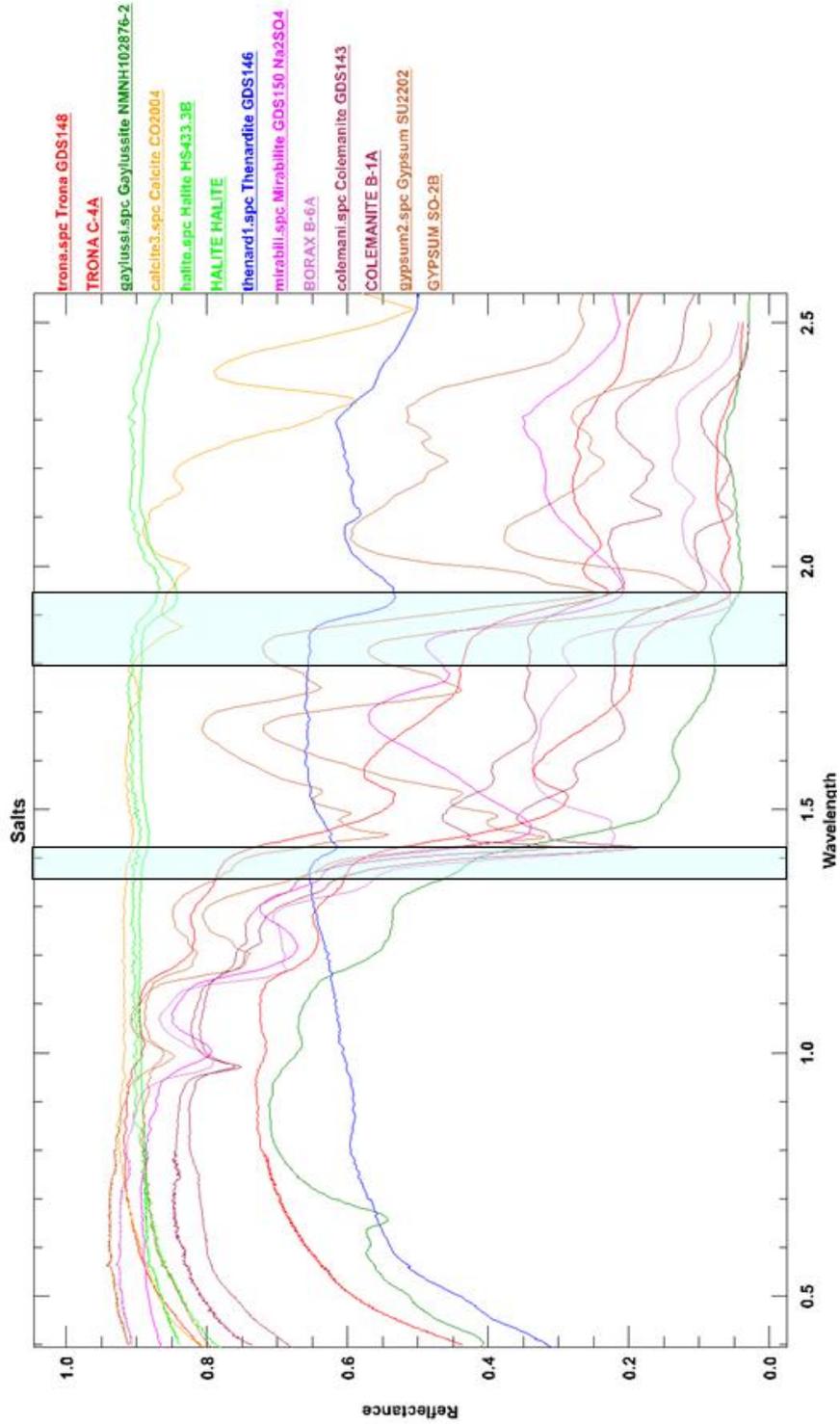


Figure 14 : Spectres de réflectance des minéraux évaporitiques disponibles et fenêtres d'absorption atmosphérique.

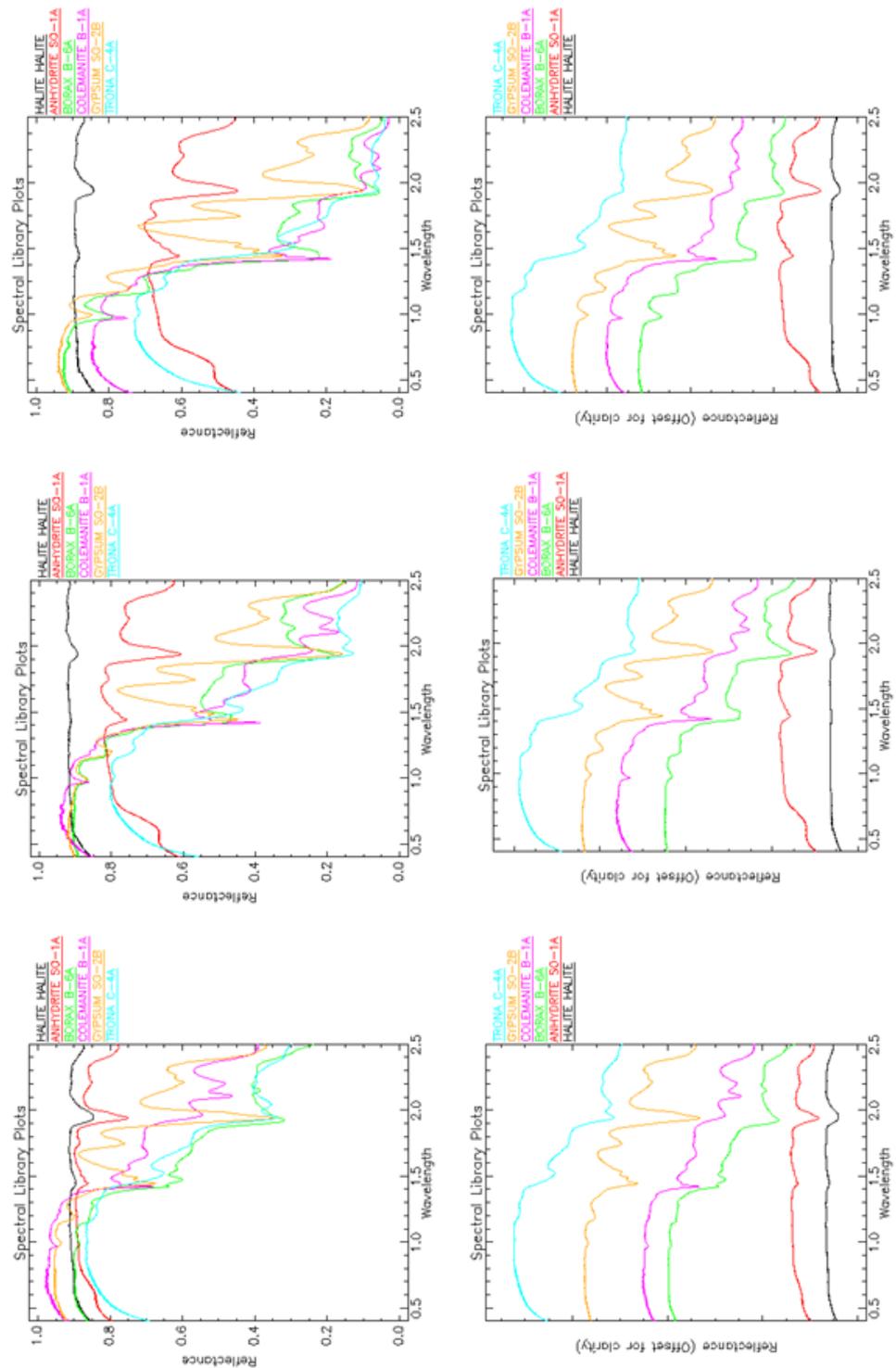


Figure 15 : Influence de la granulométrie sur la réflectance des minéraux évaporitiques (< 45 μm (gauche), 45-125 μm (milieu), 125-500 μm (droite)).

