



## Fragmentation

AIDE AU CHOIX D'ÉQUIPEMENTS PERMETTANT  
LA FRAGMENTATION DE MATIÈRES SOLIDES SUR  
DES BASES ÉNERGÉTIQUES



Concasseur, Portafill 7000ICRD. Source : axyo.fr.

## Introduction

La fragmentation, dont le nom désigne un processus par lequel un objet est divisé en un grand nombre de petits morceaux, se rencontre dans bon nombre d'industries wallonnes. Concrètement, la fragmentation s'adresse aux solides dont la taille veut être réduite en des éléments ou particules de taille inférieure et de granulométrie déterminée.

Dans l'industrie extractive, la fragmentation apparaît à toutes les étapes du traitement de la roche extraite en vue d'obtenir des produits pouvant être commercialisés tels quels ou ayant la granulométrie nécessaire à leur traitement ultérieur éventuel. L'opération de fragmentation consiste généralement en une ou plusieurs étapes de concassage et en une étape de broyage selon la granulométrie finale voulue. D'un point de vue énergétique, les opérations de fragmentation comptent pour environ 70% de l'énergie totale nécessaire au traitement de la roche.

Dans le recyclage des déchets, la fragmentation apparaît également fortement présente. Cette opération s'applique aussi bien pour les déchets ménagers que pour les déchets industriels. Elle s'utilise généralement en amont d'une unité de traitement ; notamment en vue d'isoler et recycler les matières recyclable. Dans le cas de l'industrie automobile, par exemple, le broyage est suivi d'un tri magnétique : les particules métalliques seront sélectionnées et recyclées, et les autres seront des résidus qu'il faudra traiter. De même pour le recyclage des bouteilles plastiques, le broyage est suivi d'une phase de tri où les résidus d'étiquettes en papier sont éliminés.

Concasseur EDGE, Slayer. Source : edgeinnovate.com



Outre ces deux pôles industriels où la fragmentation est fortement présente, il existe bien évidemment d'autres secteurs où une telle opération intervient comme une nécessité. À titre d'exemple, on cite : les cimenteries qui broient leur clinker, les scieries où les plaquettes sont obtenues par broyage, les industries alimentaires où l'on cherche par le biais d'un broyeur à obtenir de fines matières solides telles que du sucre, des pigments, des épices, de la farine, etc. ou encore les industries chimiques où le broyage intervient dans la préparation des matières premières. Pour ce dernier, la fragmentation permet en effet de faciliter la manutention des solides et d'augmenter leur réactivité vis-à-vis du processus en aval (par exemple, pour une mise en solution rapide ou pour favoriser des réactions chimiques).

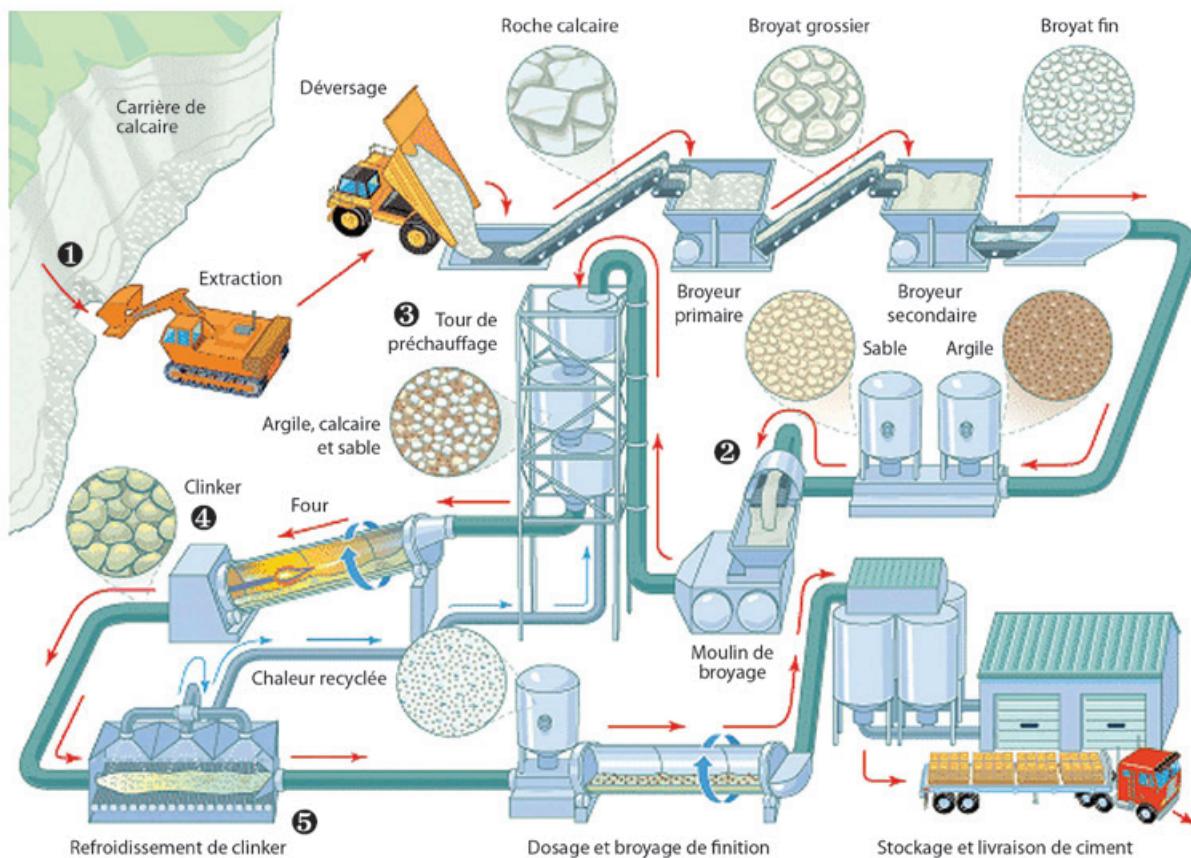


Figure 1 : exemple d'une chaîne de fabrication du ciment. Source : Encyclopaedia britannica.



Détail d'un concasseur. Source : maiteksrl. De bas en haut :

- « gueulard » du concasseur,
- chaines de « précriblage » : régulation de débit, de prévention de projection de blocs,
- aspersion de la trémie du concasseur pour rabattement des poussières.

## La fragmentation dans le traitement de la roche

Comme précédemment introduit, le concassage et le broyage sont deux opérations essentielles dans le traitement de la roche pour la production de granulats de plus fine granulométrie.

En premier lieu, les concasseurs fragmentent la roche extraite et permettent d'obtenir au cours d'une première étape, par un concassage dit primaire, des matériaux relativement grossiers. Au cours d'étapes suivantes, dites secondaire puis tertiaire, des matériaux de plus en plus fins peuvent être obtenus. Les blocs de roches massives issus des tirs de mines peuvent ainsi subir jusqu'à trois phases de concassage avant d'obtenir les dimensions de granulats recherchées ; généralement compris entre 5 et 250 millimètres.

Lorsque la roche est concassée, les granulats peuvent encore subir des opérations de broyage pour atteindre encore de plus petites dimensions que celles obtenues par concassage. En sortie de broyage, les particules présentent généralement une granulométrie comprise entre 10 et 300 micromètres.

