



IDENTIFICATION DE PROCÉDÉS INDUSTRIELS À L'AIDE DES CARACTÉRISTIQUES SPECTRALES (VNIR-SWIR) DE LEURS REJETS.

MAÏWENN LOTHODÉ - UMR-CNRS 6112 LPGN - UNIVERSITÉ DE NANTES

DIRECTION : VÉRONIQUE CARRÈRE - UMR-CNRS 6112 LPGN - UNIVERSITÉ DE NANTES

CO-ENCADRANT : RODOLPHE MARION – LTSE – CEA-DAM



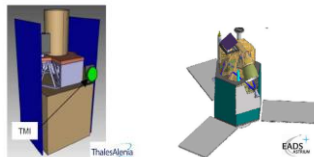
CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Missions spatiales en cours
Capteurs hyperspectraux

HypSIRI
USA
?
(60 m)

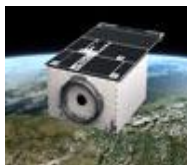


HYPXIM
France
Phase A
2020-2025
(8 m)



©CNES and industrial property – all rights reserved

EnMAP
Allemagne
2015-2016
(30 m)



PRISMA
Italie
2014
(30 m)



- Nouvelle génération de capteurs :
HYPXIM (CNES)
=
Satellite Haute résolution spectrale et spatiale
- Évaluation des traitements et Applications :
CdR HYPEX de la DGA (2012-2016)

Logiciels de traitements pour les opérationnels

Applications de l'imagerie hyperspectrale

Prétraitements
(ONERA, CNES...)

Traficabilité
(BRGM)

Identification
effluents industriels

Gaz
(CEA)

Liquides et solides
(CEA, LPGN)

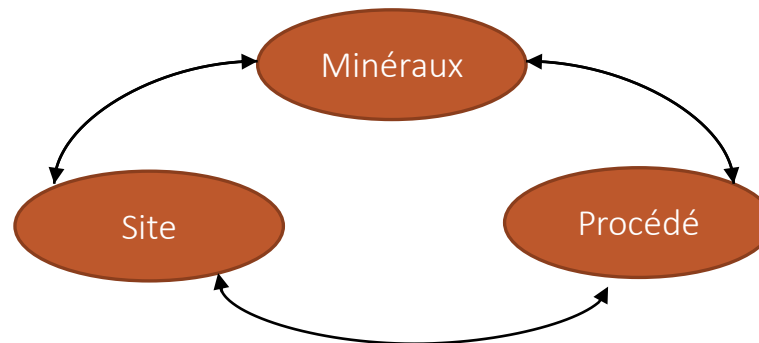
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

- Montrer l'apport de l'imagerie hyperspectrale par rapport aux méthodes d'imagerie classiques (multispectrales) pour la caractérisation des rejets industriels.
- Développer une méthode de détection automatique de ces rejets.

Industries différentes = rejets différents
Rejet industriel = combinaison de minéraux caractéristiques d'un procédé.
Caractérisation spectrale de cette combinaison minérale



Caractérisation de l'observable



DESCRIPTION DES SITES ET ÉCHANTILLONNAGE

Usine de neutralisation des effluents Séché Eco-Service : Site de Thann

- ❖ Neutralisation des effluents (acide sulfurique) provenant de l'usine Cristal (TiO_2) : production de gypse ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- ❖ Résidus : gypse rouge = Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \gamma\text{-FeO(OH)} + \alpha\text{-FeO(OH)}$), Rutile (TiO_2), Calcite (CaCO_3) stockés sur un terril



Image PLEIADE tous droits réservés – ©CNES2013

DESCRIPTION DES SITES ET ÉCHANTILLONNAGE

Usine de production d'alumine Altéo-Environnement : Site de Gardanne

- ❖ Production d'alumine (Al_2O_3) à partir du minerai de Bauxite (Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$, Boehmite $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ /Diaspore $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$, Hematite Fe_2O_3 and Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$, Quartz SiO_2 , Kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) par attaque basique à la soude (Procédé Bayer)
- ❖ Résidus : Bauxaline[®] :Hématite (Fe_2O_3), Cancrinite ($\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\cdot[2\text{NaOH},\text{Na}_2\text{SO}_4]\cdot n\text{H}_2\text{O}$), Gibbsite, Goethite: Boehmite + Diaspore, Rutile + Anatase (TiO_2), Perovskite (CaOH) and Hydrogénats

