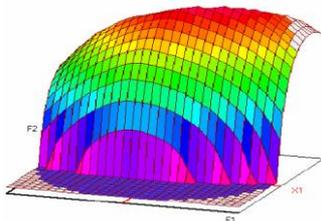




Année Universitaire : 2021-2022



## Master Sciences et Techniques CAC Ageq Chimométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion de la qualité

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Titre : Optimisation de la qualité de la préparation  
mécanique des échantillons en utilisant l'approche  
Lean Six Sigma.**

**Présenté par :**

**BELINGA Mairiga  
Halimatou**

**Encadré par :**

**- Mr. EL. HAJJI Ridouane    Entreprise : MANAGEM  
- Mr. T. SAFFAJ                    Etablissement : FST Fès**

**Soutenu Le 21 Juillet 2022 devant le jury composé de :**

- Prof. SAFFAJ TAOUFIQ**
- Prof. IHSSANE BOUCHAIB**
- Prof. LHASSANI Abdelhadi**

**Stage effectué à : REMINEX - MANAGEM**

## Dédicaces



*A* Mes tendres et chers Parents  
Aucun terme, aucune dédicace ne saurait exprimer ma gratitude, ma considération, le respect et l'amour éternel que je vous porte pour tous les sacrifices que vous avez effectués tout au long de mon parcours académique sans oublier pour mon bien-être. Merci énormément pour votre confiance, pour vos conseils, pour votre soutien et vos encouragements. Trouvez en ce travail le fruit de votre dévouement et l'expression de ma reconnaissance et de mon profond amour. Que Dieu le tout puissant vous préserve et vous accorde santé, bonheur et longévité.

*A* Vous mes frères (Alpha et Touré) et sœurs (Mamma, Nénéné, Zaki et Rahifa)  
Qui m'avez toujours soutenu, conseillé et encouragé durant toutes ces années d'étude. Merci Pour le soutien moral et pour chaque moment de joie que vous m'avez procuré.

*A* Mes très chers oncles Djibrilla Yadji, Saibou et leurs épouses respectives Djoubeinatou Bello, Lamratou  
Pour avoir été mes tuteurs, mes parents, mes conseillés ici au Maroc. Merci de m'avoir encadré, accompagné et guidé. Je vous souhaite une vie pleine de bonheur, d'amour, de santé et de réussite.

*A* Mes chers ami(e)s Proches et éloignés  
Vous êtes pour moi des personnes sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous a réunis et des souvenirs de tous les moments que nous avons partagés. Je vous souhaite une vie pleine de prospérité et de bonheur.

*A* Toute ma Famille du Cameroun et mes proches  
Merci pour votre affection, vos encouragements et votre soutien qui me donnent la force de continuer et d'aller de l'avant.

**BELINGA Mairiga Halimatou**



## Remerciements



En préambule de ce mémoire, je remercie tout d'abord Dieu qui m'a aidé et m'a donné la santé, la patience, la force, la détermination et le courage durant ces longues années d'études.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes ces personnes, ma profonde gratitude et ma reconnaissance vont particulièrement :

A l'état du Cameroun et du royaume du Maroc qui m'ont fait confiance en m'accordant une bourse d'étude dans des prestigieuses universités.

Au corps professoral et administratif de la Faculté de Sciences et Techniques de Fès. Je salue l'effort entrepris pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée, de pointe et de qualité.

Mr. BOUSSETTA Abdelmalek (Directeur d'analyses et Caractérisations de la société Managem) de m'avoir permis d'effectuer ce stage au sein de la société.

Mr. El. HAJJI Ridouane (Responsable de la production et des analyses spectroscopiques et environnementales) mon encadrant interne, qui m'a offert l'opportunité de travailler sur un projet d'actualité, intéressant et passionnant. Merci pour son encadrement, son accompagnement, son écoute, sa patience et pour l'éclaircissement sur les différentes questions posées tout au long de ce stage.

Mr. T. SAFFAJ (Professeur à la FST Fès) encadrant externe, merci pour votre suivi, vos précieux conseils, vos recommandations, qui ont été d'une grande utilité.

Merci aux personnels de Managem particulièrement à toute l'équipe de préparation mécanique, de préparation chimique et d'Absorption Atomique. Ils m'ont beaucoup appris au cours de ce stage. Et Merci à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment aussi bien profitable qu'agréable.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans un mot de gratitude aux membres du jury pour l'honneur et l'amabilité d'avoir bien voulu accepter de juger mon travail.

## Liste des figures :

Figure 1 : Filiales nationales de Managem.....	7	
Figure 2: Diviseur à rifflé.....	11	
Figure 3 : Diviseur rotatif	Figure 4 : Diviseur rotatif de laboratoire .....	12
Figure 5 : Processus de quartage selon l'ADEME.....	12	
Figure 6 : Processus de division simple .....	12	
Figure 7 : Processus de broyage en circuit ouvert et en circuit fermé.....	13	
Figure 8 : les différents types de concasseurs .....	14	
Figure 9 : présentation des différentes techniques de broyage (impact, écrasement, attrition, percussion, abrasion, usure et cisaillement) .....	16	
Figure 10 : Les différents types de broyeurs .....	18	
Figure 11 : figures représentatives du pourcentage les valeurs ajoutées et non valeurs ajoutées lors du processus de préparation mécanique. ....	31	
Figure 12 : Figure représentant le VSM de la situation réelle sans amélioration sur un traitement de 5 kilos d'échantillons.....	33	
Figure 13 : Tableau récapitulatif mettant en exergue les différentes causes de défaillances et leurs effets sur le processus de préparation mécanique des échantillons.....	34	
Figure 14 : Diagramme de Pareto .....	35	
Figure 15 : Schéma descriptif de la méthode utilisée pour obtenir les concentrations en or des échantillons .....	37	
Figure 16 : Figure représentant la normalité des échantillons d'or sulfure et la valeur de Pvalue du test de Shapiro-Wilk.....	39	
Figure 17 : Figure représentant la normalité des échantillons d'or gris et la valeur de Pvalue du test de Shapiro-Wilk .....	39	
Figure 18 : Figure représentant la normalité des échantillons d'or marron et la valeur de Pvalue du test de Shapiro-Wilk.....	39	
Figure 19 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure .....	40	
Figure 20 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or gris .....	40	
Figure 21 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or marron.....	41	
Figure 22 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure .....	41	
Figure 23 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure .....	42	
Figure 24 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure .....	42	
Figure 25: Gamelle à disques ronds	Figure 26 : Gamelle à disques plats .....	42
Figure 27 : Diviseur à rifflé fermé.....	43	

## Liste des tableaux :

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des types de broyages et des types de broyeurs en fonction de la granulométrie finale recherchée .....	17
Tableau 3 : Tableau explicatif des différents rôles des constituants du fondant et leur masses respectives.....	22
Tableau 4 : Tableau récapitulatif de l'étape de fusion .....	22
Tableau 5 : Tableau récapitulatif de l'étape de Cupellation .....	23
Tableau 6 : Tableau récapitulatif de l'outil QQQCCP appliqué à notre étude.....	28
Tableau 7 : Tableau récapitulatif du processus de préparation mécanique listant les valeurs ajoutées et les non-valeurs ajoutées (nécessaires et non-nécessaires) au processus de préparation mécanique des échantillons. ....	31
Tableau 8 : Tableau Descriptif de la méthode SIPOC .....	32
Tableau 11 : Tableau des effets et les solutions adaptées à ces derniers .....	36
Tableau 9 : Tableau récapitulatif du temps de broyage à différentes mailles (75µm et 100µm) et sur différentes matrices (gris, marron et sulfuré) .....	37
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des résultats d'analyses des échantillons d'or des différentes matrices .....	38

## Tables de Matières :

Dédicaces .....	2
Remerciements .....	3
Liste des figures : .....	4
Liste des tableaux : .....	4
Tables de Matières : .....	5
Introduction Générale.....	6
I. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE.....	7
A. Organigramme du centre de recherche REMINEX.....	8
B. Différents laboratoires constituant les deux départements du centre de recherche .....	8
II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	10
A. Préparation mécanique .....	10
1. Réception des échantillons et séchage à l'étuve .....	10
2. Division .....	10
3. Concassage .....	13
4. Broyage.....	15
5. Contrôle qualité .....	19
6. Fire-Assay.....	21
7. Préparation chimique ou mise en solution.....	23
8. La spectrométrie d'absorption atomique à la flamme (SAA à la flamme) .....	24
B. Approche Lean Six Sigma et outil DMAIC .....	24
III. PRÉSENTATION DU SUJET.....	27
A. Introduction .....	27
B. Définition de la Problématique.....	27
1. Outil QQQQCP.....	27
2. La charte de projet .....	28
C. Mesure .....	29
1. Valeurs ajoutées, et valeurs non ajoutées .....	30
2. Outil SIPOC.....	32
3. Outil VSM (Value Stream Mapping) .....	33
D. Analyse .....	33
1. Diagramme d'Ishikawa.....	34
2. Diagramme de pareto.....	34
E. Innovation ou Amélioration .....	35
1. Brainstorming .....	36
F. Contrôle.....	44
Conclusion générale .....	47
Webographie : .....	48
Annexe 1 : code Rstudio .....	49
Résumé : .....	50

## Introduction Générale

Jour après jour, de nombreux échantillons de roches sont prélevés dans des mines pour des analyses en laboratoire afin de déterminer le contenu de la minéralisation. L'extraction minière ne peut résoudre à elle seule le tri initial de la matière minérale car la plupart du temps, la nature a l'habitude de former du métal impur mélangé à des terres et des pierres. Il sera ainsi nécessaire de séparer autant que l'on peut les minerais métalliques de ces matières fossiles avant de les traiter pour les rendre utiles. La séparation des minéraux utiles de leur gangue a pour effet d'élever la teneur du tout-venant au point d'obtenir un produit riche, sinon pur. Cette transformation ne modifie généralement pas la nature chimique de la substance minérale extraite du gisement minier. C'est dans cette lancée qu'est apparu le terme « **Préparation Mécanique des minerais** ».

En effet, ce sera la première partie des manipulations que doit subir le minerai afin de parvenir à des échantillons représentatifs qui seront envoyés dans les laboratoires. Chaque mine possède son propre protocole d'échantillonnage adapté qui dépendra fortement de la minéralisation propre à chacune. Cette préparation consiste à une réduction par un procédé industriel ou de laboratoire de matières solides en éléments ou particules de taille inférieure et de granulométrie déterminée. Encore qualifiée de « **Fragmentation** », cette opération est généralement subdivisée en un séchage, en une ou plusieurs étapes de concassage, en une étape de broyage et en une ou plusieurs étapes de division et de tamisage. Tout dépendant de la granulométrie finale voulue.

L'étape de préparation mécanique des échantillons avant analyse est fondamentale car elle permet d'obtenir un échantillon prêt pour l'analyse qui soit représentatif du minerai de départ. Dans le milieu des mines de nos jours, la préparation mécanique des échantillons se termine par un broyage. Ce dernier s'effectue généralement à une maille de 75 $\mu$ m du fait de la précision des résultats obtenus à cette dite maille. Cependant mon sujet de stage pourra par la suite réfuter ou non cette hypothèse.

Dans une optique d'amélioration ou de l'optimisation de la qualité du processus de préparation mécanique des échantillons au sein du groupe Reminex-Management, l'approche Lean Six Sigma (LSS) sera mise en pratique. La réalisation de cette tâche nécessitera une bonne connaissance des notions sur les différentes étapes constituant la préparation mécanique (séchage, broyage, concassage, division et tamisage), sur les étapes d'analyses (préparation chimique des échantillons et spectroscopie d'absorption atomique) et sur la méthode LSS. Une étude bibliographique sera l'étape clé afin de comprendre le processus dans le but de pouvoir dégager les problématiques rencontrées. Après cette dernière, nous entrerons dans le vif du sujet et passerons à des essais et des tests (plus préconisés par l'approche DMAIC) pour pouvoir apporter des solutions adéquates à chaque problème rencontré.

## I. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

En 1928, Jean Epinat, industriel français en visite au Maroc, découvre sur la place Jemaa El-Fna à Marrakech des arséniates de cobalt. Le potentiel économique du cobalt de Bou-Azzer et la création de la CTT (Compagnie de Tifnout Tighanimine) marquent le début des activités. En 1934, la holding ONA voit le jour et opère dans plusieurs secteurs, notamment le secteur minier. En 1996, Managem est créé pour gérer l'ensemble des activités minières de l'ONA (devenu Al Mada en 2018).

Managem est un groupe minier international implanté dans 9 pays d'Afrique (**Maroc, Guinée, Gabon, République démocratique du Congo, Soudan, Ghana, Burkina Fasso, Mali et Ethiopie**). C'est un acteur minier intégré, expert sur toute la chaîne de valeur : de l'exploration, l'extraction et la valorisation des minerais jusqu'au marketing et la commercialisation des matières premières. Managem opère majoritairement au **Maroc** et est constitué de **12 mines** productrices de **métaux de base (Cuivre, Zinc, Plomb)** et de **métaux précieux (Or, Argent)** ainsi que du **Cobalt**. La valorisation de chacune de leurs mines se fait dans le respect des meilleurs standards techniques et environnementaux.

Sites	Société d'exploitation	Produits
Mine polymétallique de Drâa Sfar		Concentrés de Plomb, Zinc et Cuivre
Mine de Bou-Azzer		Cobalt
Complexe hydrométallurgique de Guessama		anodes de Cobalt à une pureté de 99,3%, Oxyde de Cobalt, Oxyde de Zinc et autres
Mine d'Imiter		Concentré d'Argent
Mine d'AKKA		Concentré de Cuivre
Mine de Bleida		Concentré de Cuivre
Reminex		Travaux géologiques, recherche minière et Ingénierie
Techsub		Centre ses activités sur les sondages et les travaux souterrains.

Figure 1 : Filiales nationales de Managem

Managem est une société Anonyme de droit marocain administrée par un Président Directeur Général et un Conseil d'Administration. Managem est constitué de plusieurs pôles à savoir :

- ✚ **Le pôle exploration ;**
- ✚ **Le pôle de recherche et de développement ;**
- ✚ **Le pôle de sondage et de travaux miniers ;**
- ✚ **Le pôle d'hydrométallurgie ;**
- ✚ **Le pôle d'ingénierie (REMINEX) ;**
- ✚ **Le pôle trading et marketing.**

Mon stage s'est effectué dans le pôle d'ingénierie (REMINEX) de Managem Guessama situé à Marrakech au niveau du site minier de Drâa Sfar. Ce centre de recherche est certifié ISO 9001, ISO 14001 et ISO 45001 et Les laboratoires d'analyses sont accréditées selon la norme ISO 17025 : 2017, label accréditation N° 1-0789.