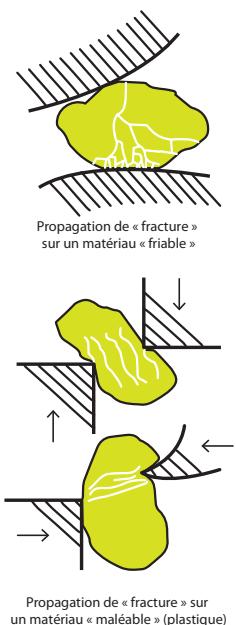


Figure 4 : Rupture par concassage. [1]

## Le concassage (crushing)

Le concassage primaire (en anglais, « primary crushing ») est la première étape mécanique dans le procédé de fragmentation. Cette opération permet de réduire la taille des particules du tout-venant de la mine (« run-off mine » en anglais) jusqu'à ce qu'elles aient une taille acceptable pour pouvoir subir le traitement en aval. Il se place donc dans le « flowsheet » à la sortie de la mine.

Afin d'obtenir la granulométrie nécessaire à leur valorisation ou à leur utilisation ultérieure, le concassage primaire est dans la majorité des cas suivi d'un concassage secondaire, voire au concassage tertiaire ou encore même quaternaire.

La fragmentation dans un concasseur peut être réalisée de différentes manières :

- par compression contre une surface rigide ;
- par auto-concassage (attrition) lors de la phase de compression ;
- par projection contre une surface rigide ;
- par projection matière sur matière (autogène).

Ou selon le type de concasseur en combinant plusieurs de ces techniques.

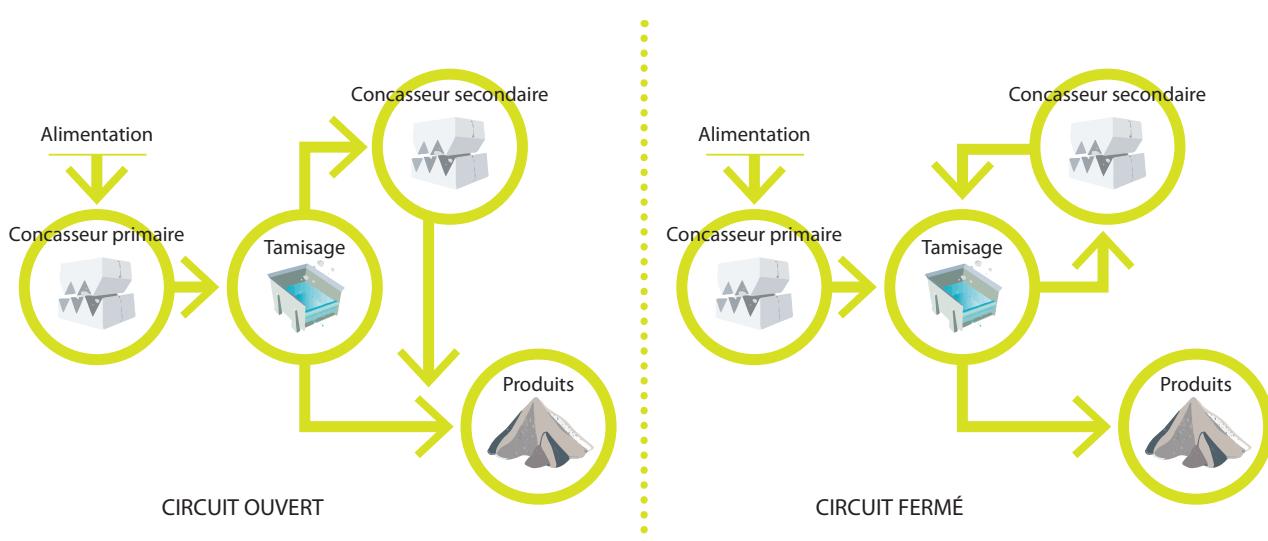
L'opération de concassage est réalisée à sec.

## Les types de circuits

Le concassage des solides peut avoir lieu en circuit ouvert ou en circuit fermé :

- En **circuit ouvert**, les produits ne passent qu'une seule fois dans le concasseur.
- En **circuit fermé**, la granulométrie des produits est contrôlée dès la sortie, et les produits dont la granulométrie est trop grosse sont aussitôt renvoyés pour être reconcassés.

En pratique, le concassage en circuit fermé est la technique la plus fréquemment rencontrée. Les particules passent au travers d'un crible et comme précisé ci-dessus, celles qui sont insuffisamment réduites sont renvoyées pour être reconcassées.



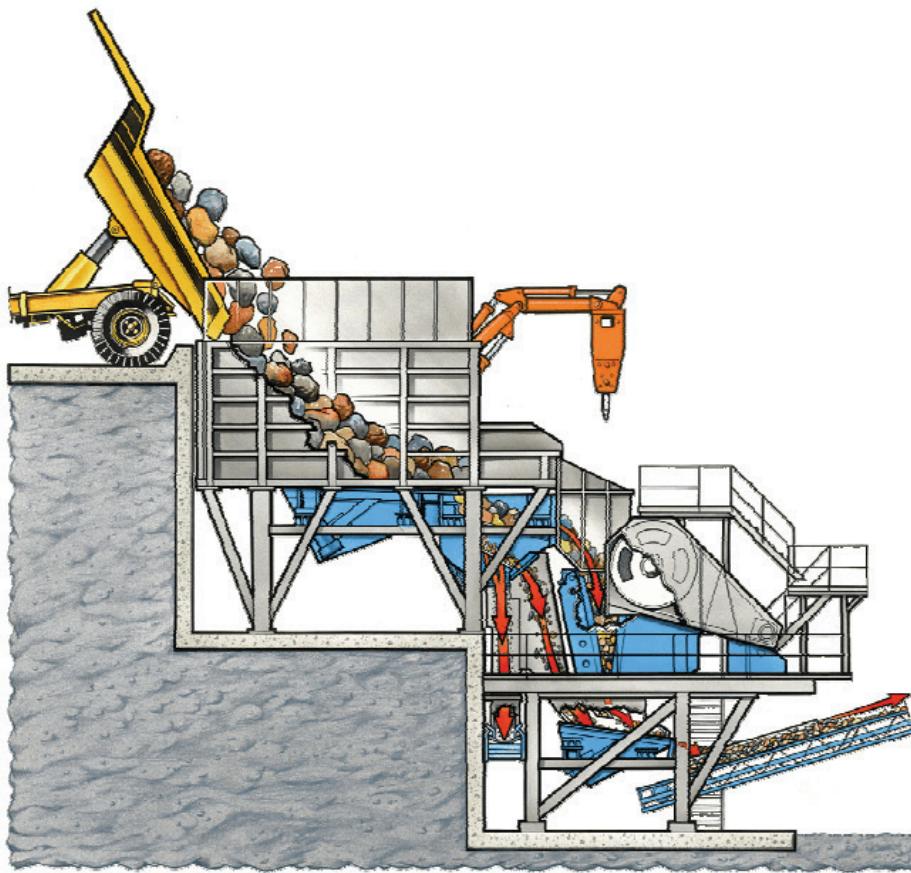


Figure 5 : le concassage primaire du tout venant de la mine. Source : 911metallurgist.com.

### Le concassage primaire

Le concasseur primaire est une machine conçue pour réduire la taille des grosses roches du tout-venant de la mine à 20-40 cm.

Il est généralement dimensionné de manière à travailler environ 75% du temps disponible. Il ne travaille pas en continu principalement par manque de matière à concasser à certaines périodes mais également pour des raisons économiques. Il est, en effet, plus rentable d'utiliser les concasseurs quand le prix de l'électricité est le plus bas, c'est-à-dire durant la nuit, ce qui ne correspond pas à la période de travail d'extraction qui a, elle, plutôt lieu en journée.