6.3. RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DES SPECTRES SUR LES 9 BANDES ASTER

Les mêmes spectres que ceux présentés en Figure 14 ont été ré-échantillonnés pour correspondre aux neuf bandes spectrales d'ASTER dans le domaine du visible et proche infrarouge (3 bandes) et du moyen infrarouge (6 bandes)

Ils sont présentés en Figure 16 (longueur d'onde en abscisse) et Figure 17 (bande spectrales ASTER en abscisse).

On constate que, malgré une importante perte d'information (passage de 425 bandes spectrales à 9 bandes), il reste théoriquement possible d'identifier les minéraux sélectionnés à partir d'image ASTER

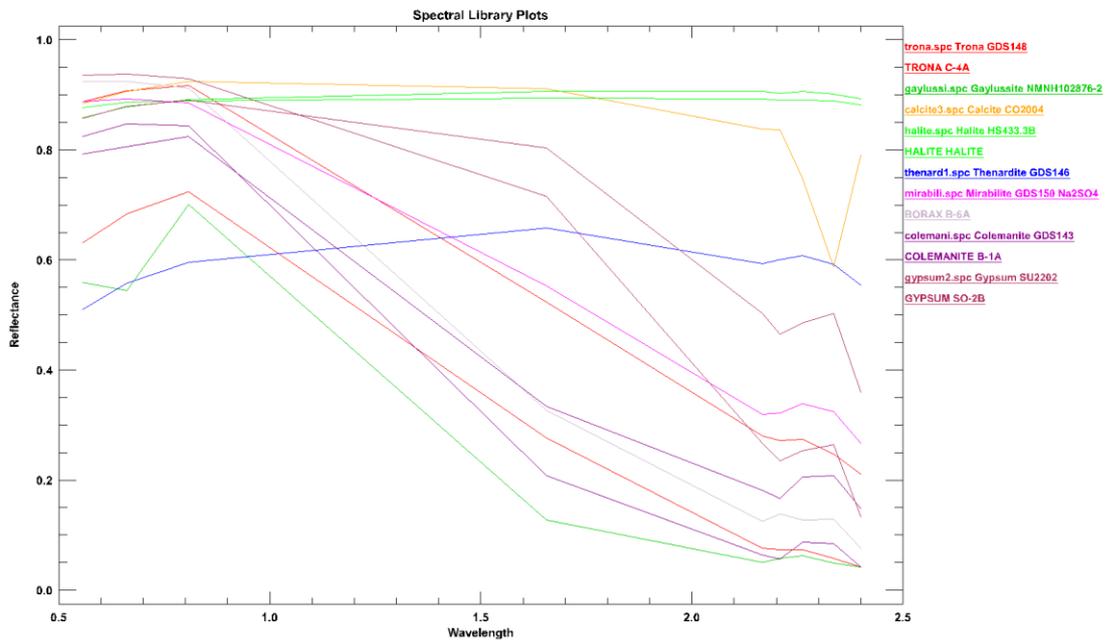


Figure 16 : Spectres de la figure 14 ré-échantillonnés sur les bandes spectrales d'ASTER (longueur d'onde en abscisse).

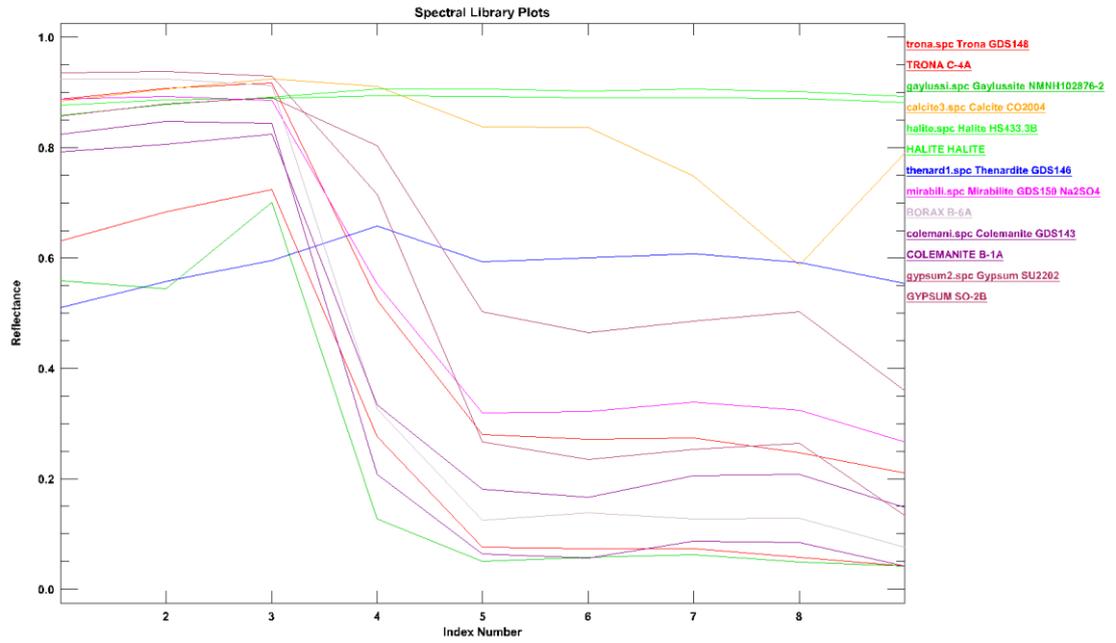


Figure 17 : Spectres de la figure 14 ré-échantillonnés sur les bandes spectrales d'ASTER (numéro de bande ASTER en abscisse).

7. Acquisition et analyse de spectres spécifiques à l'étude

Des spectres de réflectance ont été acquis sur des échantillons fournis par Solvay, à l'aide du spectroradiomètre du BRGM :

- 4 échantillons (Papi 3, Papi 4, Papi5 et Papi8) se présentaient sous forme de matériau dur, scié. Une partie a fait l'objet de mesure de réflectance en illumination artificielle, tandis qu'une autre partie a été broyée pour analyse de diffractométrie RX ;
- 3 échantillons de trona sous forme de granulés ont fait l'objet de mesure de réflectance (Trona1, Trona2 et Trona3).

La description des échantillons ainsi que les résultats des analyses DRX sont présentés dans le Tableau 5, tandis que les spectres de réflectance correspondants sont présentés en Figure 18 et Figure 19.

L'échantillon Trona 1 présente un spectre de trona caractéristique que l'on retrouve, avec des absorptions plus atténuées, dans l'échantillon Papi5. Les échantillons Trona 2 et Trona 3 sont également caractéristiques du trona, bien que les absorptions soient peu marquées.

Les autres échantillons en revanche ont des réflectances et des figures d'absorption trop faibles pour pouvoir être caractérisées.

