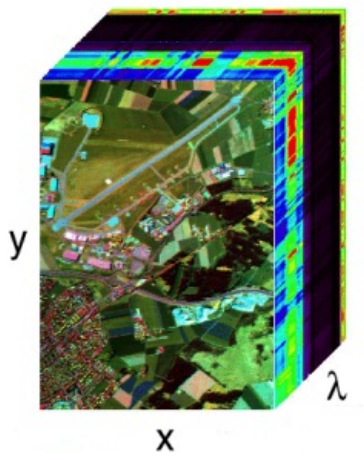
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

APPORT DE L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE POUR LA CARACTÉRISATION DES MINÉRAUX INDUSTRIELS ET MINIERS



Exemple de cube hyperspectral

M. BROSSARD (CEA/ENS), R. MARION (CEA), V. CARRÈRE (LPGN)

www.cea.fr

ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Caractérisation des minéraux industriels et miniers

- Surveillance environnementale
  - Pollution des sols et des eaux, etc.
- Impact des activités anthropiques
- Sécurité & Défense

Hyperspectral : caractéristiques instrumentales adaptées

- Résolution spatiale (déca) métrique → analyse locale à l'échelle des sites
- Continuum spectral [0,4 – 2,5µm] à 10nm → accès aux minéraux ayant une signature spectrale caractéristique dans le VNIR/SWIR
  - Oxydes et hydroxydes de fer, argiles, chlorites, carbonates, sulfates, etc.

Usines métallurgiques ArcelorMittal de Fos-sur-Mer (France)

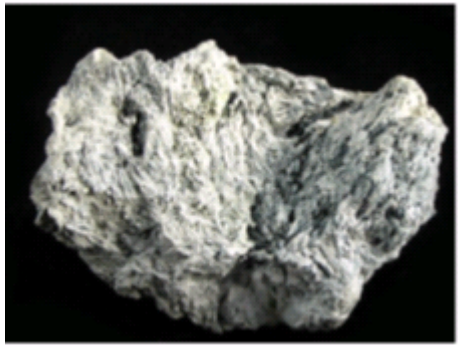
Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) disposée en tas sur un site industriel

MINÉRALOGIE ET IMAGERIE HYPERSPECTRALE

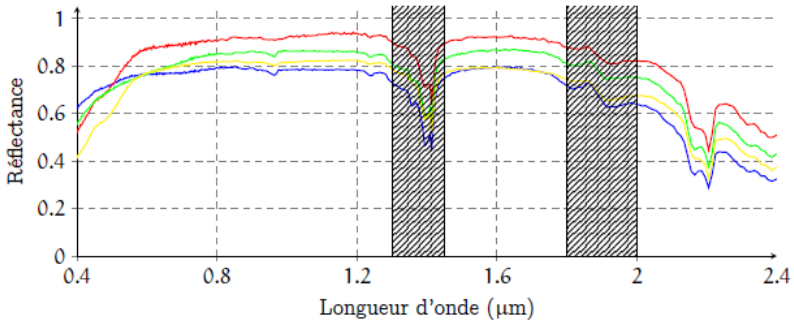
Un minéral est défini par :

- Sa composition chimique
- L'agencement de ses atomes
- Ses propriétés
  - Physico-chimiques
  - Mécaniques
  - Optiques

En particulier, un minéral est caractérisé par son spectre de réflectance



Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)

