

## **Sujet de thèse de doctorat**

### **Traitement des Minerais / Génie des procédés**

**Développement d'un modèle prédictif d'opérations de concentration minérale basé sur la minéralogie quantitative à fin de conception et de suivi des procédés de traitement de minerai. Application au cas des coproduits des minerais de lithium dans une perspective zéro déchet.**

#### **CONTEXTE**

---

Le développement et la diffusion dans l'industrie extractive des techniques de minéralogie quantitative offrent de nombreuses perspectives quant à la recherche du potentiel de valorisation de l'ensemble de la ressource minérale. Elle permet une description fine de la matière, dès les premières prospections, à toutes les étapes du développement d'un projet minier et tout au long de la vie d'une exploitation jusqu'à sa réhabilitation. Bien que les techniques de modélisation et de simulation de procédés soient éprouvées et aient pu montrer leur intérêt de longue date, la minéralogie quantitative apporte de nouvelles perspectives de modélisation et des possibilités accrues quant au caractère prédictif de la simulation. Cette association permet d'aborder de front non seulement les principaux produits source de valeur, mais aussi les co-produits répondant à une demande du marché ainsi que le potentiel de réutilisation des rejets de production en applications localisées, avec une perspective zéro-déchet. Cette approche permet d'orienter au mieux les essais au laboratoire ou en usine pilote qui vont valider les hypothèses retenues tout en améliorant les modèles prédictifs mis en œuvre, modèles réutilisés en conception et optimisation de l'usine à l'échelle industrielle.

Une telle approche n'en est qu'à ses débuts et les quelques exemples d'application démontrent un besoin de clarification méthodologique. La société CASPEO, qui développe et édite des outils d'analyse des procédés de traitement de minerai, que ce soit par approche statistique (variabilité de la mesure, réconciliation de données par bilan matière) ou basés sur la modélisation et la simulation, a conçu ces outils dans la perspective de gérer et traiter des données issues de la minéralogie quantitative. Bien que les modèles d'opérations unitaires soient en mesure de les intégrer, des améliorations sont encore possible afin de mieux relier les données de minéralogie à leurs performances.



Dans le cadre du projet Horizon Europe EXCEED, le potentiel multiproduits de ressources minérales en lithium est recherché, avec cet objectif zéro-déchet. Une part importante du programme de recherche de ce projet porte sur la minéralogie quantitative des minerais de ces gisements européens et une autre part sur leur utilisation à des fins de conception et d'optimisation des unités de traitement en utilisant les techniques de modélisation et simulation des procédés. Un travail de recherche est donc à mener pour le développement d'une méthode de prise en compte de la minéralogie quantitative lors des étapes de conception et de suivi des procédés de traitement de minerai, appliquée dans un premier temps aux cas du projet EXCEED, mais généralisée ensuite à tous types de ressources minérales.

## OBJECTIF

---

L'objectif principal de ce travail de recherche est le développement d'un modèle prédictif des opérations de concentration minérale (principalement la flottation) basé sur une caractérisation fine des minerais à l'aide, entre autres, des techniques de minéralogie quantitative afin d'obtenir des jeux de données suffisamment détaillés pour prédire au mieux la valorisation de ces minerais par simulation.

Les objectifs secondaires sont donc la mise au point de méthodes et techniques de pré-traitement de telles données de caractérisation (telles l'analyse factorielle discriminante ou l'identification paramétrique), l'amélioration des modèles mathématiques d'opérations unitaires pouvant prendre en compte ces données, et l'application de l'ensemble aux cas étudiés, tels que dans le cadre du projet EXCEED.

## ORGANISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

---

Les axes de recherche pressentis sont :

- Définir les méthodes et techniques de pré-traitement des données issues de la minéralogie quantitative :
  - Déterminer les données purement minéralogiques permettant le développement et l'utilisation des différents modèles d'opérations unitaires considérés.
  - Identifier les mesures brutes effectuées par les instruments d'analyse (tels le QEMSCAN, le MLA, la spectroscopie Raman et IR, voire l'imagerie hyper-spectrale des carottes) qui pourraient apporter des éléments de compréhension du comportement des matériaux et ainsi améliorer les modèles mathématiques.
  - Définir les analyses complémentaires (chimiques ou autres) complétant au mieux la caractérisation du matériau, ainsi que la méthode de réconciliation de l'ensemble de ces données.

