

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



**Détection/identification de minéraux industriels  
par imagerie hyperspectrale VNIR/SWIR – Apport  
de la transformée en ondelettes continue pour  
l'initialisation de l'algorithme AGM**



6<sup>ème</sup> colloque SFPT-GH  
Montpellier, 17-18 mai 2018

**Ronan Rialland (CEA), Rodolphe Marion (CEA),  
Véronique Carrère (LPG Nantes)**

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

[ronan.rialland@cea.fr](mailto:ronan.rialland@cea.fr)

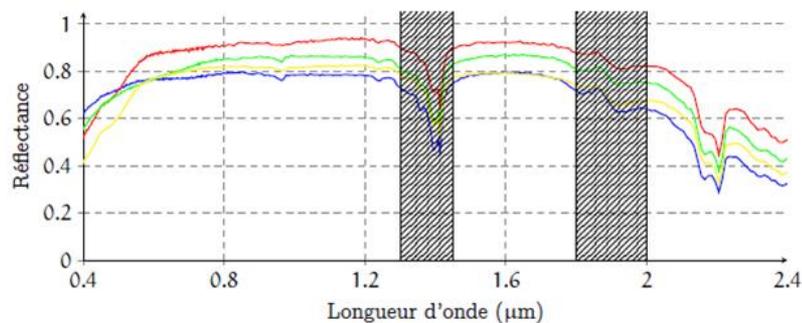
- Introduction
- Algorithme AGM (*Automatized Gaussian Model*)
  - Modèle EGO (*Exponential Gaussian Optimization*)
  - Présentation de l'algorithme AGM
  - Exemple d'application
  - Objectifs de l'étude et solutions proposées
- Initialisation du modèle par transformée en ondelettes continue
  - Principe de la méthode
  - Analyse des résultats
- Identification/caractérisation des minéraux et spatialisation de l'information
- Conclusion

# INTRODUCTION

- Un minéral est défini par :
  - Sa composition chimique
  - Sa structure cristalline (agencement des atomes)
  - Ses propriétés : physico-chimiques, mécaniques, optiques
  
- Un minéral possède une signature spectrale (i.e., un spectre de réflectance) dans les domaines spectraux du VNIR-SWIR [0,4 – 2,5]  $\mu\text{m}$  se décomposant en :
  - Une forme générale (continuum)
  - Des absorptions (positions, amplitudes, largeurs, formes)
  
- Le spectre de réflectance permet d'identifier le minéral ou le mélange et d'analyser certaines caractéristiques minéralogiques (granulométrie, humidité, etc.)



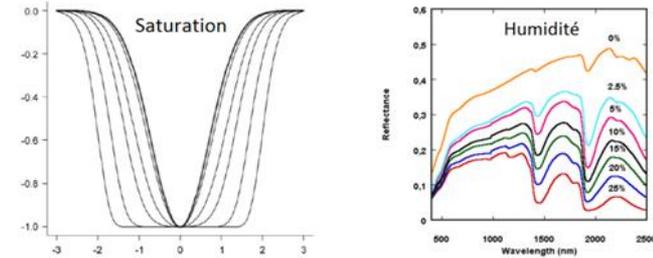
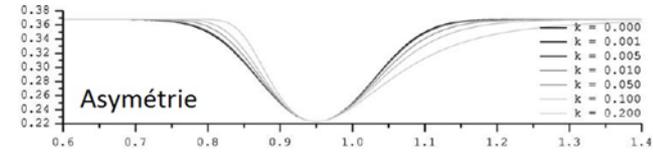
Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )



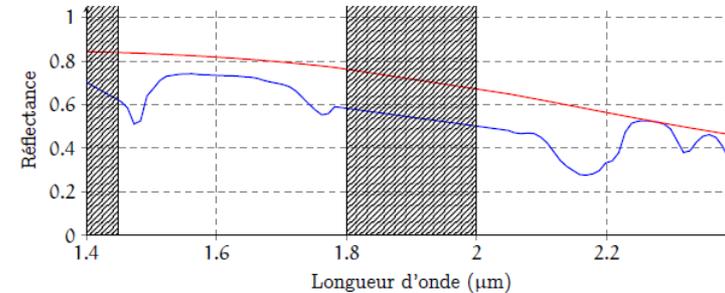
Spectres de différents échantillons de kaolinite

