

Modélisation Statistique Et Validation Du Modèle Prédicatif Du Rendement D'extraction Du Lithium A Partir De La Lépidoïite De Tsitondroina (Haute Matsiatra, District D'Ikalavony, Madagascar)

Heritiana RATSIMISATA¹¹, RAKOTOSON Tolontsoa.^{1,2}, TOVONIRINA Mamiharizo. Jackie.¹³,
RAVAOARINORO Rondro Nirina^{1,4}, RAHARIMALALA Laurence^{1,5}

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université Antananarivo



Résumé : Cette étude porte sur l'extraction du lithium à partir du lépidolite provenant du gisement de Cette étude présente une modélisation statistique du rendement d'extraction du lithium à partir du lépidolite provenant du gisement de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalavony (Madagascar). L'objectif est d'évaluer l'influence des paramètres opératoires et de valider un modèle prédictif permettant d'optimiser le procédé de digestion sulfurique. Les analyses géochimiques par fluorescence X montrent que le minerai est principalement constitué de SiO₂ (49,0–53,0 %), Al₂O₃ (21,0–24,1 %) et K₂O (10,0–10,8 %), tandis que la teneur en Li₂O varie entre 4,8 % et 5,3 %. Les essais expérimentaux révèlent que le rendement d'extraction du lithium augmente avec la température de digestion et le temps de réaction, atteignant environ 75 % après calcination à 900 °C. Une modélisation basée sur une régression polynomiale régularisée de type Ridge a été appliquée afin de prédire le rendement d'extraction en fonction des paramètres opératoires. Les résultats montrent une bonne performance du modèle avec un coefficient de détermination de R² = 0,893, une erreur absolue moyenne (MAE) de 3,61 % et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 5,28 %. Ces résultats démontrent que l'approche de modélisation statistique constitue un outil efficace pour analyser et optimiser les conditions d'extraction du lithium à partir du lépidolite étudié.

Mots clés : Lithium ; Lépidolite ; Modélisation statistique ; Digestion sulfurique ; Tsitondroina.

Abstract: This study presents a statistical modelling of the lithium extraction yield from lepidolite originating from the Tsitondroina deposit, located in the Haute Matsiatra region, Ikalavony district (Madagascar). The objective is to evaluate the influence of operating parameters and to validate a predictive model that allows optimization of the sulfuric acid digestion process. Geochemical analyses by X-ray fluorescence (XRF) show that the ore is mainly composed of SiO₂ (49.0–53.0%), Al₂O₃ (21.0–24.1%), and K₂O (10.0–10.8%), while the Li₂O content ranges between 4.8% and 5.3%. Experimental tests reveal that the lithium extraction yield increases with digestion temperature and reaction time, reaching approximately 75% after calcination at 900 °C. A modelling approach based on a Ridge-regularized polynomial regression was applied to predict the extraction yield as a function of the operating parameters. The results show good model performance with a coefficient of determination of R² = 0.893, a mean absolute error (MAE) of 3.61%, and a root mean square error (RMSE) of 5.28%. These results demonstrate that the statistical modelling approach is an effective tool for analysing and optimizing lithium extraction conditions from the studied lepidolite.

Keywords: Lithium; Lepidolite; Statistical modelling; Sulfuric acid digestion; Tsitondroina.

