

Sommaire

Introduction	1
I. Généralités sur le zircon	2
I.1. Historique	2
I.2. Les différents gisements de zircon au Sénégal	2
I.3. Les Caractéristiques du zircon	3
I.4. Les propriétés du zircon	5
II. Extraction du zircon	6
II.1. Etapes préliminaires de l'extraction du zircon	7
II.1.1. La fragmentation	7
II.1.1.1. Le concassage	7
II.1.1.2. Le broyage	7
II.1.2. Le criblage	8
II.1.3. La classification	9
II.2. Méthodes de séparation de zircon	9
II.2.1. La gravimétrie	9
II.2.1.1. La séparation densimétrique	10
II.2.1.2. La flottation	10
II.2.2. Procédé électrostatique	11
II.2.2.1. Le Séparateur de Hamos GmbH	11
II.2.2.2. Les séparatrices électrostatiques multifonctions à électrode-convoyeur métallique	12
II.2.2.2.1. Effet de couronne	13
II.2.2.2.2. Induction électrostatique	14
II.2.2.2.3. Effet triboélectrique	14
II.2.3. Le procédé magnétique	15
II.2.3.1. Séparation magnétique à haut gradient (HGMS)	15
III. Le traitement du zircon	15
III.1. La voie thermique :	16
III.1.1. Le chauffage direct	16
III.1.2. La carbochloration	16
III.1.3. Attaque fluorée	16
III.1.4. Attaque réductrice	16
III.2. Traitement sous vide	16
III.2.1. Le procédé de Kroll	16
III.2.2. Electrolyse de fluorozirconate de potassium	17

III.2.3.	La réduction de zircon	17
IV.	Applications du zircon	17
IV.1.	L'industrie chimique :	17
IV.2.	La fonderie	17
IV.3.	L'industrie céramique :	18
IV.4.	L'industrie nucléaire	18
IV.5.	Le domaine médical	18
IV.6.	Le domaine du luxe	19
	Conclusion et perspective	20
	REFERENCES	21

INTRODUCTION

Pour de nombreux pays, le secteur minier apparaît comme un enjeu du développement économique. En effet, depuis la fin du vingtième siècle certains minéraux ont conduit à la multiplication des grands projets miniers, notamment des minerais lourds comme le zircon. Ce dernier est une matière première qui est utilisée dans plusieurs domaines. Il est le principal minerai utilisé dans l'industrie nucléaire pour l'élaboration du zirconium et du dioxyde de zirconium et des divers autres composés du zirconium [1]. Il entre aussi dans la construction des réacteurs nucléaires, des piles à combustibles, des pompes électrochimiques, des capteurs d'oxygène et des matériaux de construction. Le zircon et ses composés dérivés sont utilisés dans le domaine pharmaceutique dans la fabrication des prothèses dentaires, des instruments chirurgicaux et dans le domaine du luxe pour réaliser des bijoux... Dans ce contexte, l'exploitation de gisements de zircon s'avère être une solution intéressante du point de vue économique. Donc il s'avère nécessaire pour certains pays comme le Sénégal d'exploiter d'importants gisements de zircon.

Notre travail est subdivisé en quatre parties :

Dans la première partie nous traitons les généralités sur le zircon en revenant sur son historique, ses différents gisements, ses caractéristiques et ses propriétés, puis dans la deuxième partie nous montrons les différentes méthodes d'extraction, ensuite nous étudierons dans la troisième partie les différentes techniques de traitement du zircon et enfin nous terminerons notre étude par les applications du zircon.

I. Généralités sur le zircon

I.1. Historique

Le zircon est une gemme naturelle de la famille des silicates. Il a été découvert en 1783 par le minéralogiste allemand Abraham Gottlob Werner, qui l'a extrait des roches plutoniques. C'est l'une des pierres les plus vieilles de la planète. Le mot zircon proviendrait, soit de l'arabe zargun (cinabre), soit du persan zargun (« doré »). On retrouve cette étymologie dans l'anglais jargoon, qui désigne des zircons de couleur claire. Les zircons jaunes à grenat sont appelés hyacinthes, du grec signifiant « jacinthe ». Il apparaît aussi dans plusieurs textes anciens, notamment dans un poème Hindou sur l'arbre mythique Kalpa, qu'on disait orné de feuilles de Zircon. Certaines sources évoquent également une légende juive, dans laquelle un ange nommé "Zircon" apparaît pour servir de guide à Adam et Eve au Jardin d'Eden.²

I.2. Les différents gisements de zircon au Sénégal

Les plus grands gisements de zircon se trouvent autour des vieux continents stables dans les régions équatoriales, à savoir le long des côtes australiennes, Sud-Africaines, Indiennes. Les gisements de zircon existent aussi aux Etats Unis, au Sénégal, en Malaisie, en Asie, au Nigeria, au Madagascar et en Chine. Le quatrième gisement de zircon le plus important au monde se trouve au Sénégal dans la région de Thiès plus précisément à Diogo et son exploitation a été confiée à la société d'extraction minière Grande Côte Opérations (GCO). Un gisement de zircon est découvert aussi au nord de la Casamance dans la région de Ziguinchor plus précisément à Niafourang. La figure1 montre la cartographie du zircon au Sénégal.



