

GÉNIE MINÉRAL & GÉNIE PROCÉDÉS

Comminution & Broyage

Principes Fondamentaux, Modélisation Énergétique et Conception des Circuits Industriels de Traitement des Minerais

Introduction à la Comminution

Objectif de Libération

La comminution regroupe l'ensemble des opérations mécaniques de réduction granulométrique (concassage et broyage).

Son objectif premier est d'atteindre la **maille de libération** : séparer physiquement les grains de minéraux valorisables de la gangue stérile avant la phase de concentration.

Enjeu Énergétique Majeur

La comminution représente à elle seule **30% à 50% de la consommation d'énergie globale** d'une usine de traitement minier.

L'optimisation des circuits est indispensable pour réduire l'empreinte carbone, limiter l'usure des corps broyants et garantir la rentabilité économique du procédé.

De la Mine au Produit Fini



Mécanismes de Fragmentation



Compression

Force quasi-statique appliquée entre deux surfaces rigides. Mode dominant lors du concassage primaire et dans les rouleaux HPGR.



Impact

Force dynamique à haute vitesse provoquant la rupture le long des plans de faiblesse cristallins. Utilisé dans les concasseurs à percussion.



Attrition & Cisaillement

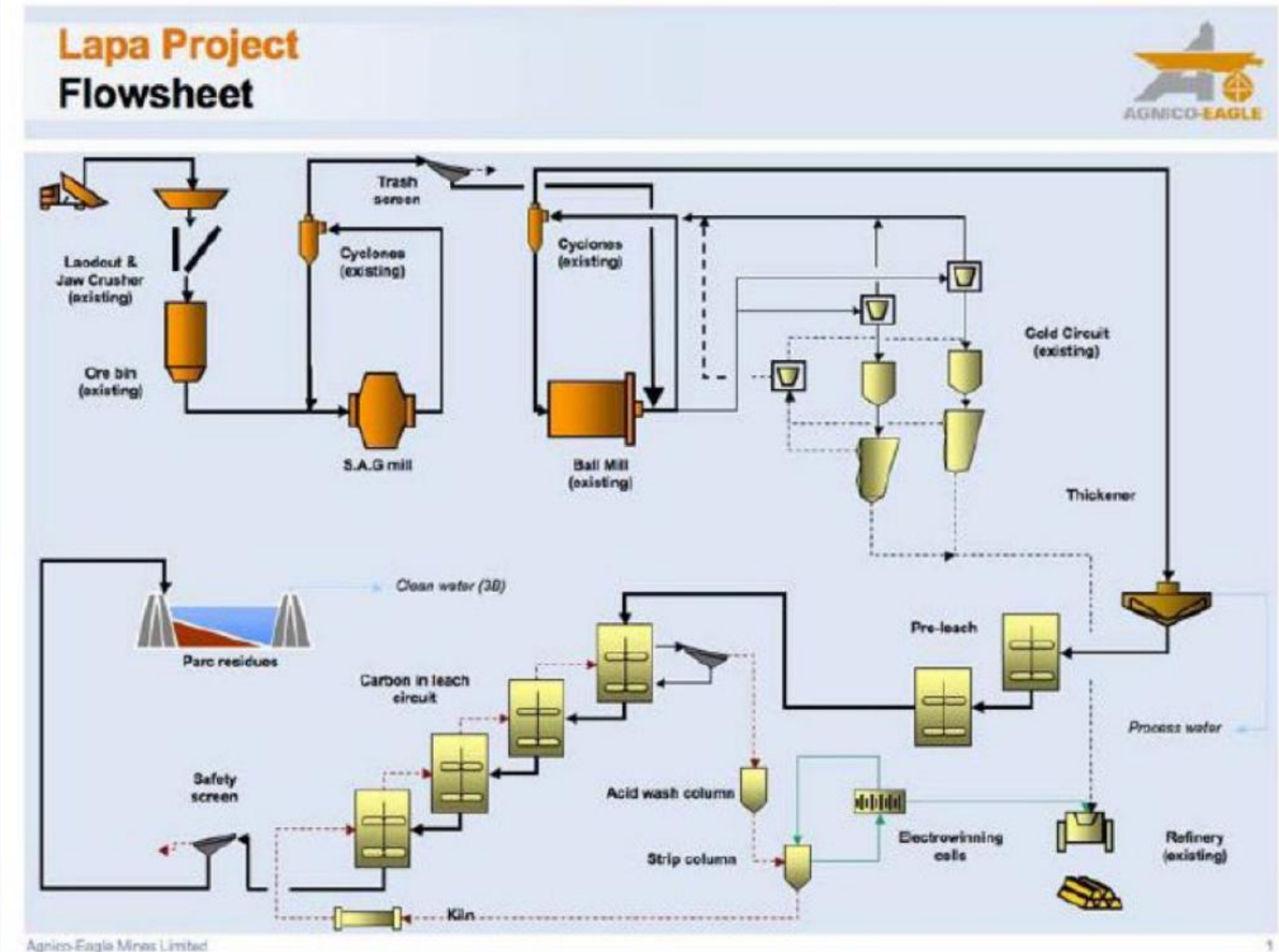
Frottement particule-particule ou corps broyant-particule. Produit des particules très fines nécessaires au broyage secondaire et ultrafin.