Il n'est pas rentable d'entasser la roche extraite sur un stock pile « tampon » en attendant son traitement par le concasseur primaire. Cette solution n'est à appliquer que lors d'une panne de courte durée du concasseur primaire ou pour couvrir éventuellement un temps de pause si la capacité de production du concasseur primaire limite le traitement en aval.

Le concassage primaire se fait toujours en circuit ouvert, parfois précédé d'un grizzly<sup>1</sup> qui élimine les pierres dont la granulométrie est inférieure à une certaine taille afin de ne pas surcharger inutilement le concasseur et d'en augmenter ainsi le rendement.



<sup>1</sup> Le grizzly ressemble à une grille, il sert à enlever les blocs de trop grande dimension du circuit afin de ne pas endommager les machines.

Figure 6 : Grizzly [1]

Il existe 2 principaux types de concasseurs primaires pour les opérations de fragmentation sur la roche.

- Les concasseurs giratoire (gyratory crusher) ; peuvent produire de 600 à 6000 t/h, selon la taille.
- Les concasseurs à mâchoire (jaw crusher) ; peuvent assurer jusqu'à 1.400 t/h en fonction de leur serrage qui détermine la granulométrie de sortie.

Le concasseur à impact (impact crusher) peut également être utilisé au primaire mais son utilisation est habituellement limitée à ce stade.

Quel que soit le type de concasseur utilisé, il s'agira toujours de machines lourdes et très résistantes, capables de fractionner des blocs de roches de taille importante.

#### Concasseurs à mâchoires

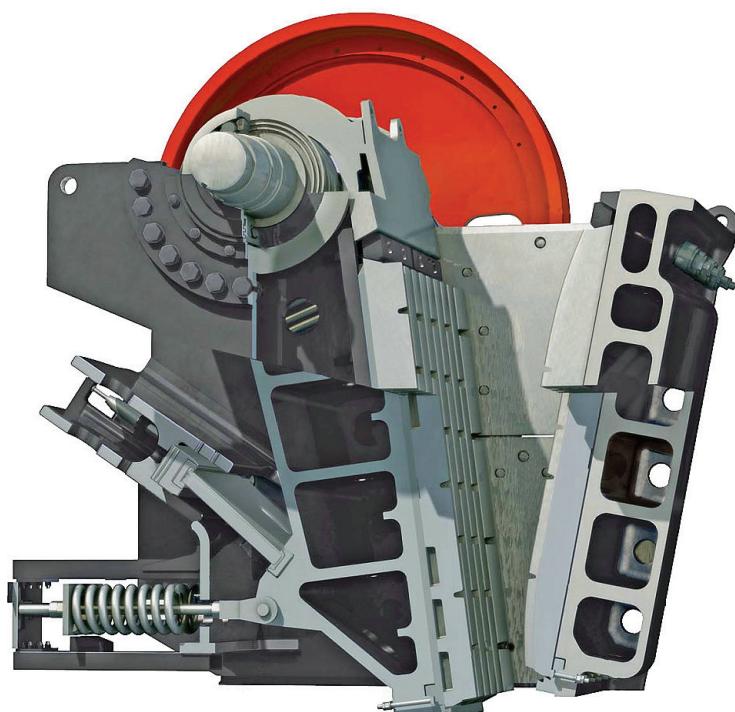
Les concasseurs à mâchoires reposent sur un principe assez simple qui consiste à compresser la roche pour réduire sa taille. Il est constitué généralement d'une paroi mobile et d'une autre fixe et muni d'un blindage (simple effet). La partie mobile est mise en mouvement grâce à un système rotatif externe relié par un arbre de transmission.

Ce concasseur associe deux mouvements : un mouvement de compression (de gauche à droite) qui permet de concasser la roche et un léger mouvement de friction (du haut vers le bas) qui permet de faire descendre les matières solides vers le convoyeur de réception des matériaux concassés.

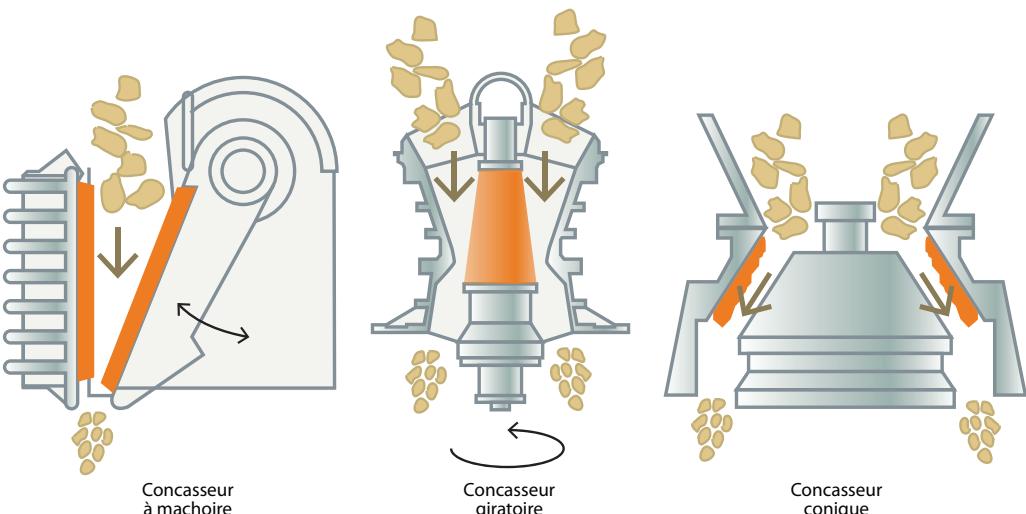
Ce type de concasseur est sans doute le plus populaire au monde de par sa conception rudimentaire, sa fiabilité et sa maintenance peu coûteuse. Il présente l'avantage de pouvoir concasser des matériaux très résistants et de grande taille.

Son inconvénient majeur est que la granulométrie de sortie n'est pas garantie et qu'il peut y avoir des aiguilles familièrement appelées « poisons » qui échappent au concassage. Celles-ci peuvent être très gênantes car elles peuvent bloquer en aval l'extraction d'un silo, bloquer le fond d'une goulotte, ...

Cet inconvénient n'existe pas pour un concasseur giratoire.



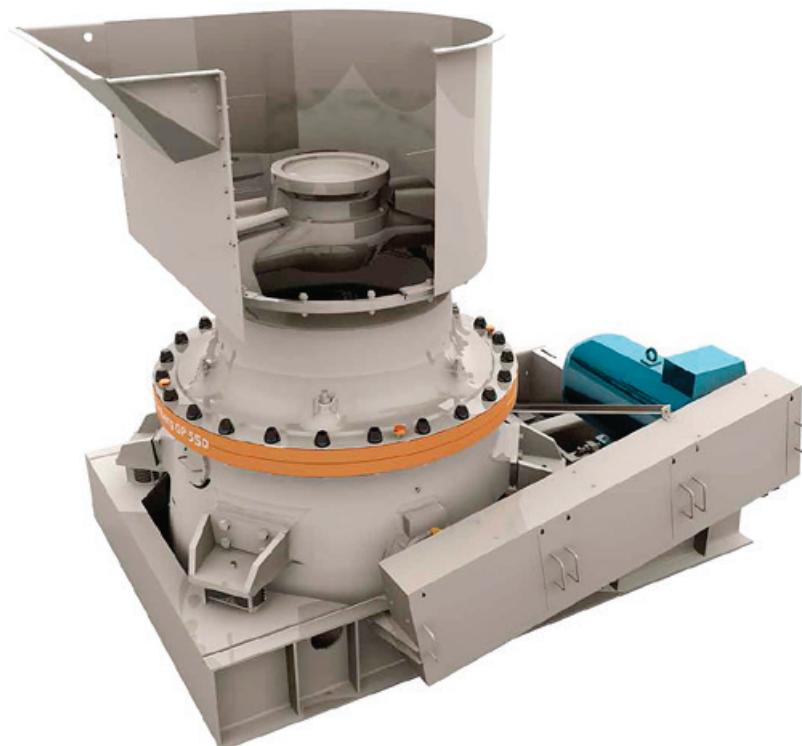
Concasseur à mâchoire. Source : briquettemachinery.