Figure 1: Les zones d'exploitation de zircon au Sénégal

I.3. Les Caractéristiques du zircon

Le zircon est une pierre précieuse dont le cristal coloré apparaît sous forme de nombreuses couleurs, parfois chocolat, jaune ou jaune orangé, vert, blanc (figure 2). Lorsque la lumière pénètre cette pierre précieuse de zircon, elle est divisée en deux faisceaux lumineux distincts, alors on dit que le zircon est doté d'une forte biréfringence (figure 3). Cet effet est rendu évident par un effet optique de doublage des arêtes en fonction de l'angle de vue et de la taille de la pierre [4]. D'ailleurs Les cristaux de zircon contiennent une petite proportion d'uranium (isotope radioactif 238) qui se désintègre progressivement. Ce dernier entraîne l'apparition d'un spectre d'absorption du zircon qui a été découvert pour la première fois par Church en 1866. Ces raies fines obtenues tout au long du spectre, sont dans le domaine du visible d'où la présence de ces couleurs (verte, rouge, jaune, marron, bleue). En effet les raies les plus fortes et les plus persistantes sont à 621, 615, 589.5, 562.5 ,537.5 ,516 ,484 ,460 ,432.5 [5] (Figure 4).



Figure 2: Quelques variétés de couleurs de zircon



Figure 3 : Le zircon représentant une forte biréfringence

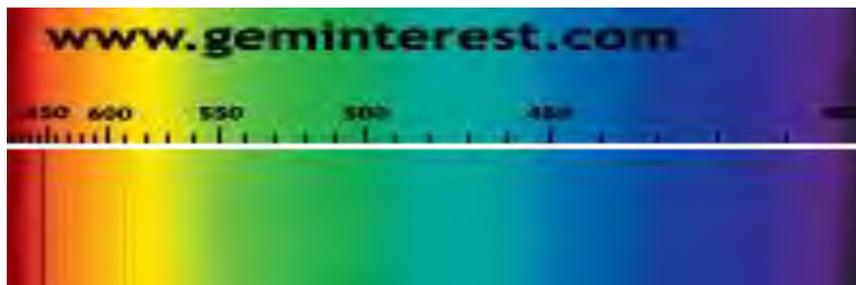


Figure 4 : Le spectre d'absorption du zircon

En joailleries les vrais cristaux de zircon sont considérés comme des pierres fines (figure5).



Figure 5 : Les cristaux de zircon sous forme de pierres fines

I.4. Les propriétés du zircon

Le zircon est un minéral du groupe des silicates, appelé silicate de zirconium de formule chimique

($ZrSiO_4$). Il contient 49,77% de zirconium, 15,32% de silicium et 34,91% d'oxygène. Sa forme oxyde théorique est composée de 67,1 % de ZrO_2 et de 32,9 % de SiO_2 . Il peut, dans certains cas extrêmes, contenir jusqu'à 30 % d'oxyde d'hafnium (HfO_2), 12 % d'oxyde de thorium (ThO_2) ou 1,5 % d'oxyde d'uranium (UO_2). Le zircon, grâce à sa grande variété de propriétés physiques, est classé en trois types qui sont : le zircon haut, le zircon intermédiaire et le zircon bas. Le tableau 1 représente le tableau récapitulatif des types de zircon. Les cristaux de zircon ont la forme d'un prisme et il cristallise dans le système quadratique, de groupe d'espace $4/m2/m2/m$ (figure 6) [6]. Parfois, dans les vieux spécimens de cristal de zircon, les particules alpha provenant de la désintégration de l'uranium et du thorium ont partiellement ou complètement détruit le réseau cristallin du zircon. Donc ce dernier est une pierre qui peut avoir une évolution sur des milliers d'années : avant le processus de déstructuration du réseau cristallin, on parle alors de zircon haut ($ZrSiO_4$) et vers la fin du processus de destruction, le zircon est appelé zircon bas ($ZrSiO_2$) [3].

Type	Zircon Haut	Zircon Intermédiaire	Zircon bas
Formule	$ZrSiO_4$	ZrO_2	$ZrSiO_2$
Densité	4,65 à 4,71	4,10 à 4,65	3,94 à 4,40
Couleur	Jaune et Pale Jargoon	Rouge et Orange Hyacinthe	Vert et Autres
Dureté	7,25	7 à 6,5	6

Tableau 1 : Le tableau récapitulatif des types de zircon [23].