N° échantillon	Description (Solvay)	Analyse DRX
Papi3	Bed 17 anomalous ore	- trona abondant
Papi3b		- quartz probable en traces - northupite probable en traces à faible - shortite en traces à faible
Papi4	Bed 17 anomalous ore	- trona abondant à très abondant - northupite probable en traces à faible
Papi5	Bed 17 non typical anomalous ore	- trona abondant à très abondant - halite en traces à faible
Papi8a	Bed 17 transition to anomalous ore	- trona très abondant
Papi8ab		
Papi8ac		
Trona1		
Trona2		
Trona2b		
Trona3		

Tableau 5 : Description et analyses DRX des échantillons Solvay.

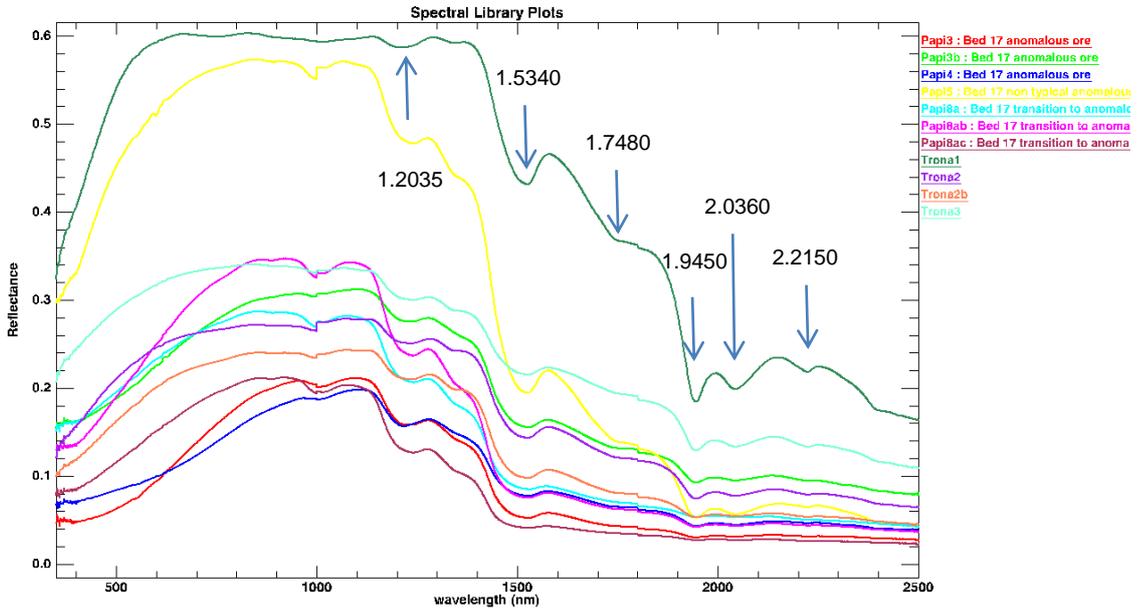


Figure 18 : Spectres de réflectance des échantillons Solvay avec indication des pics d'absorption caractéristiques du Trona.

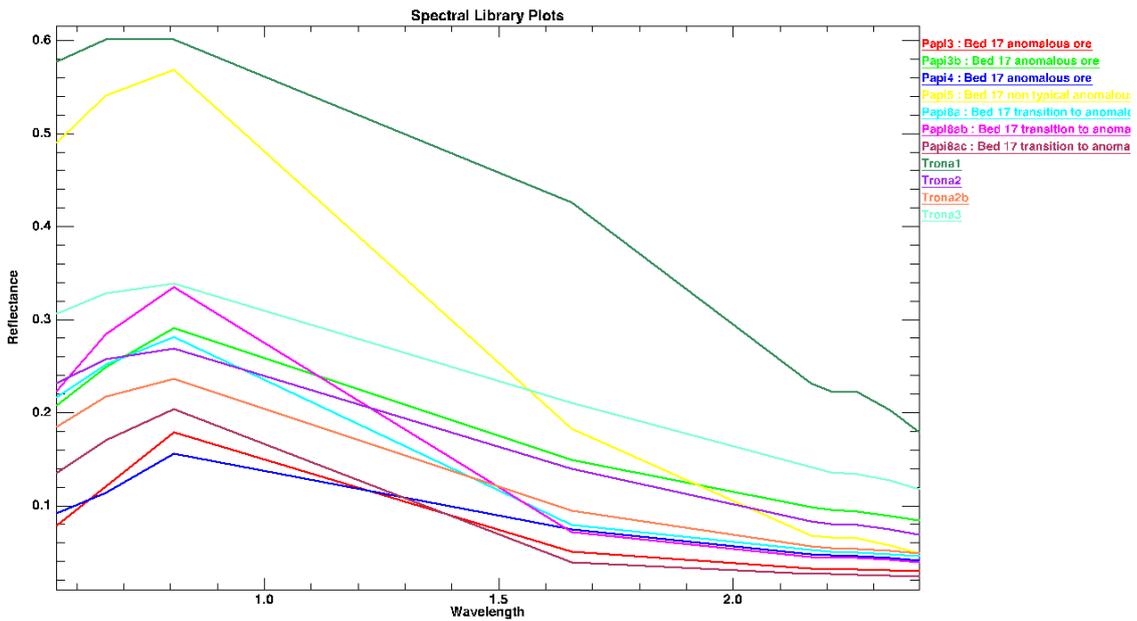


Figure 19 : Spectres de la figure 18 rééchantillonnés sur les bandes ASTER.

8. Essai de cartographie de lacs salés à partir d'images ASTER

8.1. CORRECTION ATMOSPHÉRIQUES DES IMAGES

Lors de son trajet depuis la source (le soleil) vers la cible (surface terrestre), puis de la cible vers le capteur, le rayonnement électromagnétique subit des interactions avec les molécules gazeuses et les particules (aérosols, gouttelettes d'eau, poussières) présentes dans l'atmosphère. Deux phénomènes essentiels se produisent : l'absorption et la diffusion atmosphériques (Figure 20). Les molécules gazeuses et particules présentes dans l'atmosphère vont provoquer un blocage et/ou une déviation du rayonnement, diminuant ainsi l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique.

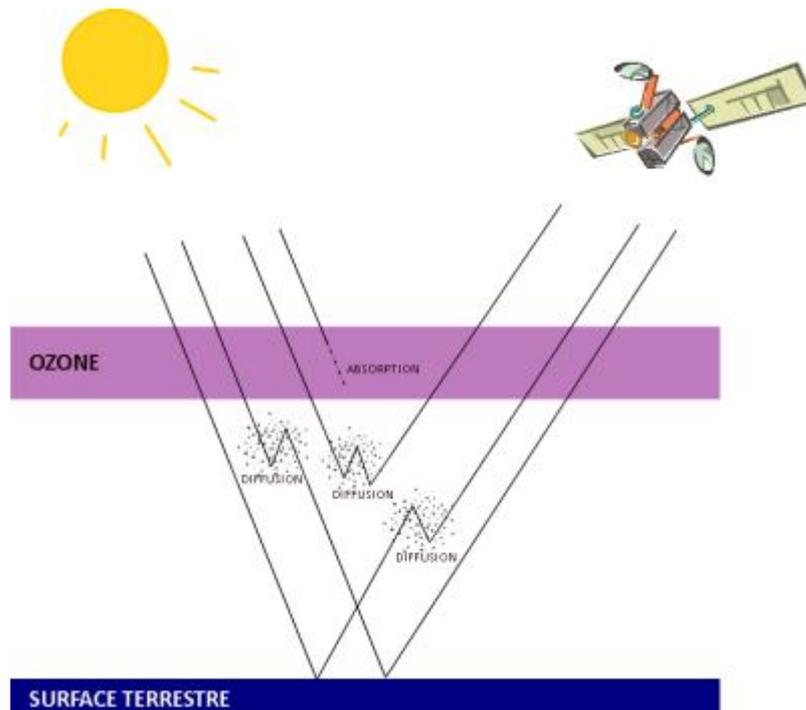


Figure 20 : Absorption par l'ozone et diffusion atmosphérique du rayonnement électromagnétique, lors de sa traversée de l'atmosphère.