- L'imagerie hyperspectrale est adaptée à l'étude des spectres de réflectance

- Basé sur le modèle MGM<sup>2</sup> (*Modified Gaussian Model*)  
=> Modèle du logarithme du spectre de réflectance pour le VNIR
- Modèle EGO développé pour l'étude des absorptions du SWIR, prise en compte de la forme des absorptions et du continuum :
  - Asymétrie et saturation<sup>1</sup>
  - Humidité<sup>3</sup>
- Généralisé à l'ensemble du spectre VNIR – SWIR<sup>3</sup>



Extension du modèle MGM



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

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

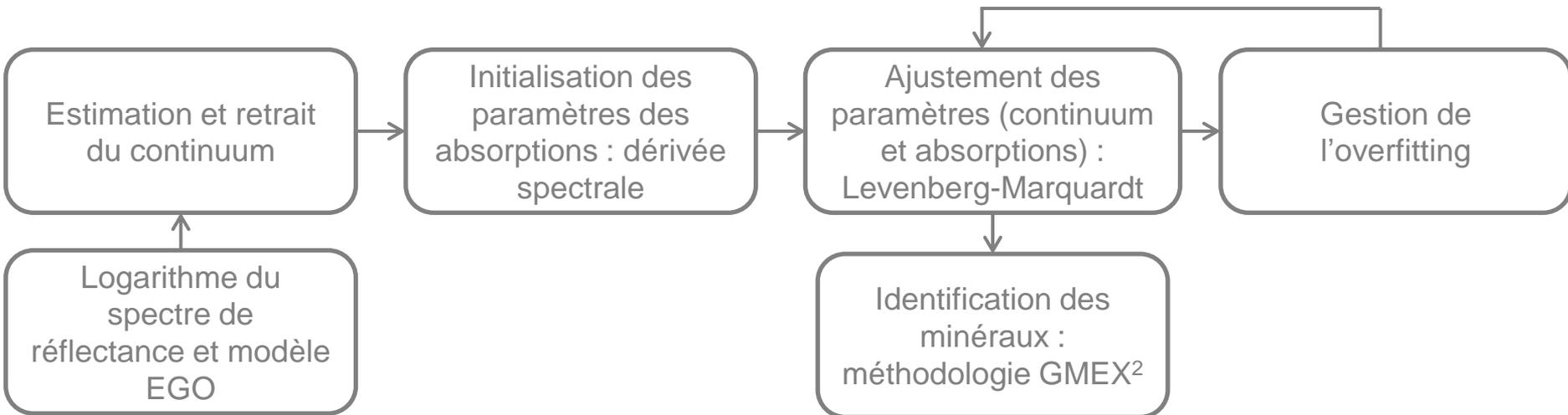
$$C(\lambda) = c_0 + c_1\lambda^{-1} + G_{UV}(\lambda) + G_{EAU}(\lambda)$$

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

<sup>1</sup> (Pompilio et al., 2009) <sup>2</sup>(Sunshine et al., 1990)<sup>3</sup> (Whiting et al., 2003)

## ■ Objectifs de l'algorithme :

- Décomposer un spectre en une somme de gaussiennes et d'un continuum pour estimer ses caractéristiques (positions, profondeurs, forme des absorptions)
- A l'aide des caractéristiques du spectre, détecter et identifier les minéraux présents