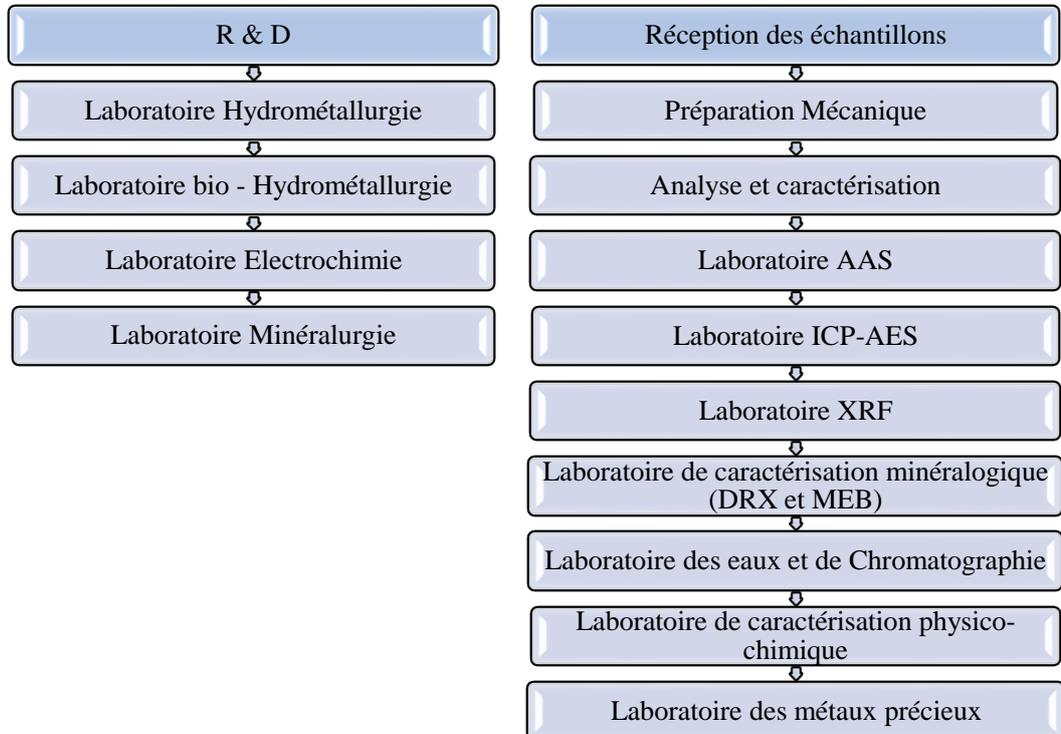
Ce centre de recherche met au service des clients externes, au Maroc et à l'étranger, une gamme complète de services d'ingénierie, de gestion de projet, de conseil et d'assistance technique dans le but de garantir des prestations aux meilleurs standards de qualité. REMINEX regroupe une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs, de cadres et techniciens. Il dispose de laboratoires équipés d'installations à la pointe de la technologie pour effectuer différentes analyses et essais physico-chimiques, en répondant aux demandes et aux différents soucis des clients. Il est capable de traiter plus de 150 000 échantillons par an et de produire plus d'un million de déterminations annuelles. Le centre de recherche est composé de trois activités majeures à savoir :

- ✚ **Activité analyse**
- ✚ **Activité appui**
- ✚ **Activité recherche.**

## **A. Organigramme du centre de recherche REMINEX**

- ✚ Naoual ZINE : Directrice Générale Reminex et Projets
- ✚ BOUSSETTA Abdelmalek : Directeur Analyse et Caractérisation
- ✚ B. AZNAG : chef du département d'analyse
- ✚ OUZAOUTTE : chef du département caractérisation et de transformation énergétique
- ✚ EL. HAJJI Ridouane : Responsable de la production et des analyses spectroscopiques et environnementale
- ✚ BADRI Mustapha : Responsable de la Caractérisation

**B. Différents laboratoires constituant les deux départements du centre de recherche**



## II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### A. Preparation mécanique

#### 1. Réception des échantillons et séchage à l'étuve

Les échantillons étant réceptionnés par les opérateurs, ils seront méticuleusement enregistrés dans un cahier spécifique. Les matériaux prélevés au sein des mines seront envoyés dans des sacs quelque soient leurs formes (carottes, roches, fragments, copeaux de forages). Dans un cahier spécifique sera inscrit :

- ✚ La date de la réception ;
- ✚ La référence de l'échantillon reçue ;
- ✚ Le nom du client ;
- ✚ Les tests à effectuer ;
- ✚ Le poids de l'échantillon avant et après séchage...

Après enregistrement des échantillons, le séchage sera l'étape clé à effectuer afin de réduire considérablement le taux d'humidité présent dans les roches. La méthode la plus courante pour sécher les produits consiste à envoyer de l'air chaud. Le séchage s'effectue généralement à une température de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  dans une étuve pendant 2 à 24h (tout dépendra du taux d'humidité présent dans la roche ou le sol).

Les quatre facteurs principaux influençant la vitesse de séchage et le temps de séchage des échantillons seront :

- ✚ Les propriétés physiques des échantillons en particulier la taille des particules, la porosité et la géométrie ;
- ✚ L'agencement géométrique des produits par rapport au flux d'air (courant transversal, passage, charge de plateau, etc.) ;
- ✚ Les propriétés physiques de l'air (température, humidité, vitesse) ;
- ✚ Les caractéristiques de conception du séchoir (courants croisés, co-courant, contre-courant, lit agité, pneumatique, etc.).

$$\% \text{ Humidité} = M_{\text{eau}} / M_{\text{totale}} = (M_{\text{H}} - M_{\text{S}}) * 100 / M_{\text{H}}$$

La température jouera un rôle très important lors du séchage.

- ✚ Pour des températures basses par exemple, on pourra observer une rétention d'eau par les particules ;
- ✚ Pour des températures élevées, on pourra avoir l'évaporation des minéraux et le compactage des grains.

#### 2. Division

La division favorise la réduction de volume de grandes quantités de matériaux en vrac, en poudre ou granulaires en quantités représentatives. Dans bien des cas, l'objet dont on cherche

à évaluer la composition moyenne (le lot) est trop étendu pour pouvoir dans son ensemble être soumis à l'analyse. En effet, les analyses sont à la fois coûteuses et destructrices, on devra alors avoir recours à un échantillon souvent de masse infime sur lequel l'analyse sera effectuée par procuration. Seule une division exacte d'un lot de départ en fractions représentatives garantit des résultats d'analyses exactes et non faussés. Car un résultat d'analyse ne vaut que ce que valent d'une part l'échantillon remis au laboratoire, d'autre part la prise d'essai prélevée sur ce dernier. Raison pour laquelle elle devra être effectuée méticuleusement et avec une extrême précision. Des erreurs peuvent être observées dans les résultats après analyse :

- + Des pertes de matière ;
- + Des contaminations (les poussières extérieures, les matières présentes dans le circuit d'échantillonnage avant l'opération) ;
- + Des altérations de la composition chimique (séchage excessif par exemple) ;
- + Des altérations de la composition physique (bris de fragments grossiers, etc.) ;
- + Des fautes opératoires accidentelles involontaires ;
- + Des altérations volontaires de la composition de l'échantillon ;
- + Opérer le prélèvement de sa prise d'essais à la surface du flacon ;
- + Hétérogénéité.

La division s'effectue par le biais des Diviseurs échantillonneurs, Mais les appareils de cette catégorie sont sensibles à un excès d'humidité qui risque de les obstruer. On doit alors procéder à un séchage partiel ou total de ces derniers au travers de l'air comprimé.

**NB** : le nettoyage de ces derniers est très important pour considérablement diminuer les contaminations lors de la division.

Ces diviseurs sont généralement de deux types :

- + **Les diviseurs à riffles** : Ils permettent de diviser avec une bonne précision un échantillon initial en deux sous-échantillons représentatifs. Ils sont les plus universellement utilisés pour préparer des sous-échantillons représentatifs de produits granulaires secs qui peuvent s'écouler. La technique est rapide et l'équipement économique.



Figure 2: Diviseur à riffle

- + **Les diviseurs rotatifs** : quant à eux, assurent la représentativité de l'échantillon et donc la reproductibilité de l'analyse. Ils sont spécialement conçus pour la division représentative et sans poussière et la réduction de volume de grandes quantités de matériaux en vrac, en poudre ou granulaires. La sélection des modules de division déterminera le rapport de division et la quantité d'échantillon



Figure 3 : Diviseur rotatif



Figure 4 : Diviseur rotatif de laboratoire

Appart le fait d'avoir recours aux diviseurs échantillonneurs, l'on peut passer par des techniques de divisions telles que :

- Le Quartage** : c'est une méthode manuelle utilisée pour les solides en vrac. Il favorise la réduction de la taille d'un échantillon en formant un tas conique qui est étalé en une galette plate circulaire. La galette est divisée en quatre quartiers (d'où son nom) approximativement égaux. Deux quartiers opposés sont mis au rebut et les deux autres quartiers sont combinés pour former le sous-échantillon. Le processus est répété autant de fois que nécessaire pour obtenir la quantité désirée pour une utilisation finale.

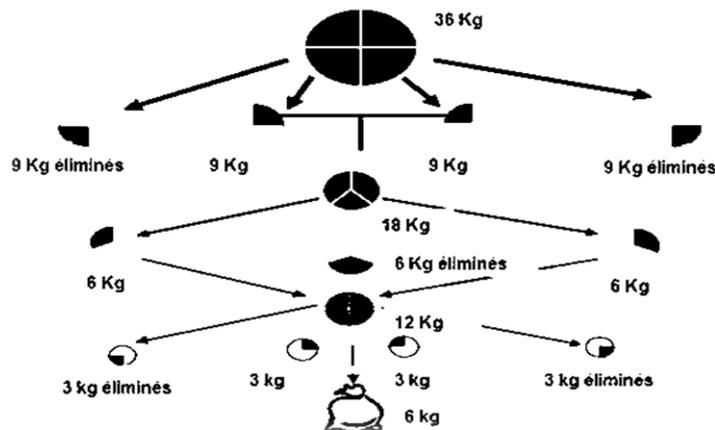


Figure 5 : Processus de quartage selon l'ADEME

- La division simple** : c'est une méthode manuelle utilisée aussi pour les solides en vrac. Cette division consiste en la réduction de la taille d'un échantillon en échantillons représentatifs. Elle emploie généralement les diviseurs à rifles ou rotatifs.

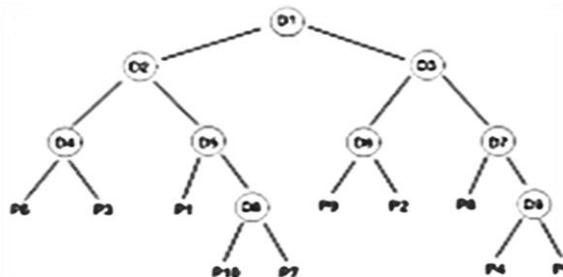


Figure 6 : Processus de division simple

**NB** : la division peut être utilisée avant le concassage et après le concassage ; tout dépendra de la taille des échantillons (homogénéité).

### 3. Concassage

Encore appelé broyage grossier, le concassage réduira les particules jusqu'à l'ordre du mm. C'est un procédé purement mécanique qui consiste le plus souvent à placer les matériaux entre deux plaques métalliques dont l'une est fixe et l'autre est mobile. Celle mobile se rapprochera alors de la plaque fixe et en fonction de la vitesse de rapprochement on parlera d'écrasement, de compression ou de percussion. Le concassage des solides peut avoir lieu en une étape ou en plusieurs étapes selon le schéma suivant :

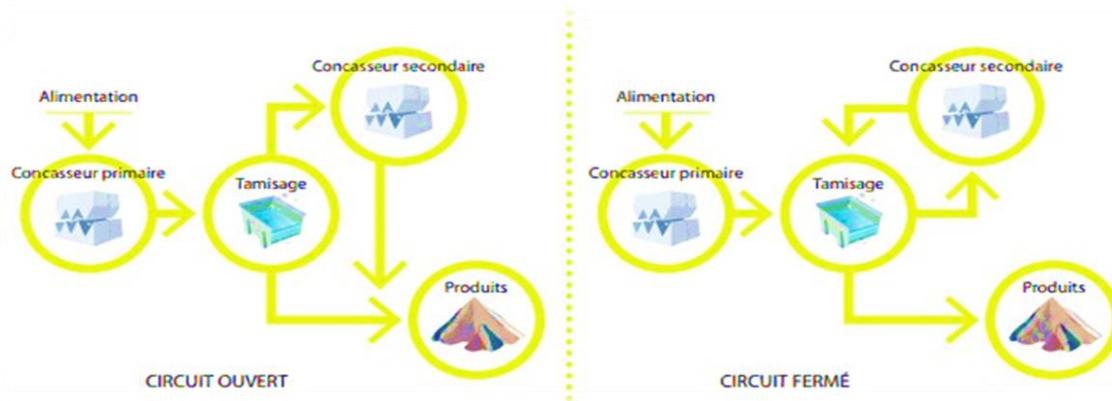


Figure 7 : Processus de broyage en circuit ouvert et en circuit fermé

- ✚ **En une étape ou circuit ouvert en industrie** : les produits ne passent qu'une seule fois dans le concasseur. (Figure7)
- ✚ **En plusieurs étapes ou circuit fermé en industrie** : la granulométrie des produits est contrôlée dès la sortie, et les produits dont la granulométrie est trop grosse sont aussitôt renvoyés pour être reconcassés. C'est la technique la plus fréquemment utilisée. (Figure7)

Généralement on distingue 3 types de concassage : le concassage primaire, le concassage secondaire et le concassage tertiaire.

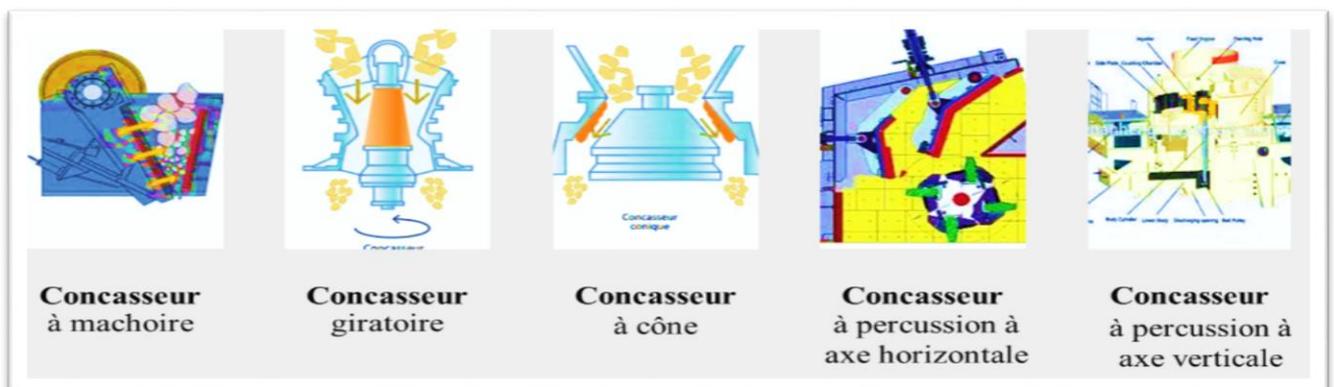
- ✚ **Concassage primaire** : utilisé pour réduire les gros blocs qui arrivent directement du site de la carrière ou du chantier (bloc rocheux d'environ 3 tonnes) jusqu'à 150-100 millimètres ;
- ✚ **Concassage secondaire** : les matériaux provenant du concassage primaire sont encore réduits par cette étape de concassage jusqu'à 25 millimètres ;
- ✚ **Concassage tertiaire** : pour donner des matériaux encore plus fins jusqu'à 5-2 millimètres.

Le concassage s'effectue au travers d'un concasseur. On distingue plusieurs types ; le choix du concasseur adéquat s'effectuera en fonction :

- ✚ Du type de la roche ;
- ✚ De la granulométrie finale recherchée.

Son nettoyage se fera au travers de l'air comprimé et du quartz. Un concasseur est une machine conçue pour réduire les grosses roches en petites pierres, graviers, ou poussière de roches. Il peut également réduire la taille d'un mélange solide de matières premières (comme le minerai), de sorte que ses différents composants puissent être séparés. Les concasseurs des opérations minières sont généralement classés suivant la finesse avec laquelle ils fragmentent le matériau de départ. Les concasseurs primaires et secondaires traitant les matériaux grossiers tandis que les concasseurs tertiaires réduisent les particules de minerai à des échelles plus fines. Chaque concasseur est conçu pour une taille maximale des matières premières. Afin de choisir un concasseur, plusieurs paramètres sont à prendre au sérieux tels que :

- ❖ **Le coefficient d'abrasivité et la dureté** : Il est primordial de connaître le matériau à concasser et ses caractéristiques, en particulier son abrasivité et sa dureté. Vous devez évaluer la résistance à la compression ou la force maximale que le matériau peut supporter avant de casser.
- ❖ **Les dimensions** : Il faut considérer les dimensions maximales à entrer dans la machine (longueur, largeur et épaisseur).
- ❖ **La granulométrie** : Il est nécessaire de définir le résultat souhaité, la granulométrie recherchée après concassage.
- ❖ **La capacité (le débit)** : Il faut déterminer la capacité de traitement (ou le débit) nécessaire par rapport à vos besoins. Celle-ci se mesure en tonnes/heure.



minerais), abrasifs (roches), grossiers et cassants. Particulièrement adapté au concassage primaire, il utilise la compression afin de réduire les particules. C'est le concasseur le plus populaire dans le monde de par sa conception rudimentaire, sa fiabilité et sa maintenance peu coûteuse. Il entraîne une répartition granulométrique uniforme, une production de très peu de poussière, une puissance consommée réduite, une haute résistance à l'usure, et une gestion de la granulométrie en sortie par vérins hydrauliques.