Lois Énergétiques de Bond

L'énergie spécifique E requise pour réduire la taille des particules suit l'équation différentielle générale de Walker :

$$dE = -K \frac{dx}{x^n}$$

- **Rittinger ($n=2$)** : Valable pour le broyage très fin (énergie proportionnelle à la surface créée).
- **Kick ($n=1$)** : Valable pour le concassage grossier (énergie proportionnelle au volume).
- **Bond ($n=1.5$)** : Norme industrielle fondamentale basée sur le Work Index (W_i).



Types de Broyeurs Industriels



Broyeur à Boulets

Utilise des billes en acier comme milieu broyant. Offre une grande flexibilité et précision pour le broyage secondaire fin.



Broyeur SAG / AG

Broyeur Semi-Autogène utilisant les gros blocs de minerai combinés à une charge réduite de boulets pour de grands débits.



Rouleaux HPGR

Technologie à haute pression créant une micro-fissuration inter-particulaire à très faible consommation d'énergie.

Circuits Ouverts et Fermés

Circuit Ouvert

Le minerai ne traverse l'appareil de broyage qu'une seule fois. Le produit de sortie contient une plage granulométrique étalée.

Inconvénient : Risque élevé de sur-broyage inutile des particules déjà fines et présence de grains grossiers non libérés.

Circuit Fermé (Recommandé)

Le broyeur est couplé à un classificateur (hydrocyclone). Les particules grossières (sous-verse) sont recyclées en entrée de broyeur.

Avantage : Contrôle précis du P_{80} , réduction du temps de séjour et maximisation du rendement énergétique.

Classification par Cyclone

L'hydrocyclone est l'équipement standard de classification dimensionnelle en milieu humide pour les circuits de broyage.

Sous l'effet de la force centrifuge, la pulpe est séparée : les fines évacuées en sur-verse (overflow) rejoignent la flottation, tandis que les grossiers en sous-verse (underflow) retournent au broyeur.

Le taux de **charge circulante** est habituellement maintenu entre 200% et 400% pour optimiser l'efficacité.



Indicateurs Énergétiques

40%

Part de la comminution dans le OPEX
minier

L'Indice de Travail de Bond (\$W_i\$)