Concasseurs primaires et secondaires : schémas de principe. Source : Met-Solve Laboratories.

### Concasseurs giratoire

Le principe du concasseur giratoire est semblable à celui du concasseur à mâchoire mais avec le phénomène d'attrition bien plus présent. Il se compose d'une surface concave et d'une tête conique en mouvement. Le cône interne a un léger mouvement circulaire, mais ne tourne pas, le mouvement est généré par un excentrique ; ce dernier transforme un mouvement de rotation en un mouvement d'oscillation. La tête excentrée tournante est couverte par un blindage résistant à l'usure.



Concasseur giratoire. Source : directindustry.fr.

Concasseur à mâchoire



Concasseur giratoire



#### Caractéristiques principales

+	Grande ouverture de réception (favorise l'alimentation formée de grand bloc)	+	Capacité élevée
+	Manipule aisément les matériaux grossiers	+	Manipule aisément tout type de matériaux (minces ou grossiers)
+	Entretien plus facile	+	Alimentation plus simple
+	Faible coût de fabrication	+	Conception plus compacte

### Caractéristiques des concasseurs primaires

#### Le concassage secondaire/tertiaire

Le concassage secondaire ou tertiaire inclut toutes les opérations de réduction de la taille après le concasseur primaire. Il est parfois plus rentable de faire appel à un concassage tertiaire plutôt que de réduire directement à la taille voulue dans le concasseur secondaire. Toutefois, qu'il soit secondaire ou tertiaire, le concasseur aura le même design. La dimension d'alimentation pour un concasseur secondaire est généralement comprise entre 20 et 40 cm et pour un concasseur tertiaire entre 10 et 80 mm. En sortie, la taille des particules peuvent varier entre 5 et 20 mm.

Le concassage secondaire s'opère habituellement avec des concasseurs à cône (« cone crusher ») ou des concasseurs à percussion (« impact crusher »). Plus rarement, les concasseurs à marteaux (« hammer crusher ») et les concasseurs à rouleau (« roll crusher ») peuvent également être utilisés.

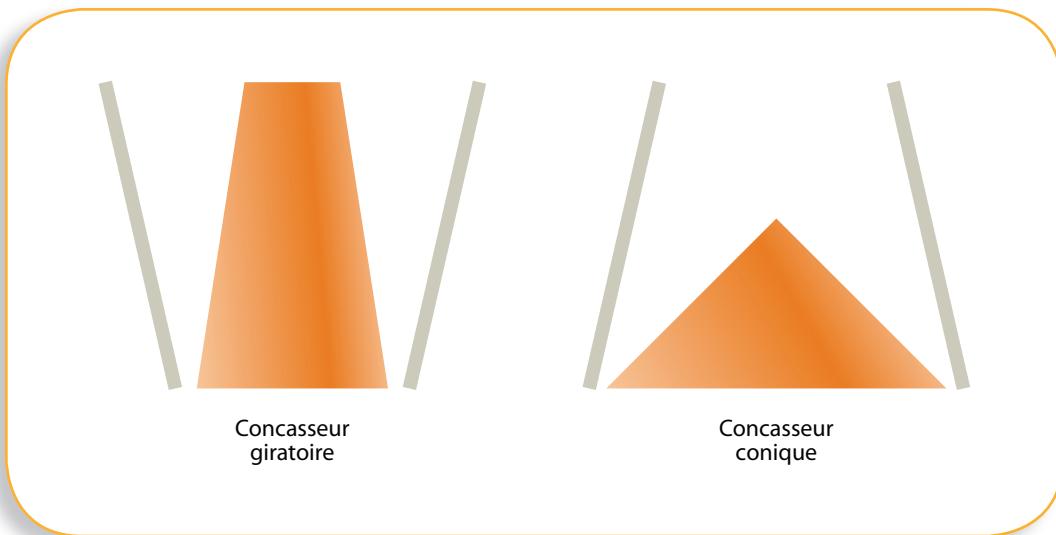
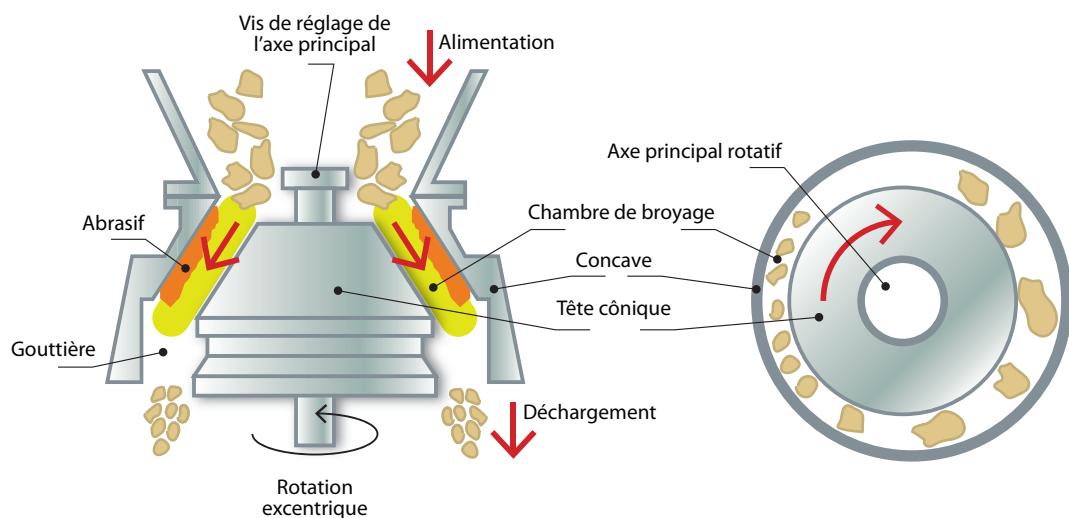


Figure 7 : Forme de la tête principale du concasseur et de la coquille extérieure d'un concasseur à cône et d'un concasseur giratoire [1]

### Concasseurs à cône

Les concasseurs à cône sont très similaires aux concasseurs giratoires, avec néanmoins quelques différences. Une première différence apparaît au niveau de la forme de la tête principale du concasseur et de la coquille extérieure (voir Figure 7).

Les concasseurs à cône sont également munis d'un système de libération à ressorts agissant comme fusible contre les brutales augmentations de pression provoquées par la présence d'un imbro�able et qui permet à celui-ci de passer par la chambre de concassage sans (trop) endommager le concasseur. Si la pression ne retombe pas rapidement à sa valeur normale, le concasseur est purement et simplement arrêté en charge pour éviter toute dégradation.