1. INTRODUCTION

Le lithium est aujourd'hui considéré comme l'un des éléments stratégiques majeurs pour la transition énergétique mondiale en raison de son rôle essentiel dans la fabrication des batteries lithium-ion utilisées dans les véhicules électriques, les dispositifs électroniques portables et les systèmes de stockage d'énergie renouvelable [1]. L'augmentation rapide de la demande mondiale en lithium au cours des dernières décennies a conduit à une intensification des recherches visant à identifier de nouvelles ressources et à améliorer les procédés d'extraction à partir de minerais lithinifères [2]. Les ressources en lithium proviennent principalement de deux types de gisements : les saumures salines et les minerais solides associés aux pegmatites granitiques, tels que le spodumène, la pétalite et la lépidolite [3]. Parmi ces minéraux, la lépidolite constitue une source importante de lithium dans les gisements pegmatitiques et présente une structure cristalline de type mica contenant du lithium, du potassium, de l'aluminium et du fluor [4]. L'extraction du lithium à partir de ce type de minerai repose généralement sur des procédés hydrométallurgiques impliquant une activation thermique suivie d'une digestion acide ou alcaline permettant de solubiliser le lithium sous forme de composés récupérables [5]. Dans ce contexte, la digestion sulfurique constitue l'une des méthodes les plus utilisées pour l'extraction du lithium à partir du lépidolite. Cette technique repose sur la réaction du minerai broyé avec l'acide sulfurique à haute température afin de transformer le lithium présent dans la structure minérale en sulfate de lithium soluble, qui peut ensuite être récupéré sous forme de carbonate de lithium après différentes étapes de purification [6]. Toutefois, l'efficacité de ce procédé dépend fortement de plusieurs paramètres opératoires, notamment la température de calcination, la température de digestion et le temps de réaction. Par ailleurs, l'utilisation d'outils de modélisation statistique et d'analyse de données permet aujourd'hui d'optimiser les procédés hydrométallurgiques en identifiant les relations entre les variables expérimentales et les performances du procédé. Ces approches permettent notamment de développer des modèles prédictifs capables d'estimer le rendement d'extraction du lithium en fonction des conditions opératoires et de déterminer les zones optimales de fonctionnement [7]. Madagascar possède un potentiel géologique important en ressources minérales associées aux pegmatites granitiques. Dans ce cadre, le gisement de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony (Madagascar), représente une zone d'intérêt pour l'étude et la valorisation de la lépidolite comme source potentielle de lithium. L'analyse géochimique et la modélisation statistique des performances du procédé d'extraction constituent ainsi des étapes essentielles pour évaluer le potentiel de ce gisement. L'objectif de ce travail est donc de développer et de valider un modèle statistique prédictif du rendement d'extraction du lithium à partir du lépidolite de ce gisement, en analysant l'influence des principaux paramètres opératoires du procédé de digestion sulfurique.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les échantillons de lépidolite utilisés dans cette étude ont été collectés à Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony (Madagascar). Les prélèvements ont été réalisés sur des affleurements pegmatitiques selon un maillage de terrain afin d'assurer une représentativité géologique du minerai étudié. Après la collecte, les échantillons ont été soumis à une opération de concassage suivie d'un quartage afin d'obtenir un échantillon représentatif d'environ 10 kg. Une fraction de ce matériau a ensuite été broyée jusqu'à une granulométrie d'environ 80 μm pour les analyses chimiques et les essais d'extraction. La caractérisation géochimique du minerai a été réalisée par fluorescence X (XRF) afin de déterminer les teneurs en oxydes majeurs, notamment SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O et Li_2O . Cette technique analytique est largement utilisée pour la caractérisation des minerais en raison de sa précision et de sa capacité à quantifier simultanément plusieurs éléments chimiques dans les matériaux géologiques [8]. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer la composition minéralogique de la lépidolite et de vérifier l'homogénéité des échantillons étudiés. Les essais d'extraction du lithium ont été réalisés par digestion sulfurique. Les échantillons broyés ont été soumis à une calcination préalable dans un four électrique à différentes températures comprises entre 750 °C et 900 °C afin d'activer la structure minérale et de favoriser la réaction avec l'acide sulfurique. Après calcination, le minerai a été mélangé avec de l'acide sulfurique concentré puis chauffé à différentes températures de digestion pendant des temps de réaction variables. Les solutions obtenues après lixiviation ont ensuite été traitées par ajout de carbonate de sodium afin de précipiter le lithium sous forme de carbonate de lithium. L'analyse et le traitement des données expérimentales ont été réalisés à l'aide du langage de programmation Python, largement utilisé dans les applications de calcul scientifique et d'analyse de données [9]. Les bibliothèques NumPy et pandas ont été utilisées respectivement pour le traitement numérique des données et pour

l'organisation des tableaux de données expérimentales [10][11]. La visualisation graphique des résultats a été réalisée à l'aide de la bibliothèque Matplotlib, qui constitue un outil standard pour la représentation scientifique des données [12]. La modélisation statistique du rendement d'extraction du lithium a été réalisée à l'aide de la bibliothèque scikit-learn, en utilisant un pipeline de traitement comprenant une standardisation des variables (StandardScaler), une transformation polynomiale (PolynomialFeatures) et une régression pénalisée de type Ridge avec validation croisée (RidgeCV). Cette approche permet d'améliorer la robustesse du modèle et de réduire les effets de sur-apprentissage lors de l'ajustement des données expérimentales [13]. Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide du coefficient de détermination (R^2), de l'erreur absolue moyenne (MAE) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Modélisation du rendement d'extraction du lithium du lépidolite : validation du modèle et analyse des paramètres opératoires

La figure ci-dessous présente les résultats de la modélisation statistique du rendement d'extraction du lithium en fonction des paramètres opératoires, notamment la température de digestion et le temps de réaction. Les différentes représentations graphiques permettent d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle, d'analyser la distribution des résidus et d'identifier l'influence des variables expérimentales sur le rendement d'extraction. Le modèle utilisé repose sur une régression polynomiale régularisée de type Ridge appliquée aux données expérimentales obtenues lors des essais de digestion sulfurique du lépidolite provenant de Tsitondroina, dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony.