Lorsque l'on s'intéresse à l'observation spatiale de la surface terrestre, il est impératif de prendre en compte les interactions rayonnement-atmosphère puisque le signal qui parvient au capteur satellitaire est perturbé par la traversée atmosphérique. À part dans le domaine de la météorologie spatiale où l'on cherche à mesurer la composition et à comprendre les propriétés de l'atmosphère, cet effet perturbateur de l'atmosphère doit être pris en considération dans l'interprétation du signal mesuré par le satellite.

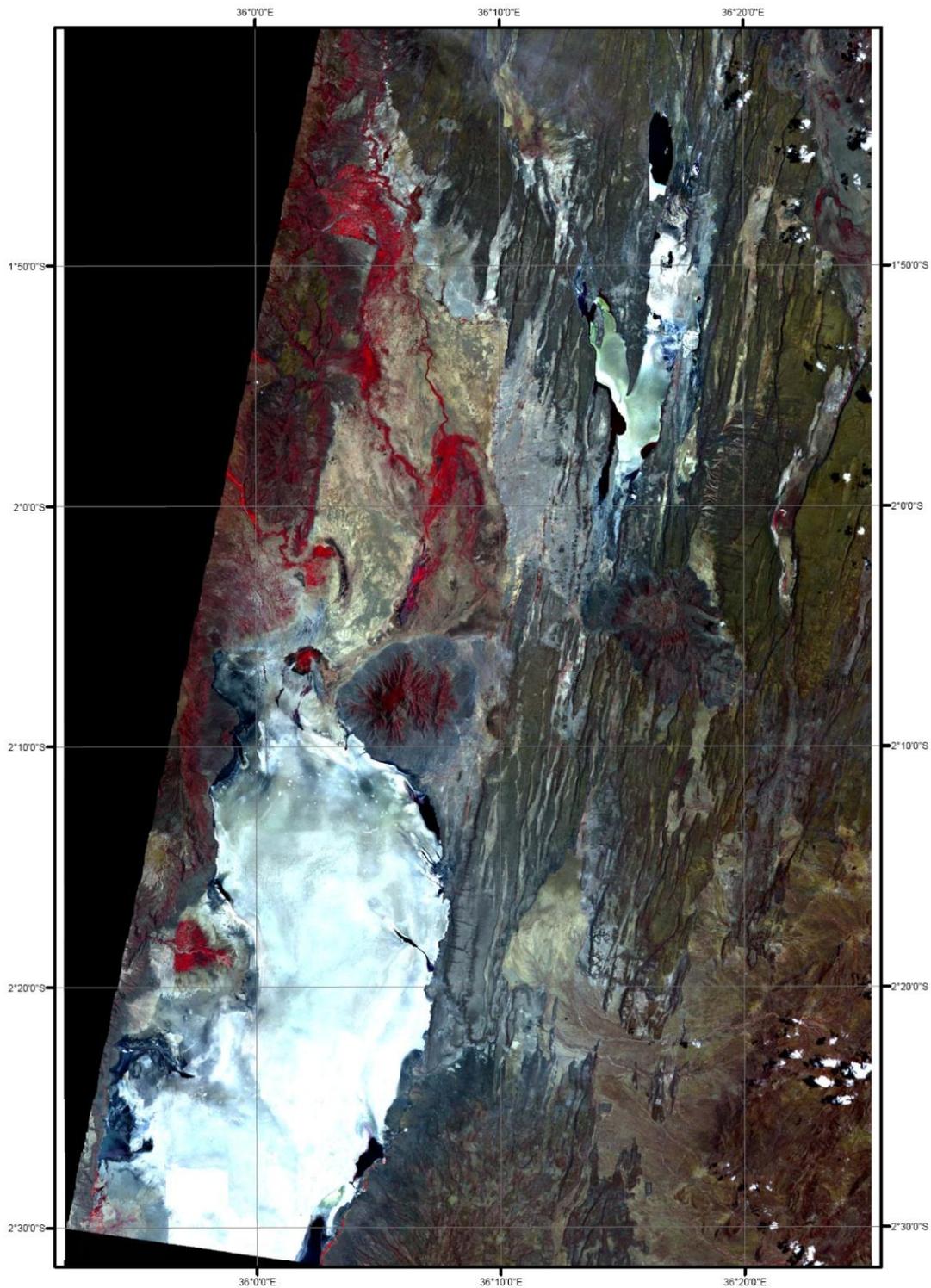


Figure 21 : Composition colorée fausses couleurs images ASTER lacs Magadi et Natron.

Le capteur mesure une luminance (ou radiance) correspondant à l'énergie réfléchiée par la surface terrestre, après sa traversée de l'atmosphère (Figure 20).

Pour pouvoir comparer des spectres images à des spectres terrain, ou comparer des images entre elles, il convient de convertir ce signal reçu en une réflectance au sol.

Ces corrections atmosphériques s'effectuent à l'aide de logiciels spécifiques et, en toute rigueur, prennent en compte :

- l'épaisseur et la composition de l'atmosphère au moment de l'acquisition (ou un modèle atmosphérique standard) ;
- la topographie ;
- la position du soleil.

On utilise des spectres image (ou terrain si disponibles) étalon types (exemple eau sombre, végétation, sol nu clair) pour procéder à ces corrections, en cherchant à faire coïncider les spectres images correspondants à ces spectres étalon.

8.2. IMAGES ASTER DU LAC MAGADI ET DU LAC NATRON

8.2.1. Scènes disponibles

On disposait de deux scènes acquises le 23 septembre 2000, contiguës selon la trace du satellite, et couvrant le lac Magadi et le lac Natron. La mosaïque nord-sud de ces deux scènes est présentée en Figure 21.

8.2.2. Corrections atmosphériques

Deux corrections atmosphériques ont été appliquées aux images :

- avec trois spectres image étalon : végétation, eau sombre, sols nus clairs ;
- avec quatre spectres image étalon : végétation, eau sombre, sols nus clairs, trona.

8.2.3. Essais de cartographie des sels par classification supervisée

L'algorithme de classification utilisé est le « Spectral Angle Mapper ».

L'algorithme détermine la similitude spectrale entre un spectre image et un spectre de référence (issu d'une librairie spectrale) en calculant l'angle entre ces deux spectres en les considérant comme vecteurs dans un espace dont la dimensionnalité est égale au nombre de bandes spectrales de l'image (Kruse et al, 1993).

La Figure 22 illustre le principe de l'algorithme pour un espace à deux dimensions (deux bandes spectrales). Tout spectre image (test spectrum) dont l'angle avec le vecteur du spectre de référence (reference spectrum) est inférieur à un angle donné sera classé comme appartenant à la même classe que le spectre de référence.