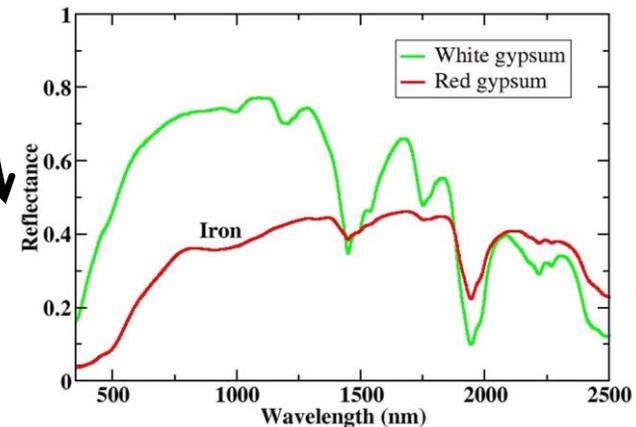
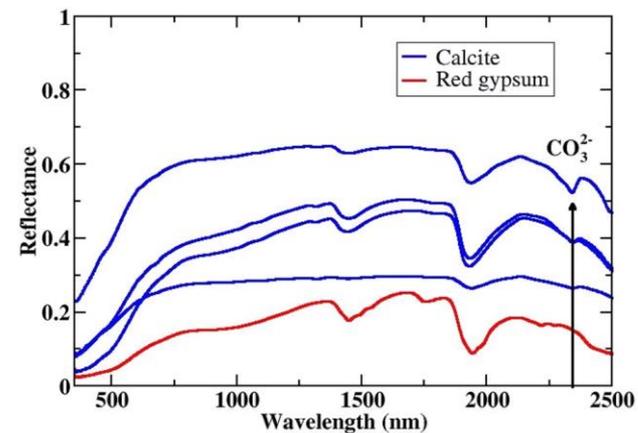
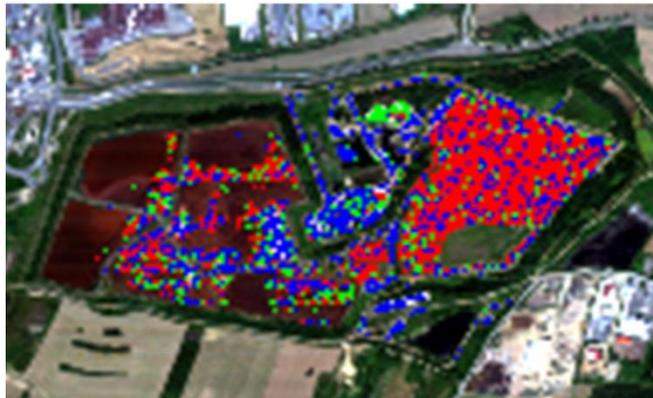
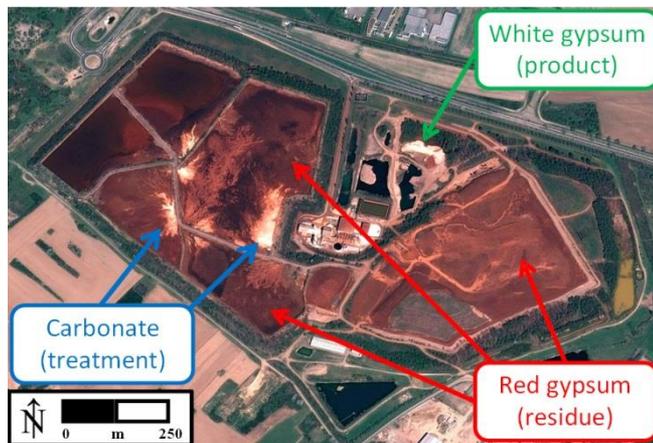


<sup>1</sup> (Lothodé 2016 ; Brossard et al., 2016 ; Marion et al., 2018)

<sup>2</sup> (GMEX: Guides for Mineral Exploration: Spectral Interpretation Field Manual.” 2008. AusSpec)

# ALGORITHME AGM : EXEMPLE D'APPLICATION

- Site industriel de Thann<sup>1</sup> (France) => production de  $\text{TiO}_2$  => Résidus = gypse, carbonates
- Minéraux présents : calcite, gypse rouge et blanc



- Limites de l'algorithme AGM :
  - Phénomène d'overfitting
  - Méthode d'identification/caractérisation => pas de gestion des mélanges spectraux
  - Pas de prise en compte de l'information spatiale
  
- Solution proposée au phénomène d'overfitting :
  - Initialisation des paramètres du modèle EGO par transformée en ondelettes continue<sup>1</sup>  
+ optimisation (Levenberg-Marquardt)
  