- ✚ **Concasseur giratoire (figure 8)** : c'est l'un des principaux types de concasseurs primaires dans les mines ou les usines de traitement du minerai. À travers la compression, il concasse les produits durs et abrasifs (roches) grossiers ou minces. Ce type de concasseur peut être utilisé pour un concassage primaire ou secondaire et allié à lui seul fiabilité et flexibilité. Il permettra donc d'obtenir des produits finis de qualité.
- ✚ **Concasseur à cône (Figure 8)** : utilisé majoritairement pour le concassage secondaire, à travers la compression, il concasse des roches mi-dures à dures et les roches abrasives. Il est largement utilisé dans la métallurgie, la construction, le

transport et l'industrie des matériaux de construction. On distingue deux types de concasseurs à cône ; les suspendus et les supportés (le concasseur à cône supportés étant meilleur). Il a l'avantage d'une construction fiable et robuste, d'une haute productivité et performance, d'un réglage facile et de faibles coûts opérationnels. Il favorise aussi la bonne forme des produits finaux, et il possède une protection contre les surcharges qui va permettre aux matériaux imbroyables de passer par la chambre de concassage sans endommager le concasseur.

✚ **Concasseur à percussion à axe horizontale (Figure 8) :** il utilise la percussion pour briser la roche contrairement aux concasseurs à mâchoires, giratoire et à cône qui utilisent la compression. Ce type de concasseur peut être utilisé en concassage primaire ou secondaire ou tertiaire selon les tailles des roches et technologies. Il peut être difficile de briser des cailloux de petites dimensions avec ce type de concasseur, et il est bien plus sensible à l'usure et à l'abrasivité des matériaux et n'est donc pas adapté à tous les types de roches. Il sera donc plus adapté aux roches tendres à moyennes, aux matériaux mous, élastiques, fibreux ou collants (couteau), aux matériaux durs et abrasifs (marteau). Le concasseur à percussion à axe horizontal est idéal dans les mines, les carrières, pour les opérations de recyclage ou encore de démolition. Il s'applique au broyage des minerais dans les industries du chemin de fer, de l'autoroute, de l'énergie, du ciment, des produits chimiques, et de la construction. Et il a comme avantage d'aboutir à une forme des grains excellente (grains cubiques sans tension et fissure), à une résistance à l'impact et à l'abrasion, il est économique et fiable et il possède une productivité élevée.

✚ **Concasseur à percussion à axe verticale (Figure 8) :** on l'utilise pour fabriquer des sables de qualité, d'agrégats bien formés et minéraux industriels. En effet, il permet de concasser encore plus finement les roches tendres à moyennes, les minerais, le ciment, les réfractaires, le clinker de bauxite, le sable, verre, le gravier de construction, le gravier, le quartzite, les matériaux de fer, les pierres, etc. Il favorise une consommation faible. C'est un appareil irremplaçable dans le domaine de l'écrasement du minerai car il possède une structure simple et rationnelle, le concassage s'y déroule par impact propre et percussion. Il présente une multitude d'avantages comme : le coût d'utilisation bas, le fonctionnement stable, le bruit de travail faible, l'efficacité de concassage haute.

#### **4. Broyage**

C'est l'action de réduire en très petites particules jusqu'à quelques micromètres. « L'art du broyage et de l'homogénéisation » fait d'un échantillon de laboratoire un échantillon représentatif, homogène à la finesse d'analyse : « Broyer aussi fin que nécessaire et non aussi fin que possible ». Pour obtenir un meilleur broyage, l'on jouera sur des facteurs essentiels :

- ✚ La capacité d'admission / quantité à broyer ;
- ✚ Le pourcentage de passant et de rebus ;
- ✚ La dureté du minerai ;
- ✚ Le temps de séjour.

En fonction de la qualité du matériau, différents principes de réduction des matériaux sont appliqués afin d'obtenir la finesse nécessaire. Les matériaux durs ou cassants, par exemple, sont mieux fragmentés par impact et frottement dans un broyeur planétaire à billes. Cependant

dans le cas des matériaux mous ou élastiques, la méthode de broyage avec un broyeur à couteaux est la plus adaptée. Sachant qu'il n'est pas toujours possible d'obtenir la finesse d'analyse requise en une seule étape lorsque les particules sont importantes, on pourra alors distinguer 3 types de broyages :

- ✚ **Le broyage grossier** : il permet d'obtenir des particules de l'ordre du mm (Concassage) ;
- ✚ **Le broyage fin** : les particules obtenues varient de 10 à quelques centaines de micromètres ;
- ✚ **Le broyage ultra-fin** : il est peu utilisé et n'est nécessaire que pour certains types de recyclage, très spécifiques.

Afin de réaliser ces différents types de broyage, des techniques adéquates suivantes sont utilisées :

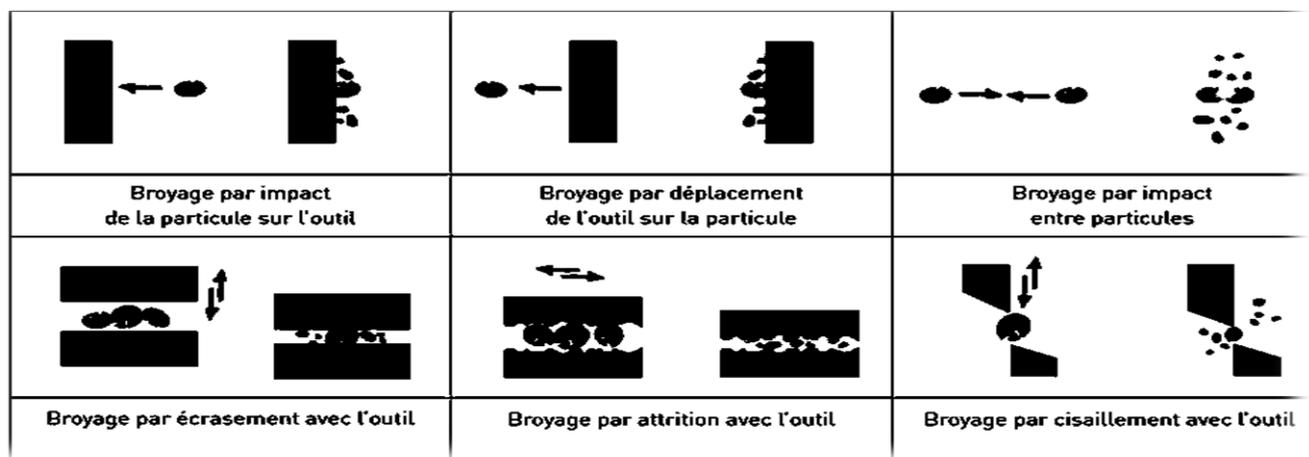


Figure 9 : présentation des différentes techniques de broyage (impact, écrasement, attrition, percussion, abrasion, usure et cisaillement)

Parmi ces différentes techniques de broyage, les plus répandues ou utilisées sont de l'ordre de trois : le broyage par cisaillement, par percussion et par écrasement.

- ✚ **Le broyage par cisaillement (Figure 9)** : c'est un traitement s'appliquant à des déchets solides, en général relativement friables. Il ne nécessite aucune préparation particulière des déchets (à part une certaine homogénéité de taille). Ce type de traitement est en particulier utilisé par les industries de fabrication de piles électriques et d'accumulateurs, de fils et câbles électriques, des industries de fabrication et transformation de papier et du carton.). Le broyage par cisaillement s'obtient par l'action de forces externes au matériau. Les machines utilisées comportent, en général, un rotor équipé de dents ou de couteaux qui travaillent en cisaillement, tranchage, éclatement ou déchiquetage.
- ✚ **Le broyage par percussion (Figure 9)** : cette technique est utilisée en particulier par les centrales thermiques, nucléaires, hydrauliques et autres centrales électriques. Elle concerne principalement les déchets de grenailage, les sels de trempe, les scories, les crasses, les réfractaires usés, les sables de fonderie usagés, les emballages souillés, les chutes de fabrication non inertes, les piles, batteries, accumulateurs déchargés. La fragmentation des pièces s'obtient en brisant le matériau par des chocs, à une vitesse

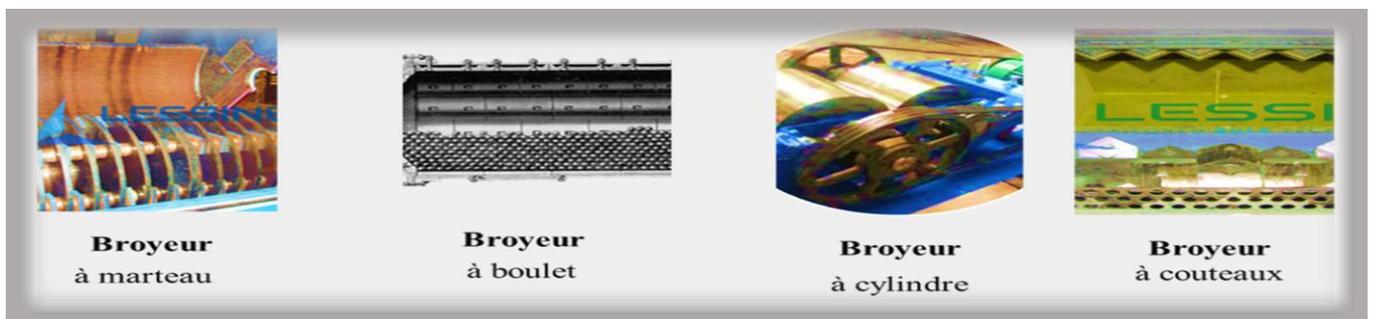
de 8 à 200 m/s. Il peut aussi être réalisé dynamiquement à l'aide d'éléments métalliques (marteaux, broches, ...), qui projettent le matériau contre des plaques de choc. Ce broyage est généralement utilisé en amont d'une unité de traitement et elle ne produit en théorie pas de déchets autres que les particules qu'elle fabrique et qui sont traitées par un processus en aval.

✚ **Le broyage par écrasement (Figure 9) :** comme son nom l'indique, résulte de l'action des plaques sur les roches.

TECHNIQUE DE BROYAGE	FINAL PARTICLE SIZE			
	Ultrafine 10 $\mu$	Fine 100 $\mu$	Moyen 1mm	Grossier 10mm
CISAILLEMENT				Broyeur à couteaux et Déchiqueteur
			Emetteur	
PERCUSSION	Broyeur centrifuge			
				Broyeur à percussion
			Broyeur marteaux-cylindre	
		Broyeur à marteaux		
ÉCRASEMENT	Broyeur à boulets			
				Broyeur à mâchoires
				Broyeur à cylindres

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des types de broyages et des types de broyeurs en fonction de la granulométrie finale recherchée

Selon le tableau ci-dessus, on distingue alors plusieurs types de broyeurs :



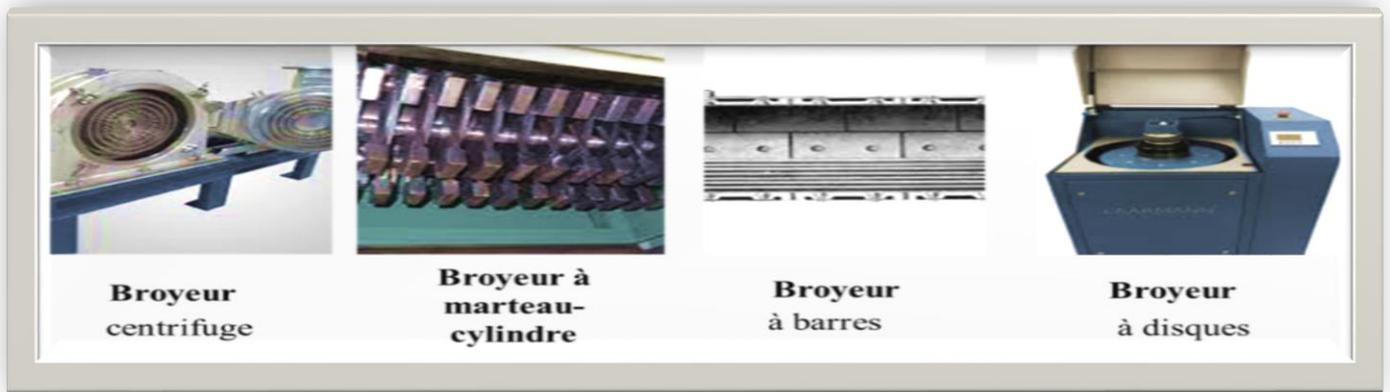


Figure 10 : Les différents types de broyeurs

- ✚ **Broyeur à marteau (Figure 10) :** ces broyeurs sont généralement utilisés pour réduire des produits secs, produits moyennement abrasifs, durs ou semi-durs par impact. La granulométrie finale peut aller de moyenne (20mm) à fine (200 $\mu$ m). Il résiste moins bien à l'usure, dans ce cadre d'utilisation, que les concasseurs à cylindres. On note également ici plusieurs avantages : un degré de réduction, son adaptabilité, une granulométrie uniforme à la sortie, un usage industriel intensif, un accès aisé pour l'entretien, le contrôle de l'usure.
- ✚ **Broyeur à boulets (Figure 10) :** il est utilisé pour les gros débits de broyage de nombreux matériaux quel que soit leur dureté. Ils servent au broyage grossier comme au broyage fin effectué par percussion, friction et attrition pour une finesse à la sortie allant jusqu'à 5 $\mu$ . Ce broyage peut se faire en voie sèche ou en voie humide et selon le débit souhaité par lot ou en continu. Les boulets ont une taille variant de 2 à 20 cm. Il existe trois principaux types de broyeurs à boulets : broyeur cylindrique, broyeur compound et broyeur cylindro-conique. Il présente de nombreux avantages à savoir : une souplesse d'utilisation, la possibilité de ventilation, chauffage ou refroidissement du tambour, une installation et entretien faciles, et in broyage en milieu humide ou sec..
- ✚ **Broyeur à cylindres (Figure 10) :** ce type d'appareil est souvent utilisé en pré-broyage. Outre le concassage des produits durs, abrasifs et moyennement abrasifs, il peut servir pour le concassage de produits mous, collants, élastiques ou fibreux. ; Pour un broyage primaire, grossier ou moyen. Le broyeur à cylindres permet l'écrasement et/ou le déchirement de la matière tout en gardant une distribution granulométrique resserrée. On en distingue en deux types, à dents lisses et à dents garnis. Le broyage génère très peu de fines. La force de compression entre les deux cylindres est assurée par des ressorts tarés ou pistons hydrauliques. Ce type de broyeur favorise une distribution granulométrique resserrée, on remarque aussi qu'il n'y a pas d'échauffement du produit, il réduit au minimum l'émission de poussières lors du broyage, ses ressorts de compression sont adaptés au produit broyé, et il garantit le passage de corps étrangers et/ou imbroyables sans endommager la machine.
- ✚ **Broyeur à couteaux (Figure 10) :** ils servent principalement au broyage matières souples, matériaux tendres, mi-durs, caoutchouteux, élastiques et fibreux par cisaillement. La présence d'une grille peut assurer un contrôle granulométrique à la sortie. Avec une précision et une netteté remarquable, la granulométrie à la sortie peut

aller jusqu'à 1mm. Il présente des avantages multiples à savoir : une conception simple, un nettoyage & entretien facile, un faible niveau de bruit, des couteaux interchangeables facilement, une grille pour contrôle granulométrique facilement interchangeable, et enfin une alimentation en continu. Et enfin il peut être utilisé dans les industries de métaux (aluminium, cuivre, ...)

- ✚ **Broyeur centrifuge (Figure 10) :** le broyeur Centrifuge sert à réduire les produits d'une dureté inférieure à 3 Mohs. Il permet d'avoir une granulométrie très fine à la sortie allant jusqu'à 10 µ. Le broyage est également généré par la collision entre les particules. Afin d'aménager la matière et de limiter l'échauffement, le produit est porté dans un grand flux d'air pendant le broyage. Il présente une multitude d'avantages comme : le fait qu'il soit totalement ajustable au produit traité, une désintégration d'agglomérés, pas ou peu d'échauffement du produit, la consommation de l'appareil est relativement faible d'énergie, une bonne stabilité de la machine, une granulométrie fine et homogène, et la génération d'un minimum de fines.
- ✚ **Broyeur à marteau – cylindre (Figure 10) :** pour broyer des matières humides, collantes ou difficiles, le broyeur à marteau-cylindre combine les technologies de l'écrasement et de la percussion pour assurer un degré de réduction élevé. Ce broyeur présente un degré de réduction élevé, il facilite l'accès pour le contrôle et l'entretien, on y perçoit aussi la présence d'un racleur pour garder le cylindre propre, et il permet la production d'un minimum de fines lors du broyage.
- ✚ **Broyeur à barres (Figure 10) :** il est utilisé pour le broyage grossier (concassage quaternaire), en particulier pour les produits durs et abrasifs (roches par exemple). Ce broyeur utilise des barres pour broyer les matériaux trop humides pour le concassage fin et le criblage à sec. Ce broyeur parvient à atteindre une finesse finale inférieure à 20 microns. Il est puissant et facilite un broyage rapide de grandes quantités, il possède des ailes standard des tambours de broyage de 5 à 43.4 l, un capot solide de protection anti bruit et un interrupteur d'urgence.
- ✚ **Broyeur à disques (Figure 10) :** les broyeurs à disques sont souvent utilisés pour réduire les matériaux durs, mi-durs, humides, cassants et fibreux. Le broyeur à disque peut être vibrant ou pas ; Il présente comme avantages : une granulométrie précise et un temps de broyage bref. Les broyeurs à disques sont la solution idéale de broyage fin dans la plage granulométrique moyenne, pour les solides mous à durs, résistants et sensibles à la température. Le matériau est fragmenté sous l'effet de compression et l'effet de cisaillement générés entre deux disques nervurés agissant l'un contre l'autre. Le broyeur à disques oscillants est la solution idéale de broyage ultrarapide pour atteindre la finesse d'analyse. Le nettoyage des gamelles s'effectuera avec **du quartz**, utilisé entre chaque échantillon pour éviter toute contamination et mélange entre les échantillons ; **l'air comprimé** sera aussi utilisé pour le nettoyage des gamelles et de l'espace de travail.