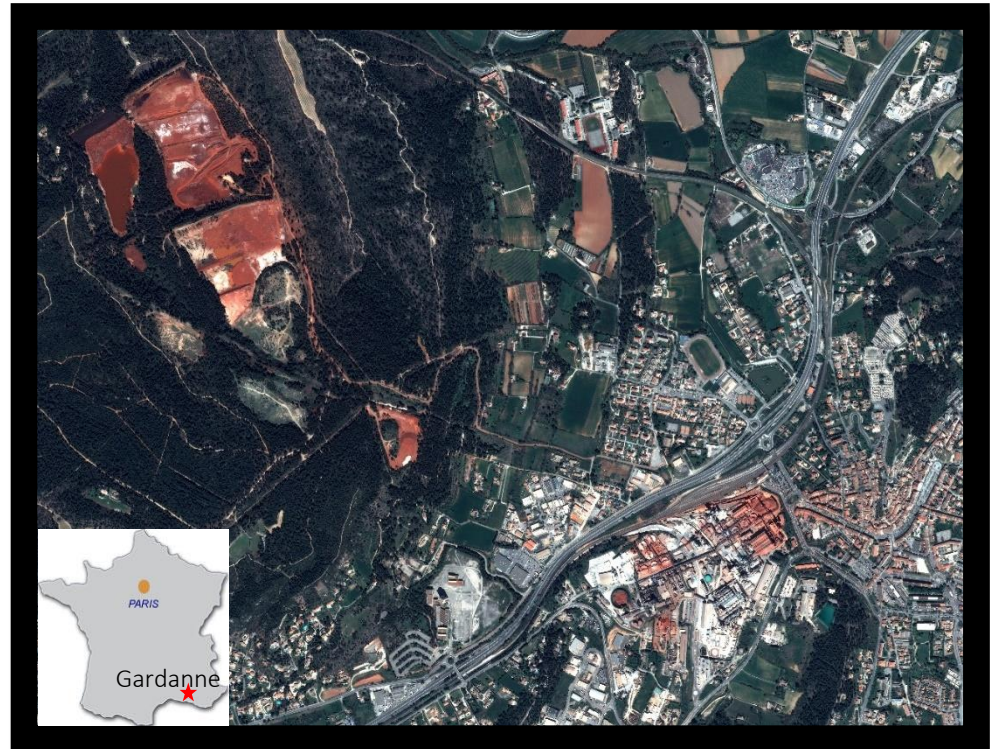
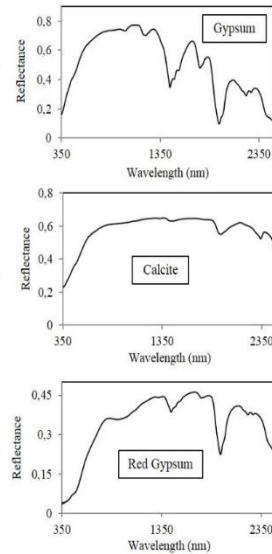
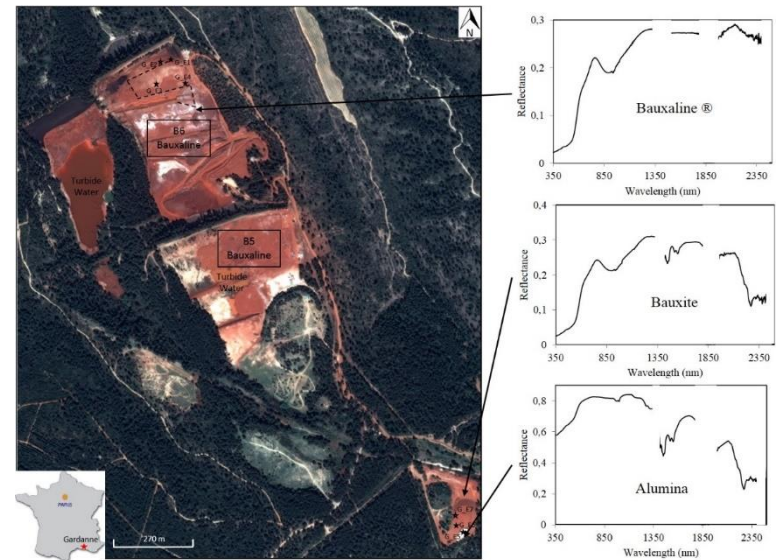