- Solutions envisagées aux autres problématiques :
  - Mise en place d'un ensemble de lois expertes permettant d'identifier les minéraux puis de les caractériser
  - Utiliser le traitement de pixels significatifs par AGM pour définir un ensemble de références propres à l'image

<sup>1</sup> (Du et al., 2006)

# INITIALISATION DES PARAMÈTRES PAR TRANSFORMÉE EN ONDELETTES CONTINUE (CWT)

■ Principe => pour un pic gaussien

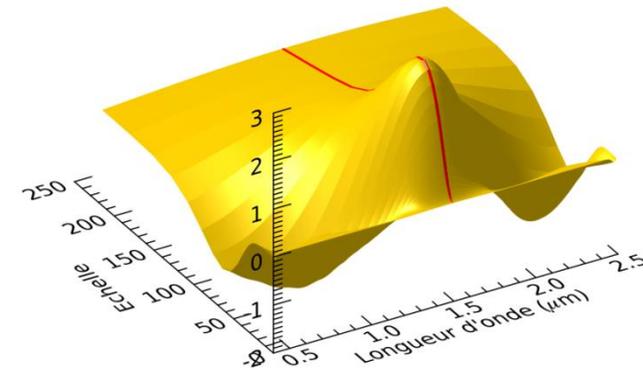
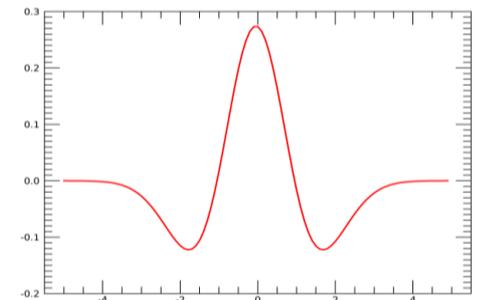
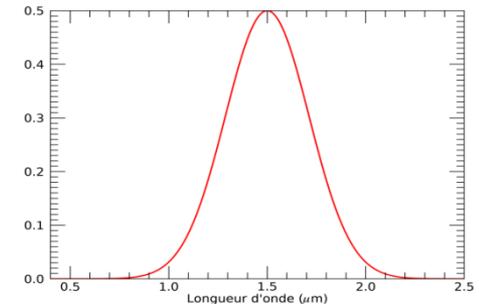
- Ondelette du chapeau mexicain
- Représentation dans la matrice des coefficients => informations sur les caractéristiques des absorptions (lignes de crêtes)

■ Avantages

- Suppression implicite du continuum (passe bas)
- Lien avec le bruit (*overfitting*)

■ Inconvénients

- Perte des informations contenues dans le continuum
- Approximation pour des spectres => underfitting
- Paramètres algorithmiques pour la détection et la sélection des lignes de crêtes



Pic gaussien centré en 1,5 µm, ondelette du chapeau mexicain, matrice D(a,b)

$$D(a,b) = \int s(t)\psi_{a,b}(t)dt$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$$a \in \mathbb{R}^+ \text{ et } b \in \mathbb{R}$$