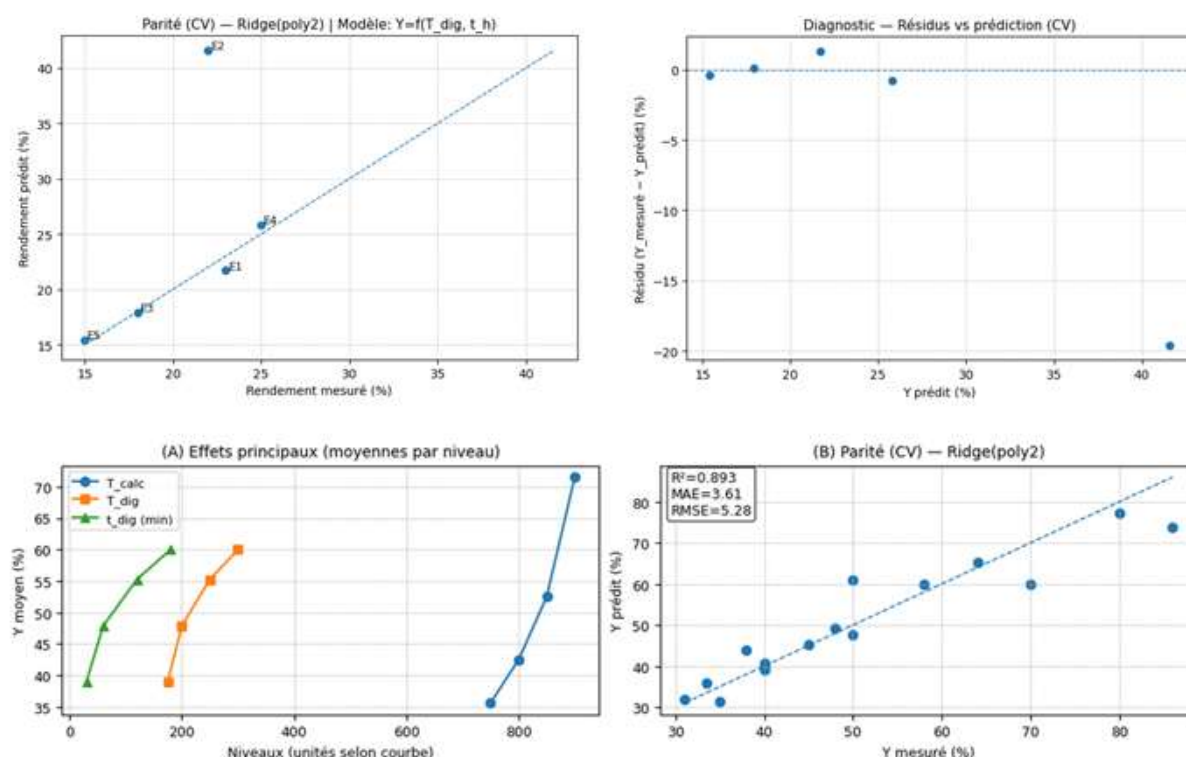


Figure 1: Modélisation du rendement d'extraction du lithium du lépidolite : validation du modèle et analyse des effets des paramètres opératoires