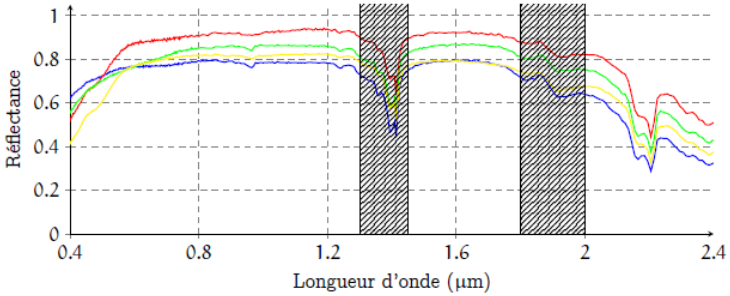


Spectres de différents échantillons de kaolinite

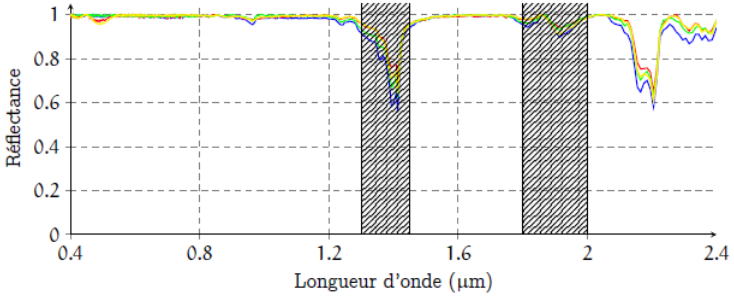
SIGNATURE DES MINÉRAUX DANS LE DOMAINE [0,4 – 2,5µm]

Exploitation de la signature spectrale

- Position en λ des pics d'absorption → identification du minéral
- Amplitude des absorptions → informations quantitatives
- Forme générale → informations sur les conditions de surface (granulométrie, rugosité, humidité, etc.)



Spectres de différents échantillons de kaolinite



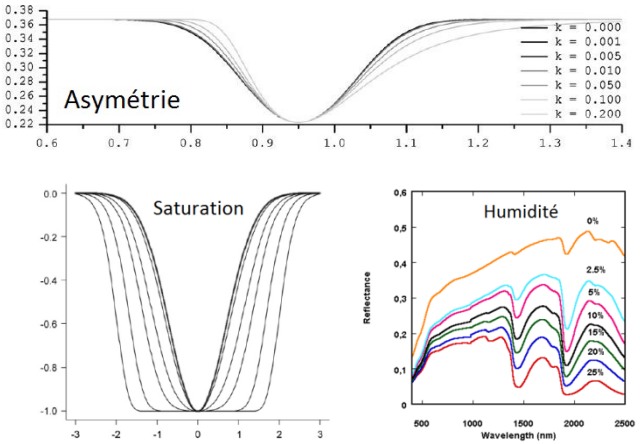
Spectres de kaolinite après retrait du continuum

→ Comparer le spectre à une base de données en utilisant une métrique : NOK

→ Objectif : trouver la position des pics d'absorption

MÉTHODE AGM (AUTOMATIZED GAUSSIAN MODEL*) : MODÉLISATION DU SPECTRE [1/3]

- Approche MGM** étendue au SWIR
- Extension du modèle pour prendre en compte la forme :
  - Des absorptions (asymétrie, saturation)***
  - Globale du spectre (eau à 2,8µm)****



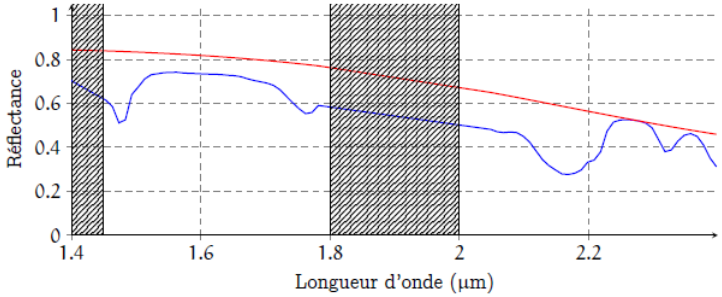
Extension du modèle MGM

Modélisation du spectre

$$\log(\rho(\lambda)) = C(\lambda) + \sum_{i=1}^{N} G_i(\lambda)$$

$$C(\lambda) = c_0 + G_{EAU}(\lambda)$$

$$G_i(\lambda) = \frac{S_i}{1 - e^{-\frac{1}{2}t_i}} \left[1 - e^{-\frac{1}{2}\left(t_i e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \mu_i}{\sigma_i + k_i(\lambda - \mu_i)} \right)^2} \right)} \right]$$