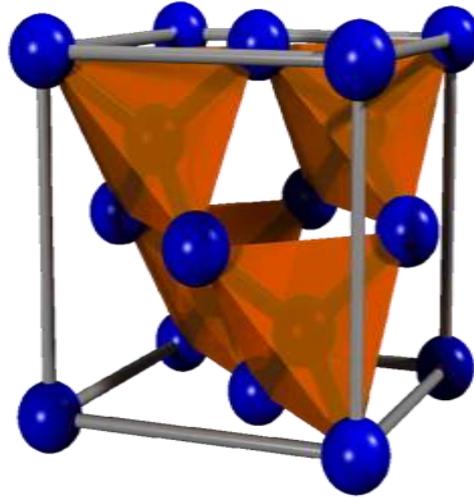


Figure 6 : La structure quadratique du zircon

Le zircon appartient à la famille des minéraux denses. Il a aussi une dureté qui n'est pas régulière sur tout le cristal qui va de 7 à 7,5 et son clivage est négligeable et imparfait. Le zircon, grâce à ses propriétés physiques et chimiques (voir tableau 2) se différencie du diamant [6].

Tableau 2: Les propriétés physiques et chimiques de zircon

Composition chimique	Système cristallin	Solubilité	Dureté	Densité	Masse volumique g/cm^3	Masse molaire moléculaire (g/mole)
ZrSiO ₄	Quadratique	Insoluble	7 à 7.5	3,9 à 4,8	4,56	183,307

Indice de réfraction	Température de fusion	susceptibilité magnétique	Conductivité électrique	Taille moyen	Forme dans les roches
1.923 à 2.010	2550°C	Faible	Faible	100 à 600 μm	Recristallisée

II. Extraction du zircon

L'exploitation minière consiste à extraire des minéraux ayant des valeurs économiques. Il existe diverses étapes et trois méthodes pour extraire le zircon qui sont : la séparation gravimétrique, le procédé électrostatique et le procédé magnétique.

II.1. Etapes préliminaires de l'extraction du zircon

II.1.1. La fragmentation

La fragmentation se fait en deux grandes opérations qui sont les suivantes :

II.1.1.1. Le concassage

Le concassage est la première étape du procédé de fragmentation. Il s'effectue généralement par voie sèche, il consiste à décomposer le minerai par compression contre des surfaces rigides ou par percussion contre des surfaces dures dans un mouvement à débit contrôlé.



Figure 7: Le concasseur des minerais

II.1.1.2. Le broyage

Le broyage est la dernière étape du procédé de fragmentation et c'est elle qui nécessite la plus grande quantité d'énergie de ces deux étapes. C'est pourquoi on a souvent tendance à commencer par faire éclater le minerai dans la mine ou à le concasser le plus finement possible pour réduire les quantités de matériaux plus gros envoyés au broyage, afin de réduire la consommation énergétique globale du broyage, donc de la fragmentation. Dans la mesure du possible, le broyage s'effectue par voie humide, ce qui nécessite moins d'énergie et permet ainsi des économies d'énergie pouvant aller jusqu'à 30 % par rapport au broyage par voie sèche. Lors du broyage, les particules sont généralement réduites par une action combinée de percussion et d'abrasion du minerai provoquée par un mouvement libre d'éléments de broyage, par exemple des barres d'acier, des boulets ou des galets dans le broyeur.



Figure 8:Le broyeur des minerais

II.1.2. Le criblage

Le criblage peut être défini comme une opération mécanique qui sépare les particules en fonction de leur calibre et selon qu'elles soient admises ou rejetées par les ouvertures d'une face de criblage. Les particules qui sont plus grosses que les ouvertures des cribles sont retenues, et constituent les déclassés supérieurs. Inversement, celles qui sont plus petites passent à travers la surface de criblage et forment les déclassés inférieurs. Il existe de nombreux types différents de cribles industriels, qui peuvent se classer en cribles fixes et en cribles mobiles. Dans le traitement du minerai, le criblage s'effectue principalement pour les raisons suivantes :

- Pour éviter que des matériaux trop petits ne pénètrent dans les concasseurs
- Pour éviter que des matériaux trop gros ne passent aux stades ultérieurs du procédé de broyage ou au concassage fin en circuit fermé
- Pour produire des matériaux d'une granulométrie contrôlée, par exemple après extraction.