Interprétation

L'analyse du graphique de parité entre les rendements mesurés et les rendements prédits montre une bonne concordance globale entre les valeurs expérimentales et celles estimées par le modèle. Les points expérimentaux se situent globalement à proximité de la droite de parité, indiquant une capacité satisfaisante du modèle à reproduire les tendances observées. Les rendements mesurés varient approximativement entre 15 % et 41 %, tandis que les valeurs prédites suivent une tendance similaire, confirmant la cohérence du modèle pour décrire le comportement du système étudié. Le diagnostic des résidus en fonction des valeurs prédites met en évidence une distribution relativement homogène des écarts autour de la ligne de référence correspondant à un résidu nul. La majorité des résidus se situe dans un intervalle compris entre environ -2 % et +2 %, ce qui indique une erreur de prédiction relativement faible pour la plupart des observations. Toutefois, une valeur plus éloignée est observée pour un rendement prédit proche de 41 %, avec un résidu d'environ -20 %, ce qui peut être attribué à une variabilité expérimentale plus importante dans cette zone du domaine étudié. L'analyse des effets principaux met en évidence l'influence significative des paramètres opératoires sur le rendement d'extraction du lithium. L'augmentation de la température de digestion entraîne une amélioration progressive du rendement moyen, passant d'environ 39 % à près de 60 % lorsque la température augmente dans l'intervalle étudié. De même, l'augmentation du temps de digestion conduit à une augmentation du rendement moyen, qui passe d'environ 38 % pour les temps les plus courts à environ 60 % pour les durées les plus longues. La calcination du minerai constitue également un facteur déterminant, le rendement moyen augmentant d'environ 36 % à plus de 70 % lorsque la température de calcination atteint les valeurs les plus élevées. Enfin, le graphique de parité obtenu dans le cadre de la validation croisée du modèle confirme la robustesse de l'approche de modélisation adoptée. Le coefficient de détermination obtenu est de $R^2 = 0,893$, ce qui indique que près de 89 % de la variabilité du rendement d'extraction peut être expliquée par le modèle. Les indicateurs d'erreur montrent une erreur absolue moyenne (MAE) de 3,61 % et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 5,28 %, ce qui confirme la qualité prédictive satisfaisante du modèle pour l'analyse des paramètres influençant l'extraction du lithium à partir du lépidolite du gisement étudié.

3.2 Analyse cinétique et thermodynamique de l'extraction du lithium à partir du lépidolite de Tsitondroina

La figure ci-après illustre présente l'évolution cinétique du rendement d'extraction du lithium ainsi que l'analyse thermodynamique et mécanistique du procédé de digestion sulfurique appliqué au lépidolite du gisement de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalavony (Madagascar). Les différentes représentations graphiques illustrent l'influence du temps de réaction, de la défluoration préalable et des paramètres thermiques sur la cinétique d'extraction du lithium, ainsi que l'identification du mécanisme dominant contrôlant la réaction.

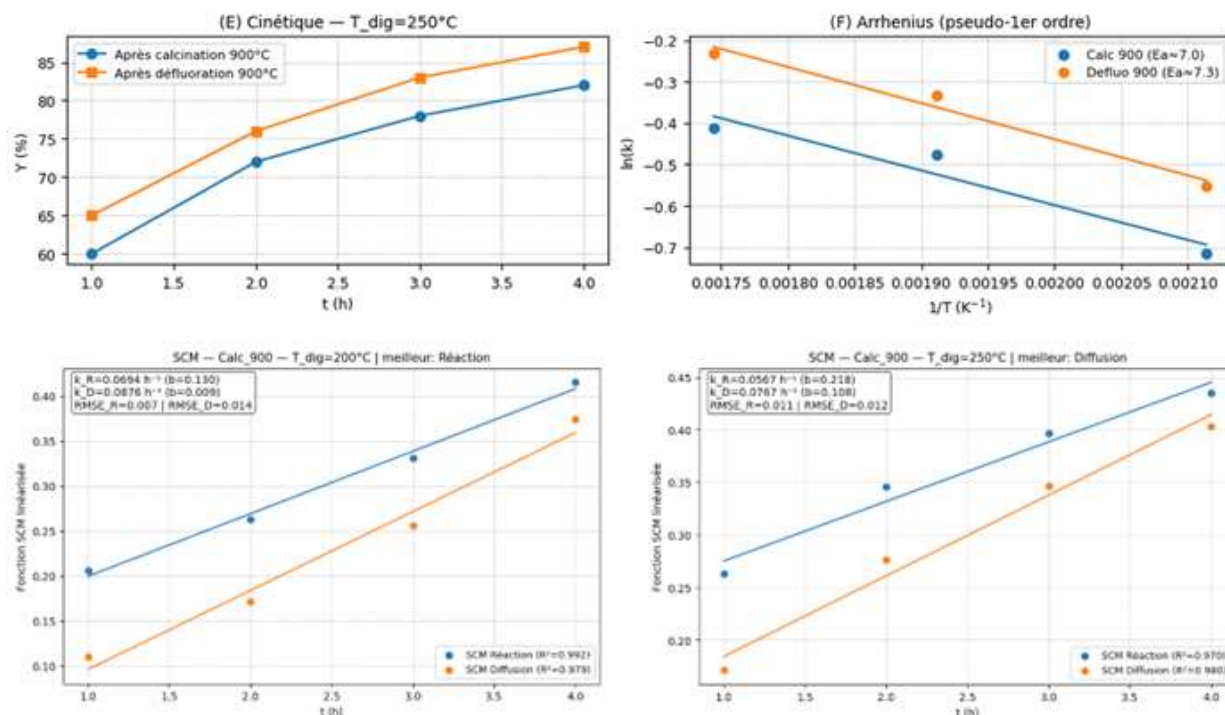


Figure 2: Analyse cinétique et thermodynamique de l'extraction du lithium à partir du lépidolite de Tsitondroina