## 5. Contrôle qualité

En 1924 pour la première fois un service « assurance qualité » fut créé dans la société Bell Téléphone pour mieux satisfaire le client final. A cette époque dans cette société des personnes qui deviendront des maîtres à penser mondialement connus comme Stewart, Deming et Juran ont travaillé et développé la démarche « maîtrise statistique de la qualité ».

Jusqu'au début des années 40 du siècle dernier le service inspection (appelé souvent contrôle) avait la mission de vérifier la conformité des produits finis. Cela coûtait cher (beaucoup de vérifications) et n'était pas très efficace (les défauts étaient découverts à la fin du cycle de production). On commença à utiliser l'inspection à toutes les étapes de la production et certaines exigences devinrent obligatoires (y compris en réception). On obtenait une production finie avec beaucoup moins de défauts (ils étaient découverts assez tôt). En 1949 fut créée l'American Society for Quality Control (ASQC), société américaine pour la maîtrise de la qualité. Les années 60 et 70 virent l'apparition du service qualité, de l'amélioration continue, de la prévention, de l'utilisation quotidienne de la statistique en production, de l'implication de tout le personnel et de l'esprit d'équipe pour la qualité.

Dans sa démarche qualité, une entreprise peut inclure le contrôle qualité qui va permettre de savoir si les produits ou les services vendus par l'entreprise sont conformes : aux exigences du marché, à la demande du client, aux législations, et au cahier de charges de l'entreprise. Cette démarche volontaire permet à l'entreprise de répondre à des problématiques de qualité des produits dans un marché toujours plus exigeant et vise à identifier les potentielles non-conformités. Le contrôle qualité intervient une fois le produit fini, donc il analyse les conditions de retouche ou de rejet d'un produit. Il est effectué par un contrôleur qualité, qui peut contrôler :

- ✚ Les composants d'un produit ou la matière première dès la réception (audit) ;
- ✚ La production en cours de réalisation (assurance qualité) ;
- ✚ Les produits finis (contrôle qualité).

En général, cette procédure vise à répondre aux normes de qualité en vigueur, et apporter ainsi des labels ou certifications à l'entreprise ou au produit. Il existe différentes manières de réaliser un contrôle. En premier lieu, distinguons les méthodes. Ils en existent deux :

- ✚ **Le contrôle à 100%**, ou systématique : dans cette méthodologie, le contrôleur cherche à contrôler l'intégralité des pièces du lot.
- ✚ **Le contrôle par échantillonnage**. A l'inverse du contrôle à 100%, on ne contrôle qu'une partie du lot, un échantillon représentatif.

À la suite du contrôle qualité, le contrôleur qualité va rédiger un rapport sur le déroulement du contrôle (traçabilité). La pratique de programmes de contrôle qualité (**test QC et QSE**) est progressivement devenue chose commune depuis le début des années 2000.

- ✚ **Le test QC (Quality Control)** est une méthode de validation des méthodes et des mesures mises en place pour mesurer et maintenir la qualité d'un produit fabriqué en conformité avec son cahier de charges à travers des actions variées telles que : l'insertion des échantillons de contrôle dans les lots (standards, duplicata, blancs), les audits de bases de données et de laboratoires, etc. dans le cas du broyage et du concassage, ce test est effectué en évaluant la pourcentage de passant du 1<sup>er</sup> échantillon par lot.
- ✚ **Le Test QSE (Quality-Security-Environment)** dont les cibles sont différentes (le produit, le personnel, l'environnement), est un mode de management qui vise à mettre en place des actions dont le but est d'assurer la sécurité des salariés sur le lieu de travail. Son objectif étant d'améliorer la sécurité de travail tout en incluant la notion de performance. Cela peut être effectué à travers les séminaires sur la sécurité, des chartes, des affiches, etc.

## 6. Fire-Assay

Un **essai** dans la métallurgie et l'analyse chimique est un procédé utilisé pour déterminer les proportions de métaux précieux dans les minerais et d'autres substances métallurgiques telles que l'argent ou l'or. Il est important d'utiliser une méthode précise pour identifier les polluants présents dans un échantillon, surtout lorsque certains métaux en faibles concentrations indiquent un niveau élevé de pollution. Les métaux dosés doivent satisfaire à des normes de pureté strictes qui correspondent souvent aux contrats d'investissement existants.

**Fire-Assay** est une méthode qui a donc été initiée par la nécessité de déterminer géologiquement la quantité d'or présente dans le sol, les roches et les ruisseaux. C'est la méthode universellement reconnue et la technique la plus utilisée pour la détermination des traces (ppm) ou ultra-traces (ppb) d'or dans les minerais, les roches et les concentrés. C'est plus long, mais c'est généralement plus précis. Fire Assay est utilisé pour déterminer l'or dans tous les types d'échantillons de différentes tailles (10g, 30g et 50g) selon les teneurs en or prévues et le degré d'homogénéité attendu. Il se déroule en 3 étapes : **la Préparation, la Fusion et la Cupellation.**

### Préparation :

Le processus de Fire Assay commence par le broyage des échantillons en une poudre fine (à moins 75µm) suivi d'un mélange de ces échantillons à une poudre sèche constituée des produits chimiques (le Fondant). L'agent qui se charge du dosage choisira les réactifs chimiques à ajouter et la masse. L'échantillon est ensuite pesé avant que le fondant n'y soit ajouté. Dans les creusets, insérer environ 150g du fondant, dont les réactifs sont mentionnés ci-dessous (selon l'échantillon et sa couleur, d'autres réactifs seront ajoutés). Ajouter ensuite 10 à 50 g de l'échantillon ; insérer des blancs, des échantillons étalons et des standards afin de contrôler le procédé. Le mélange du fondant et de l'échantillon, sera fait par une spatule. Et le mélange devra être fait méticuleusement (ce mélange ne doit pas dépasser les 2/3 du creuset).

Les minerais d'origine naturelle sont fusionnés à haute température, l'ajout de fondant nous permettra alors de faire fondre ces minerais à une température ne dépassant pas 980 °C (le fondant aura donc pour rôle d'abaisser la température de fusion et de solubiliser les impuretés dans la scorie afin que les métaux précieux soient concentrés dans la base de plomb). Les composants chimiques de la poudre de fondant sont en général : PbO, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> (Borax), SiO<sub>2</sub>, Flour (réducteur), KNO<sub>3</sub> (si nécessaire), AgNO<sub>3</sub> (à ajouter uniquement aux échantillons contenant de l'or), etc.

	Propriétés	% pour obtenir un culot de plomb de 25g
PbO	Fondant basique et oxydant ; il réagit de tel sorte que : silice + impuretés = silicates ; il est réduit par la farine pour donner le plomb ; en excès il attaque le creuset	57 / 80
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	C'est un fondant basique, il réagit avec la silice pour former des silicates ; il facilite la formation durant la fusion des aluminates, des sulfures et des sulfates ; il est ajouté proportionnellement à l'échantillon.	26 / 40
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Fondant acide et il se combine aux oxydes des métaux, acides ou basiques ; abaisse le point de fusion des scories, il est très visqueux ; en excès il rend difficile la séparation culot-scorie	12 / 18

<b>SiO<sub>2</sub></b>	Composé acide et il se combine aux oxydes des métaux et au plomb ; protège le creuset de l'action du plomb ; en excès il entraîne la perte des métaux précieux ; il détermine la qualité du scorie	3,2 / 5
<b>AgNO<sub>3</sub></b>	Pour les échantillons de l'or, il aidera comme un collecteur d'or et il facilitera l'isolement	3 or more spoon
<b>La farine</b>	Elle favorise la production du plomb et possède un pouvoir réducteur d'environ 10-12	1,8 / 3
<b>KNO<sub>3</sub></b>	C'est un oxydant, il est utilisé pour oxyder les sulfures, en excès il entraîne le débordement de la charge due au dégagement gazeux ; si silice absente on aura la formation des Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (car on sera en milieu acide) et pour y remédier on y ajoute du SiO <sub>2</sub> ; il sert aussi à diminuer la masse du plomb	
<b>CaF<sub>2</sub></b>	Il améliore la fluidité de la scorie ;	

Tableau 2 : Tableau explicatif des différents rôles des constituants du fondant et leur masses respectives.

### La fusion :

Le mélange est chauffé dans un récipient en céramique ou en métal appelé creuset, qui le réchauffe à des températures extrêmes (allant de 1000 °C à 1200 °C). La température requise et le type de fondant utilisé dépendent de la composition de la roche dans laquelle les métaux précieux sont concentrés. La fusion prend environ 45 min, jusqu'à ce que toute la poudre fonde en une scorie de verre. Pour que cette fusion soit bonne, l'activité et la viscosité sont d'importantes propriétés à prendre en compte. En particulier la différence de densité entre les deux liquides : le plomb en fusion, et la scorie. Une fois la réaction terminée, le contenu est versé dans un moule et laissé pour refroidir.

Lorsque le fluide n'est pas visqueux mais plutôt pâteux, cela signifierait que le temps de fusion était trop court ou que la charge est trop basique (l'ajout de borax et de silice sera nécessaire). Et lorsque la température est trop basse (cela signifie que la viscosité sera trop élevée lors de la 2ème phase de fusion et que nous pourrions trouver les métaux précieux piégés dans la scorie).

Température	Fusion	Impact	Temps
800°C	Préchauffement		5 min
Diminution à 900°C	1 <sup>ère</sup> étape fusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fusion de la charge tout en restant visqueuse</li> <li>- Empêcher le plomb de se déposer</li> <li>- Décomposition de l'échantillon et diffusion des métaux précieux dans le plomb</li> <li>- Décomposition de l'échantillon et diffusion des métaux précieux dans le plomb</li> <li>- Dégagement du CO<sub>2</sub> et du CO</li> </ul>	20 min
Augmentation à 1000°C	2 <sup>ème</sup> étape fusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de la fluidité des scories</li> <li>- Formation des fines gouttelettes de plomb (contenant les métaux précieux)</li> <li>- Favoriser le dépôt au fond du creuset</li> </ul>	20 min

Tableau 3 : Tableau récapitulatif de l'étape de fusion

## Cupellation :

Après avoir retiré les creusets du four de fusion, verser le mélange dans des « cupels » (généralement, une tasse peu profonde faite de phosphore, de cendres osseuses ou de phosphate de calcium). On utilise cette combinaison de « cupels » pour fusionner les constituants de fondant et isoler les métaux précieux. Laisser refroidir le mélange pendant environ 20 min, puis le bouton de plomb sera retiré du fond. Ensuite, la séparation scorie-plomb sera faite en tenant compte de ne pas perdre de plomb (le bouton de plomb doit être pesé et la masse de ce dernier peut varier entre 15 et 60g).

Ensuite, enfourner les tasses à 950 °C pendant environ « 55 min à 2 heures » pour oxyder le plomb. Nous obtiendrons alors des perles d'or ou d'argent que nous laisserons refroidir puis aplatir afin de les peser et nous les transférerons dans des tubes à essais (Parfois, la présence de la gangue sur les perles de métaux précieux provoque une erreur de masse qui mérite l'attention de l'analyste; il faut donc la peser avant et après le lavage avec HNO<sub>3</sub>) et envoyer ces tubes pour une analyse plus approfondie de la teneur en métaux précieux à l'aide d'une technique d'analyse instrumentale, comme ICP-AES, SAA, ICP-MS, etc., selon le besoin.

**NB :** La Cupellation seule ne peut éliminer qu'une quantité limitée d'impuretés d'un échantillon, c'est pourquoi nous devrions ajouter une étape de fusion ou de scorification avant la Cupellation.

Température	Cupellation	Impact	Temps	Nombre de coupelles
800°C	Préchauffement			
Augmentation à 1000°C	Chauffage des coupelles	Pour éliminer toute trace d'humidité des coupelles Dégagement du gaz	Quelques minutes	20 à 24
Diminution à 820°C	Enfournage	Rapidement pour éviter la perte de matériaux Aération / ventilation	10 min	20 à 24
Augmentation de 20°C chaque 10 min	Fusion des coupelles		40 min	20 à 24
880°C / 900°C	Température de fin de fusion		10 min	20 à 24

Tableau 4 : Tableau récapitulatif de l'étape de Cupellation

## **7. Préparation chimique ou mise en solution**

Cette analyse consiste à peser la bille de métal résultant de la pyroanalyse de l'échantillon d'origine, suivi d'une attaque à l'acide nitrique (Tiekink et al., 2003). Cette analyse ne s'effectue que si la teneur en or obtenue par absorption atomique est supérieure à 5-10 ppm. La teneur en argent, si requise, est déterminée par différence de poids. Le bouton d'or étant récupéré de la Fusion – Cupellation, sera inséré dans des tubes à essais. À ces tubes

- ✚ On insèrera quelques gouttes de HNO<sub>3</sub> (cela dans le but de dissoudre l'argent et obtenir une solution contenant uniquement l'or) 1 ml dilué à 50% v/v.
- ✚ Ce mélange se fera sur bain de sable pour une température comprise entre 250°C et 300°C pendant quelques minutes.  
Lorsque l'attaque sur l'argent sera terminée, on procédera à l'ajout de 1 ml de l'eau régale, selon l'équation :



Équation 1 : équation de l'eau régale ou royal

On mixera le tout et le mettra à bain de sable pendant environ 15 à 30 minutes jusqu'à l'apparition de la couleur jaune significative de la présence de l'or en solution.

- ✚ L'ajout de l'eau déminéralisée se fera alors dans un tube à essais de 10ml jusqu'au trait de jauge et on laissera décanter le mélange. Il sera enfin envoyé au laboratoire d'Absorption Atomique à la flamme afin de déterminer la concentration (en ppm) d'or présent dans chaque tube.

### **8. La spectrométrie d'absorption atomique à la flamme (SAA à la flamme)**

La spectroscopie d'absorption atomique (SAA) est basée sur le principe que les atomes libres peuvent absorber la lumière d'une certaine longueur d'ondes. Cette analyse se fait sur tous les échantillons. La bille de métal est transférée dans un tube à essai auquel 1 ml d'acide chlorhydrique est ajouté. Un bain-marie permet de dissoudre cette perle. Cette solution est ensuite analysée à l'absorption atomique. Cette dernière mesure les absorptions de lumière par l'atome libre. Les longueurs d'onde (domaine du visible) émises par chaque élément sont captées par un spectromètre (Kryazhov et al., 2014). La longueur d'onde de l'or étant 496 nanomètres. Après la lecture sur l'appareil de l'absorbance émise, à travers un logiciel on calculera la concentration en ppm de l'or contenu dans chaque tube à essais. Et les résultats seront reconstitués sous forme de base de données et envoyés au client qui a sollicité l'analyse.

## **B. Approche Lean Six Sigma et outil DMAIC**

La règle Lean Six Sigma (LSS) est une méthode de management qui vise à améliorer la qualité et l'efficacité des processus de fabrication. C'est une approche selon la performance (en termes de productivité, de qualité, de délais et de coûts). Elle vise à identifier la cause d'un problème et à mettre en œuvre une solution efficace basée sur des observations et des faits, et non sur de simples suppositions, l'objectif principal étant de bien cerner le problème à travers des analyses de processus ou de mesures. Elle nous permettra donc, de nous rassurer sur la fiabilité du processus tout entier. Elle présente comme avantages :

- ✚ L'augmentation des bénéfices : en produisant plus rapidement et efficacement sans réduire la qualité, sans augmenter les coûts et à un temps minimal.
- ✚ La réduction des coûts : en supprimant les gaspillages et en éliminant des défauts sur un produit qui engendrent un retour client.