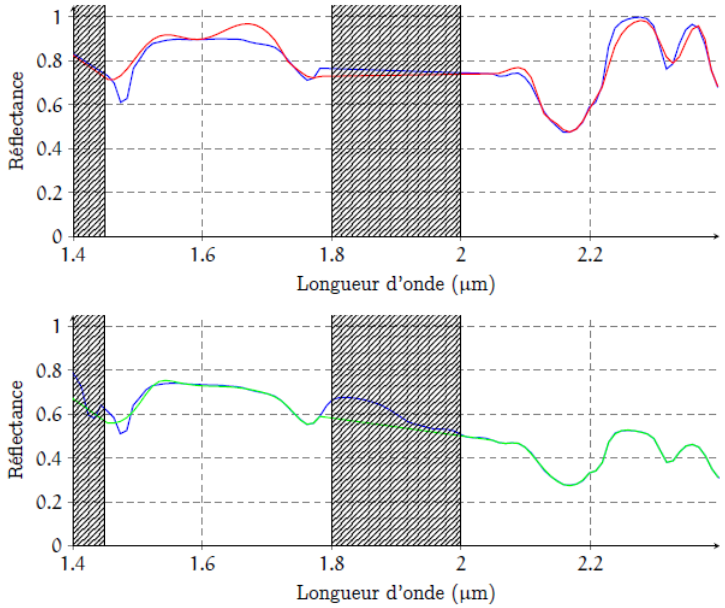
Spectre d'alunite (en bleu) ainsi que son continuum calculé (en rouge)

* (Brossard et al., 2016), ** (Sunshine et al., 1990), *** (Pompilio et al., 2009), **** (Whiting et al., 2003)

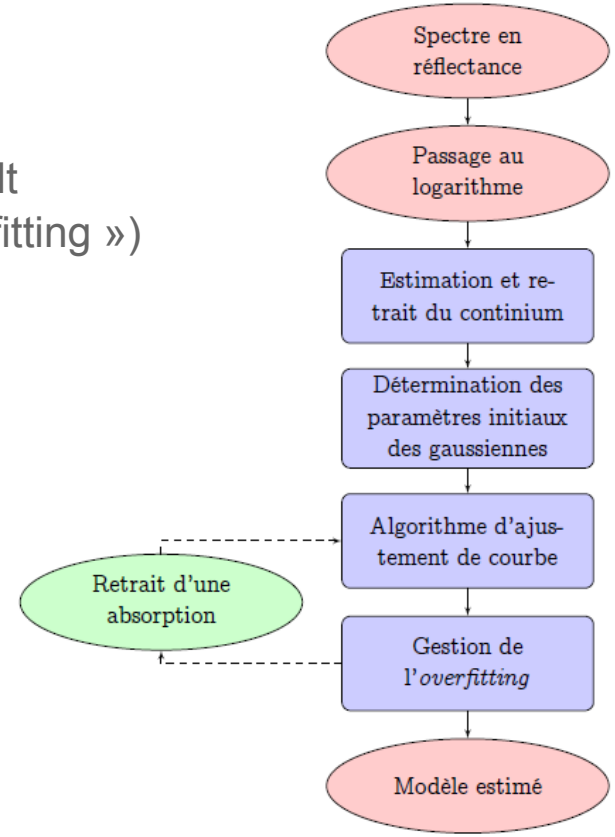
MÉTHODE AGM : ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE [2/3]

- Estimation des paramètres initiaux :
  - Estimation et retrait du continuum $C(\lambda)$
  - Détermination de N et des gaussiennes $G_i(\lambda)$
- Boucle d'ajustement de courbe :
  - Algorithme de minimisation Levenberg-Marquardt
  - Critères de suppression de gaussiennes (« overfitting »)