Interprétation

L'analyse de la cinétique d'extraction à une température de digestion de 250°C montre que le rendement du lithium augmente progressivement avec le temps de réaction. Dans le cas du minerai simplement calciné à 900°C , le rendement passe d'environ 60 % après 1 heure de réaction à environ 72 % après 2 heures, puis atteint près de 78 % après 3 heures et environ 82 % après 4 heures. Lorsque le minerai est soumis à une étape préalable de défluoration à 900°C , les rendements obtenus sont systématiquement plus élevés, avec des valeurs d'environ 65 % après 1 heure, 76 % après 2 heures, 83 % après 3 heures et près de 87 % après 4 heures. Cette amélioration du rendement peut s'expliquer par l'élimination partielle du fluor, qui facilite l'attaque de la structure minérale par l'acide sulfurique et favorise la libération du lithium. L'analyse thermodynamique basée sur la représentation d'Arrhenius montre une relation linéaire entre le logarithme de la constante de vitesse et l'inverse de la température. Les droites obtenues indiquent des énergies d'activation approximatives de l'ordre de 7,0 pour le minerai calciné et de 7,3 pour le minerai défluoré. Cette relation linéaire confirme que le processus d'extraction du lithium suit un comportement cinétique de type pseudo-premier ordre dans les conditions expérimentales étudiées. Les graphiques basés sur le modèle du cœur rétrécissant permettent d'identifier le mécanisme cinétique dominant au cours du processus de lixiviation. Les résultats montrent que l'ajustement correspondant au contrôle par diffusion présente un coefficient de corrélation très élevé, atteignant environ $R^2 = 0,979$ dans le cas de la défluoration, tandis que le modèle correspondant au contrôle par réaction chimique présente également une bonne corrélation avec une valeur proche de $R^2 = 0,992$ pour certaines conditions expérimentales. Les indicateurs statistiques associés au modèle montrent une erreur absolue moyenne relativement faible, de l'ordre de 0,076 à 0,056, et une erreur quadratique moyenne comprise entre environ 0,007 et 0,011, ce qui confirme la pertinence des modèles appliqués.

3.3 Diagnostic statistique du modèle prédictif et influence de la température de calcination sur le rendement d'extraction du lithium du lépidolite

La figure ci-dessous présente l'analyse diagnostique du modèle de prédiction du rendement d'extraction du lithium ainsi que la distribution du rendement en fonction de la température de calcination appliquée au minerai de lépidolite provenant de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony (Madagascar). Ces représentations permettent d'évaluer la fiabilité statistique du modèle utilisé pour la prédiction du rendement ainsi que l'influence de l'activation thermique du minerai sur l'efficacité du procédé d'extraction.

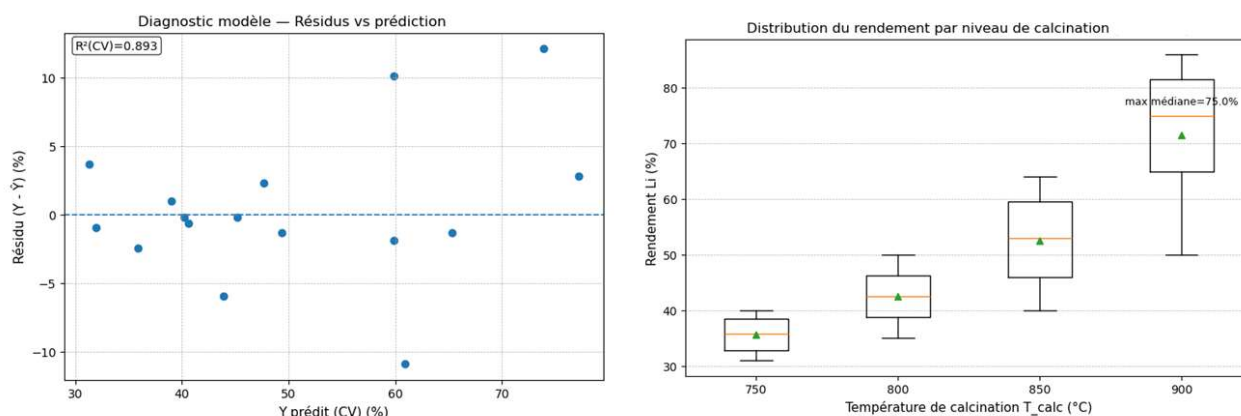


Figure 3: Diagnostic statistique du modèle prédictif et influence de la température de calcination sur le rendement d'extraction du lithium du lépidolite