Concasseur cônique, schéma de principe.  
Source : S. Gaydardzhiev, Mineral Processing I, Support de cours ULG, 2015.

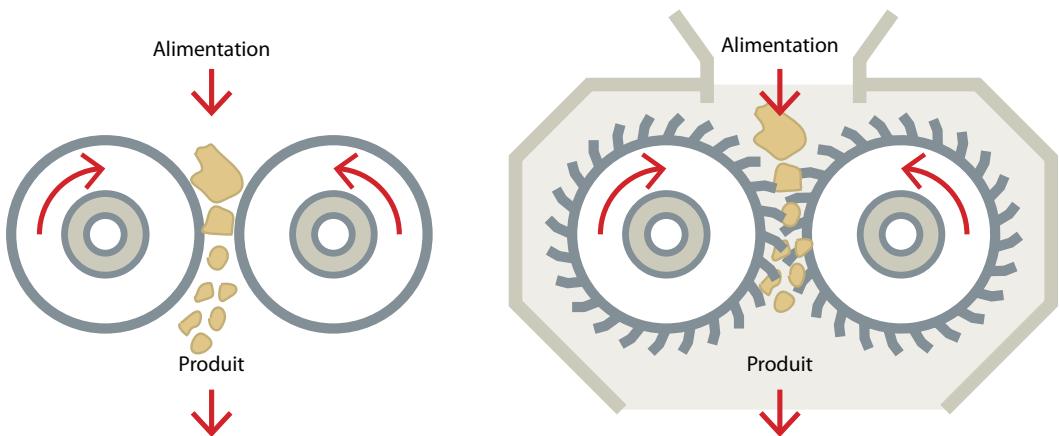


Figure 8 : Principe de concasseurs à rouleau (à gauche) lisse et denté (à droite) [1]

### Concasseur à rouleau

Les concasseurs à rouleaux utilisent deux grands tambours montés sur des axes, en rotation l'un vers l'autre pour écraser la matière entrante. Ce type de concasseur se base uniquement sur de la compression.

Il est utilisé pour des matériaux friables, collants et moins abrasifs (ex: calcaire,...). Il n'est absolument pas adapté aux produits allongés tel que les micas. En effet, ces types de matériaux peuvent facilement passer au travers des rouleaux sans être réduit s'ils ont la bonne orientation.

Les 2 cylindres sont placés à une distance fixée. Contrairement aux concasseurs à cône ou à percussion, ce n'est pas par contraintes successives que le matériau est réduit. Dans ce cas-ci, un seul passage entre les cylindres est nécessaire pour atteindre la taille voulue.

Les cylindres peuvent être lisses ou dentés selon la taille et la dureté de la roche à traiter.





Concasseur à percussion, vue et schéma de principe.

Sources : Xballmill.com, ballmillfactory.com.

Le grand désavantage du système est qu'afin d'obtenir un rapport de réduction raisonnable, des tambours très grands doivent être utilisés.

#### Concasseurs à percussion

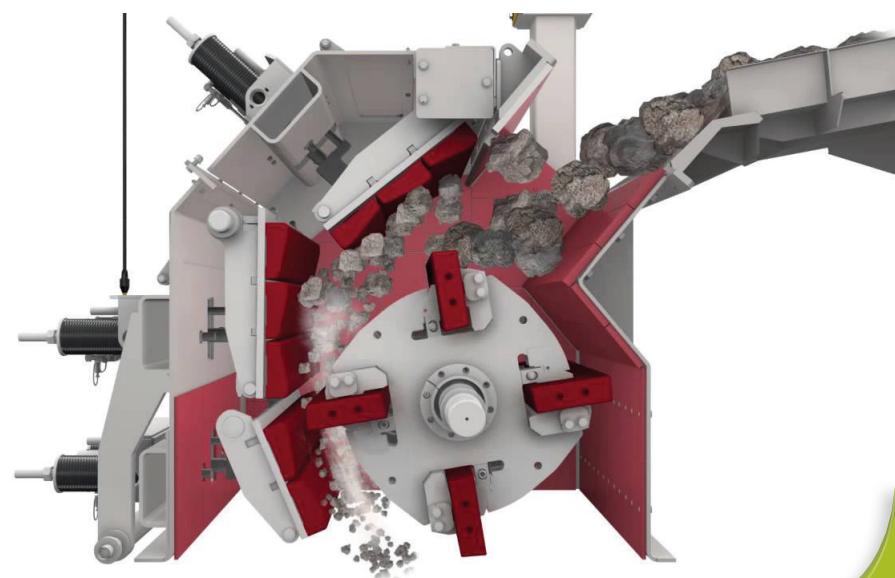
Les concasseurs à percussion utilisent une technique qui consiste à concasser le produit alimenté par choc plutôt que par pression. Le phénomène d'attrition est également utilisé dans ce type de concasseur par le réglage des écrans. Les grands concasseurs à percussion présente une capacité de l'ordre de 1500 t/h.

Le rotor du concasseur est généralement équipé de marteaux ou de couteaux, en fonction du type de matériau à concasser. Les couteaux seront préférés au concassage des matériaux mous, élastiques, fibreux ou collants (argiles par exemple) tandis que les marteaux seront préférés pour des matériaux durs et abrasifs (roches par exemple).

Cette machine combine l'énergie de rotation avec l'énergie de percussion pour concasser les matériaux. Si les granulats ne sont pas cassés par la percussion des blocs, l'énergie supplémentaire emmagasinée lors de la frappe permet de les casser lors de la rencontre avec les marteaux du rotor (ou couteaux).

Cette machine fonctionne généralement en continu.

Il y a une différence fondamentale entre le matériau concassé par compression (précédemment introduit) ou par impact. Dans le matériau concassé par compression, des contraintes internes restent et peuvent aider à une deuxième réduction de taille. L'impact, lui, donne une fracture directe sans qu'il ne reste des contraintes internes.



## Le broyage (grinding)

Le broyage est l'étape finale de la fragmentation permettant de réduire des produits dont la taille est exprimée en mm à des produits pulvérulents dont la taille s'exprime majoritairement en microns. Le circuit de broyage est souvent nécessaire à l'obtention d'un produit suffisamment broyé. Au cours de cette étape, les particules sont généralement réduites de 5 à 250 millimètres à une taille finale comprise entre 10 et 300 micromètres.

L'opération de broyage doit être réalisée avec soin, car une pierre trop finement broyé induira de lourdes pertes énergétiques et financières. En effet, plus la roche est broyée finement, plus le processus est énergivore.

À cette étape, les particules sont réduites par impact ou par abrasion. L'opération s'exécute aussi bien en milieu sec qu'en milieu humide, bien que ce dernier soit plus fréquent.

### Les régimes de fonctionnements

La vitesse à laquelle le broyeur tourne est un élément déterminant du processus de broyage. C'est ce paramètre qui va déterminer le régime de fonctionnement du broyeur. La vitesse permet de déterminer à quel moment la masse broyante va se détacher de la surface du cylindre pour retomber sur les granulats solides.