Figure 9: La machine de criblage

II.1.3. La classification

La classification peut être décrite comme la séparation de particules solides en deux ou plusieurs produits selon leur vitesse de chute à travers un milieu. La vitesse des particules dépend de leur granulométrie, de leur densité et de leur forme. Dans le traitement du minerai, la classification s'effectue le plus souvent par voie humide, l'eau servant de milieu liquide. La classification par voie sèche, avec l'air comme milieu, s'emploie dans plusieurs applications (ciment, calcaire, charbon). La classification est généralement effectuée sur des minéraux qui sont considérés comme trop fins pour être séparés efficacement par criblage.

II.2. Méthodes de séparation de zircon

II.2.1. La gravimétrie

La gravimétrie, ou concentration par gravité, est une technique utilisée en minéralurgie, et qui vise à séparer les minéraux de masses volumiques, tailles, formes et de densités différentes. Elle est réalisée en voie humide. Divers opérateurs sont utilisés pour extraire le zircon notamment, La drague flottante qui est une machine utilisée pour extraire les minéraux (figure 10) et le concentrateur à spirale (figure 11) qui permet d'épurer le zircon contenue dans le sable.



Figure 10 : La drague flottante



Figure 11 : Le concentrateur à spirale

Deux procédés sont réalisés lors de la séparation par gravimétrie qui sont la densimétrie et la flottation.

II.2.1.1. La séparation densimétrique

Elle consiste à séparer les minéraux à partir de leur différence de densité. Par exemple, on peut utiliser un système de spirales dans lesquelles circule une « pulpe » composée du minerai et d'eau : les minéraux légers sont alors poussés vers le bord extérieur par la force centrifuge.

II.2.1.2. La flottation

Elle consiste à séparer les minéraux rendus hydrophiles ou hydrophobes par l'utilisation de réactifs chimiques notamment les collecteurs qui ont pour but d'activer les surfaces des minéraux à valoriser pour les rendre hydrophobes. Par conséquent, une alimentation en air dans la solution liquide contenant le minerai permet de créer des bulles qui collectent les

minéraux hydrophobes et les remontent à la surface, formant une mousse que l'on pourra ainsi aisément récolter. Les matériaux hydrophobes vont « s'accrocher » aux bulles d'air et remonter en surface et les matériaux hydrophiles s'éloignent des bulles d'air.

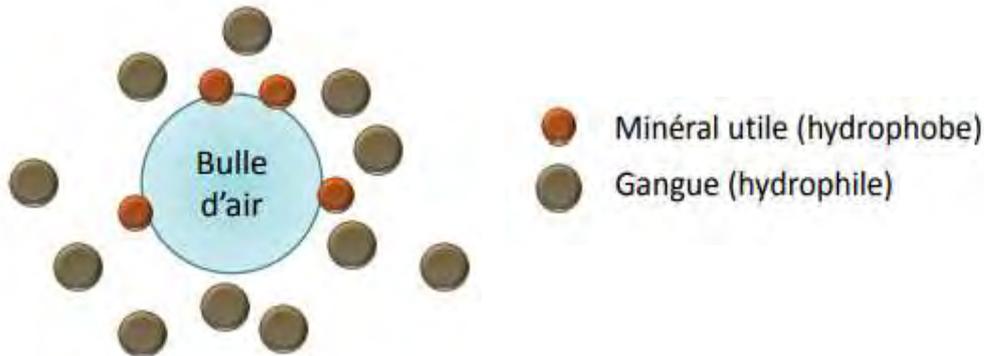


Figure 12 : Minéraux hydrophobes s'accrochant sur une bulle d'air

II.2.2. Procédé électrostatique

La séparation électrostatique des minéraux lourds est produite par les forces électriques agissant sur les matériaux qui ont des caractéristiques physiques différentes, qui sont chargés ou polarisés, et qui se trouvent dans un champ électrique intense [9]. Le principe de la séparation électrostatique des minéraux repose sur la différence de leurs conductivités électriques. Les procédés utilisés pour cette opération sont :

II.2.2.1. Le Séparateur de Hamos GmbH

Il est utilisé pour faire le tri des sables en utilisant la différence de conductivité des substances minérales à séparer, telles que l'ilménite, le rutile, le leucoxène et le zircon. Dans ce cas, le mélange est déposé sur un tambour relié à la terre par l'intermédiaire d'une unité de dosage (lubrificateur à rouleau) sur des rouleaux de séparation, ce qui leur permet d'acquérir des charges électro-statiquement [10]. De ce fait, les minéraux conducteurs (rutile, leucoxène) perdent leur charge rapidement lors de leur contact avec le tambour mis à la terre, et sont collectés dans un compartiment du collecteur comme étant le produit A, tandis que les minéraux non conducteurs (zircon, ilménite) perdent leur charge plus lentement, et restent collés à la surface du tambour, à partir duquel ils sont récupérés dans un autre compartiment du collecteur comme étant le produit B. La figure 13 représente les différents séparateurs à Hamos GmbH.