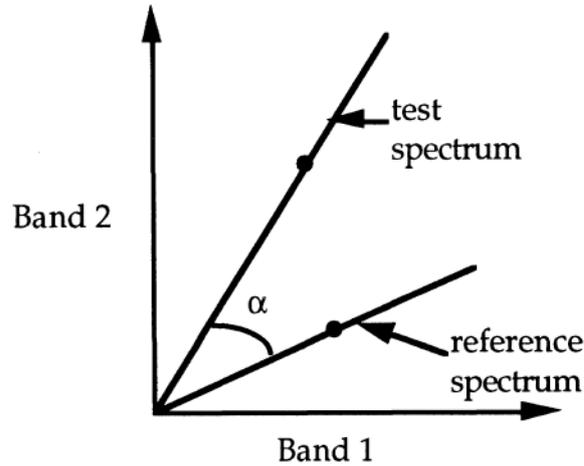


Figure 22 : Principe du Spectral Angle Mapper dans un espace à deux dimensions.

Cet algorithme présente le double avantage :

- de sa simplicité de mise en œuvre ;
- d'être indépendant des conditions d'illumination (zones ensoleillées ou ombragées) seuls l'angle entre deux vecteurs (et non leur longueur) étant pris en considération.

Classification à partir des spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres de référence.

L'algorithme de classification a été appliqué à l'image corrigée avec trois spectres étalon (voir 8.2.2) en prenant comme spectres de référence les spectres de la librairie USGS (voir Tableau 3).

Le résultat, présenté en Figure 23 montre :

- qu'à l'exception de la thénardite (que l'on a pas fait figurer sur l'image de la classification), dont le spectre ASTER est trop proche de celui d'une roche nue, seules les zones correspondant aux lacs sont classées en sels ; il y a donc peu de confusion entre les sels des lacs et l'environnement.
- que les pixels sont classés prioritairement en trona, gypse, gaylussite et mirabilite, et dans une moindre mesure colemanite.

Classification à partir des spectres USGS sur image corrigée avec quatre spectres de référence.

L'algorithme de classification a été appliqué ici à l'image corrigée avec quatre spectres étalon (voir § 8.2.2) en prenant comme spectres de référence les spectres de la librairie USGS (voir Tableau 3). Il s'agissait ici de contraindre la correction atmosphérique avec un spectre étalon de trona pour éviter les confusions entre les spectres de sels et ceux de roches nues.

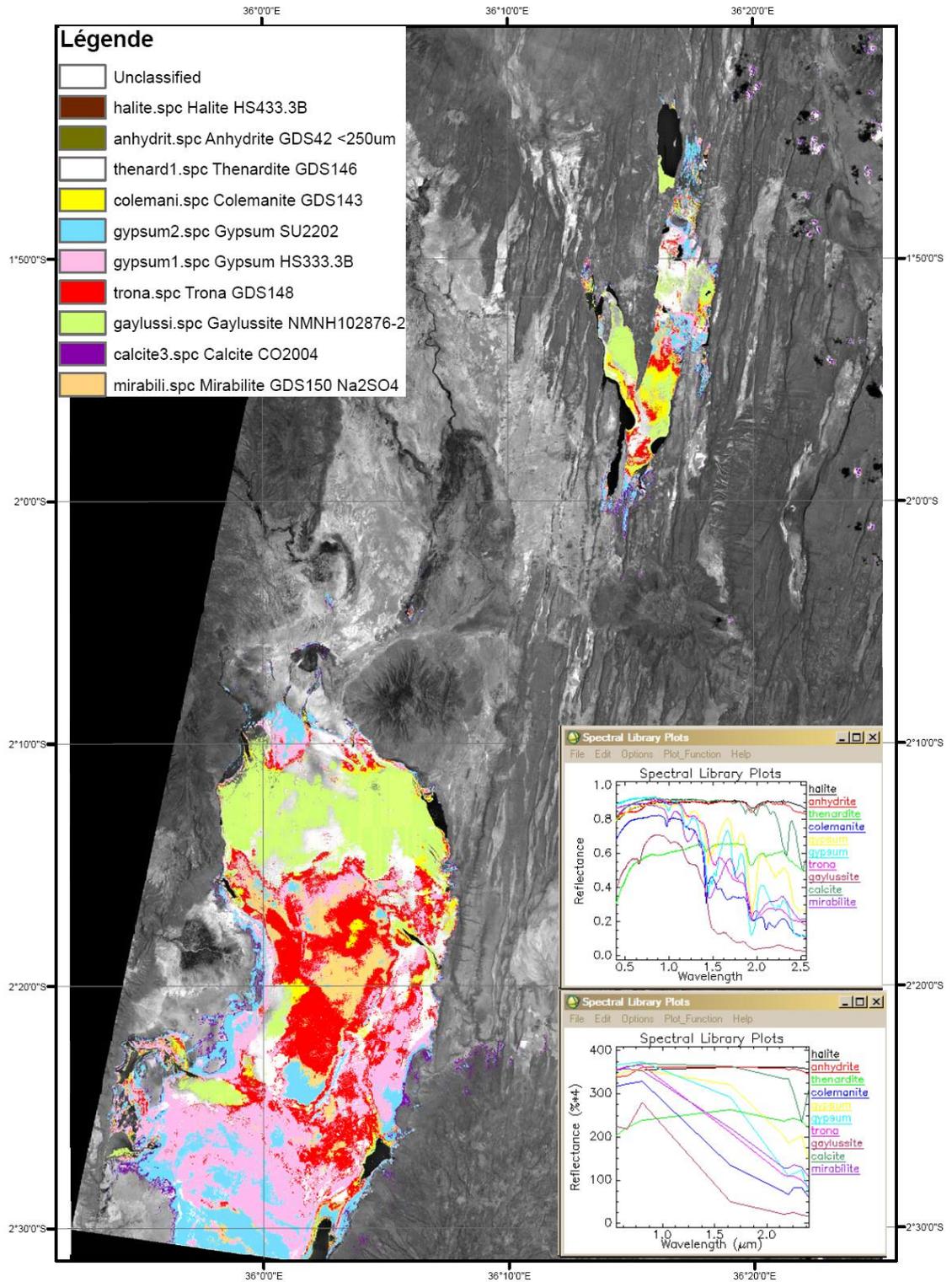


Figure 23 : Classification lac Magadi à partir spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres étalon.