- À vitesse réduite, le régime est dit « en cascade ». Dans ce cas, la charge broyante a tendance à rouler jusqu'au point bas du cylindre. Il y a un phénomène d'abrasion des granulats à cause de cette charge broyante qui « roule » tout simplement sur eux. Ce régime induit la production de particules fines. Afin d'éviter l'usure du broyeur à cause de cette même abrasion, il faut augmenter l'épaisseur du blindage, ce qui peut s'avérer coûteux. Ce régime n'est dès lors pas choisi préférentiellement.
- À plus haute vitesse, le régime est dit « en cataracte ». La charge broyante est dans ce cas projetée sur les granulats à broyer en une série de paraboles et s'écrase sur ces derniers. La fragmentation produit dès lors de plus gros grains. Cette méthode permet de réduire l'épaisseur du blindage. Ce régime est choisi préférentiellement.

Lorsque la vitesse augmente encore, la charge broyante ainsi que les granulats sont plaqués contre les parois et il n'y a plus aucune réduction de taille. Ce point correspond à la vitesse critique du système. En pratique, on choisit une vitesse entre 50 et 90 % de la vitesse critique. Ce choix est influencé par des considérations économiques.

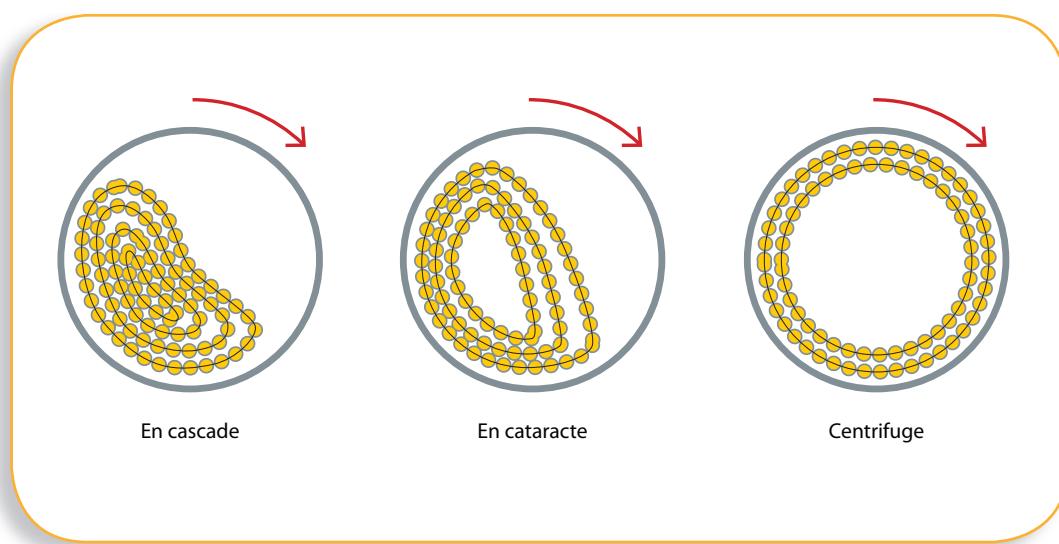


Figure 9 : types de mouvement dans un broyeur à boulets [1]

## Les broyeurs culbuteurs (tumblings mills)

Les broyeurs culbuteurs sont constitués d'une coquille cylindrique horizontale, recouverte avec un blindage renouvelable qui s'use au fur et à mesure de ses utilisations. Les modèles imposants sont généralement motorisés par leur axe tandis que les plus modestes sont déposés sur des cylindres en rotation. Le diamètre du broyeur va déterminer la pression exercée sur les granulats solides lors du broyage. Ainsi, plus les granulats contiendront de gros blocs, plus le rayon du broyeur sera grand.

Les broyeurs culbuteurs sont susceptibles de contenir une charge broyante (boulets, barres, ...) et libre de se mouvoir dans le cylindre. Le frottement de cette charge contre les parois permet de les mettre en mouvement. La plupart de l'énergie est alors dépensée pour mettre en mouvement la charge broyante. De plus, il y a de très fortes pertes en énergie en chaleur, bruit, et autres. Au décompte final, seule une fraction minime est réellement utilisée pour fragmenter les particules.

Les broyeurs culbuteurs sont de 3 types, et peuvent tous s'utiliser aussi bien en milieu sec qu'en milieu humide :

- broyeurs à boulets (ball mills)
- broyeurs à barres (rod mills)
- broyeurs autogène (autogenous mills)



Broyeur à boulets. Source : metso.com.



Broyeur à boulets.

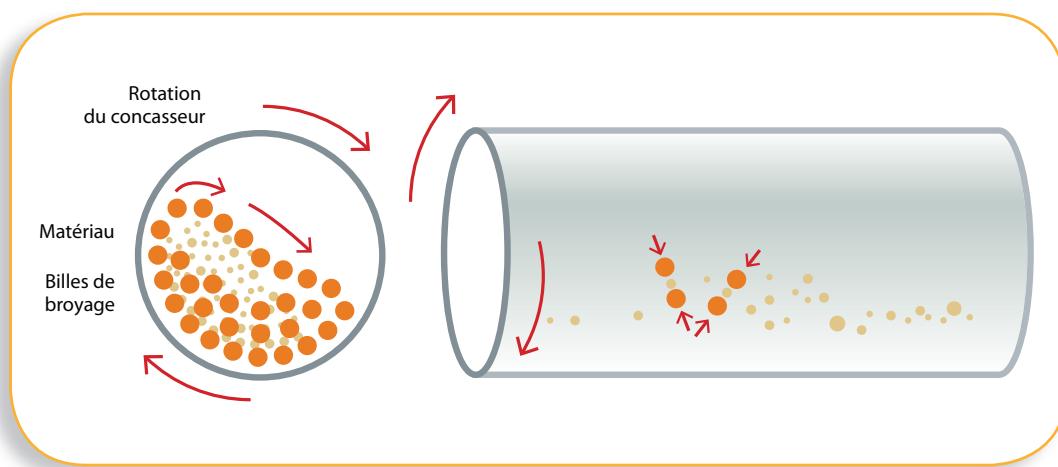
### Broyeur à boulets

Les broyeurs à boulets sont destinés à moudre des solides en poudres très fines. Ils sont donc habituellement très prisés pour le broyage fin (ex. ciment).

Le broyeur à boulets se compose d'un tambour horizontal partiellement rempli du produit à moudre et des éléments de broyage. Sa paroi intérieure est équipée de barres relevées qui, comme le nom l'indique, relèvent les boulets afin qu'ils retombent sur le produit à broyer. Les corps broyants sont généralement des boulets d'acier inoxydable : leur efficacité est due à la forte densité de ce métal et à la relative «inertie» de l'inox qui ne contamine pas trop les produits à broyer. Notons que le fer peut altérer certains matériaux bruts : on utilise alors des galets en silex ou en céramique. En général, le tambour est rempli à 30% de sa capacité en boulets.

Le broyeur à boulets peut être compartimenté (= chambre) ; la taille et la quantité de boulets étant différentes dans chaque chambre afin d'optimiser celles-ci en fonction de la taille du produit qui la traverse.

Les broyeurs industriels fonctionnent généralement en continu : ils sont chargés à une extrémité et déchargés à l'autre.



Principe de broyeur à boulets.



Broyeur à barres et barres de broyage de précision. Sources : memitali.com, alibaba.com.

### Broyeur à barres

Le broyeur à barres repose sur le même principe que le broyeur à boulets. La différence vient simplement de l'utilisation de barre plutôt que de boulet. Les barres sont généralement faite en acier très résistant (Haut %Carbone).

Vu la forme géométrique du corps broyant, le broyeur à barres permet d'obtenir des granulats globalement plus gros et plus hétérogènes (voir Figure 6).