Figure 13 : Les séparateurs à Hamos GmbH

II.2.2.2. Les séparatrices électrostatiques multifonctions à électrode-convoyeur métallique

Le principe du séparateur électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur repose sur la différence de conductivité des minéraux à séparer tels que le zircon, l'ilménite, le rutile et la leucoxéne. Le schéma de la figure 14 représente le dispositif du séparateur électrostatique multifonctions. Ce dispositif est destiné aux études de faisabilité de la séparation électrostatique des minéraux. Ces derniers sont déposés sous forme d'une monocouche sur la surface d'un convoyeur à bande métallique, long de 700 mm et large de 70 mm, qui joue le rôle d'une électrode liée à la terre. Le dépôt des minéraux se fait à l'aide d'une goulotte oscillante à unité de contrôle dédiée, elle est dotée d'un dispositif de dispersion des particules. Diverses possibilités sont offertes à ce séparateur pour charger les particules. En général, le choix du dispositif de charge dépendra essentiellement des propriétés électriques des minéraux à séparer et la distinction entre ces minéraux sera faite par rapport à leur conductivité qui définit leur aptitude à garder la charge acquise. Cependant, il existe trois mécanismes pour faire la séparation électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur qui sont les suivants : la décharge de couronne (effet de couronne), par induction électrostatique ou par effet tribo-électrique [9 - 10].



Figure 14 : Le séparateur électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur

1 : Goulotte oscillante ; 2 : Moteur électrique entrainant le convoyeur métallique ; 3 : Convoyeur métallique ; 4 : Electrode couronne ; 5 : Moteur électrique entrainant l'électrode cylindrique ; 6 : Electrode cylindrique tournante ; 7 : Boite 1 ; 8 : Boite 2 ; 9 : Boite 3, 10 : Armoire électrique ; 11 : Alimentations en haute tension continue.

II.2.2.2.1 Effet de couronne

L'effet de couronne est un terme qui désigne la présence de décharge partielle autour des conducteurs. L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produit entre deux électrodes métalliques : l'une dite active, se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre (figure 15). À proximité de l'électrode active la tension varie fortement sur une courte distance créant ainsi un fort champ électrique, responsable de l'accélération des quelques électrons issus de l'ionisation naturelle de l'air. Lors de l'utilisation de l'effet couronne comme mécanisme de décharge pour la séparation électrostatique des mélanges isolant/conducteur les minéraux sont positionnés sur la surface de l'électrode passive et acquièrent des charges positives ou négatives selon la polarité de l'électrode active qui produit un nuage ionique mono-polaire. Cependant, les minéraux qui traversent ce nuage acquièrent une charge ionique, alors que les minéraux conducteurs perdent cette charge du fait de leur contact avec la terre et redeviennent neutres

alors que les minéraux isolants la gardent plus longtemps. Ce phénomène permet donc la séparabilité du mélange isolant/conducteur [11 -13].

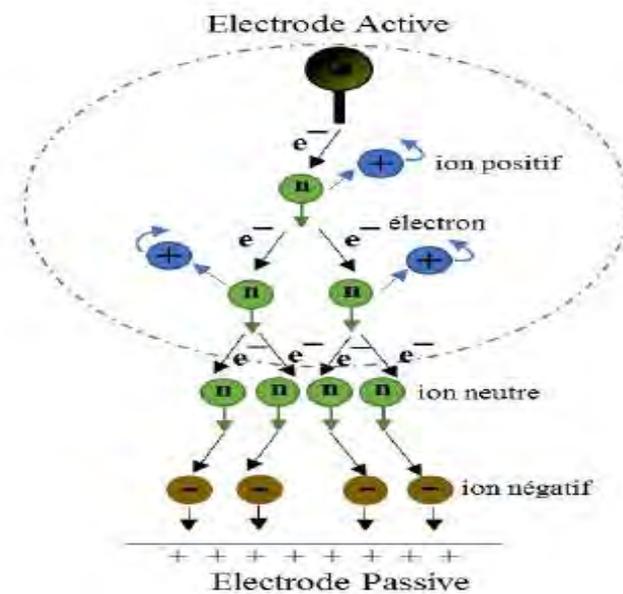


Figure 15 : Le mécanisme de l'effet de couronne

II.2.2.2.2 Induction électrostatique

L'induction électrostatique est également responsable de l'attraction d'objets non conducteurs et il laisse les

conducteurs constants en tout point. Il peut se définir comme étant une méthode par laquelle un objet électriquement chargé est employé pour créer un déplacement de charges électriques dans un deuxième objet neutre sans être en contact avec celui-ci. Dans ce cas l'objet chargé qui génère un champ électrique, provoque la polarisation de l'objet neutre. Mais, si ce dernier est conducteur et temporairement en contact avec une électrode liée à la masse, les charges polaires situées au voisinage du point de contact vont s'écouler vers la terre. De ce fait, lorsque l'objet est déconnecté de la terre, il emporte une charge nette non nulle. Les charges ne s'écoulant pas dans un corps isolant, celui-ci n'est alors jamais chargé par induction électrostatique [14].