$$\tilde{\mu} = \lambda_{\text{max\_ligne\_crete}}$$

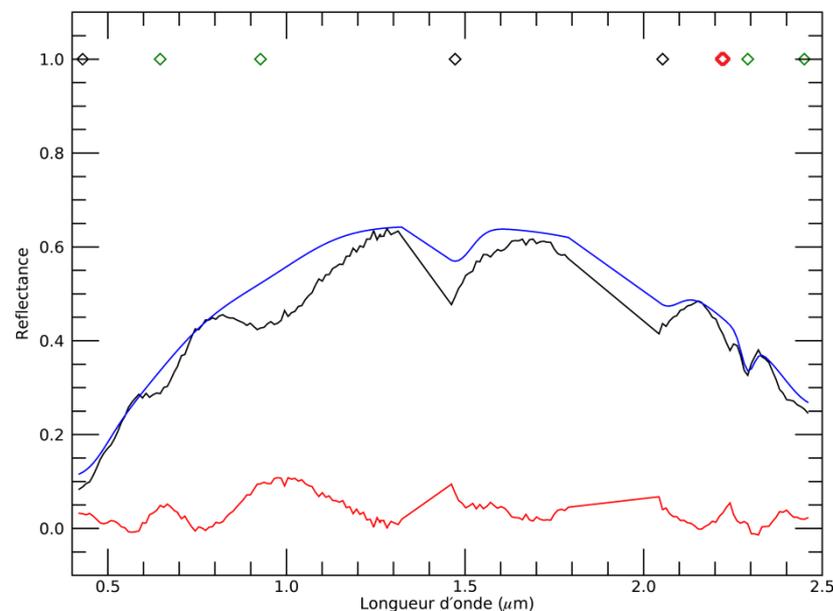
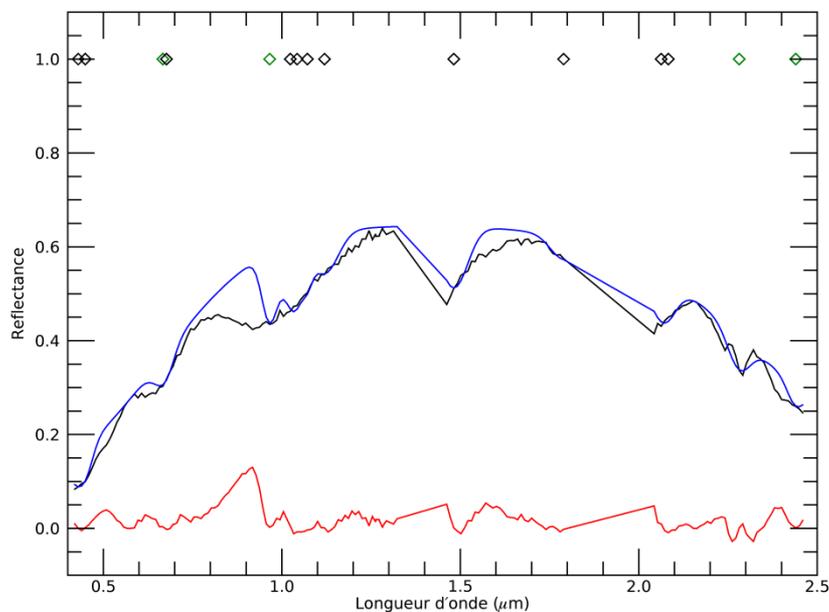
$$\tilde{\sigma} = 2a_{\text{max\_ligne\_crete}}$$

$$\tilde{S} = \tilde{\sigma}\sqrt{2\pi}A_{\text{max\_ligne\_crete}}$$

■ Exemple : spectre de nontronite => absorptions dans le VNIR et dans le SWIR

■ Analyse :

- Nombre de gaussiennes estimées très réduit => réduction de l'overfitting
- Difficulté d'initialisation des paramètres autres que les positions des gaussiennes (profondeurs et largeurs) => ajustement final par Levenberg-Marquardt conservé



Comparaison de l'initialisation par dérivées spectrales (à gauche) et par transformée en ondelette continue (à droite) : spectre réel (noir), spectre initialisé (bleu) et erreur (rouge)