Interprétation

L'analyse du graphique représentant les résidus en fonction des valeurs prédites montre une dispersion relativement équilibrée autour de la ligne horizontale correspondant à un résidu nul. Les valeurs prédites du rendement varient approximativement entre 30 % et 76 %, tandis que les résidus se situent principalement dans un intervalle compris entre -10 % et +12 %. Cette distribution indique que les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées par le modèle restent globalement modérés. La qualité du modèle est également confirmée par le coefficient de détermination obtenu en validation croisée, avec une valeur de R^2 (CV) = 0,893, ce qui signifie qu'environ 89 % de la variabilité du rendement d'extraction peut être expliquée par les paramètres opératoires pris en compte dans la modélisation. La seconde représentation illustre la distribution du rendement d'extraction du lithium en fonction des différents niveaux de température de calcination. Les résultats montrent une augmentation progressive du rendement lorsque la température de calcination augmente. À une température de 750 °C, les rendements observés se situent approximativement entre 31 % et 40 %, avec une médiane proche de 35 %. Lorsque la température atteint 800 °C, les rendements augmentent et varient entre environ 35 % et 50 %, avec une médiane d'environ 42 %. Pour une température de calcination de 850 °C, les rendements sont compris entre environ 40 % et 64 %, la médiane se situant autour de 53 %. Les rendements les plus élevés sont observés à 900 °C, où les valeurs varient entre environ 50 % et 86 %, avec une médiane proche de 75 %. Ces résultats mettent clairement en évidence l'effet positif de la calcination sur l'extraction du lithium. L'augmentation de la température de calcination favorise les transformations structurales du minerai, notamment la déshydroxylation et la modification de la structure cristalline du lépidolite, ce qui améliore l'accessibilité du lithium lors de la digestion acide. Ainsi, l'activation thermique du minerai apparaît comme un paramètre déterminant dans l'optimisation du rendement d'extraction du lithium à partir du lépidolite du gisement de Tsitondroina dans la région de Haute Matsiatra.

3.4 Analyse probabiliste des conditions opératoires optimales

La figure suivante présente une analyse probabiliste des conditions opératoires permettant d'atteindre différents seuils de rendement d'extraction du lithium lors de la digestion sulfurique du lépidolite provenant de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony (Madagascar). Les graphiques illustrent l'influence combinée de la température de digestion et du temps de réaction sur la probabilité d'atteindre un rendement cible. Trois niveaux de seuils de rendement ont été étudiés, correspondant respectivement à 22 %, 50 % et 70 %, afin d'identifier les domaines opératoires favorables à l'optimisation du procédé.