### Broyeur (semi-) autogène

L'utilisation d'un broyeur à barres ou d'un broyeur boulets se justifie par le fait que les granulats ne sont généralement pas suffisamment solides (durs) que pour obtenir un produit broyé simplement par leurs entrechoquements. De ce fait, des corps broyant sont généralement ajoutés. Néanmoins, il se peut que les granulats soient suffisamment solides, et qu'on puisse épargner l'utilisation de corps broyant. Les systèmes fonctionnant de la sorte sont dit autogène (« Self-grinding »). Des systèmes semi-autogènes (SAG) sont également envisageables. Dans ce cas, le remplissage du tambour avec les corps broyants sont généralement compris entre 8 et 20%.

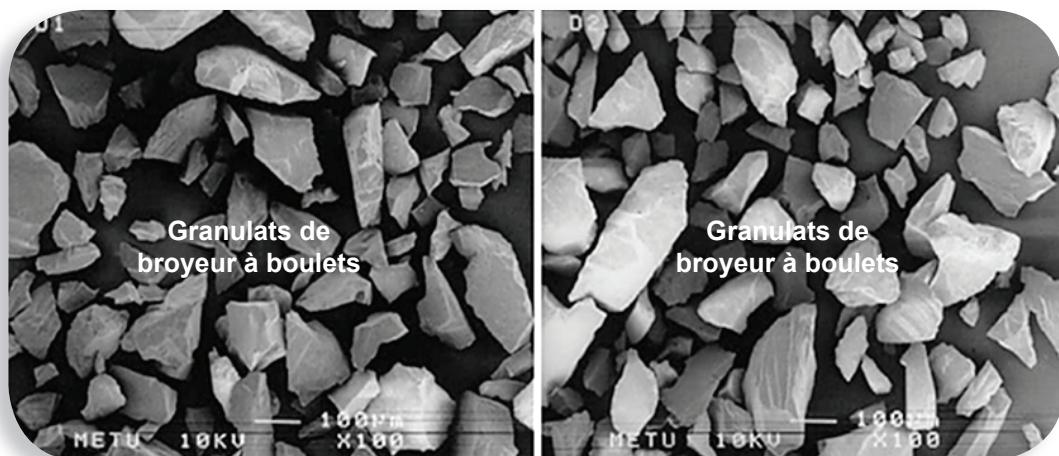


Figure 10 : comparaison des granulats sortant d'un broyeur à boulets et d'un broyeur à barres [1]

## Les circuits de broyage

Les broyeurs à barres et les broyeurs à boulets sont généralement mis en série dans un circuit de broyage. Car l'un permet d'obtenir des plus gros granulats, qu'on peut ensuite broyer plus finement dans un broyeur à boulets.

Des broyeurs mixtes, utilisant à la fois des boulets et des barres, sont également disponibles sur le marché. Ces systèmes présentent les avantages de chacune des méthodes en une seule machine, et permet dès lors d'épargner le fonctionnement d'un broyeur.

Comme pour les circuits de concassage, il faut distinguer les circuits ouvert des circuits fermés :

- Le circuit ouvert est généralement d'application lorsque les procédés en aval ne sont pas sensibles aux variations de tailles des granulats. En effet, il n'est pas possible de régler la granulométrie du produit autrement qu'en agissant sur les variables d'entrées du broyeur. Le débit d'alimentation doit dès lors être assez faible pour assurer aux particules un temps de séjour suffisant qui permette au broyeur d'éliminer les plus grosses particules, tout en risquant de surbroyer d'autres particules.
- Dans les circuits fermés, les particules de dimensions convenables sont immédiatement retirées du circuit par un classificateur alors que les morceaux grossiers retournent au broyeur ; ce qui permet de prévenir tout risque de surbroyage. En conséquence, le temps de séjour des granulats dans un broyeur en circuit fermé est moindre. Le circuit fermé présente donc l'avantage d'être moins consommateur d'énergie.

À présent, il y a lieu de différencier le broyage à sec et le broyage humide :

- Le broyage à sec est généralement utilisé lorsque le broyage humide n'est pas favorable au type de roche. En effet, l'eau est susceptible de modifier la structure chimique de certaines roches. Outre cet aspect pratique, le broyage à sec permet de limiter l'usure du broyeur et produira plus de fines.
- Le broyage humide est la plupart du temps favorisé car son fonctionnement améliore le rendement énergétique par rapport au broyage à sec. En effet, les consommations de puissance sont plus faibles. De plus, le broyage humide permet d'humidifier le milieu qui peut s'avérer utile pour les procédés en aval, et permet de limiter les problèmes de poussière. Enfin, le broyage humide favorise le transport des produits et leurs manipulations (utilisation de pompes, ...). Notons néanmoins qu'en pratique, il est nécessaire d'obtenir un taux d'humidité supérieure à 50%. En effet, sous cette barrière, il y a risque de formation de pâtes, et de blocage du broyeur (bourrage).

En conclusion, **d'un point de vue purement énergétique, il est plus intéressant de travailler en circuit fermé et en milieu humide.**



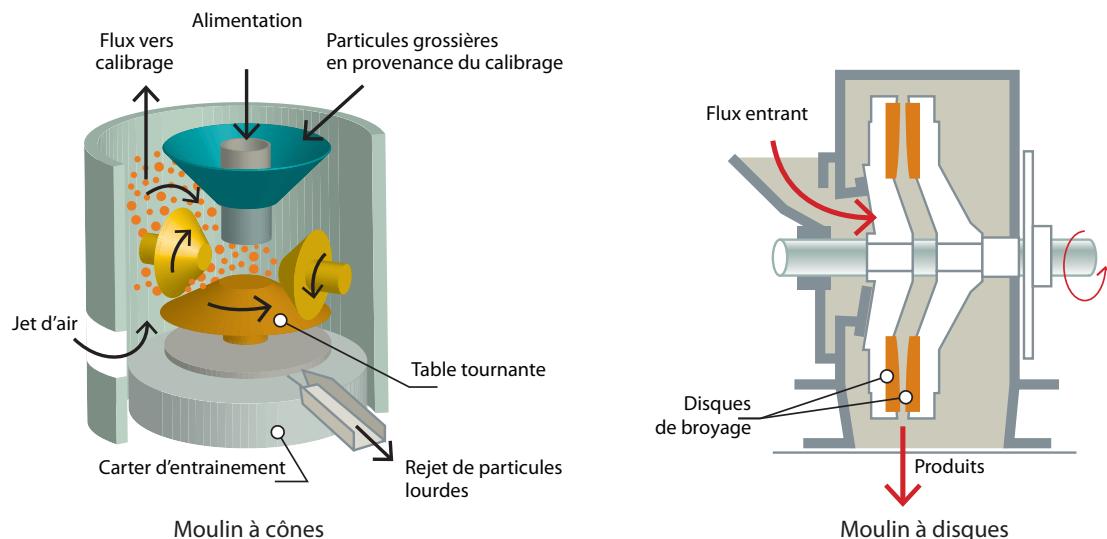
Broyeurs humide à boulets. Source : directindustry.fr.

## Les moulins (milling)

Les moulins sont des hybrides entre les concasseurs et les broyeurs. Les concasseurs ont été définis comme des machines utilisant la compression ou l'impact d'une particule contre une paroi rigide pour réduire sa taille. Les broyeurs utilisent pour leur part le cisaillement, le broyage par impact de parties libres (ex: boulets,...) ainsi que de l'attrition (abrasion). Les moulins utilisent aussi bien l'attrition que la compression. C'est pourquoi ils ne peuvent pas être rangés dans une catégorie précise.