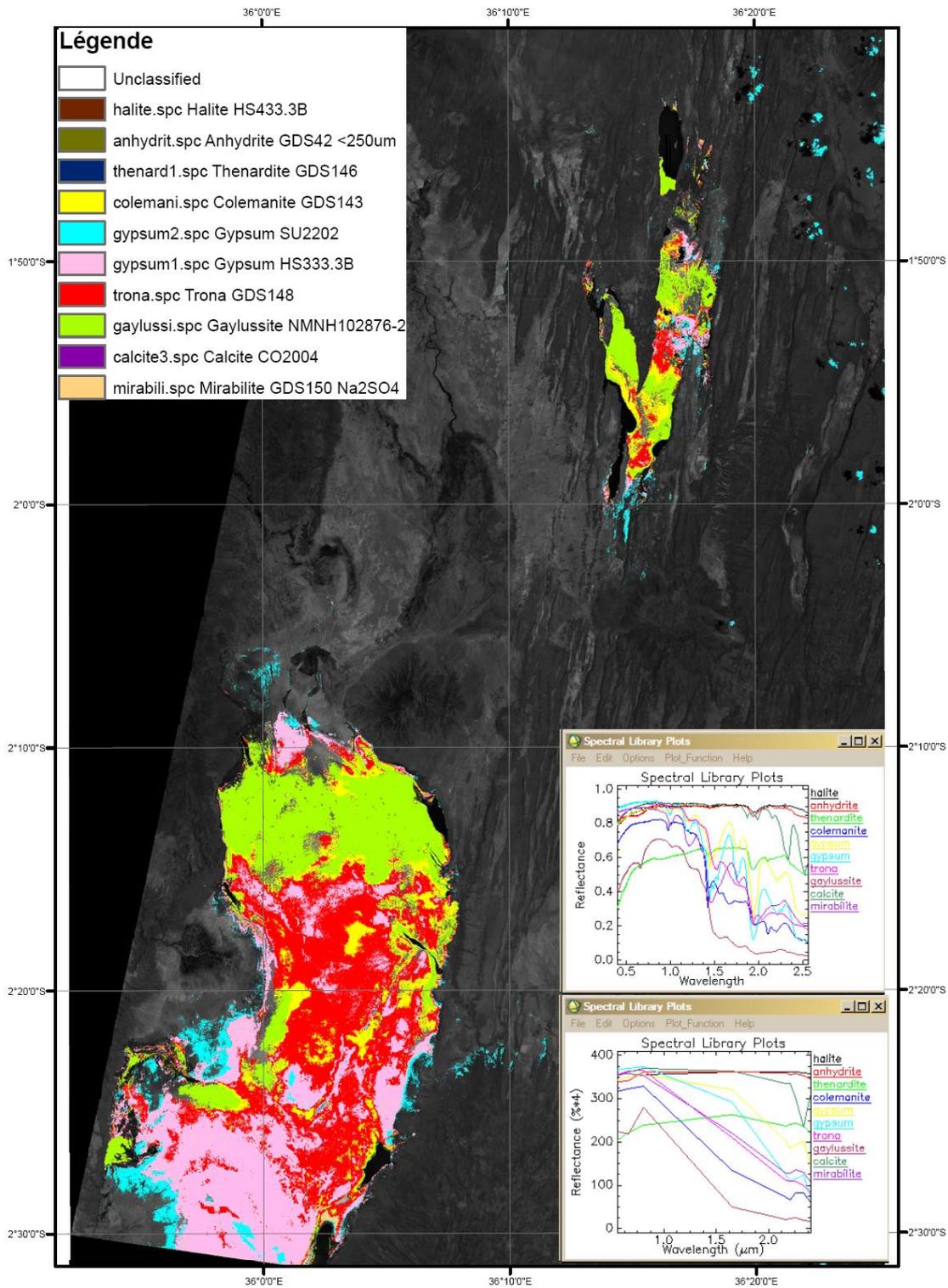


Figure 24 : Classification lac Magadi à partir spectres USGS sur image corrigée avec quatre spectres étalon.

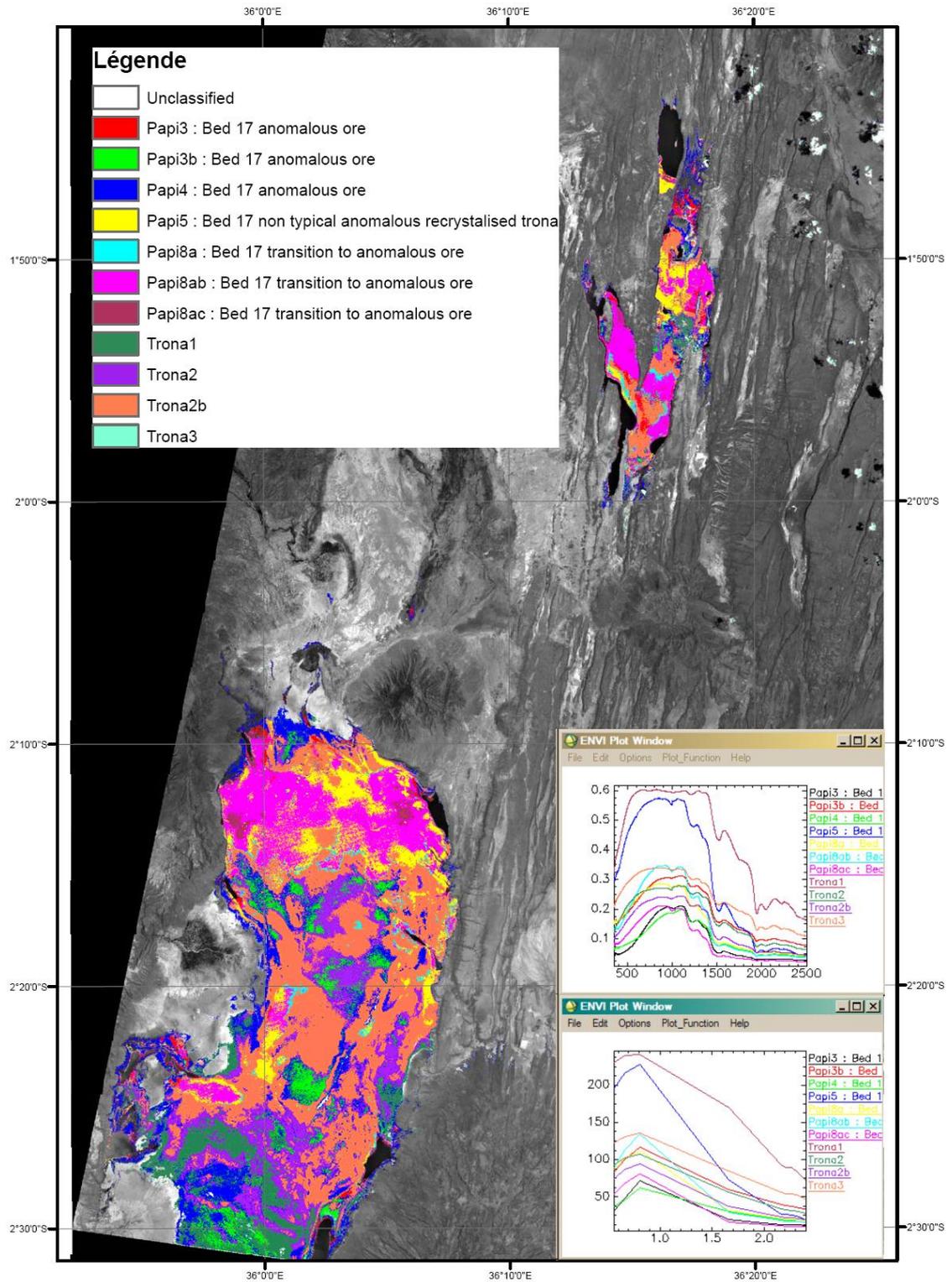


Figure 25 : Classification lac Magadi à partir spectres Solvay sur image corrigée avec quatre spectres étalon.

La classification, présentée en Figure 24, est très similaire à la précédente, sans qu'il subsiste une ambiguïté entre thénardite et roches nues. Notons toutefois la quasi disparition de la mirabilité de la classification.

Classification à partir des spectres Solvay sur image corrigée avec quatre spectres de référence

Le même algorithme de classification a cette fois été appliqué sur l'image corrigée avec quatre spectres étalon, en utilisant cette fois les spectres Solvay (voir § 7) comme spectres de référence

La classification de la Figure 25 montre une zonation très semblable à la précédente.

8.3. IMAGES ASTER DE WULAN AOB AO

8.3.1. Localisation

La région d'étude se situe dans la province de l'Ordos en Mongolie chinoise (Figure 26).