- Estimer la précision de ces mesures, aussi bien au niveau des instruments d'analyse que des échantillons utilisés, et ceci de manière automatique à partir des résultats d'analyse. Estimer l'apport de la réconciliation de données à l'augmentation de la précision de l'ensemble des résultats d'analyse.
- Identifier les phases porteuses de certains éléments, tels les radionucléides ou autres éléments de valeur (métaux précieux) ou pénalisants, afin de pouvoir suivre leur comportement au cours du traitement.
- Relier les données de minéralogie quantitative aux performances des opérations unitaires :
  - Analyser les différents modèles de libération minérale au regard des données de libération issues de l'analyse d'image et des données complémentaires issues d'autres méthodes analyses et de tests de traitement. Déterminer leurs atouts et limites concernant la libération multi-minérale (prenant en compte plusieurs minéraux) pouvant apparaître à différents stades du processus de réduction granulométrique.
  - Proposer un mode de description fine du matériau permettant une description de la libération multi-minérale aux différents stades de broyage répondant aux besoins de la modélisation des opérations unitaires et pouvant être alimentée par les données issues de la minéralogie quantitative.
  - Améliorer les modèles de broyage afin de prendre en compte cette description fine.
  - Déterminer des lois, basées sur la physique des phénomènes ou par approche statistique, reliant les performances des opérations de séparation minérale à cette description fine en déconvoluant les effets des conditions opératoires du potentiel de séparation lié au matériau lui-même.
  - Améliorer les différents modèles de séparation physique ou physico-chimique, principalement ceux de flottation, en y introduisant ces lois tout en assurant une prédiction des caractéristiques des produits sous forme d'une même description fine. L'étape de lixiviation, initiale au traitement hydrométallurgique, sera aussi abordée selon les mêmes critères d'analyse.
- Valider les méthodes et outils décrits ci-dessus aux cas des gisements de granites à métaux rares et de pegmatites LCT :
  - Dans le cadre de projets de caractérisation fine du matériau utilisant la minéralogie quantitative, le doctorant aura accès aux échantillons de minerais ciblés. Un aller-retour entre ses travaux et ceux des équipes de caractérisation est primordial, les données de caractérisation alimentant les travaux de la thèse dont les résultats orienteront les techniques de caractérisation.
  - Les modèles mathématiques améliorés seront utilisés pour construire les simulateurs des usines de traitement des minerais issus des gisements étudiés dans le projet. Ceci inclut aussi les tests à l'échelle du laboratoire ou en usine pilote.



- Proposer une généralisation des méthodes décrites ci-dessus à d'autres types de gisement, sous forme d'un « guide de bonnes pratiques » décrivant les méthodes de caractérisation pouvant être utilisées, celles de pré-traitement des données obtenues et comment les utiliser dans une approche par modélisation et simulation, que ce soit en conception ou en optimisation d'usine.

Ce travail de recherche met en œuvre des connaissances en génie des procédés de traitement des minerais, en modélisation mathématique des opérations unitaires, et donc, plus généralement, en physique et mathématiques. Il s'ensuit qu'une large part sera consacrée à la recherche bibliographique afin de mieux situer les travaux de recherche dans l'existant et mieux les orienter. Ces travaux se feront à peu près dans l'ordre décrit dans la liste ci-dessus.

## BIBLIOGRAPHIE

---

## PhD thesis topic

# Mineral Processing / Process Engineering

**Development of a predictive model of mineral concentration operations based on quantitative mineralogy for the design and monitoring of ore treatment processes.**  
**Application to the case of lithium ore co-products in a zero waste perspective.**

### CONTEXT

---

The development and dissemination of quantitative mineralogy techniques in the extractive industry offers numerous prospects for researching the potential of the entire mineral resource. It allows a detailed description of the material, from the very first exploration, at all stages of the development of a mining project and throughout the life of an operation until its rehabilitation. Although process modelling and simulation techniques are tried and tested and have long proved their worth, quantitative mineralogy brings new modelling perspectives and increased possibilities for the predictive nature of simulation. This combination makes it possible to address not only the main value products, but also co-products that meet market demand and the potential for reuse of production waste in localised applications, with a zero waste perspective. This approach allows for the best possible orientation of laboratory or pilot plant tests that will validate the retained hypotheses while improving the implemented predictive models, models that are reused in the design and optimisation of the plant on an industrial scale.