II.2.2.2.3 Effet triboélectrique

C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires en vue de leur séparation dans un champ électrique intense. Lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact, en présence du champ électrique très intense, les charges électriques ainsi acquises dans le système sont alors transférées dans les matériaux ou généralement la conductivité est faible. Mais jusqu'à présent le zircon est associé avec l'ilménite, donc une autre méthode existe pour les séparés.

II.2.3. Le procédé magnétique

La magnétisation des minerais est une technique utilisée pour extraire les minéraux sous l'action du champ magnétique. La séparation magnétique des minerais est une technique relativement ancienne, mais qui s'est beaucoup améliorée grâce aux aimants permanents céramiques à grande énergie spécifique. Le principe de la séparation magnétique repose sur la différence de susceptibilité magnétique entre les minerais à traiter, lorsque ceux-ci sont soumis à un champ magnétique donné [22]. En présence du champ magnétique intense, le zircon et le rutile seront séparés facilement avec les autres minéraux du titane (l'ilménite, le leucoxéne). La séparation utilisée dans ce procédé est la suivante :

II.2.3.1 Séparation magnétique à haut gradient (HGMS)

La séparation magnétique à haut gradient est une séparation qui se fait à l'intérieur de la bobine d'induction et s'effectue en voie humide. Les matériaux à traiter sont alors soumis, dans la matrice, à des gradients d'énergie magnétique suffisants pour séparer des minéraux de faible susceptibilité magnétique (le zircon) avec ceux de forte susceptibilité magnétique (l'ilménite). En particulier, plus la susceptibilité magnétique d'une particule est faible, plus l'intensité du champ magnétique à fournir est importante pour la séparer des particules non-magnétiques. Le zircon étant ferromagnétique donc sous l'action du champ magnétique très intense, il est attiré par l'aimant d'où la séparation entre le zircon et l'ilménite qui est un minerai magnétique [22]. Ce phénomène est appelé l'aimantation.



Figure 16 : Le séparateur magnétique à haut gradient

III. Le traitement du zircon

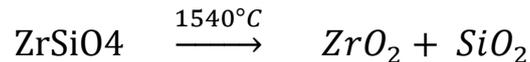
Le principe de ce traitement c'est d'obtenir le zirconium sous forme métallique. Les traitements les plus utilisés pour le zircon sont le traitement par la voie thermique et le traitement sous vide.

III.1. La voie thermique :

L'objectif de ce traitement consiste à éliminer la silice. Pour bien comprendre cette étape, les différents processus sont réalisés :

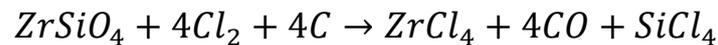
III.1.1. Le chauffage direct

Le zircon est un mélange constitué de dioxyde de zirconium et de dioxyde de silicium. Par chauffage à une température très élevée (1540°C environ), il se décompose en un mélange de silice et de zircone [24] selon la réaction suivante :



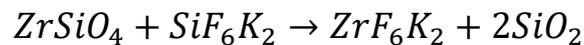
III.1.2. La carbochloration

Le but de cette étape est de passer du zircon au tétrachlorure de zirconium. Elle se fait entre 1100 - 1200°C dans un four à induction en présence de carbone et de dichlore selon la réaction suivante [26]:



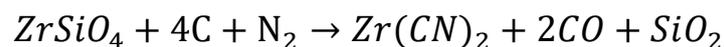
III.1.3. Attaque fluorée

C'est la méthode la plus intéressante, elle consiste à faire réagir le zircon avec le fluosilicate de potassium en un frittage entre 650-700°C. Selon la réaction suivante :



III.1.4. Attaque réductrice

Ce procédé est mis au point par Kroll au Etats Unis, il consiste à chauffer à 1800°C et sous azote un mélange de zircon et de carbone selon la réaction suivante :

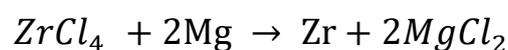


III.2. Traitement sous vide

C'est l'étape qui vient après le traitement thermique. Le but du traitement sous vide, c'est d'obtenir les éponges de zirconium. Les procédés utilisés lors de ce traitement sont :

III.2.1. Le procédé de Kroll.