# CONSTRUCTION DES LOIS EXPERTES POUR L'IDENTIFICATION ET LA CARACTÉRISATION DES MINÉRAUX

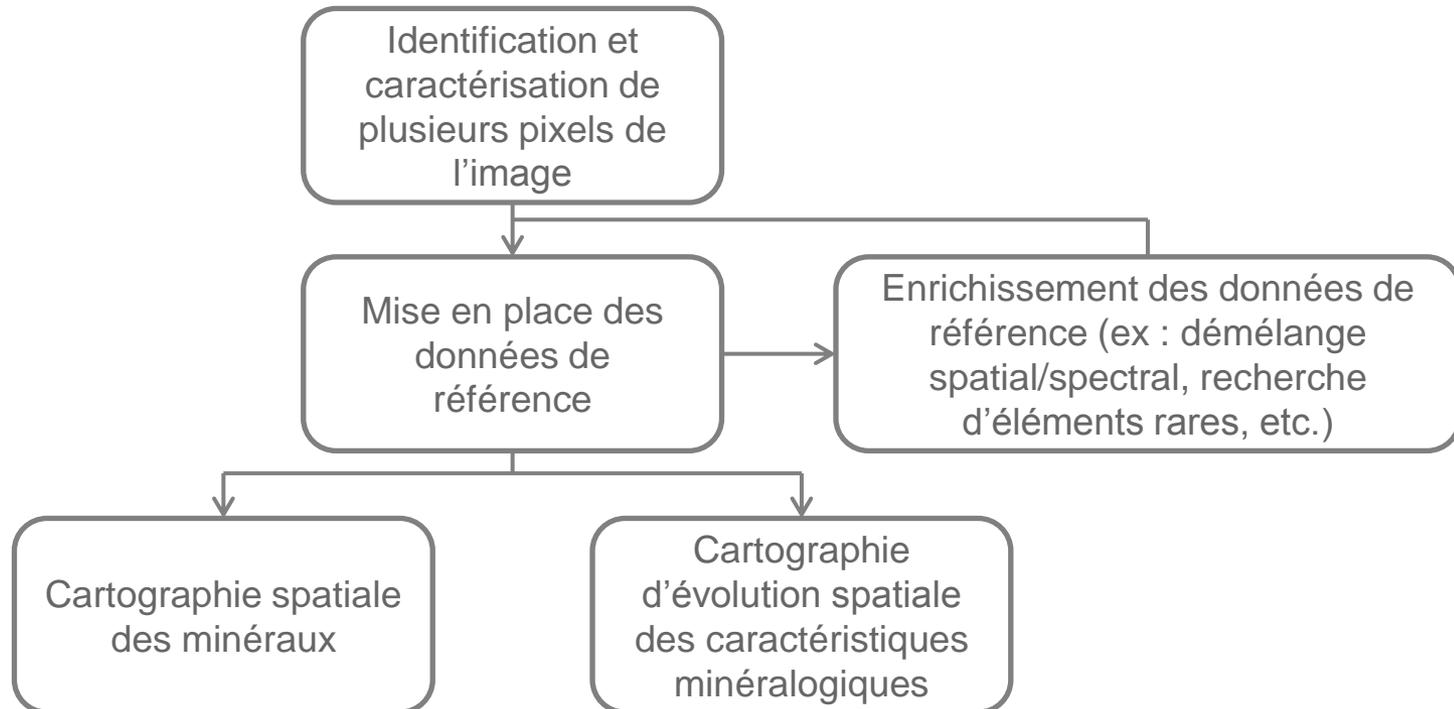
- Le continuum et les absorptions informent sur le minéral (composition chimique, caractéristiques minéralogiques) => paramètres du modèle EGO
- Objectifs :
  - Identification des minéraux
  - Etude des caractéristiques minéralogiques
- 1<sup>ère</sup> étape : identification du minéral ou de la famille minéralogique :
  - Mise en place de lois expertes associées à chaque minéral de la base de données
  - Exemple : la position des absorptions renseigne sur la composition chimique

$$\begin{cases} \text{Si } \lambda_{\min} \leq \lambda_{\text{AGM}} \leq \lambda_{\max} \text{ alors } F = 1 \\ \text{Sinon } F = 0 \end{cases}$$

- 2<sup>nd</sup> étape : caractérisation minéralogique
  - Restriction aux minéraux identifiés à l'étape 1
  - Mise en place de lois expertes associées aux caractéristiques minéralogiques

# SPATIALISATION DE L'INFORMATION

- Objectif : utiliser le traitement de certains pixels par AGM pour cartographier les minéraux et leurs caractéristiques
- Exemple : cartographie de la variation de granulométrie d'un minéral au cours du procédé industriel



- Limites de l'algorithme AGM pour l'identification et la caractérisation des minéraux
- Proposition d'une nouvelle méthode d'estimation des paramètres du modèle EGO par transformée en ondelettes continue
- Perspectives :
  - Améliorer l'estimation des paramètres (modèle de bruit, etc.)
  - Mettre en place une nouvelle méthode d'identification et de caractérisation des minéraux
  - Gérer les mélanges spectraux
  - Mettre en place une approche de spatialisation de l'information