Such an approach is still in its infancy and the few examples of application demonstrate a need for methodological clarification. CASPEO, which develops and publishes analysis tools for mineral processing, whether by statistical approach (measurement variability, data reconciliation by material balance) or based on modelling and simulation, has designed these tools with a view to managing and processing data from quantitative mineralogy. Although unit operation models are able to integrate them, improvements are still possible in order to better link mineralogy data to their performance.

In the framework of the EXCEED Horizon Europe project, the multi-product potential of lithium mineral resources is being investigated, with this zero waste objective. An important part of the research programme of this project concerns the quantitative mineralogy of the ores of these European deposits and another part concerns their use for the design and optimisation of treatment units using process modelling and simulation techniques. A research work is thus to be carried out for the development of a method of taking into account the quantitative mineralogy at the stages of design and follow-up of mineral processing plants, applied initially to the cases of the EXCEED project, but generalized then to all types of mineral resources.

## OBJECTIVE

---

The main objective of this research work is the development of a predictive model of mineral concentration operations (mainly flotation) based on a fine characterisation of the ores using, among others, quantitative mineralogy techniques in order to obtain sufficiently detailed data sets to best predict the valorisation of these ores by simulation.

The secondary objectives are therefore the development of methods and techniques for the pre-processing of such characterisation data (such as discriminant analysis or parametric identification), the improvement of mathematical models of unit operations to take these data into account, and the application of the whole to the studied cases, such as in the framework of the EXCEED project.

## ORGANISATION OF RESEARCH WORK

---

The proposed research areas are:

- Define methods and techniques for pre-processing data from quantitative mineralogy:
  - Determine the purely mineralogical data allowing the development and use of the different unit operation models which are considered.
  - Identify raw measurements made by analytical instruments (such as QEMSCAN, MLA, Raman and IR spectroscopy, and even hyper-spectral imaging of cores) that could provide insights into the behaviour of materials and thus improve mathematical models.
  - Define the additional analyses (chemical or other) that best complete the characterisation of the material, as well as the method for reconciling all these data.
  - Estimate the accuracy of these measurements, both at the level of the analytical instruments and the sampling stages, and this automatically from the analytical results. Estimate the contribution of data reconciliation to increasing the accuracy of all analytical results.
  - Identify the carrier phases of certain elements, such as radionuclides or other valuable (precious metals) or penalising elements, in order to be able to monitor their behaviour during treatment.
- Relate quantitative mineralogy data to unit operation performance:
  - Analyse the different mineral liberation models with respect to liberation data from image analysis and complementary data from other analytical methods and processing tests. Determine their strengths and limitations with respect to multi-mineral liberation that may occur at different stages of the particle size reduction process.

- Propose a method of fine description of the material allowing a description of the multi-mineral liberation at the various stages of grinding that meets the needs of the modelling of unit operations and that can be fed by data from quantitative mineralogy.
- Improve grinding models to take into account this fine description.
- Determine laws, based on the physics of the phenomena or by statistical approach, linking the performance of mineral separation operations to this fine description by deconvoluting the effects of operating conditions from the separation potential linked to the material itself.
- Improve the various physical or physico-chemical separation models, mainly those of flotation, by introducing these laws while ensuring a prediction of the characteristics of the products in the form of the same fine description. The leaching stage, initial to the hydrometallurgical treatment, will also be addressed according to the same analysis criteria.
- Validate the methods and tools described above for rare metal granite and LCT pegmatite deposits:
  - In the context of fine material characterisation projects using quantitative mineralogy, the PhD student will have access to the targeted ore samples. A back and forth between his work and that of the characterisation teams is essential, as the characterisation data will feed into the thesis work, the results of which will guide the characterisation techniques.
  - The improved mathematical models will be used to build simulators for mineral processing plants for the deposits studied in the project. This also includes laboratory scale and pilot plant testing.
- Propose a generalisation of the methods described above to other types of deposit, in the form of a "good practice guide" describing the characterisation methods that can be used, those for the pre-processing of the obtained data and how to use them in a modelling and simulation approach, whether in plant design or optimisation.

This research work involves knowledge of mineral processing engineering, mathematical modelling of unit operations, and therefore, more generally, physics and mathematics. It follows that a large part will be devoted to bibliographical research in order to better situate the research work in the existing body of work and to better orientate it. This work will be carried out more or less in the order described in the list above.

## **BIBLIOGRAPHY**

---