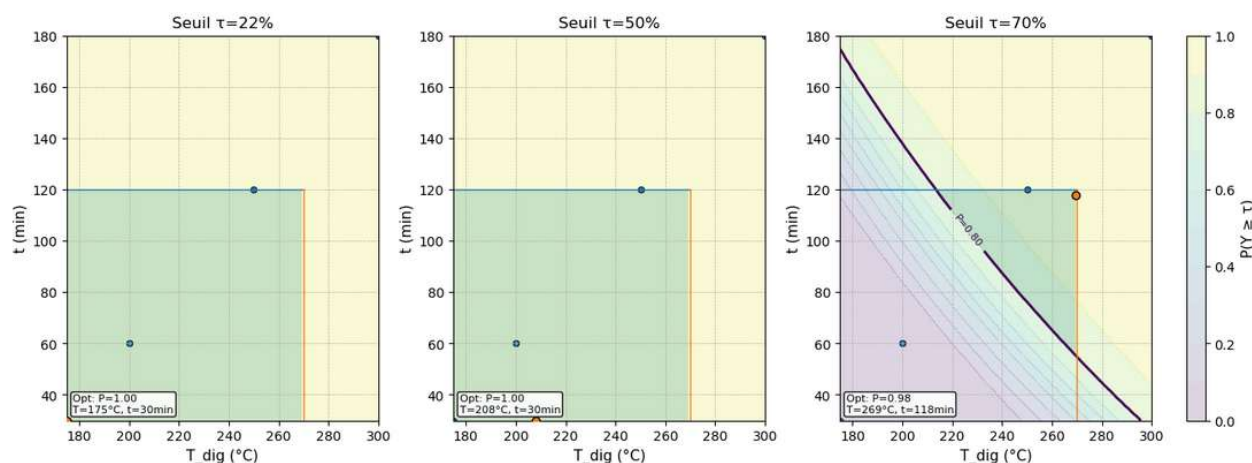


Figure 4: Analyse probabiliste des conditions opératoires optimales

Interprétation

L'analyse du premier graphique, correspondant à un seuil de rendement de 22 %, montre que ce niveau de performance peut être atteint dans une large zone du domaine expérimental. Pour des températures de digestion comprises entre environ 175 °C et 265 °C et des temps de réaction allant de 30 à 120 minutes, la probabilité d'atteindre ce rendement est proche de $P = 1,00$, indiquant que ce seuil est facilement accessible dans les conditions expérimentales étudiées. Le point optimal identifié se situe autour de 175 °C pour un temps de réaction de 30 minutes, ce qui suggère qu'un rendement minimal de 22 % peut être obtenu même à des températures relativement modérées. Dans le cas du seuil de rendement fixé à 50 %, le domaine opératoire favorable reste relativement étendu, bien que légèrement plus restreint que dans le cas précédent. Les résultats indiquent que ce rendement peut être obtenu pour des températures de digestion comprises approximativement entre 200 °C et 270 °C avec des temps de réaction variant entre 30 et 120 minutes. Le point optimal identifié se situe autour de 208 °C pour un temps de réaction d'environ 30 minutes, avec une probabilité estimée de $P = 1,00$, ce qui indique que ce niveau de rendement peut être atteint avec une forte fiabilité dans ces conditions. L'analyse du troisième graphique, correspondant à un seuil de rendement plus élevé de 70 %, montre une réduction significative du domaine opératoire favorable. Les zones de forte probabilité se concentrent pour des températures de digestion plus élevées et des temps de réaction relativement longs. Les résultats indiquent qu'un rendement supérieur à 70 % peut être obtenu avec une probabilité proche de $P = 0,98$ pour une température de digestion d'environ 269 °C et un temps de réaction d'environ 118 minutes. Les courbes de probabilité montrent également que l'augmentation simultanée de la température et du temps de digestion favorise l'atteinte de ce niveau élevé de rendement. Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence l'importance des paramètres thermiques et cinétiques dans l'optimisation du procédé d'extraction du lithium. Les analyses probabilistes permettent de définir des zones opératoires robustes pour atteindre différents niveaux de rendement et constituent ainsi un outil pertinent pour la conception et l'optimisation du procédé de digestion sulfurique appliqué au lépidolite du gisement de Tsitondroina dans la région de Haute Matsiatra.