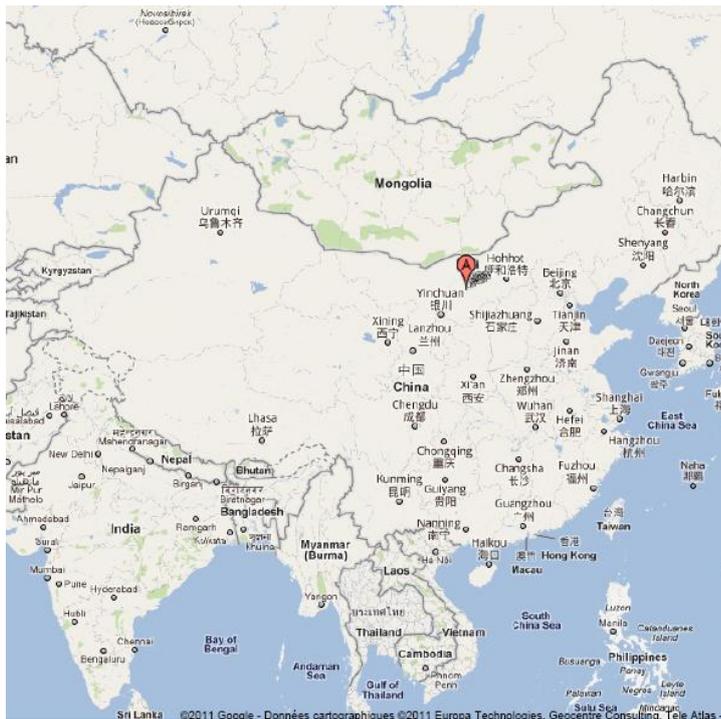


Figure 26 : Zone d'étude de Wulan Aobao (Bayinwusuzhen).

8.3.2. Scènes disponibles

On disposait de deux scènes, respectivement acquises le 12 mai 2003 et le 19 mai 2004, cette dernière ne couvrant que la partie nord de la zone d'exploitation.

8.3.3. Corrections atmosphériques

En l'absence de certitudes sur les sels présents, seule une correction atmosphérique à partir de trois spectres étalon (eau sombre, végétation, sols nus clairs) a été appliquée.

8.3.4. Essais de cartographie des sels par classification supervisée

Les mêmes spectres de référence et le même algorithme de classification, paramétré de la même manière, ont été utilisés pour la classification des images Chine.

Image de mai 2003

Là encore, on observe (Figure 27) une confusion thénardite (ne figure pas sur l'image de la classification) et sols nus. On note que seuls sont classées les zones correspondant aux zones humides et/ou en exploitation. Les zones blanches de l'image, supposées sèches, ne sont pas classées en sels. De fait, les spectres images de ces zones blanches sont très différents des spectres de référence USGS utilisés ; soit qu'il ne s'agisse pas de sels (les spectres image correspondant sont très différents des spectres de sels présentés en Figure 13 et Figure 14), soit que ce soient des sels pour lesquels on ne dispose pas de spectres

La majorité des pixels classés sont classés en gypse et gaylussite, sous forme de zonation de type auréole, et dans une moindre mesure en trona et mirabilite.

Image de mai 2004

La classification (zone nord uniquement, Figure 28) est semblable à la précédente, avec le même type de zonation, mais toutefois moins de pixels sont classées en gypse.

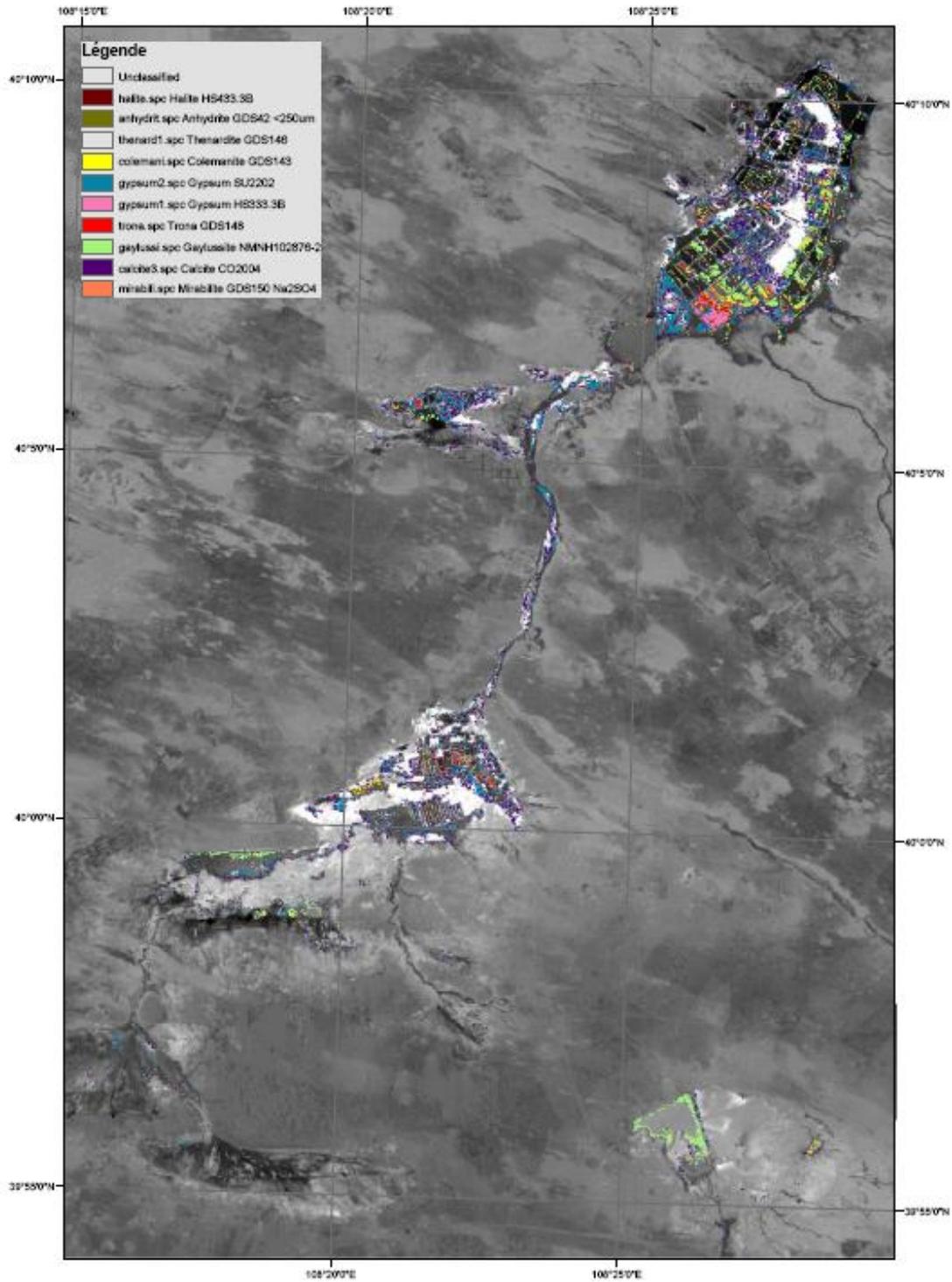


Figure 27 : Classification Chine à partir spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres étalon, image de mai 2003.