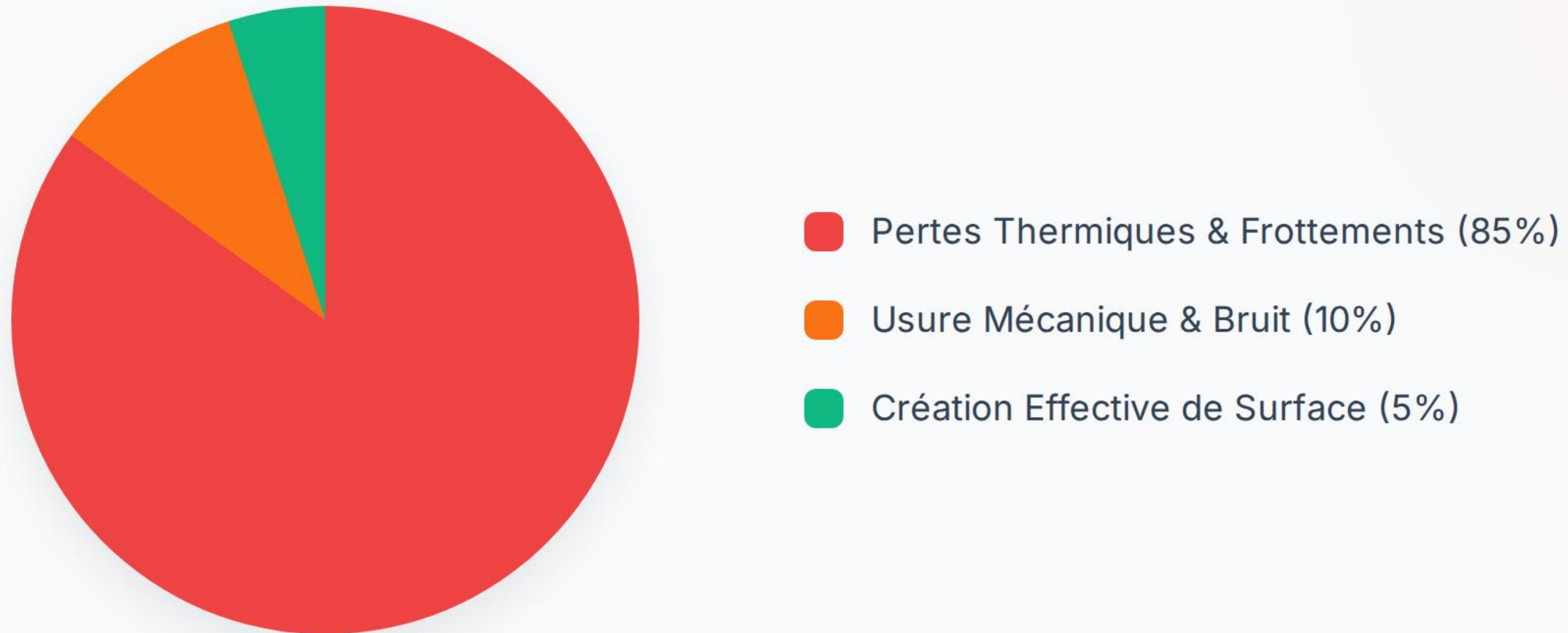
Exprimé en kWh/tonne courte, le \$W_i\$ caractérise la résistance mécanique d'un minéral à la fragmentation.

Pour un minéral dur (\$W_i > 18\$ kWh/t), la sélection d'un circuit combiné SAG-HPGR-Boulets permet d'économiser jusqu'à 20% d'énergie par rapport à un circuit conventionnel.

Comparatif des Équipements

Équipement	Taille Alimentation	Taille Produit	Efficacité Énergétique	Application Principale
Concasseur à Mâchoires	800 - 1200 mm	100 - 200 mm	Haute (Mécanique)	Concassage primaire sec
Broyeur SAG	200 - 300 mm	1 - 5 mm	Moyenne	Réduction primaire fort débit
Rouleaux HPGR	20 - 60 mm	1 - 6 mm	Très Haute	Tertiaire / Pre-grinding
Broyeur à Boulets	5 - 25 mm	40 - 150 µm	Modérée	Broyage secondaire/tertiaire

Bilan Énergétique du Circuit



Seule une fraction minime de l'énergie électrique consommée sert directement à la rupture des liaisons chimiques du cristal.

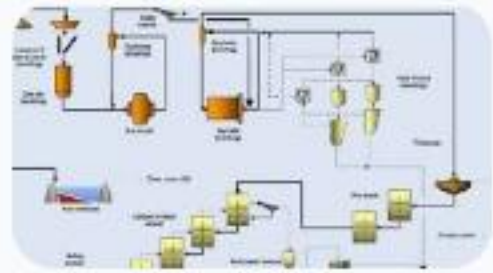
Questions & Discussion

Merci pour votre attention.

Cours de Génie Minéral & Procédés

Module : Comminution & Classification des Minerais

Image Sources



<https://millops.community.uaf.edu/wp-content/uploads/sites/605/2016/04/fig3-1.png>

Source: millops.community.uaf.edu



<https://www.caststeelproducts.com/wp-content/uploads/2021/08/PkfcUUAfG8gXT9RkXoRnq1P7pcDRfUR1629146798.jpg>

Source: www.caststeelproducts.com



https://alphagrindingmedia.com/wp-content/uploads/2025/08/0000751251_resized_1022template.webp

Source: alphagrindingmedia.com



<https://www.global.weir/globalassets/product-images/enduron/enduron-high-pressure-grinding-rolls-hpgr/product-images/enduron-hpgr-rpm-crusher---back-per-sp-rev03-0902212>

Source: www.global.weir



<https://image.made-in-china.com/365f3j00gVPEcThWTpzi/Dewatering-Machine-Hydrocyclone-Cluster-of-Mineral-Processing-Plant.webp>

Source: hze-beneficiation.en.made-in-china.com