Le principe consiste à ajouter du magnésium liquide qui va réagir avec le tétrachlorure de zirconium sublimé selon l'équation suivante [26] :



À la fin du processus, la matière obtenue est une matrice de magnésium avec des nodules blancs de zirconium. Le magnésium ayant une température d'ébullition plus faible que le zirconium, son élimination est effectuée via une distillation sous vide à environ 1000°C. On obtient à la fin, une éponge de zirconium avec une structure très poreuse.

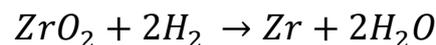
III.2.2. Electrolyse de fluorozirconate de potassium

Par électrolyse, le fluorozirconate de potassium se transforme en zirconium, en fluorure et en potassium selon la réaction suivante :



III.2.3. La réduction de zircone

Le but de cette étape permet de transformer la zircone en zirconium. Il se produit en présence de dihydrogène gazeux avec une élimination d'une molécule d'eau [6] selon la réaction suivante :



L'effet de la chaleur est très intéressant sur les zircons de types différents. Que ce soit les zircons bas ou haut ou leurs intermédiaires. S'ils sont chauffés vers 1450°C leurs densités tendent à accroître vers la valeur normale. Le traitement thermique sur les zircons est mené sur les cristaux bruns rougeâtres, car ce sont ces pierres qui après traitement donnent des pierres incolores, bleues et dorées qui sont prisées en joaillerie [6].

IV. Applications du zircon

Le zircon est un minéral lourd, dur et très dense. Le zircon, grâce à ses propriétés physiques et chimiques, est utilisé dans plusieurs domaines. Parmi lesquels, on peut citer : l'industrie chimique, la fonderie, l'industrie céramique, l'industrie nucléaire, le domaine médical et celui du luxe [8].

IV.1. L'industrie chimique :

Le zircon est utilisé dans l'industrie chimique dans la fabrication des peintures. Il permet à la peinture d'être opacifiante, c'est-à-dire d'avoir une capacité à occulter les colorations du substrat et d'avoir aussi une propriété d'intercepter la lumière même lorsqu'elle est de faible épaisseur.

IV.2. La fonderie

Le zircon est utilisé sous forme de poudre fine. Il est utilisé pour élaborer des moules pour le moulage des métaux fondus [26]. Il est utilisé sous forme de sable de base qui sert à réunir les

composés. Il est la principale matière première à élaborer la silice qui est une matière de moule très utilisée pour le moulage.

IV.3. L'industrie céramique :

Dans l'industrie céramique le zircon est utilisé dans la fabrication des carreaux. Il est un opacifiant pour les carreaux, il permet aux carreaux d'avoir une capacité à résister à de très haute température, d'être opaques et transparents, grâce à ses propriétés physiques et optiques [17].

IV.4. L'industrie nucléaire

Le zircon est utilisé dans l'industrie nucléaire pour l'élaboration de zirconium. Ce dernier est un métal dur, argenté et très développé pour des applications nucléaires grâce à sa transparence aux neutrons et pour sa bonne stabilité chimique à haute température, particulièrement sa résistance à la corrosion. Il entre aussi dans la fabrication des réacteurs nucléaires (figure 17) [18].



Figure 17 : Photo de réacteurs nucléaires

IV.5. Le domaine médical

Le zircon c'est sous sa forme oxyde appelé oxyde de zirconium qu'il est utilisé dans le domaine médical. La zircone est un matériau non seulement ultra résistant mais aussi 100 % biocompatible, on l'utilise de plus en plus dans le domaine médical dans la fabrication des prothèses auditives, des doigts, de la hanche, ainsi que dans le domaine dentaire, notamment pour les couronnes et les bridges. La zircone grâce à sa très bonne résistance à la torsion et sa

brillance, est utilisée pour restaurer une dent cassée ou abîmée et permet aussi à la dent d'avoir une longue durée de vie et de transparence réduite.

IV.6. Le domaine du luxe

L'oxyde de zirconium est fréquemment utilisé dans le domaine du luxe dans la fabrication des bijoux grâce à sa dureté et à son éclat semblable à celui du diamant. La zircone est une pierre précieuse que l'on retrouve sous des formes différentes donc il est très difficile de définir une utilisation précise de l'oxyde de zirconium en bijouterie. On la retrouve notamment :

- sur les bagues taillées en poire, en cabochon, en cœur...
- sur les boucles d'oreilles,
- dans les montres sans forme d'ornement ou directement dans la composition du cadran et /ou du boîtier.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

L'objectif de ce travail est de montrer comment le zircon est extrait à partir des mines, traité et utilisé. À travers cette étude nous notons une grande variété de composés associés au zircon dans ses gisements, notamment les minéraux de titane (le rutile, l'ilménite et le leucoxéne), les minéraux de gangue (quartz, feldspath) et les dioxydes de fer. Ce travail nous a permis de bien comprendre les différentes étapes, les techniques et les matériels utilisés pour extraire le zircon dans les roches et le traiter afin d'obtenir des matériaux notamment le zirconium et la zircone, qui ont des applications dans plusieurs domaines. Ainsi nous avons montré que le zircon et ses dérivés sont utilisés dans l'industrie chimique pour la fabrication des peintures et des pompes électrochimiques ; nucléaire pour la fabrication des réacteurs nucléaires ; céramique pour la fabrication des carreaux, dans le domaine du luxe pour la confection de bijoux et dans le domaine médical pour la fabrication des prothèses et la restauration des dents abîmées.