⇨ Modélisation correcte avec N faible



Spectres analysé (bleu), après initialisation (rouge) et calculé (vert)



Flowchart de l'algorithme AGM

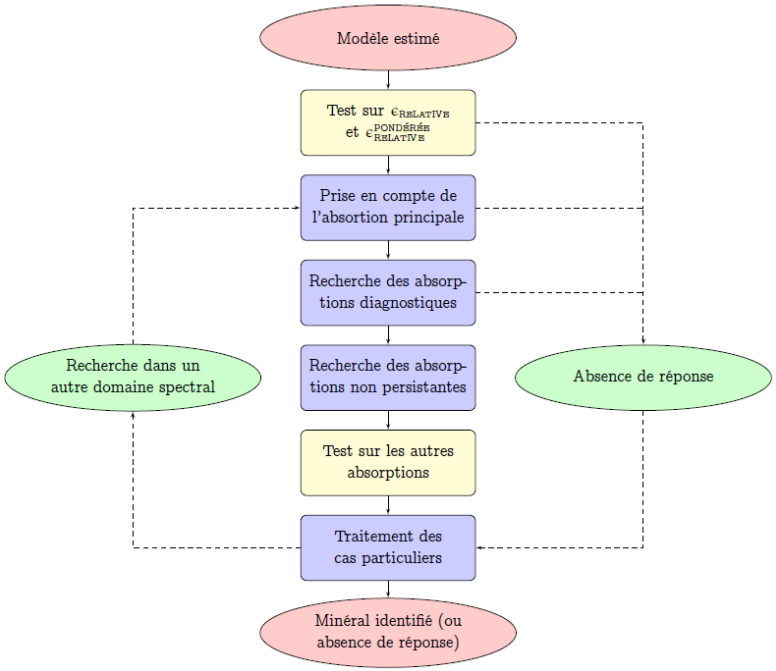
MÉTHODE AGM : IDENTIFICATION DU MINÉRAL [3/3]

- Principe : reproduire l'interprétation visuelle du spectre de réflectance qui serait faîte par un minéralogiste pour identifier le minéral (GMEX*)

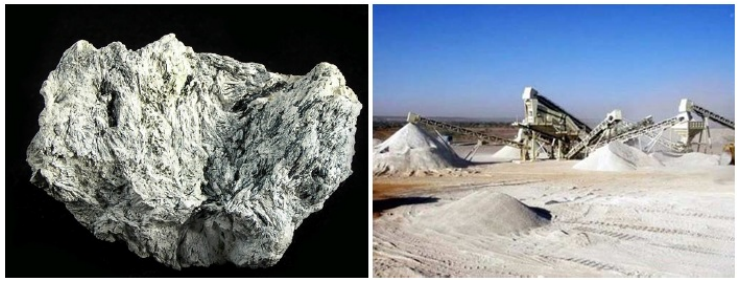
- Méthode d'identification :
  - Regarder l'absorption la plus profonde → identification d'un groupe minéralogique
  - Regarder les autres absorptions → identification d'un minéral

- + Prise en compte :
  - Des spectres sans absorption (fausses détections)
  - Des bandes masquées (atmosphère)

- Base de données :
  - 14 minéraux industriels (argiles, chlorites, carbonates, sulfates + gibbsite, buddingtonite, talc)
  - Caractérisation des absorptions de chaque minéral : position, largeur, profondeur



Flowchart de l'algorithme d'identification



Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) disposée en tas sur un site industriel

"GMEX: Guides for Mineral Exploration: Spectral Interpretation Field Manual." 2008. *AusSpec*.