Image PLEIADE tous droits réservés – ©CNES2013

DESCRIPTION DES SITES ET ÉCHANTILLONNAGE



Site de Thann – Localisation des échantillons et spectres des 3 phases principales (Image PLEIADE tous droits réservés – ©CNES2013)



Site de Gardanne – Localisation des échantillons et spectres des 3 phases principales (Image PLEIADE tous droits réservés – ©CNES2013)

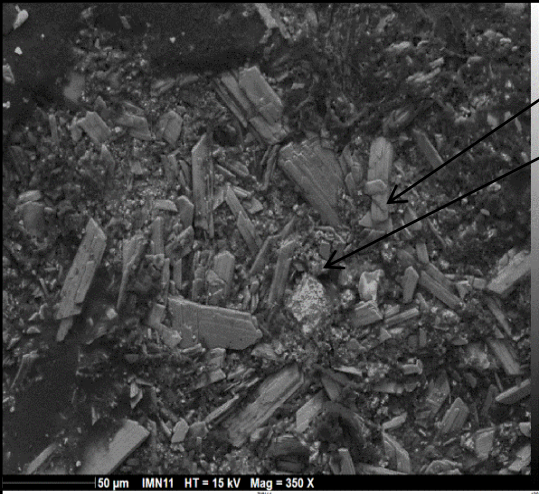
Survol APEX Juin 2013

Survol Hypspec Septembre 2013

ANALYSES

- ❖ Diffraction des rayons X (DRX) : minéralogie principale
- ❖ Inductively-coupled plasma atomic emission spectroscopy ICP-AES : chimie éléments majeurs (SARM-CRPG, Nancy)
- ❖ Microscope à balayage électronique (MEB) : morphologie

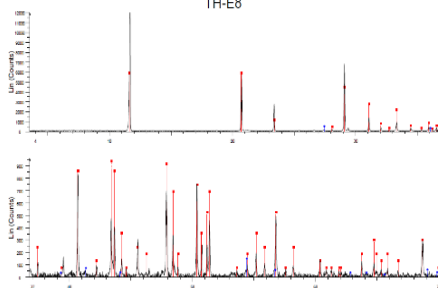




Gypse rouge (TH_E8 sortie d'usine)

- gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Oxyde de titane : TiO_2
- (- Oxydes de fer mal cristallisés)