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent que le lépidolite provenant de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony (Madagascar), présente une composition géochimique caractéristique des pegmatites granitiques lithinifères. Les analyses chimiques indiquent des teneurs élevées en SiO_2 (49,0–53,0 %), Al_2O_3 (21,0–24,1 %) et K_2O (10,0–10,8 %), tandis que la teneur en Li_2O varie entre 4,8 % et 5,3 %. Ces valeurs sont comparables à celles observées dans de nombreux gisements de lépidolite exploités dans les pegmatites granitiques, où le lithium est incorporé dans la structure des micas aluminosilicatés. La présence de fluor, comprise entre 4,5 % et 5,1 %, confirme également la nature fluorée du lépidolite et son rôle dans la stabilité structurale du minéral [14]. Les essais expérimentaux ont montré que la calcination joue un rôle important dans l'activation du minerai avant la digestion sulfurique. L'augmentation de la température de calcination entraîne une transformation progressive de la structure cristalline du minéral, facilitant ainsi la diffusion des ions hydrogène lors de l'attaque acide. Cette activation thermique permet d'améliorer la solubilisation du lithium et d'augmenter le rendement d'extraction. Les résultats expérimentaux montrent que le rendement peut atteindre environ 75 % après calcination à 900 °C, ce qui confirme l'importance de cette étape dans le traitement hydrométallurgiques du lépidolite [15]. La modélisation statistique appliquée aux données expérimentales a permis d'identifier l'influence combinée des paramètres opératoires, notamment la température de digestion et le temps de réaction, sur le rendement d'extraction du lithium. Le modèle prédictif basé sur une régression polynomiale régularisée de type Ridge présente une bonne capacité de prédiction, avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,893$, une erreur absolue moyenne de 3,61 % et une erreur quadratique moyenne de 5,28 %. Ces résultats indiquent que près de 89 % de la variabilité du rendement d'extraction peut être expliquée par les paramètres expérimentaux pris en compte dans le modèle. L'utilisation de méthodes de modélisation statistique constitue ainsi un outil efficace pour analyser et optimiser les procédés hydrométallurgiques appliqués aux minerais lithinifères. En permettant d'identifier les relations entre les variables expérimentales et les performances du procédé, ces approches facilitent la détermination des conditions opératoires optimales et contribuent à améliorer l'efficacité globale de l'extraction du lithium [16]. Les résultats obtenus dans cette étude confirment donc l'intérêt de combiner les approches expérimentales et la modélisation statistique pour la valorisation des ressources lithinifères issues des pegmatites granitiques.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de développer et de valider un modèle statistique prédictif du rendement d'extraction du lithium à partir du lépidolite provenant du gisement de Tsitondroina, situé dans la région de Haute Matsiatra, district d'Ikalamavony (Madagascar). La caractérisation géochimique par fluorescence X a montré que le minerai est principalement constitué de SiO_2 (49,0–53,0 %), Al_2O_3 (21,0–24,1 %) et K_2O (10,0–10,8 %), avec une teneur en Li_2O comprise entre 4,8 % et 5,3 %, confirmant ainsi la présence significative de lithium dans la structure minérale du lépidolite. Les essais expérimentaux ont mis en évidence l'influence importante de la calcination et des conditions de digestion sulfurique sur le rendement d'extraction du lithium. L'augmentation de la température de calcination favorise l'activation thermique du minerai et améliore la réactivité du lépidolite lors de la lixiviation acide. Les résultats montrent que le rendement d'extraction peut atteindre environ 75 % après calcination à 900 °C, ce qui souligne le rôle déterminant de cette étape dans l'optimisation du procédé. La modélisation statistique basée sur une régression polynomiale régularisée de type Ridge a permis de décrire de manière satisfaisante la relation entre les paramètres opératoires et le rendement d'extraction du lithium. Le modèle obtenu présente une bonne performance prédictive avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,893$, une erreur absolue moyenne de 3,61 % et une erreur quadratique moyenne de 5,28 %. Ces résultats démontrent que l'approche de modélisation statistique constitue un outil pertinent pour analyser et optimiser les procédés hydrométallurgiques appliqués à l'extraction du lithium à partir du lépidolite. Dans l'ensemble, cette étude met en évidence le potentiel du gisement de Tsitondroina comme source de lithium et souligne l'intérêt de combiner les approches expérimentales et les méthodes de modélisation statistique pour améliorer l'efficacité des procédés d'extraction et contribuer à la valorisation des ressources minérales locales.

REFERENCES

- [1] Tarascon, J.M. & Armand, M., 2001. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, pp.359–367.
- [2] Flexer, V., Baspineiro, C.F. & Galli, C.I., 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies. *Science of the Total Environment*, 639, pp.1188–1204.
- [3] Garrett, D.E., 2004. *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride*. Burlington: Elsevier.
- [4] London, D., 2008. *Pegmatites*. Mineralogical Association of Canada.
- [5] Meshram, P., Pandey, B.D. & Mankhand, T.R., 2014. Extraction of lithium from primary and secondary sources. *Hydrometallurgy*, 150, pp.192–208.
- [6] Chen, Y., Tian, Q., Chen, B. & Shi, X., 2011. Preparation of lithium carbonate from lepidolite by sulfuric acid leaching. *Minerals Engineering*, 24, pp.249–254.
- [7] Montgomery, D.C., 2017. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. New York: Wiley.
- [8] Jenkins, R., Gould, R.W. & Gedcke, D., 1995. *Quantitative X-ray Spectrometry*. New York: Marcel Dekker.
- [9] Van Rossum, G. & Drake, F.L., 2009. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley: CreateSpace.
- [10] Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al., 2020. Array programming with NumPy. *Nature*, 585, pp.357–362.
- [11] McKinney, W., 2010. Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp.51–56.
- [12] Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp.90–95.
- [14] London, D., 2008. *Pegmatites*. Mineralogical Association of Canada, Special Publication 10.
- [15] Meshram, P., Pandey, B.D. & Mankhand, T.R., 2014. Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation. *Hydrometallurgy*, 150, pp.192–208.
- [16] Montgomery, D.C., 2017. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. New York: Wiley.
- [13] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A. et al., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, pp.2825–2830.