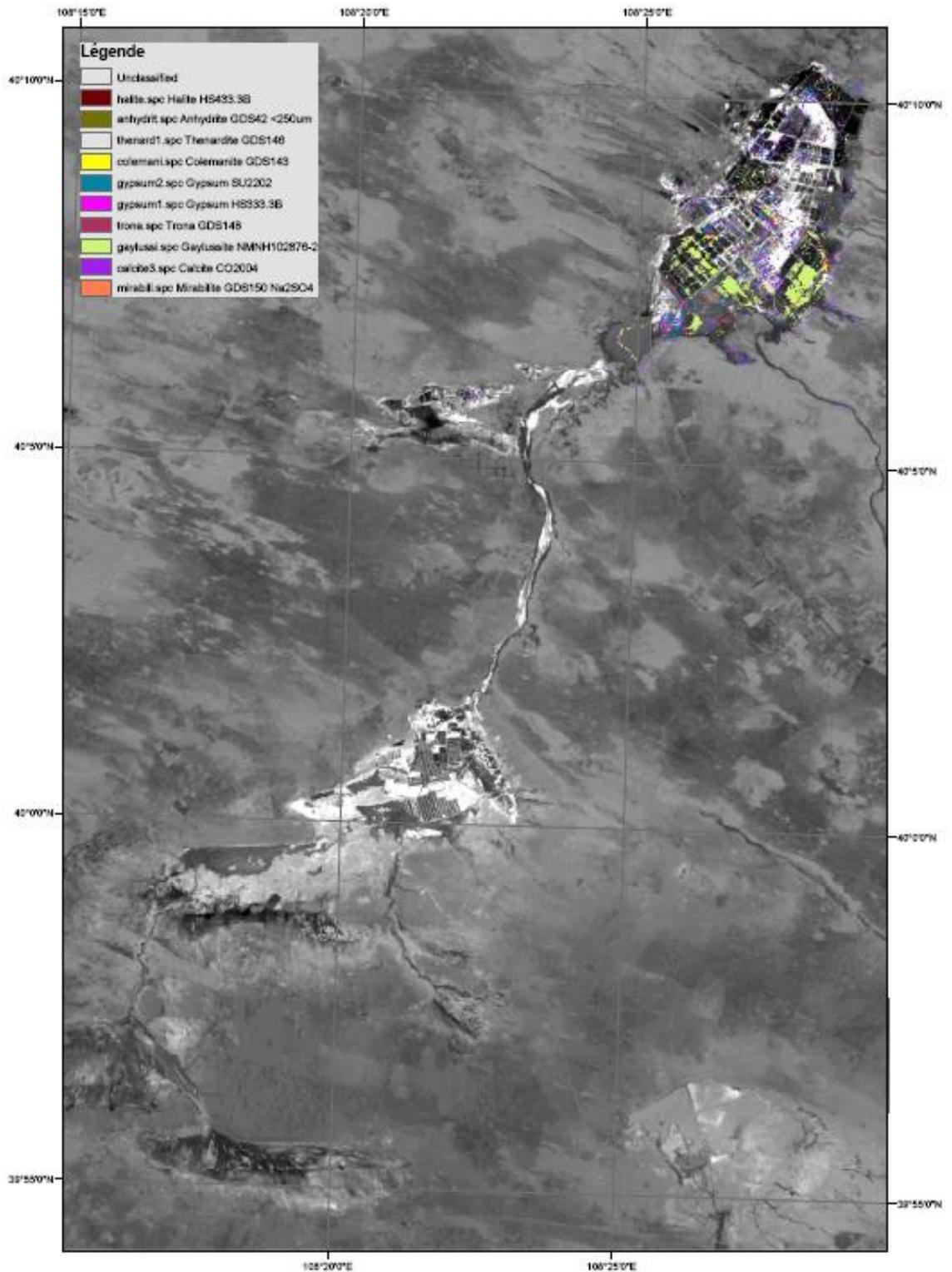


Figure 28 : Classification Chine à partir spectres USGS sur image corrigée avec trois spectres étalon, image de mai 2004.

9. Conclusions et perspectives

9.1. CONCLUSIONS

9.1.1. Analyse des spectres

L'étude bibliographique a montré le manque de disponibilité de spectres de lacs salins disponibles sous forme numérique utilisables par les logiciels d'analyse spectrale et de télédétection.

Seules les bibliothèques spectrales USGS et JPL fournissent des spectres sous forme numérique pour quelques sels majeurs.

L'analyse spectrale des spectres disponibles montre de bonnes possibilités de discrimination et d'identification minéralogique de ces sels d'après leur signature spectrale dans la gamme du visible – proche infrarouge – moyen infrarouge (450-2 500 nm).

Pour les minéraux dont les spectres sont disponibles, ces capacités de discrimination sont conservées lors du ré-échantillonnage des spectres sur les bandes spectrales ASTER, malgré une réduction de 425 à 9 bandes spectrales.

9.1.2. Essais de cartographie à partir d'images ASTER

Des essais de classification des sels évaporitiques à partir d'images ASTER et des spectres de sels de la bibliothèque spectrale USGS ont montré de bonnes capacités de cartographie des sels dans les lacs salés par cette technique.

En particulier, à l'exception de la thénardite dont le spectre est proche de celui des sols et roches nues, il n'y a pas de confusion entre les sels et leur environnement, seule la partie des lacs correspondant à ces sels étant cartographiée.

Dans tous les cas, on observe une zonation dans les lacs, en forme d'auréole ou non.

Ces classifications nécessiteraient toutefois une validation sur le terrain.

9.2. PERSPECTIVES

Les perspectives s'orientent selon trois axes :

- pallier au manque de données en disposant d'une bibliothèque spectrale numérique extensive représentative de l'ensemble des sels de lacs évaporitiques ;
- améliorer le traitement des données image pour une meilleure classification et valider les résultats ;

- disposer de données images permettant une meilleure discrimination spectrale que les données ASTER.

9.2.1. Amélioration des connaissances

Il conviendrait d'acquérir une meilleure connaissance de la minéralogie des sites étudiés, que ce soit pour ces sites ou d'autres sites à venir. Des investigations terrain permettraient :

- de reconnaître les sites étudiés et d'en identifier les minéralogies principales ;
- d'acquérir des spectres terrain et/ou sur échantillons prélevés, afin de constituer une librairie spectrale dédiée, représentative des minéralogies rencontrées.

9.2.2. Amélioration du traitement des données

Les corrections atmosphériques des images pourraient être nettement améliorées en utilisant des spectres « terrain » comme spectres étalon, en particulier des spectres de sels identifiés lors de la mission terrain.

De nouveaux algorithmes de classification, autre que le Spectral Angle Mapper, pourraient être testés.

9.2.3. Amélioration de la résolution des images de télédétection

Les images ASTER sont facilement accessibles et bon marché. Toutefois, le capteur n'est plus opérationnel dans le proche infrarouge depuis 2008. D'autre part, malgré ses 9 bandes spectrales, le capteur n'aura pas une résolution spectrale suffisante pour distinguer des sels dont la signature spectrale est trop proche, ou distinguer certains sels de leur environnement (ex de la thénardite).

Le recours à des images hyperspectrales permettrait une amélioration des capacités de cartographie de sels dans les lacs évaporitiques. On ne dispose cependant pas à ce jour d'un capteur satellitaire hyperspectral et seules des campagnes aéroportées permettraient d'acquérir des images hyperspectrales.

10. References

Crowley J.K. (1991) - Visible and near-infrared (0.4-2.5 μm) reflectance spectra of playa evaporite minerals, *Journal of Geophysical Research*, 96 (B10): p. 16231-16240.

Eugster H.P. and Smith G.I. (1965) - Mineral Equilibria in the Searles Lake Evaporites, California. *J. Petrology* (1965) 6(3): p. 473-522.

Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J. and Goetz A.F.H. (1993) - "The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 44, p. 145-163.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre Scientifique et Technique
Service Ressources Minérales**

3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 – France – Tel.: +33 (0)2 38 64 34 34