TH-E8

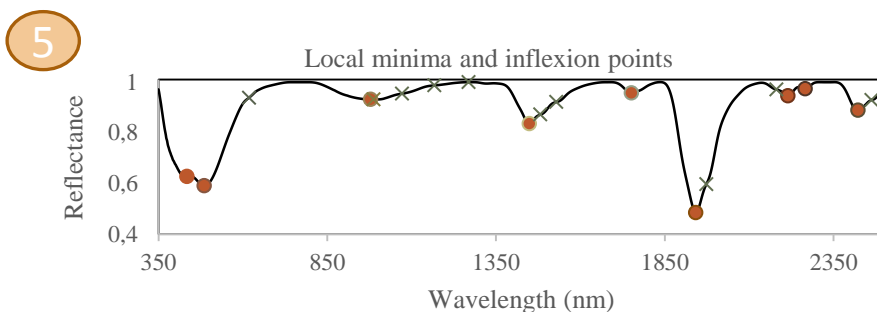
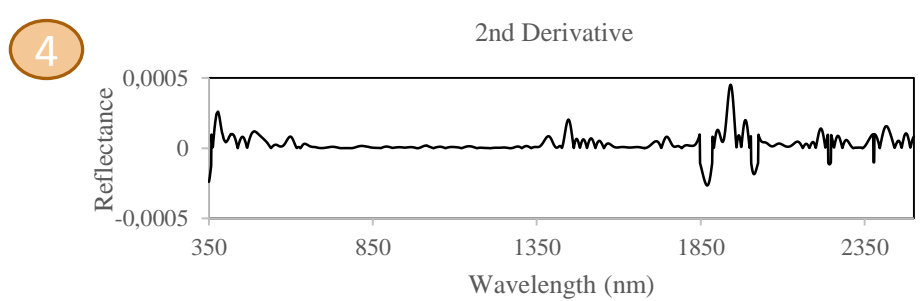
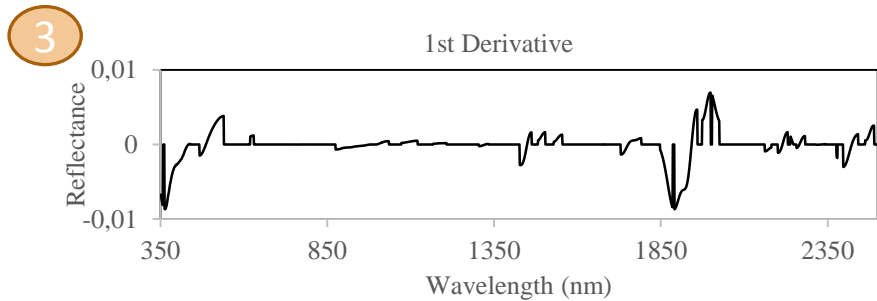
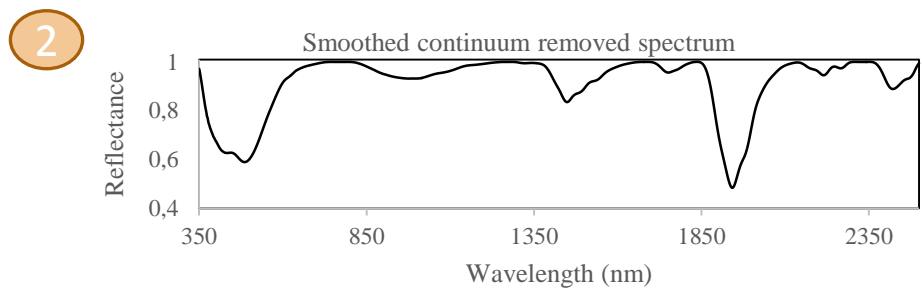
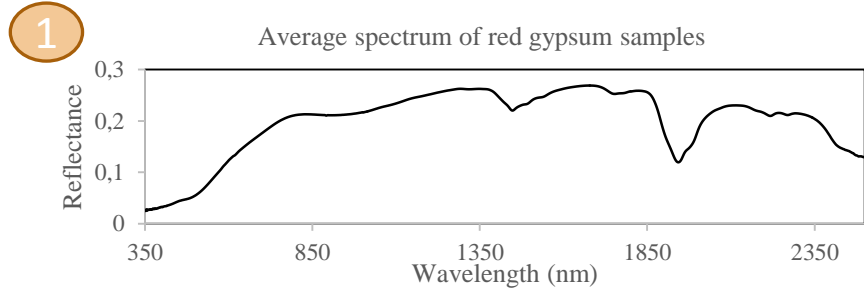


Diffractogramme de TH_E8

Photo Microscope électronique à balayage

Texture du gypse rouge :
Cristaux allongés de gypse
Agglomérat « globuleux »
d'oxydes

EXTRACTION AUTOMATIQUE DES PARAMÈTRES SPECTRAUX



Utilisation des **dérivées** pour extraire les paramètres des absorptions : **position, largeur, profondeur**

Bruit → **Seuil de détection** : profondeur + largeur

COMPARAISON INTER-SITES

❖ Partie Visible –Proche IR du spectre :

❖ Gardanne

➤ Absorption Fe^{3+} :

- Centrée à 850 nm = 50 % Hématite + Goethite (Bauxaline®)

❖ Thann

➤ Absorption Fe^{3+} :

- Centrée à 960 nm = 10 % Limonite (Gypse Rouge)

❖ Partie IR du spectre :

❖ Gardanne

➤ Absorption Al-O-H

- Centrée à 1550 nm = oxy-hydroxyde d'aluminium (Bauxite et Alumine)
- Centrée à 2270 nm = oxy-hydroxyde d'aluminium (Bauxite et Alumine)