VALIDATION SUR DONNÉES SIMULÉES

Constitution d'une base de données

- 14 minéraux (argiles, chlorites, carbonates, sulfates + gibbsite, buddingtonite, talc)
- Caractérisation des absorptions de chaque minéral :
  - Position
  - Largeur
  - profondeur

Minéral	Numéro d'absorption	Position moyenne (nm)	Écart-type (nm)	Position GMEX (nm)
Kaolinite	1	2206	1	~ 2206
	2	2167	3	~ 2162
Illite	1	2213	8	2180 - 2228
	2	2357	14	~ 2347
Montmorillonite	1	2210	6	2205 - 2212
	-	-	-	-
Nontronite	1	2280	-	2270 - 2296
	2	2357	-	2363 - 2394
Fe chlorite	1	2258	2	2355 - 2365
	2	2258	2	2261
Mg chlorite	1	2322	3	2325
	2	2247	2	~ 2245
Calcite	1	2338	2	2340 - 2345
	-	-	-	-
Dolomite	1	2320	-	2320 - 2328
	-	-	-	-
Alunite	1	2171	4	2160 - 2170
	2	1763	2	~ 1760
Gypse	1	1434	-	~ 1449
	2	1750	-	~ 1750
Jarosite	1	2271	3	2262 - 2277
	2	1474	5	1468 - 1477
Gibbsite	1	2270	-	~ 2268
	2	1452	-	~ 1452
Buddingtonite	1	2124	-	2112
	-	-	-	-
Talc	1	2310	2	~ 2310
	2	2386	1	~ 2390

Tests sur données simulées

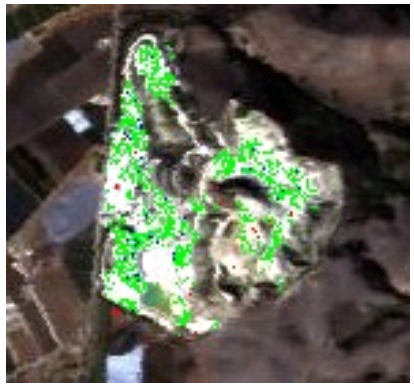
- 60 spectres des 14 minéraux de la base de données
- 59 spectres correctement identifiés
  - Non réponse pour un spectre de montmorillonite à la granulométrie particulière

→ Application à la reconnaissance de minéraux industriels (carrières, usines) et miniers et à la cartographie minéralogique

CHEMICAL LIME CO : PRODUCTION DE CHAUX DOLOMITIQUE

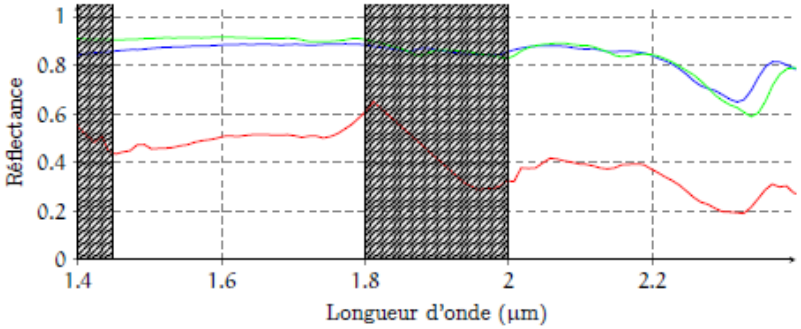
Images Google Earth et AVIRIS (rés. : 16m) (rouge : zone des fours, vert : tas d'approvisionnement, bleu : carrière)