- ✚ L'amélioration de l'efficacité et du rendement : en créant des processus plus efficaces et en maximisant les efforts pour délivrer un produit satisfaisant du premier coup ; ce qui entrainera une production plus élevée de produits et la satisfaction des clients.
- ✚ La création d'un sentiment d'appartenance et de responsabilité : C'est un bon moyen de montrer que chaque personne au sein de l'entreprise est importante ainsi l'équipe sera alors plus motivée et plus performante.

Comme son nom l'indique, la méthode Lean Six Sigma est l'association des principes des méthodologies Lean management et Six Sigma, qui sont connues et reconnues pour leur efficacité dans l'amélioration de la performance logistique de l'entreprise. Alors que le Six Sigma va venir réduire les variations observées sur le produit en améliorant en continu la qualité des produits fabriqués, le Lean va se concentrer sur l'élimination de tout ce qui est superflu (la non-valeur rajoutée) dans les processus de production ; en réduisant le temps de travail et le temps d'attente. Le processus gagnera ainsi en efficacité.

- ✚ **Lean** : mise en place au sein des usines Toyota au cours des années 70 (TPS Toyota Production System), sorti du Japon en 1980, théorisé aux USA dans les années 90 et utilisé en Europe dans les années 2000, se lie au Management et se concentre plus sur une gestion sans gaspillage. La méthode Lean permet de fournir un travail de grande qualité avec un minimum d'argent, de ressources et de temps ; donc en bref il favorise l'autonomie du personnel. Son objectif premier étant d'améliorer au mieux la performance des processus en exploitant les méthodes, les techniques et les pratiques déjà à disposition dans l'entreprise afin de faire toujours plus vite et mieux tout en optimisant les conditions de travail pour le personnel.
- ✚ **Six Sigma** : née au sein du groupe Motorola dans les années 80 et développée par GE dans les années 90 est fondée sur des données fiables et mesurables afin de tendre vers le zéro défaut. La méthode Six Sigma offre des techniques et des outils (statistiques) pour améliorer la fiabilité des processus et éliminer la variabilité dans le but de réduire les défauts. La méthode se base sur les cinq étapes de l'outil DMAIC (Définir, Mesure, Analyse, Innovation, Contrôle), qui s'appuie sur :

- ❖ Des mesures fiables mesurant la performance du processus en entier (temps, énergie, rendement, etc.) ;
- ❖ Des outils statistiques pour analyser les causes sources influant sur la performance du processus ;
- ❖ Des solutions attaquent ces causes sources ;
- ❖ Et des outils pour contrôler que les solutions ont bien l'impact escompté sur la performance du processus.

**La méthode (DMAIC)** est basée sur l'analyse des données permettra d'optimiser, mais également de stabiliser les processus de l'organisation et des services dans le but ultime d'identifier les processus nécessitant une amélioration et d'agir en conséquence. Il s'agit d'une méthode d'investigation expérimentale, analytique et scientifique exécutée en mode projet. Elle se déroule généralement en 5 phases à savoir :

- ✚ **La définition** : Cette première étape permet de cadrer le projet en déterminant son périmètre, les résultats attendus, les ressources et les délais nécessaires. Donc c'est la phase où on pose le problème : quelle partie du processus global pose problème ? Le problème est-il sérieux ? S'agit-il d'un problème à traiter immédiatement ? Plusieurs

outils peuvent être utilisés pour mieux illustrer cette phase : le diagramme CTQ (Critical To Quality), le modèle QQQCP (Quoi, QUI, Où, Quand, Comment, Combien, Pourquoi ?), ou encore la charte de projet (objectif SMART).

- ✚ **La mesure** : cette phase vise à évaluer la performance du processus actuel afin de récolter des données sur ce qui pose problème (leur variabilité). Elle consiste en quelque sorte à réunir différents types d'informations afin de mieux évaluer la situation actuelle de l'entreprise à l'aide de chiffres et de données, permettant ainsi de mieux quantifier le problème et de pouvoir comparer les résultats au fil du projet. Cette phase utilise divers outils afin d'évaluer les processus de manière précise ; ces outils sont en quelque sorte : une matrice cause-effet, le diagramme SIPOC, la VSM (Value Stream Mapping), la MSP (Maîtrise statistique des processus), ou encore les cartes de contrôle.
  
- ✚ **L'analyse** : vise à analyser les données collectées lors de la phase précédente afin d'identifier les points d'améliorations sur lesquels travailler avec le plus d'efficacité. Elle consiste à étudier en détails les mesures obtenues au cours de la deuxième phase. Le Six Sigma repose largement sur l'analyse des chiffres et des statistiques et cette phase d'analyse permet donc de se baser sur les mesures récemment obtenues pour mieux comprendre la source des problèmes, qu'il s'agisse de délais, d'inefficacité ou d'un taux de défauts trop élevé. Les outils qu'on utilise dans cette phase sont divers, à savoir : les Test d'hypothèse, le diagramme d'Ishikawa, le diagramme de pareto, la corrélation / régression ou encore les plans d'expériences.
  
- ✚ **L'innovation / Amélioration** : pour identifier et mettre en œuvre les solutions d'amélioration afin d'éliminer les problèmes rencontrés. Plusieurs étapes peuvent être nécessaires afin de tester et de valider les solutions les plus adéquates, ce qui nécessite de la créativité, de la co-création, de la réflexion et de l'expertise. Les outils comme l'AMDEC (Analyse des modes de défaillances) et le Brainstorming sont priorités.
  
- ✚ **Le Contrôle** : il s'agit de l'étape la plus délicate ; Il est essentiel de suivre les solutions mises en place afin d'éviter un retour en arrière et d'assurer une amélioration de la qualité à long terme. Et pour se faire on pourra procéder par autocontrôle ou encore opter pour un contrôle par échantillonnage, les 5S ou encore effectuer une matrice de contre-mesures.

### III. PRÉSENTATION DU SUJET

#### A. Introduction

La fragmentation des minerais ou encore appelée préparation mécanique a fait depuis longtemps l'objet d'innombrables recherches théoriques. Une fragmentation supposée réalisée de telle sorte qu'aucun des fragments obtenus ne dépasse une dimension préalablement définie. La préparation mécanique en elle-même est constituée de 5 étapes majeures : **Le séchage, le concassage, le broyage, la division et le tamisage.**

Dans l'optique d'une amélioration de la qualité, de l'efficacité, de la sécurité et de la fiabilité du processus de préparation mécanique des échantillons (équipement, environnement, méthodes et personnel) au sein de l'entreprise, la méthode Lean Six Sigma (LSS) plus précisément l'approche DMAIC a été adoptée. Elle se déroule en 5 phases (Définition, Mesure, Analyse, Innovation et Contrôle). Cette approche est basée sur l'analyse des données qui permettra d'optimiser, mais également de stabiliser les processus de l'organisation et des services. En bref, elle nous aidera à identifier la (les) cause (s) d'un problème et à mettre en œuvre une (des) solution (s) efficace (s) basée (s) sur des observations et des faits, et non sur de simples suppositions.

#### B. Définition de la Problématique

La phase « Définir » est la toute première étape de la méthode DMAIC. Elle est donc essentielle et le succès de l'approche Six Sigma repose entièrement sur la précision de son exécution. Pour cela, le processus doit être clairement défini en le cartographiant par exemple à l'aide de l'outil QOOQCCP et une charte de projet, afin de pouvoir repérer les anomalies ou les dysfonctionnements plus facilement.

##### 1. Outil QOOQCCP

Cet outil nous permettra de décrire une situation via des questions clés pour une définition précise du problème (**Quoi, QUI, Où, Quand, Comment, Combien, Pourquoi ?**)

	Réponses attendues	Questions clés	Réponses selon l'étude faite
Qui ?	Responsable, acteur unités de production, services, opérateurs, fournisseurs	Qui est concerné ? Qui a le problème ? Qui est intéressé par le résultat ?  Qui est concerné par la mise en œuvre ?	Centre de recherche Reminex et le personnel.
Quoi ?	Actions, procédés, objet, méthode, opération...	De quoi s'agit-il ?  Quel est l'état de la situation ?	Optimisation du processus de préparation mécanique, de l'équipement, des méthodes et de l'environnement du travail  Alarmante

		Quelles sont les caractéristiques ? Quelle sont les conséquences ?	Processus lent, couteux et non fiable Optimisation du temps, de l'efficacité, de la fiabilité, de la sécurité du processus et du rendement de l'entreprise.
<b>Où ?</b>	Lieux, Local, distance, service, atelier, poste, machine...	Où cela se produit-il et s'applique-t-il ?  Où le problème apparait-il ?  Dans quel lieu ? et Sur quelles machines ?	Au bloc de préparation mécanique  Sur le matériel et machines lors du séchage, concassage, broyage, division et tamisage Au niveau des chariots de séchage, du concasseur à machoire, du broyeur à disque, des diviseurs à riffles et sur le tamis.
<b>Quand ?</b>	Mois, jour, heure, période, durée	Quand le problème a-t-il découvert ? Quelle et sa fréquence ? Quand se produit le risque ?	Lors du stage Régulière Lors de la manipulation des équipements.
<b>Comment ?</b>	Méthodes, modes opératoires, organisation de travail, procédures, équipement matières première	De quelle manière ? Dans quelles conditions de circonstances ? Comment procède-t-on ?  Avec quelles méthodes, quels moyens ? Comment mettre en œuvre les moyens nécessaires ?	Par des pannes, par un surchauffage, etc. Lors de la manipulation  On procède par la méthode Lean Six Sigma plus précisément par l'approche DMAIC Par des essais, des tests statistiques, des tests hypothèses, la méthode des 5S, par les chartes, etc.
<b>Pourquoi ?</b>	Pour faire l'analyse critique, à chaque question	La poser pour toutes les questions Quoi ? Qui ? Où ? Comment ? Pourquoi ?	Afin d'optimiser le processus en entier, d'assurer la sécurité et l'autonomie du personnel, d'améliorer le rendement de l'entreprise, de diminuer le taux de contamination et la perte d'information et d'accentuer la confiance entre les équipes.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif de l'outil QQQCCP appliqué à notre étude

## 2. La charte de projet

Cet Outil permettra de formaliser le projet de résolution de problème. Il s'inspirera des questions posées précédemment (QQOCQQP) afin :

- ✚ D'identifier le problème et son importance ;
- ✚ De détailler le projet ou le plan d'action à mener face à cette situation ;
- ✚ De définir les objectifs clés à atteindre ;
- ✚ Et d'encourager la participation de tous.

Les étapes clés de cette charte se reposent sur :

- ✚ L'identification du problème et ses sources (méthode QQQCCP) ;
- ✚ L'attribution à une équipe (stagiaire) la tâche de mener à bien le travail ;
- ✚ L'établissement des objectifs SMART (Spécifique–Mesurable–Atteignable–Relevant–Temporelle) ;
- ✚ La planification du travail.

## Objectifs SMART

Pour aider à la définition des cibles les mieux adaptées, le cadre que propose l'outil SMART est pertinent et sa mise en œuvre oblige à être très clair sur les étapes et les résultats d'un plan d'action. En ce sens, SMART est une véritable aide à l'élaboration de la stratégie d'entreprise. L'utilité de chaque indicateur repose sur la cohérence du projet et résulte de la précision de l'objectif fixé. Cette méthode permet donc de poser des jalons et de mesurer la performance. Ces objectifs doivent donc être :

- ✚ **Spécifiques** : pour des objectifs qui ne sont « ni vagues », « ni trop générales » mais plutôt précis et clairs.
- ✚ **Mesurables** : c'est pour tout objectif qui peut être quantifié et qualifié c'est-à-dire un objectif dont on peut définir le seuil, le niveau, ou une valeur à atteindre.
- ✚ **Atteignables (réalistes)** : pour un objectif concret, possible à atteindre. Il énonce non pas ce que l'on veut faire, mais ce que l'on peut faire compte tenu des moyens dont dispose l'entreprise d'une part et des capacités de l'employé d'autre part.
- ✚ **Relevant (pertinent)** : ce point touche plus à la rentabilité de l'entreprise, et à son image.
- ✚ **Temporelle (délais et date butoir)** : Pour être efficace, tout objectif et tout plan doit s'établir avec des délais de réalisation. Disposer d'un calendrier permet aussi de réfléchir aux priorités et de les hiérarchiser.

Dans le cas de notre étude, nous nous fixerons ces objectifs :

- ✚ Réduire le temps de broyage des échantillons à environ 30%, afin de voir l'évolution en termes d'énergie et de coûts.
- ✚ Réduire le taux de perte des échantillons à environ 50%.

## Planification du travail

- ✚ Etude bibliographique sur la préparation mécanique des échantillons ;
- ✚ Familiarisation avec le plan de travail, l'appareillage et les différents modes opératoires ;
- ✚ Récupération des échantillons et leur homogénéisation ;
- ✚ Préparation mécanique de ces échantillons (séchage, broyage, tamisage et division)
- ✚ Fusion-Cupellation ;
- ✚ Préparation chimique des échantillons et analyse SAA à la flamme ;
- ✚ Récupération des données ;
- ✚ Traitements statistiques, interprétation et conclusion.
- ✚ Détection des problématiques liés au processus de préparation mécanique ;
- ✚ Application de la méthode DMAIC ;
- ✚ Comparaison des résultats avant et après ;
- ✚ Conclusion de l'étude.

## C. Mesure

C'est la deuxième étape du DMAIC. C'est une étape particulièrement complexe dont l'objectif principal consiste à recueillir des données dans le but de mieux quantifier le

processus et comprendre la manière dont il fonctionne. Cette phase contribue à déterminer l'origine précise du problème et à obtenir des données fiables sur lesquelles baser le reste de l'étude DMAIC. Pour cela **les outils SIPOC et VSM (value Stream Mapping)** seront utilisés.

### 1. Valeurs ajoutées, et valeurs non ajoutées

Au départ, nous commencerons par détailler en profondeur le processus de préparation mécanique (les étapes, les sous-étapes et les sous-sous-étapes) à travers les valeurs ajoutées et les non valeurs ajoutées (nécessaire et non-nécessaire) afin de faire ressortir les phases essentielles et les phases de gaspillage.

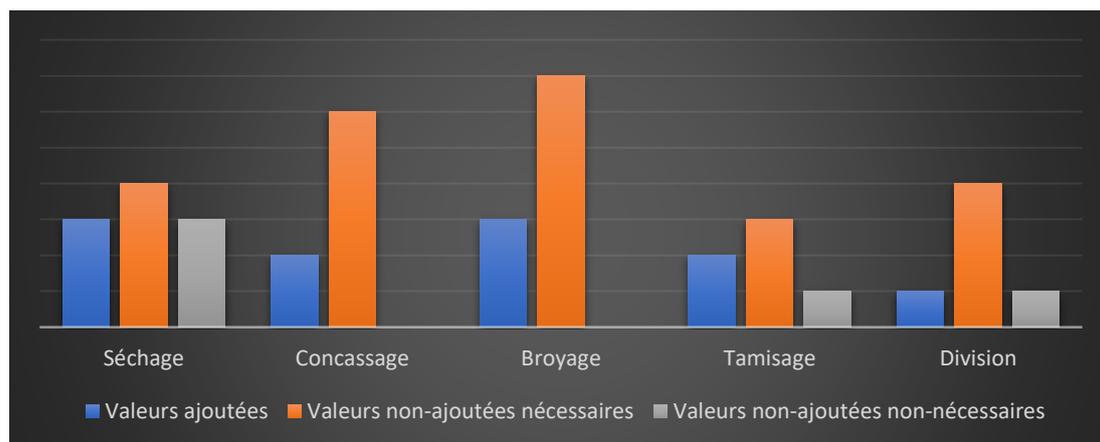
- ✚ **La valeur ajoutée** étant toute tâche du processus effectuée par l'entreprise et que le client accepte de payer.
- ✚ **La non-valeur ajoutée nécessaire** est une tâche dans le processus que le client ne souhaite pas payer. Mais elle présente un intérêt capital pour l'entreprise de telle manière que si elle n'est pas exécutée, le processus a une très forte chance d'être arrêté.
- ✚ **La non-valeur ajoutée non-nécessaire** quant à elle est une tâche que l'on peut qualifier de redondante, d'inutile ou de gaspillage.