❖ Thann

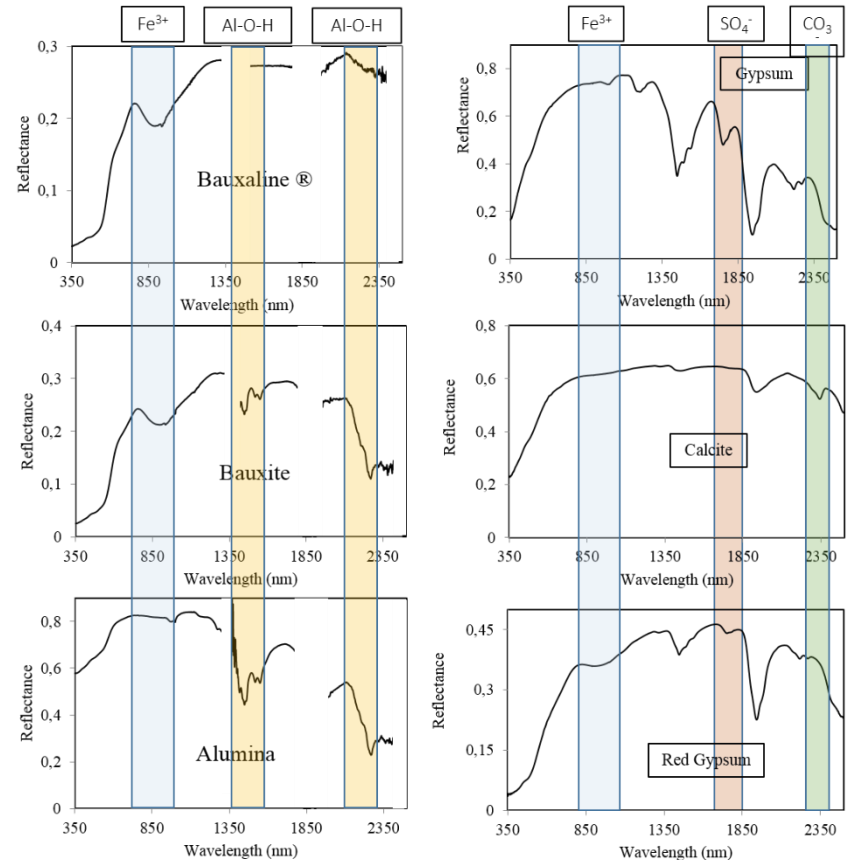
➤ Absorption SO_4^{2-}

- Centrée à 1750 nm = gypse (Gypse et gypse rouge)

➤ Absorption CO_3^{2-}

- Centrée à 2340 nm = carbonate (calcite)

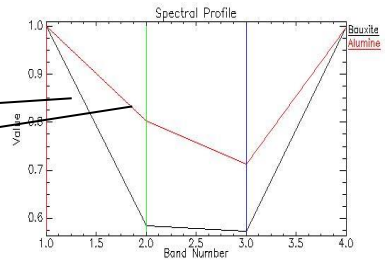
Position des absorptions différentes dans le SWIR entre Thann et Gardanne