Méthode AGM →



Résultats : dolomite en vert, calcite en bleu, autres minéraux en rouge

Image Google Earth des tas de dolomie (roche carbonatée) en entrée des fours



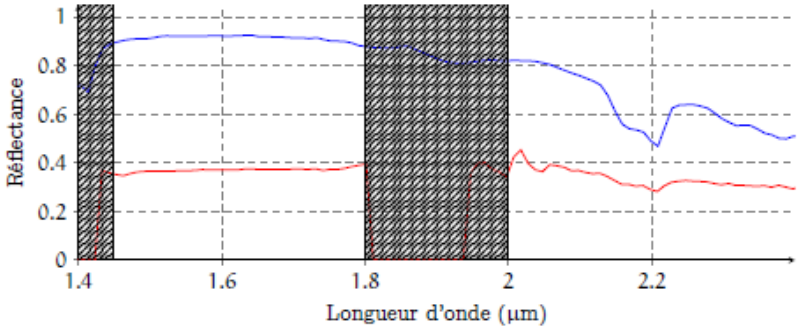
Distinction dolomite/calcite - Spectres théoriques (librairie spectrale) de dolomite (bleu) et calcite (vert) et spectre AVIRIS de dolomite (rouge)

⇨ impact de la granulométrie (tas) ou présence de calcite ?

PACIFIC CLAY & PACIFIC AGGREGATES : PRODUCTION DE BRIQUES D'ARGILE ET DE GRANULATS

Image AVIRIS (rés. 16m)

Résultats : kaolinite en vert, illite en bleu, montmorillonite en jaune, autres minéraux en rouge



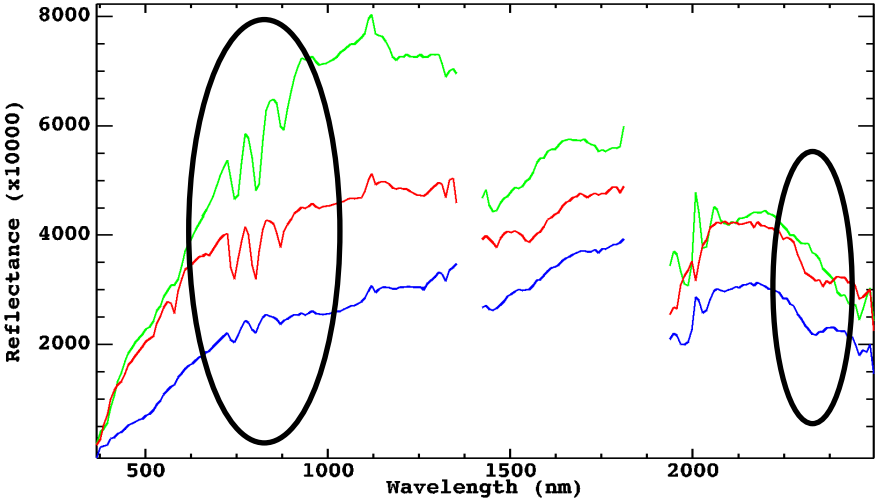
Spectres de kaolinite.
Bleu : librairie spectrale, rouge : AVIRIS

- Données USGS :
  - Kaolinite et autres argiles
  - Sables et graviers de construction
- Résultats :
  - Détection des argiles kaolinite, illite, et montmorillonite
  - Pas de fausse détection pour les sables et les graviers

MINE D'EXTRACTION DE TERRES RARES DE MOUNTAIN PASS

- Caractéristiques du dépôt :
  - Terres rares principalement contenues dans le minéral bastnasite
  - Gangue minérale : calcite, barite, dolomite (carbonates)
- Usine sur le site :
  - Extraction des métaux Cerium, Lanthanum, Neodymium, Europium
  - Divers procédés (traitements acides, calcination…)

Image hyperspectrale AVIRIS



Spectres extraits de l'image

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Conclusions :
  - Fonctionnement sur données simulées : très satisfaisant
  - Fonctionnement sur données réelles : satisfaisant, en particulier avec le capteur AVIRIS
  - Limite principale : mélanges spectraux

- Perspectives :
  - Couplage VNIR/SWIR pour l'identification
  - Ajustement des paramètres algorithmiques en fonction du capteur utilisé
  - Étendre la méthode aux environnements (industriels et) miniers
  - Prise en compte des mélanges spectraux
    - Aspect quantitatif / cartographie (ex. Cuprite AVIRIS, Namibie HyMap)
    - Applications satellitaires (HYPXIM)