Procédés	Description	Valeurs ajoutées	Non valeurs ajoutées nécessaire	Non-valeur ajoutée
Séchage	Réception des échantillons	✘		
	Première pesé		✘	
	Enregistrement manuel			✘
	Port des EPI (gants, lunettes, bottes et blouse)		✘	
	Rédaction manuelle des étiquettes			✘
	Placement des échantillons sur les chariots et séchage dans l'étuve	✘	✘	
	Seconde pesé		✘	
	Enregistrement manuel			✘
	Enregistrement logistique	✘		
Concassage	Port des EPI (gants, lunettes, bottes, masque, bouchons d'oreille et blouse)		✘	
	Nettoyage de la machine par le quartz et l'air comprimé		✘	
	Evaluation de la taille des ores		✘	
	Pré-concassage (marteau)		✘	
	Activation de la voute		✘	
	Concassage	✘		
	Homogénéisation		✘	
	Contrôle qualité au tamis de 2 mm (100g ech ou plus)	✘		
Broyage	Port des EPI (gants, lunettes, bottes, masque, bouchons d'oreille et blouse)		✘	
	Choix de la gamelle		✘	
	Nettoyage de la machine et de la gamelle par le quartz et l'air comprimé		✘	
	Insertion des échantillons dans les gamelles puis dans le broyeur (définir le temps de broyage)	✘	✘	
	Nettoyage du plan de travail et du matériel grâce à l'air compressé		✘	
		Préparation des étiquettes et des plastiques (en fonction de		✘

	masse de l'échantillon à broyer)			
	Homogénéisation		×	
	Division (en fonction de la taille de l'échantillon)	×		
	Contrôle qualité au tamis de 75µm (10g ech)	×		
Tamisage	Port des EPI (gants, lunettes, bottes, masque et blouse)		×	
	Nettoyage des tamis grâce à l'air comprimé		×	
	Tamisage	×		
	Pesé		×	
	Enregistrement manuel			×
	Enregistrement logistique	×		
Division	Port des EPI (gants, lunettes, bottes, masque et blouse)		×	
	Nettoyage du plan de travail et du matériel grâce à l'air comprimé		×	
	Homogénéisation		×	
	Division simple	×		
	Préparation des étiquettes et des plastiques		×	×

**Tableau 6** : Tableau récapitulatif du processus de préparation mécanique listant les valeurs ajoutées et les non-valeurs ajoutées (nécessaires et non-nécessaires) au processus de préparation mécanique des échantillons.

Selon le tableau ci- dessous on peut déduire les estimations suivantes :



**Figure 11** : figures représentatives du pourcentage les valeurs ajoutées et non valeurs ajoutées lors du processus de préparation mécanique.

### Interprétation

- ✚ Le broyage, le séchage, le concassage et le tamisage sont les étapes les plus lucratives. Elles constituent la valeur ajoutée du processus de préparation mécanique. En premier on retrouve le broyage et le séchage, et en second le tamisage et le concassage. Donc il faudra agir le plus sur ces différentes phases afin d'avoir une influence sur le rendement de l'entreprise.
- ✚ Pour le cas des valeurs ajoutées nécessaires, on peut dire que les deux principales étapes représentatives sont le concassage et le broyage. Le broyage constituant l'étape clé et essentielle du processus d'extraction des minerais ; c'est le processus consommant le plus d'énergie en moyenne. Il prend en charge des matières déjà réduites (<10 mm) et porte les granulométries jusqu'à des dimensions micrométriques.

On note que c'est sur les valeurs ajoutées nécessaires que se basera le plus notre étude afin d'optimiser le processus de préparation mécanique des échantillons. Donc on priorisera le broyage et le concassage des échantillons, puis la division et le séchage et enfin l'étape de tamisage.

- ✚ Et enfin en fonction de la représentation des valeurs ajoutées non-nécessaires, on pourra constater que l'étape contenant le plus de gaspillage est celle de séchage, suivie par l'étape de division et de tamisage. Ce gaspillage touche plus le côté manuel du processus (enregistrement des pesées et préparation des étiquettes). Une automatisation (machine) résoudra ce problème très efficacement.

## 2. Outil SIPOC

**SIPOC** pour (Supplier, Inputs, Process, Outputs et Customer) permettra de cartographier le processus à améliorer de bout en bout, de le documenter, de réellement cerner le périmètre du projet ainsi que les acteurs concernés et décrire une situation présente et future. SIPOC est pour :

- ✚ **Supplier** : celui qui fournit les entrées du processus (interne/externe).
- ✚ **Inputs** : sont les éléments externes au processus et nécessaires pour le fonctionnement du processus (Non-valeur ajoutée nécessaire).
- ✚ **Process** : c'est la suite d'activités, étapes, tâches et opérations nécessaires (sans entrer dans les détails) pour délivrer le produit (Se limiter à 5/7 étapes principales).
- ✚ **Outputs** : sont les biens ou les services qui résultent du processus (avec Valeur Ajoutée) à destination des clients (ou bien pour d'autres processus en aval).
- ✚ **Customer** : étant celui à qui est destiné le produit.

L'outil SIPOC nous permettra de nous concentrer sur les valeurs ajoutées, et les non-valeurs ajoutées nécessaires afin de cerner au mieux le périmètre du projet.

Supplier	Inputs	Process	Outputs	Customer
	Port des EPI	Réception des échantillons et leur enregistrement	Enregistrement de la demande	Laboratoire
	Mode opératoire	Séchage	Base de données	Client
			Analyses	
Entreprise	Propreté du lieu de travail	Concassage	Echantillons non conformes ou conformes	
	Voute	Tamisage		
	Homogénéisation des échantillons	Broyage		
	Préparation des étiquettes	Tamisage		
	Cahier Technique (registre)	Division		

Tableau 7 : Tableau Descriptif de la méthode SIPOC

### 3. Outil VSM (Value Stream Mapping)

Cet outil va nous permettre de cartographier les flux sur toute la chaîne de valeur. Il est utilisé dans le cadre de l'analyse du processus **en mettant en avant la situation réelle, en identifiant les gaspillages et le moyen de les éliminer, et en définissant le processus finale (idéale)**.

L'outil VSM chiffre le processus en représentant le temps de chaque procédés et le temps entre chaque procédé. On se basera sur lui afin de pouvoir détecter les changements suite à la suppression des gaspillages et à l'amélioration du processus (non-valeurs ajoutées nécessaires) et d'aboutir à ce que l'on souhaite réellement.

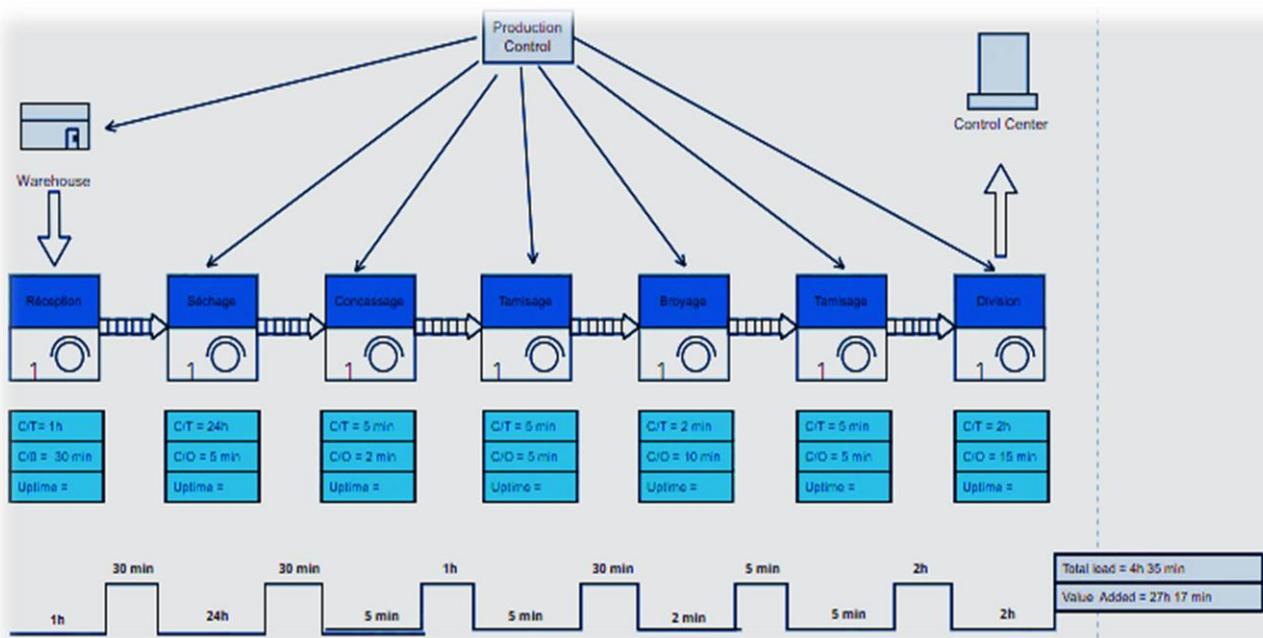


Figure 12 : Figure représentant le VSM de la situation réelle sans amélioration sur un traitement de 5 kilos d'échantillons

**Interprétation :** Selon le graphique représentant la VSM de la situation réelle, on peut observer que le traitement d'environ 5 kilos d'échantillons prend environ 32h donc une journée et demi. Le temps entre étapes prenant le plus temps (environ 28h).

#### D. Analyse

Cette troisième phase du DMAIC est fondamentalement reliée à la précédente car elle consiste à analyser les données qui ont été recueillies au cours de l'étape de « mesure ». Grâce à ces données, il est plus facile de repérer la ou les sources du problème et de quantifier l'écart entre la situation présente et la situation souhaitée. Pour cela les outils (le **diagramme d'Ishikawa** et **Diagramme de Pareto**) seront utilisés.

Précédemment on a pu constater que **les phases de concassage et broyage** sont celles qui nécessitent le plus une optimisation, **suivi des phases de séchage et de division**, et enfin celle **de tamisage**. L'étude précédente nous a permis de détailler le processus et de prioriser les phases nécessitant le plus une amélioration.

## 1. Diagramme d'Ishikawa

Le **Diagramme d'Ishikawa** nous permettra de faire un inventaire, de classer, et de hiérarchiser les différentes causes racines qui ont une influence sur cette situation (problèmes rencontrés). Dans le domaine de la qualité et de la production, les 5M sont fréquemment utilisés afin d'observer le problème sous cinq aspects différents :

- ✚ Main d'œuvre : les collaborateurs, leurs compétences...
- ✚ Matières : les matières concernées, la qualité... Pour une fabrication, les composants entrant dans l'élaboration du produit.
- ✚ Matériels : Les moyens de production, les équipements, etc.
- ✚ Méthodes : les techniques, les procédures, modes opératoires, etc.
- ✚ Milieu : l'environnement de travail, la concurrence, etc.

	Causes					Effet
	Matière	Machine	Méthode	Main d'œuvre	Milieu	
<b>Séchage</b>		Trilles de four	Pas adaptée à tous les échantillons			Contamination entre les échantillons Altération de la composition chimique des échantillons (séchage excessif)
<b>Division</b>		Diviseurs pas adéquats, sachets utilisés Diviseurs mal nettoyés		Rapidité du personnel  Manque de concentration du personnel	Table de division pas adapté lieu de travail	Perte de matière Contamination des échantillons Altération de la composition physique des échantillons (fractions grossières) Fautes opératoires accidentelles
<b>Concassage</b>	Taille élevée	Défectuosité de la machine				Hétérogénéité des échantillons Accidents
<b>Broyage</b>	Quantité élevée dans les gamelles	Temps de broyage mal défini, taille et type des gamelles petites Type de gamelle Surchauffe des gamelles Brosses pour nettoyage des gamelles	Mal défini Temps de broyage >30	Rapidité	Espace de travail restreint	Consommation d'énergie élevée Surchauffage des gamelles Perte de matière Altération de la composition physique des échantillons (fractions grossières)
<b>Tamissage</b>		Nettoyage des mailles du tamis avec de l'air comprimé insuffisant				Contamination des échantillons

Figure 13 : Tableau récapitulatif mettant en exergue les différentes causes de défaillances et leurs effets sur le processus de préparation mécanique des échantillons.

## 2. Diagramme de Pareto

**Le diagramme de Pareto** nous permettra de représenter graphiquement l'importance des différentes causes citées ci-dessus. Ce diagramme va mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effets et ainsi de prendre des mesures ciblées pour pouvoir améliorer la situation. C'est un diagramme en colonnes, exposant et classant, par ordre décroissant d'importance, les causes ou problèmes. La hauteur des colonnes est alors proportionnelle à l'importance de chaque cause.

**Le principe de Pareto**, aussi appelé loi de Pareto, principe des 80-20 ou encore loi des 80-20, est une observation selon laquelle environ 80 % des effets sont le produit de seulement 20 % des causes.

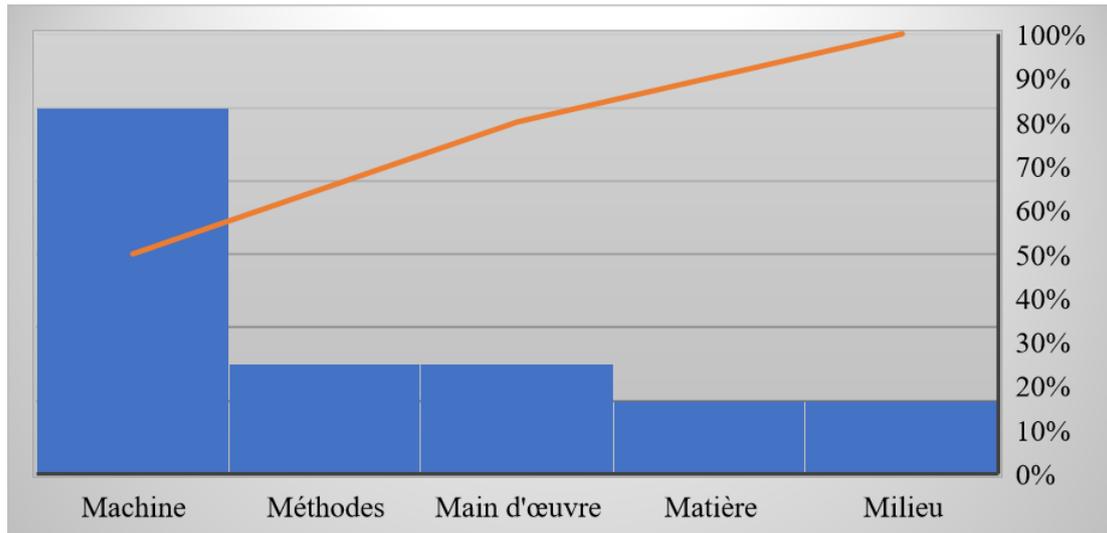


Figure 14 : Diagramme de Pareto

**Interprétation :** Ce graphique fait apparaître les causes les plus importantes qui sont à l'origine du plus grand nombre d'effets. D'après ce graphique on peut conclure que le matériel est la source première des problèmes rencontrés lors des différentes étapes de la préparation mécanique des échantillons. On jouera donc sur l'amélioration du matériel afin de parvenir aux objectifs SMART fixés plus haut.

## E. Innovation ou Amélioration

À ce stade, les sources du problème ont été clairement définies et identifiées. C'est la période d'activité. Elle consiste à trouver en effet des solutions en mesure de régler les problèmes définis grâce aux trois étapes précédentes. Cette étape ne consiste pas uniquement à définir les solutions, mais elle consiste également à les tester afin de s'assurer de leur viabilité, puis de trouver le moyen de les implémenter de la manière la plus adaptée possible. Cette étape doit prendre en compte la situation actuelle et la situation finale souhaitée. Nous allons donc nous pencher sur l'exécution de divers tests afin de déterminer quelles solutions sont les plus pertinentes, avant de nous pencher sur leur implémentation. **L'outil brainstorming** nous sera très utile à ce stade, car il va nous permettre de définir un nombre important de solutions variées multipliant ainsi les chances de trouver la solution la plus adéquate.

## 1. Brainstorming

C'est une méthode simple, facile à mettre en œuvre pour la génération d'idées, son objectif étant de susciter le plus d'idées possibles surtout innovantes et nouvelles. On proposera alors certaines idées, qu'on illustrera par la suite. Ces idées seront prioritisées en fonction des résultats obtenus sur le diagramme de pareto. Donc on s'attaquera **d'abord au matériel en priorité**, ensuite **aux méthodes, à la main d'œuvre, à la matière et au milieu**.