Spectres du site de Gardanne

Spectres du site de Thann

COMPARAISON MULTISPECTRAL/HYPERSPECTRAL



Site de Gardanne : Image PLEIADE tous droits réservés – ©CNES2013

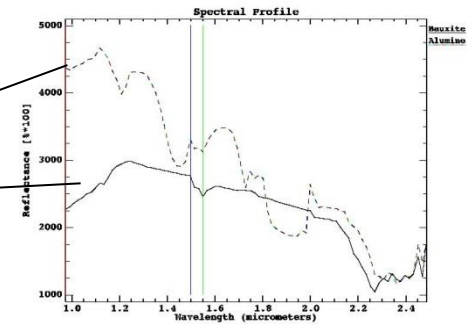
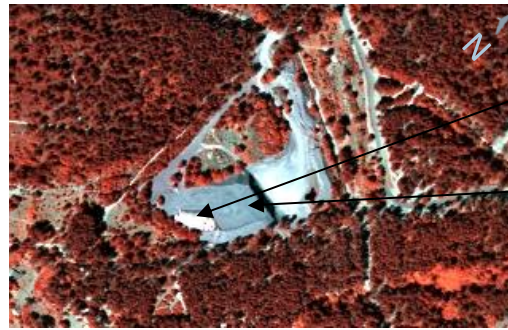
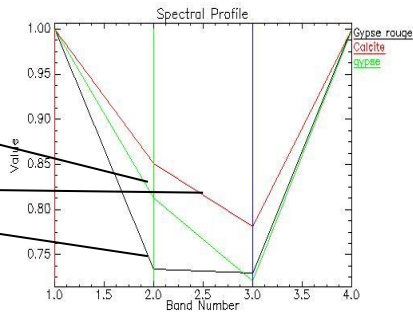


Image HYPESPEX (R : 0,972, G : 1,549, B : 1,495) de Gardanne zone de stockage du minerai (Bauxite) et produit (Alumine)

Capteur : Hypspx SWIR

256 bandes : 1,0 - 2,5 μm (pas d'échantillonnage : 6 nm)



Site de Thann : Image PLEIADE tous droits réservés – ©CNES2013

Capteur : PLEIADE

4 Bandes : Bleu (0,43 - 0,55 μm), Vert (0,50 - 0,62 μm), Rouge (0,59 - 0,71 μm), Proche IR (0,74 - 0,94 μm)



SIGNATURES CARACTÉRISTIQUES DANS LE SWIR : DISTINCTION MINÉRALOGIQUE

CONCLUSION

- ❖ Position des absorptions dans le SWIR permet d'identifier la minéralogie de la surface étudiée

Il est possible d'identifier des rejets industriels à l'aide l'imagerie hyperspectrale.

PROBLÈME : diversité des procédés et des minéralogie associées pour une interprétation à l'aveugle.

- ❖ Les dérivées permettent d'extraire les positions des absorptions et de calculer les paramètres associés (largeur profondeur)

Identification automatique de la minéralogie de surface

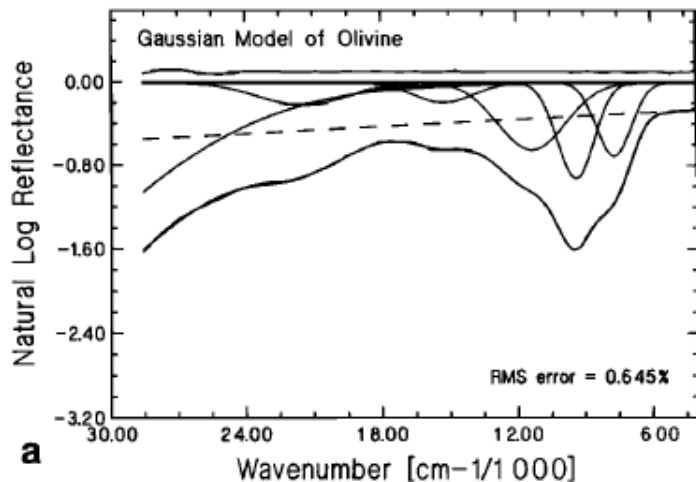
PROBLÈMES : sensibilité au bruit. Le lissage du spectre peut induire un décalage des absorptions. Recouvrement des bandes d'absorptions

Nécessité de réajuster les paramètres pour positionner le spectre modéliser sur le spectre réel le plus correctement possible et ainsi augmenter la précision de l'identification minéralogique.

PERSPECTIVES

- ❖ Nécessité de réajuster les paramètres pour positionner le spectre modéliser sur le spectre réel le plus correctement possible et ainsi augmenter la précision de l'identification minéralogique.
- ➔ Utilisation des paramètres des dérivées comme paramètres d'entrée du **Modified Gaussian Model** de Sunshine et al. (1990).

Basé sur un algorithme : **Levenberg-Marquardt** (Moré, J., 1978)



$$\ln(\text{spectre}) = \frac{a}{\lambda} + b + \sum_i S_i \cdot \exp \left[-\frac{(\lambda_k - \nu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right]$$

Spectre = Continuum (forme générale) + bandes d'absorption (Courbes de gauss)