Notre travail a des limites dues à la contrainte de temps qui ne nous a pas permis d'effectuer un stage dans une entreprise d'extraction minière pour mieux comprendre tous les processus et les techniques utilisées dans la chaîne d'extraction et de traitements du zircon.

Dans la continuité de notre travail, nous souhaiterions faire une étude plus fine sur le zircon pour apporter des résultats fiables qui nous permettraient de valoriser les minerais de zircon afin d'apporter une plus-value

REFERENCES

1. Hanchar, J. M. & Hoskin, P. W. O. (2003). Zircon, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53, Mineralogical Society of America, 500 pages.
2. Rösler, H. & Lehrbuch, J., (1991). Der Mineralogie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 5e éd., (ISBN 3-342-00288-3).
3. [tp://fr.wikipedia.org/wiki/Zirconium](http://fr.wikipedia.org/wiki/Zirconium), consulté le 22 /02/2021.
4. <https://www.juwelo.fr/guide-des-pierres/zircon/#>, Consulté le 23/O2/2021.
5. <https://www.geminterest.com/article.zircon.php>, consulté le 25/02/2021.
6. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Zircone>, consulté le 25/02/ 2021.
7. <https://www.lelementarium.fr/product/zircon/> ; consulté le 25/02/2021.
8. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Zircaloy>, Consulté le 25/02/2021.
9. Gupta1, R., Gidaspow, D. & Wasan, D.T. (1993). Electrostatic separation of powder mixtures based on the work functions of its constituents, Powder Technology, Vol. 75, pp. 79–87.
10. Lawver, J. E. & Dyrenforth, W. P. (1973). "Electrostatic Separation." Electrostatics and Its Applications, (Moore, Ed A.D.) New York: Wiley, pp. 221-249,
11. Dessauer, J. H. & Clark, H. E. (1965), "Xerography & Related Processes." London, Focal Press, U.K.
12. Dascalescu, L., Morar, R., Samuila, A. & Neamtu, V. (1998). "Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes." Part. Sci. & Technol., Vol. 16, pp. 25-42.
13. . Senouci, K., Medles, K. & Dascalescu, L. (2013). "Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment." Waste Manag. & Res., Vol. 31, pp. 160-168, 2013.
14. Govi, (1875)."Quelques expériences sur l'induction électrostatique." J. Phys. Theor. Appl., Vol. 4, pp. 264-266.
15. <https://www.zircon-association.org/zircon-sand.html>, consulté le 11/03/2021.
16. <https://www.emmanuelleguyon.com/vertus>, consulté le 12/03/2021.
17. <http://www.ceramique-et-faience.com/zircone.php>, consulté le 12/03/2021.
18. https://www.laradioactivite.com/site/pages/Feu_Zirconium.htm; consulté le 13/03/2021.
19. Crowley, J.M. (1999). "Fundamentals of Applied Electrostatics." Morgan Hill, California: Laplacian Press

20. Nicoara, S., Calin, L., Iuga, A. & Serban, N. (2006), "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose." Environment and Progress, Vol. 6, pp.341- 346.
21. <http://www.hamos.com/infocenter/brochure.html#hamos/22>, consulté le 10/03/2021.
22. <https://www.neyrtec.com/pages/equipement.php?id=18>, consulté le 10/O3/2021.
23. <https://www.gemlabmarseille.com/formation/fga/projets/2017simon/SophieSimonZircon.pdf>, consulté le 01/04/2021.
24. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/biomedical-pharmath15/biomateriaux-42606210/materiaux-ceramiques-pour-les-protheses-orthopediquesmed7100/>, consulté le 29/03/2021.
25. <https://www.lelementarium.fr/product/zircone/>, consulté le 31/03/2021.
26. <https://metalblog.ctif.com/2020/11/02/le-zirconium-pour-les-applications-nucleaires/>, consulté le 20/03/2021.
27. <https://www.smile3dconcept.com/zircone/#:~:text=A%20quoi%20sert%20la%20Zircone,les%20couronnes%20et%20les%20bridges>, consulté le 22/03/2021.