	Effets	Solutions
Séchage	Contamination entre les échantillons	Opter pour les chariots à étuves le plus fermé possible
	Altération de la composition chimique des échantillons (séchage excessif)	Faire une étude sur le temps adéquat de séchage des ores
Division	Perte de matière	Opter pour un autre type de diviseurs à ruffles
	Contamination des échantillons	Opter pour un nettoyage journalier du plan de travail
	Altération de la composition physique des ech (fragments grossiers)	
	Fautes opératoires accidentelles	Rester concentré
Concassage	Hétérogénéité des échantillons	Opter pour un autre modèle de Concasseur (neuf)
	Accidents	
Broyage	Consommation d'énergie élevé	Opter pour un broyage à 100µm au lieu d'un broyage à 75µm
	Surchauffage des gamelles	Optimiser le temps de broyage de tel sorte qu'il ne dépasse pas 1 min
	Perte de matière	Après chaque 2h d'utilisation de la machine, la laisser au repos pendant au moins 1 h
	Altération de la composition physique des ech (fragments grossiers)	Opter pour un nettoyage journalier du plan de travail et changement des brosses hebdomadairement ou opter pour des brosses en silicone
Tamisage	Contamination des échantillons	Changement hebdomadaire de tamis

Tableau 8 : Tableau des effets et les solutions adaptées à ces derniers

### Matériel

C'est la principale cause des effets (problèmes) observés lors de la préparation mécanique des échantillons. Un défaut sur ce dernier peut entraîner :

#### Une consommation d'énergie élevée :

Dans le cas particulier du broyage, car c'est le processus consommant le plus d'énergie en moyenne. Afin de lutter contre cette consommation d'énergie élevée lors de cette étape de broyage, l'on va opter pour une optimisation du temps de broyage.

Pour ce faire, on s'intéressera à la dimension des particules broyées. Le broyage s'effectue généralement à une maille de 75µm du fait de la précision des résultats obtenus à ladite maille. Mais travailler avec une maille supérieure ne nous permettra-t-il pas de gagner en temps et donc en énergie ?

Afin de confirmer ou de réfuter l'hypothèse émise sur le broyage à une maille supérieure à 75µm nous avons effectué des essais à une maille de 100µm sur des échantillons d'or sulfure. Et afin de décider sur la validité de la procédure, nous avons effectué un 2<sup>nd</sup> essais sur des

échantillons d'or gris (sulfurés) et marron (oxydés). Les tests statistiques (plus précisément le test de Student) nous ont permis de tirer une conclusion à la fin de l'analyse. Le mode opératoire suivant nous a permis d'obtenir des échantillons significatifs, qui ont été envoyés pour analyses (SAA à la flamme) :

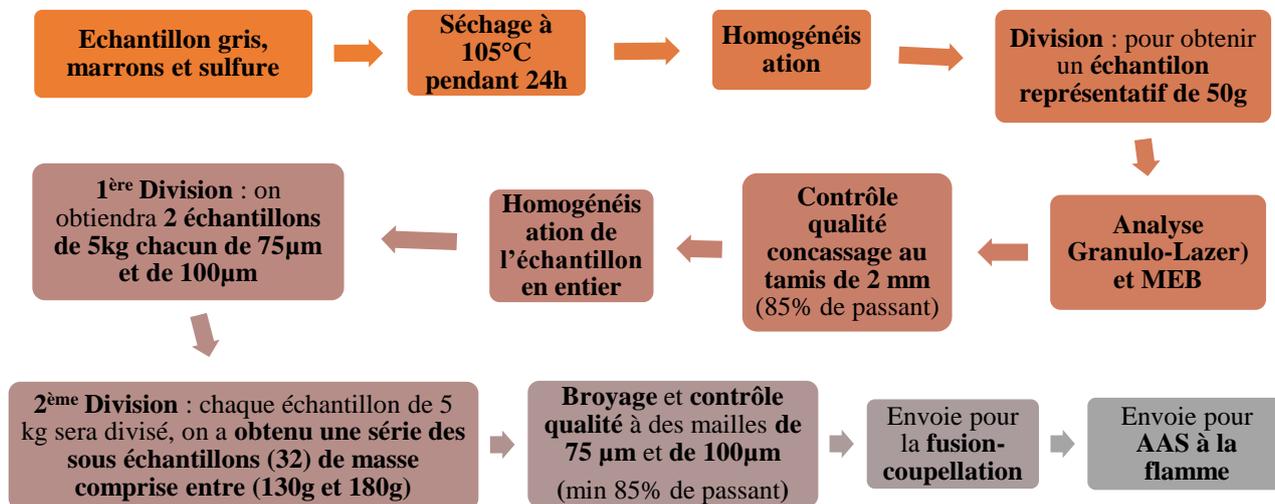


Figure 15 : Schéma descriptif de la méthode utilisée pour obtenir les concentrations en or des échantillons

Le récapitulatif du temps de broyage optimisé de ces dits échantillons étant consigné dans le tableau suivant :

Echantillons	Temps	100 µm				75 µm			
		Masse passant	Masse refus	% passant	% refus	Masse passant	Masse refus	% passant	% refus
Ech marron	30s	11,5	1,78	87%	13%				
	1min					8,79	1,14	89%	11%
Ech gris	1 min	10,7	1,65	87%	13%				
	2 min					9,18	1,34	87%	13%
Ech Sulfuré	30s			87,70%	12,30%				
	1 min							91%	9%

Tableau 9 : Tableau récapitulatif du temps de broyage à différentes mailles (75µm et 100µm) et sur différentes matrices (gris, marron et sulfuré)

Après l'absorption atomique à la flamme des échantillons d'or, nous avons obtenu les résultats suivants :

Echantillons Sulfure		Gris		Marron	
AU100	AU75	AU75	AU100	AU75	AU100
1,29	1,31	1,41	1,31	1,38	1,41
1,4	1,38	1,41	1,33	1,40	1,47
1,44	1,39	1,45	1,35	1,41	1,47
1,46	1,41	1,46	1,36	1,49	1,47
1,5	1,41	1,46	1,45	1,50	1,48
1,5	1,44	1,51	1,50	1,51	1,50

1,52	1,44	1,60	1,55	1,52	1,61
1,56	1,47	1,62	1,57	1,59	1,65
1,57	1,53	1,64	1,65	1,62	1,70
1,58	1,56	1,83	1,76	1,78	
1,58	1,56				
1,6	1,56				
1,6	1,59				
1,61	1,6				
1,66	1,62				
1,68	1,64				
1,73	1,66				
1,77	1,7				
1,79	1,74				
1,81	1,82				

**Tableau 10** : Tableau récapitulatif des résultats d'analyses des échantillons d'or des différentes matrices

Une analyse statistique a été menée à ces résultats afin de voir si les deux méthodes de broyages sont distinctes ou pas. Cette analyse a été faite en 3 étapes :

- Une vérification de la Normalité des échantillons ;
- Ensuite une comparaison de deux variances ;
- Enfin une comparaison de deux moyennes.

➤ **Vérification de la Normalité : (test de Shapiro-Wilk)**

La normalité d'une distribution (répartition des données expérimentales) est souvent une condition indispensable à la réalisation de certains tests statistiques, car elle permet d'affirmer que les données sont bien dispersées autour de la moyenne. C'est la seule façon de prouver que les grandeurs d'influences (causes de variation du résultat) sont suffisamment « maîtrisées ». C'est à cette condition que l'on pourra utiliser l'écart-type pour :

- Encadrer une mesure ;
- Comparer des moyennes ;
- Donner des garanties aux clients sur la qualité des produits ;
- Utiliser des seuils d'alerte pour détecter les dérèglages.

Les tests statistiques qu'on pourra donc utiliser pour vérifier cette normalité peuvent être de deux types :

- **Test visuel de normalité / un histogramme** : c'est un test grossier que l'on pourra effectuer avant d'effectuer un test plus rigoureux (Shapiro et Wilk)
- **Test de normalité (test de Shapiro et Wilk)** : ici on formulera deux hypothèses :

**H0** : les données forment une distribution qui n'est pas significativement différente d'une loi normale ; (**Pvalue > 0.05**)

**H1** : la distribution est significativement différente d'une loi normale ; (**Pvalue < 0.05**)

**Résultats**

Shapiro test (Pvalue)		
	AU75	AU100
<b>Ech Sulfure</b>	0,86	0,89
<b>Ech Gris</b>	0,09	0,45
<b>Ech Marron</b>	0,3	0,099

```

shapiro-wilk normality test
data: M1
W = 0.97716, p-value = 0.8924

> qqnorm(M2, col="green")
> qqline(M2, col=2)
> shapiro.test(M2) ## pour évaluer la normalité de AU75

shapiro-wilk normality test
data: M2
W = 0.97547, p-value = 0.8634

```

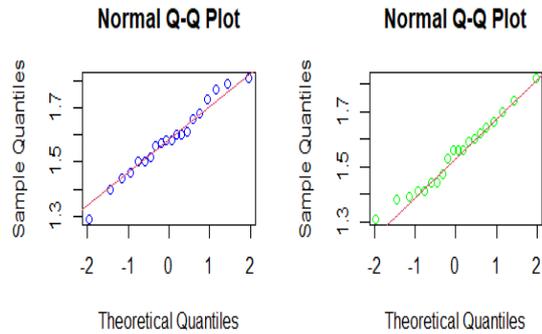


Figure 16 : Figure représentant la normalité des échantillons d'or sulfure et la valeur de Pvalue du test de Shapiro-Wilk

```

> shapiro.test(M1) ## pour évaluer la normalité de AU100

shapiro-wilk normality test
data: M1
W = 0.9306, p-value = 0.4538

> qqnorm(M2, col="green")
> qqline(M2, col=2)
> shapiro.test(M2) ## pour évaluer la normalité de AU75

shapiro-wilk normality test
data: M2
W = 0.86778, p-value = 0.09418

```

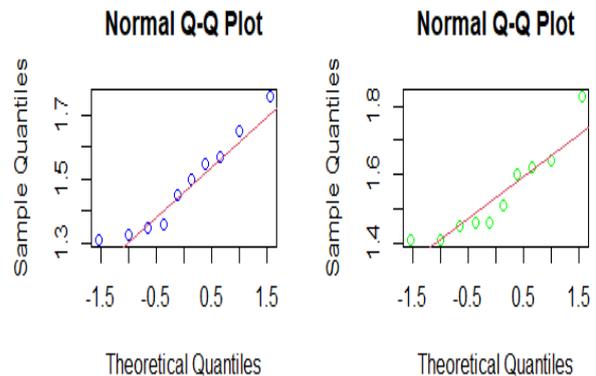


Figure 17 : Figure représentant la normalité des échantillons d'or gris et la valeur de Pvalue du test de Shapiro-Wilk

```

> shapiro.test(M1) ## pour évaluer la normalité de AU100

shapiro-wilk normality test
data: M1
W = 0.86134, p-value = 0.09916

> qqnorm(M2, col="green")
> qqline(M2, col=2)
> shapiro.test(M2) ## pour évaluer la normalité de AU75

shapiro-wilk normality test
data: M2
W = 0.91307, p-value = 0.3027

```

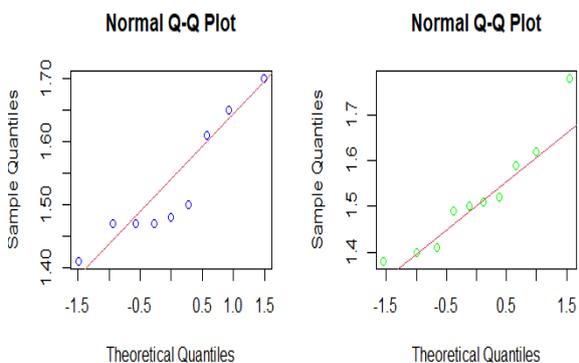


Figure 18 : Figure représentant la normalité des échantillons d'or marron et la valeur de Pvalue du test de Shapiro-Wilk

**Interprétation :** selon le test de Shapiro et Wilk on peut conclure que les données des trois lots d'échantillons d'or suivent une loi normale. On pourra donc passer au test suivant.

➤ **Comparaison de deux variances : (test de Fisher)**

En chimie analytique, est un test d'hypothèse qui permet de tester l'hypothèse nulle que deux lois normales ont la même variance. Ce test est particulièrement sensible à la non normalité.

**Règles de décision :**

- $F_{obs} < F_{crit}(v_1, v_2)$  ou  $Pvalue > 0.05$  : Les écart-types sont du même ordre de grandeur.
- $F_{obs} \geq F_{crit}(v_1, v_2)$  ou  $Pvalue < 0.05$ : Les écart-types sont significativement différents.

**Résultats :**

Var,test (Pvalue)		
	AU75	AU100
<b>Ech Sulfure</b>	0,995	
<b>Ech Gris</b>	0,72	
<b>Ech Marron</b>	0,59	

```
> var.test(M1,M2,conf.level = 0.95) # inter conf est optionnel

      F test to compare two variances

data:  M1 and M2
F = 0.99743, num df = 19, denom df = 19, p-value = 0.9956
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.3947933 2.5199474
sample estimates:
ratio of variances
      0.9974258

> var.test(M1,M2)$p.value
[1] 0.9955764
```

Figure 19 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure

```
> var.test(M1,M2,conf.level = 0.95) # inter conf est optionnel

      F test to compare two variances

data:  M1 and M2
F = 1.2788, num df = 9, denom df = 9, p-value = 0.7201
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.3176334 5.1484017
sample estimates:
ratio of variances
      1.27879

> var.test(M1,M2)$p.value
[1] 0.7200821
```

Figure 20 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or gris

```

> var.test(M1,M2,conf.level = 0.95) # inter conf est optionnel

      F test to compare two variances

data:  M1 and M2
F = 0.6775, num df = 8, denom df = 9, p-value = 0.5942
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.1651651 2.9520254
sample estimates:
ratio of variances
      0.6775

> var.test(M1,M2)$p.value
[1] 0.5941743

```

Figure 21 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or marron

➤ **Comparaison de deux moyennes : (test de Student)**

Le test utilisé pour cette comparaison sera le **test de Student**. Ce test permet de comparer :

- Une moyenne d'un échantillon à une valeur donnée (référence) appelée aussi test de conformité ;
- Les moyennes de deux échantillons indépendants (deux échantillons étant appariés si aucun résultat n'appartient aux deux groupes simultanément, donc on considèrera les échantillons de résultats distincts) ;
- Les moyennes de deux échantillons appariés.

**Condition d'application de ce test** : Normalité, égalité des variances et  $n < 30$

**Hypothèses** :

- **H0** :  $\mu_1 = \mu_2$
- **H1 bilatéral** :  $\mu \neq \mu_0$  ou **H1 unilatéral** :  $\mu < \mu_0$  ou  $\mu > \mu_0$

**Règles de décision** :

- $T_{obs} < T_{crit}$  ou  $Pvalue > 0.05$  alors les deux moyennes ne sont pas significativement différentes ;
- $T_{obs} \geq T_{crit}$  ou  $Pvalue < 0.05$  alors les deux moyennes sont significativement différentes.

**Résultats** :

Student test (Pvalue)		
	AU75	AU100
Ech Sulfure	0,339	
Ech Gris	0,39	
Ech Marron	0,86	

```

> t.test(M1,M2,var.equal=T) # comparaison avec variances égales

      Two Sample t-test

data:  M1 and M2
t = 0.96721, df = 38, p-value = 0.3396
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.04481428 0.12681428
sample estimates:
mean of x mean of y
 1.5825 1.5415

> t.test(M1,M2,var.equal=T)$p.value ### P.value = 0.326 > 0.05 donc tes
t significatif (H0 n'est pas rejeté)
[1] 0.3395564

```

Figure 22 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure

```

> t.test(M1,M2,var.equal=T) # comparaison avec variances égales

Two Sample t-test

data: M1 and M2
t = -0.88068, df = 18, p-value = 0.3901
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.18959177  0.07759177
sample estimates:
mean of x mean of y
 1.483      1.539

> t.test(M1,M2,var.equal=T)$p.value ### P.value = 0.3395 > 0.05 donc t
if (H0 n'est pas rejeté)
[1] 0.3900986

```

Figure 23 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure

```

> t.test(M1,M2,var.equal=T) # comparaison avec variances égales

Two Sample t-test

data: M1 and M2
t = 0.17478, df = 17, p-value = 0.8633
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.09841331  0.11619109
sample estimates:
mean of x mean of y
 1.528889  1.520000

> t.test(M1,M2,var.equal=T)$p.value ### P.value = 0.3395 > 0.05 donc test
if (H0 n'est pas rejeté)
[1] 0.8633198

```

Figure 24 : Figure représentant valeur du Pvalue du test de Fisher dans le cas des échantillons d'or sulfure

**Interprétation :** Selon le résultat du test de Student bilatéral, on trouve que le Pvalue de AU100 et AU75 est largement supérieur à 0.05 ; on pourra donc conclure que les deux moyennes sont Homogènes et donc que les deux méthodes ne sont pas significativement différentes. Et Selon les différentes mailles (75µm et 100µm), l'on peut remarquer que pour une maille de 100µm généralement, on réduit de moitié le temps de broyage des échantillons peu importe la matrice choisie. Qui dit réduction de temps de broyage, dit réduction d'énergie. En réduisant jusqu'à 50% du temps de broyage, nous arriverons à réduire environ 50% d'énergie.

**✚ Un surchauffage des appareillages et donc aboutir à une perte de matière**

Cette défaillance se manifeste lors de l'étape **de broyage** et lors **de l'étape de division**.

- **Lors du broyage**

On remarque que ce n'est pas la machine (broyeur) qui s'échauffe, mais plutôt **la gamelle**. Lors de notre étude, nous avons remarqué deux types de gamelles en acier (à disques ronds et à disques plats) comme représentées sur les figures ci-dessous :



Figure 25: Gamelle à disques ronds



Figure 26 : Gamelle à disques plats

Lors du broyage, nous avons constaté que les gamelles à disques plats, broyaient avec un temps double comparées aux gamelles à disques ronds. Cela serait peut-être dû à l'écrasement des particules. Les disques ronds possédant plus d'impact que ceux plats. Mais afin d'éviter ce surchauffage de la machine, il faudrait chercher à optimiser le temps de broyage de tout type d'échantillons à maximum une minute. Car lors des essais nous avons fait la remarque que, les échantillons qui ne dépassaient pas plus d'une minute de broyage entraînaient un surchauffage tardif, conduisant à une perte de matières minime.

**Conclusion** : Jouer sur le choix de la gamelle est une optique importante afin d'optimiser le temps de broyage afin de limiter les périodes de surchauffage et les pertes de matières.

- **Lors de la division**

Les pertes de matières lors de la division, sont le plus dues au matériel (diviseurs à raffles). Dans l'optique de diminuer cette perte, le choix du diviseur à raffle adéquat est très important. Nous proposerons d'opter **pour les diviseurs à raffles fermés** comme sur la photo ci-dessous et non pour des diviseurs à raffles ouverts.

**On pourra ainsi passer d'un taux de perte de matière (broyage + division) d'environ 5 à 10% à un taux de perte d'environ 0 à 1 %.**



**Figure 27** : Diviseur à raffle fermé.

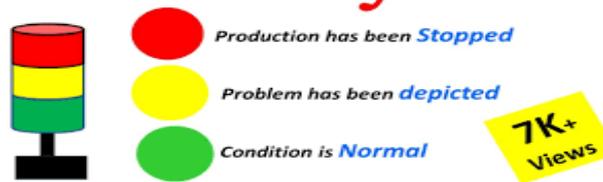
**Un accident**

Ce dernier a été répertorié, lors de l'utilisation du concasseur à machoire à 10mm. Le concasseur présentant des défauts du fait de la maintenance de l'appareillage réduit, s'est fracturé lors de l'insertion du quartz dans ce dernier.

Afin de prévenir ce genre d'accidents à l'avenir, nous proposons une maintenance régulière (mensuel) de l'appareillage (concasseurs, broyeurs, ...) afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'équipement dans le but de limiter les risques d'accidents et d'assurer la sécurité de tous.

**L'outil Andon** nous permettra de mieux implémenter cette idée pour le contrôle ou la maintenance des appareillages. **Andon** étant un système d'alerte qui permettra de remonter manuellement ou automatiquement une anomalie. Ce système d'alarme permettra à un opérateur de signaler une anomalie au niveau de son poste ; il s'agira concrètement de panneaux lumineux ou d'une balise lumineuse visible de loin qui peut être activée manuellement ou automatiquement pour remonter une anomalie.

# Andon System



## ✚ Une contamination des échantillons

Lors du processus du séchage et du tamisage des échantillons. Les chariots des étuves sont une nécessité. Ils facilitent le transport et la superposition des échantillons. Cependant les espaces présents (trous) sur ces derniers, peuvent entraîner par un acte maladroit du personnel une contamination des échantillons situés en-dessous par des échantillons situés au-dessus des chariots. Et afin de limiter ces risques de contamination, le choix du chariot est très important. On pourra ainsi opter pour les chariots fermés au lieu des chariots ouverts.

Lors du tamisage, cette contamination se fait par **les tamis**. Normalement de mailles inférieures (75 $\mu$ m ou 100 $\mu$ m), les particules y restent attachées malgré le nettoyage à l'air comprimé. Dans l'optique de garantir la qualité du produit final obtenu, on proposera alors un changement hebdomadaire des tamis dans le but de les nettoyer en profondeur. Diminuant ainsi le risque de contamination aux environs de 0 à 1 %.

## Méthodes, à la main d'œuvre, à la matière et au milieu :

Ces derniers, constituent à eux seuls moins de 20% des causes liées aux problématiques posées. Ils revêtent tous d'un seul effet qui est celui de l'altération physique des échantillons. Ce problème est le plus rencontré lors de la division et lors du broyage des échantillons. Il se lie au plan de travail par l'accumulation des particules évacuées par les voutes aux extrémités. Opter pour un espace de travail ouvert entrainera la pollution de la salle de broyage. Dans le but de remédier à cette problématique, nous proposerons d'effectuer un nettoyage journalier de l'espace de travail à travers un aspirateur de particules de préférence.

## F. Contrôle

Après la mise en place des solutions, il faut veiller à exécuter toutes les contre-mesures et à vérifier régulièrement les progrès. Ce contrôle, doit permettre de repérer rapidement s'il existe des failles au niveau même de l'implémentation au cours de la phase précédente. Ainsi, l'équipe pourra notamment définir des niveaux de tolérance à surveiller et à respecter pour éviter toute dérive. Il peut se faire à travers un plan encore appelé plan de contrôle, par un autocontrôle, par un management visuel ou encore par les KPI (Key Performance Indicator). Dans le cas de notre étude, nous nous sommes fixé plus haut les objectifs suivants :

- ✚ Réduire le temps de broyage des échantillons à environ 30%, afin de voir l'évolution en termes d'énergie et de coûts
- ✚ Réduire le taux de perte des échantillons à environ 50%.
- ✚ Augmenter le rendement annuel de l'entreprise à environ 10%.

Nous sommes arrivés aux conclusions que :

- ✚ L'étape de broyage nous a permis à travers une maille supérieure de 100µm grâce au broyeur à disques oscillants et des gamelles d'acier rondes, de parvenir à une économie de la moitié de temps de broyage des échantillons représentant ainsi une réduction de 50% d'énergie. Sachant qu'un broyeur à disques consomme en moyenne 1.9 kW de puissance chaque utilisation, on a pu ressortir la valeur de l'énergie égale à 1.85 kW/min = 111 kW/h (avec 1.0732 DH / kWh)

Mailles	Échantillons	Temps de broyage par ech	Temps de broyage	Energie consommée (kW/h)	Energie consommée totale (kW/h)	Consommation électricité (Dirham)
100µm	Marron (64)	30s	32 min	59.2	207.2	222.1184
	Gris (64)	1 min	64 min	118.4		
	Sulfure (32)	30s	16 min	29.6		
75µm	Marron (64)	1 min	64 min	118.4	414.4	444.2368
	Gris (64)	2 min	128 min	236.8		
	Sulfure (32)	1 min	32 min	59.2		

Tableau 11 : Tableau récapitulatif de la consommation énergétique lors du broyage des échantillons de notre étude

- ✚ Opter aussi pour des broyeurs de taille supérieure avec de plus grandes gamelles, nous permettront peut-être de réduire encore plus la consommation d'énergie en limitant le temps de broyage en fonction de la quantité d'échantillon introduit.
- ✚ Afin de réduire les pertes de matières au cours du processus de préparation mécanique, plus précisément lors des étapes de broyage et de séchage, nous avons opté pour :
  - ❖ L'utilisation des diviseurs à riffles fermés. Car nous avons remarqué que lors de la division, sur 100g d'échantillons, 10g étaient au moins perdus, représentant ainsi 10% de perte de matière et en même temps une perte de minerais.

Echantillon	Diviseurs			
	Riffles ouverts		Riffles fermés	
	Masse finale	Perte	Masse finale	Perte
100 g	90 g	10g	99 g	1g

% Pertes	
Riffles ouverts	Riffles fermés
10%	1%

- ❖ La réduction ou l'optimisation du temps de broyage à 1 min maximum pour tous types d'échantillons, réduira ainsi l'échauffement des gamelles sur 4 à 5h

de temps. Car lorsque les gamelles s'échauffent, les 100 g d'échantillons insérés au départ dans les gamelles se réduisent de telle sorte à n'obtenir que 90g d'échantillon. Marquant ainsi une perte de 10% pour chaque échantillon inséré après surchauffage du matériel.

Broyeur (gamelles à disques ronds)					
		Échauffées		Normales	
Echantillon	Masse finale	Perte	Masse finale	Perte	
100 g	90 g	10g	99 g	1g	

% Pertes	
Riffles ouverts	Riffles fermés
10%	1%

En appliquant ces règles nous sommes parvenus à une diminution de perte d'échantillon aux environ de 1 %.

Afin de contrôler les solutions ou les mesures mises en place, les KPI ont été adopté. On a ainsi pu contrôler :

- ✚ La sécurité : à travers l'implémentation de la méthode des 5S, d'Andon et QSE ;
- ✚ La qualité : l'étape de broyage nous a permis de nous en assurer en introduisant dans le procédé : des standards, des témoins et des duplicatas afin de contrôler le processus en entier. Et s'assurer ainsi sur la fiabilité du processus et des résultats obtenus.
- ✚ Le délais : en optant pour un broyage à une maille de 100µm avec des gamelles à disques ronds, pour l'utilisation des diviseurs à rifles fermés.

## Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude avait pour finalité, l'amélioration du processus de préparation mécanique des échantillons.

Grâce à l'outil DMAIC, nous sommes parvenus à atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, qui étaient :

- ✚ La réduction du temps de broyage, donc de l'énergie consommée ;
- ✚ La réduction des pertes de matière au sein du processus ;
- ✚ La fiabilité de la méthode.

Ce projet nous a permis en quelque sorte de mettre en pratique une nouvelle approche de résolution des problématiques au sein de l'entreprise dans le but d'améliorer la qualité et l'efficacité de tout processus de production, que ce soit en termes de productivité, de délais ou de coûts.

Nous sommes parvenus à la conclusion que, bien que le séchage, le concassage, le tamisage et la division présentaient des points sur lesquels nous avons apporté une amélioration, le broyage était l'étape clé. Cette étape, en plus d'être énergivore, elle présentait en elle-même plus de la moitié des problèmes rencontrés et nécessitait donc le plus une amélioration. À travers cette phase, nous sommes parvenus à une économie de près de 50% de la dépense énergétique lors de la préparation mécanique des échantillons. Ceci grâce au broyage à une maille de 100 $\mu$ m. Le broyage à cette maille étant une forme d'innovation, a nécessité plusieurs essais et tests pour parvenir à l'implémentation de ce dernier au sein de l'entreprise.

## Webographie :

- <https://lavallab.com/fr/products/diviseurs-echantillons/> 02/03/2022
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chantillonnage> 19/02/2022
- <https://www.wirtgen-group.com/fr-us/materiels/kleemann/technologies> 11/02/2022
- [https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/PMM\\_KB.pdf](https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/PMM_KB.pdf) 04/05/2022
- <https://books.openedition.org/pumi/4448?lang=fr#:~:text=Ces%20pr%C3%A0> 20/05/2022
- <https://www.planzone.fr/blog/quest-ce-que-la-methodologie-lean-six-sigma#> 01/06/2022
- <https://www.manager-go.com/vente/methode-smart.htm> 18/02/2022
- <https://www.lessine.com/fr/solutions/broyage/broyeur-marteaux-cylindre> 07/06/2022
- <https://www.pqb.fr/platform.php?i=&if=162&ch=3942> 15/03/2022
- <https://mineralmilling.com/fr/equipement-de-traitement-des-mineraux/> 29/03/2022
- [https://consorem2.uqac.ca/production\\_scientifique/2013\\_05/2013-05\\_Final.pdf](https://consorem2.uqac.ca/production_scientifique/2013_05/2013-05_Final.pdf) 20/04/2022
- <https://blog-gestion-de-projet.com/la-methode-dmaic/> 23/04/2022
- ORIENTATION STUDY OF THE EFFICIENCY OF BULK LEACH EXTRACTABLE GOLD (BLEG) ASSAY METHOD ON HWINIBUTRE AND BENSO ORE SAMPLES AT GOLDEN STAR RESOURCES (article) <https://www.academia.edu/4164313/> 27/03/2022
- Gold Analysis – Fire Assaying and Alternative Methods  
<https://www.studypool.com/documents/4750908/> 30/03/2022

## Annexe 1 : code Rstudio

```
med=read.table("clipboard",header=TRUE, sep="\t",dec=",")
summary(med)
M1=med$AU100
M2=med$AU75
par(mfrow=c(1,2))

qqnorm(M1, col="blue")
qqline(M1, col=2)
shapiro.test(M1) ## pour évaluer la normalité de AU100

qqnorm(M2, col="green")
qqline(M2, col=2)
shapiro.test(M2) ## pour évaluer la normalité de AU75

par(mfrow=c(1,1))
boxplot(M1)$out ## pour ressortir les mesure aberrantes
boxplot(M2)$out

# Comparaison de deux moyennes-----

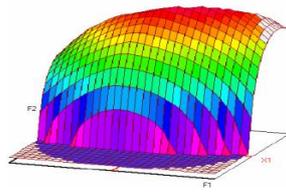
##Comparer les moyennes de AU1 et de AU2:

## Il faut d'abord comparer les variances
var.test(M1,M2,conf.level = 0.95) # inter conf est optionnel
var.test(M1,M2)$p.value

## Résultat: p-value = 0.996 donc les variances sont homogènes

## Test de Welch
var.test(M1,M2) ## p-value > 0.05 donc les deux variances sont égales
t.test(M1,M2,var.equal=T) # comparaison avec variances égales
## two sample t-test

t.test(M1,M2,var.equal=T)$p.value ### P.value = > 0.05 donc test significatif (H0 n'est pas rejeté)
##p.value > 0.05 donc les moyennes sont homogènes
```



## Master ST CAC Ageq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom : **BELINGA Mairiga Halimatou**

Année Universitaire : **2021/2022**

Titre : **Optimisation de la qualité de la préparation mécanique des échantillons en utilisant l'approche Lean Six Sigma**

### Résumé :

La minéralurgie est une discipline dont la finalité est la transformation ou le passage du minerai de l'état primaire « brut » à un état de particules de tailles infimes (inférieur à  $75\mu\text{m}$ ) qui peuvent être destinées à la vente. En respectant les règles de sécurité et de respect de l'environnement, cette discipline se réalise en amont de la chaîne de production des minerais. Elle se base sur des techniques diverses pour le traitement du minerai ; ces techniques peuvent être thermiques, physiques ou physico-chimiques. Cette discipline se résume à deux étapes consécutives : la préparation mécanique et le traitement. Lors de la préparation mécanique, les minéraux subissent diverses étapes avant de parvenir à cette poudre tant escomptée. Ces étapes étant le séchage, le concassage, le broyage, le tamisage et la division. Lors du traitement, la séparation du minerai de la gangue s'effectuera via des méthodes thermiques (FIRE-ASSAY), physiques (gravimétriques, électrostatiques, etc.), physico-chimiques (lixiviation, flottation, etc.), ou chimiques (BLEG, solubilité, etc.).

La préparation mécanique est le processus sur lequel l'étude a été faite. Afin de parvenir à trouver des solutions efficaces aux différents problèmes rencontrés au cours de ce processus, nous avons mis en pratique l'outil DMAIC tiré de la méthode Lean Six Sigma dans le but d'améliorer la qualité, la fiabilité et l'efficacité du processus en entier. En premier lieu nous avons procédé par une définition de la problématique et de l'impact de cette dernière sur la préparation mécanique des échantillons. Ensuite, nous sommes passés à la phase mesure qui nous a permis de récolter les données sur lesquels reposaient l'étude. La phase d'analyse quant à elle, a permis en quelque sorte de réduire le champ d'action en détectant uniquement les sources réelles du problème. Cela fait, nous avons mis en œuvre de solutions fiables, réalistes et innovantes au cours de la phase d'amélioration. Et enfin nous sommes passés à la dernière étape qui a été celle du contrôle. Cette phase a favorisé le suivi des solutions mises en place afin d'assurer la qualité du processus à long terme.

Mots clés : **Lean six sigma, DMAIC, Préparation mécanique, Contrôle qualité, broyage.**