### Moulin à cônes (roller mill)

Cette machine permet de broyer et de trier en même temps les particules légères et lourdes grâce à un jet d'air. Les granulats à moudre entrent par le dessus du dispositif et tombent dans la partie centrale. Ensuite, il suit la pente du cône du milieu tout en tournant. Il est alors broyé par les 2 cônes horizontaux. Il y aura donc présence de particules fines lors du broyage et ces dernières seront emportées par un jet d'air vers le dessus de l'appareil tandis que les plus lourdes descendront le long du cône central et seront récupérés en bas.



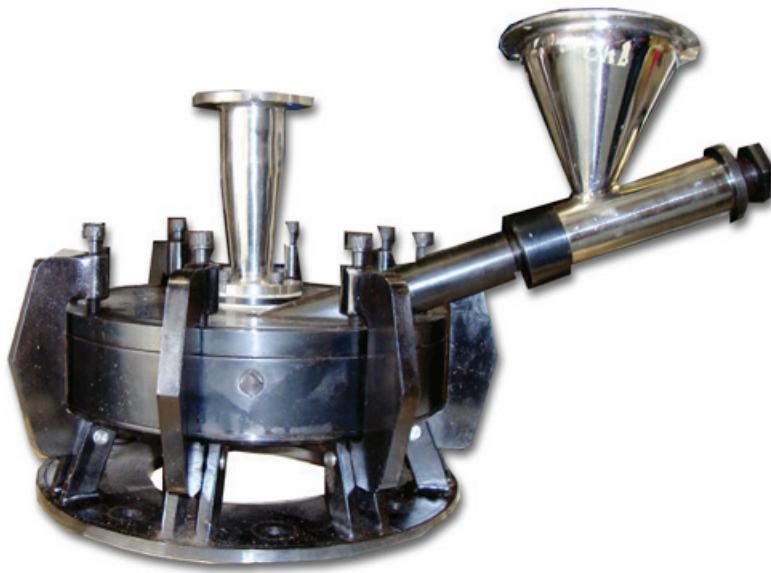
De gauche à droite, Figures 11 et 12 : Principe du moulin à cônes et moulin à disque[1]

### Moulin à disque (disc mill)

Cette machine utilise aussi bien la compression que l'attrition ; bien que ce dernier soit le processus de réduction principal.

Il s'agit d'un disque fixe faiblement distant d'un disque rotatif ; l'écart entre les disques est réglable suivant le type de roche à broyer.

Lorsque l'on charge le moulin, la matière à broyer vient se placer entre les disques. Le frottement entre les disques étant très fort, l'usure est donc très importante sur ces pièces. C'est pourquoi, elles sont construites en céramique résistante à l'abrasion.



### Broyage ultrafin à jet d'air/vapeur (jet mill)

Le broyage ultra-fin est parfois nécessaire à certains types de roche. Les broyeurs à jet utilisent habituellement de l'air comprimé comme gaz de broyage. Il existe par ailleurs des systèmes utilisant de la vapeur surchauffée.

Le matériau est broyé par attrition en introduisant des jets d'air/vapeur de haute énergie. Dans ces systèmes, le broyage est dit autogène. Le mouvement centrifuge des particules dans la chambre de broyage effectue un tri efficace pour contrôler la taille des particules. Dans ces broyeurs, la taille des particules obtenues sont dans 97% des cas inférieure à 2,5 microns.

Les principaux avantages des broyeurs à jet sont les suivants :

- Production de particules ayant une taille et une apparence uniformes ;
- Pas de problème d'usure ;
- Pas de contaminations.

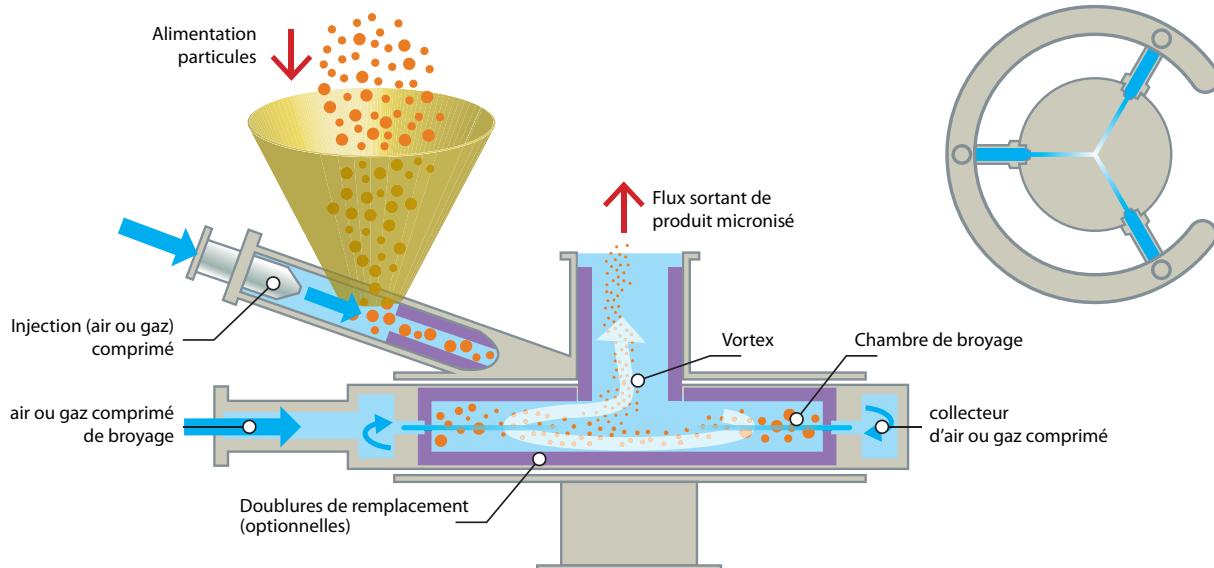
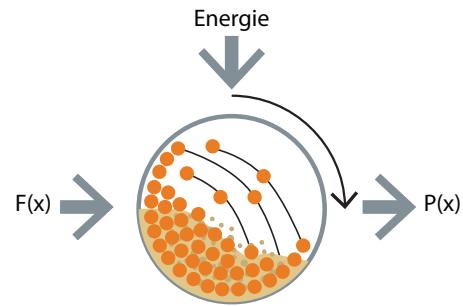


Figure 13 : Principe du moulin à jet (air/vapeur).



## Fragmentation et consommation énergétique

Comme déjà introduit dans ce cahier technique, la fragmentation est une opération responsable de près de 70% de consommation d'énergie dans le traitement de la roche.

Au même titre que le traitement de la roche, la fabrication du ciment associe 70% de sa consommation énergétique pour des opérations de broyage. À titre indicatif, la consommation associée aux opérations de fragmentation exprimée par tonne de ciment produit est généralement de l'ordre de 130 à 215 kWh/tonne dont voici le détail poste par poste :

- Le poste «concassage» dans les carrières (calcaire) :
  - concassage primaire : 1 kWh/ tonne
  - concassage secondaire : entre 1 kWh/ tonne et 5 kWh/tonne dépendant de la granulométrie visée
- Le poste broyeur pour le cru consomme entre 15 et 30 kWh/tonne
- Le poste broyage ciment consomme :
  - entre 45 et 65 kWh/tonne pour le broyage du ciment
  - entre 40 et 70 kWh/ tonne pour le broyage du laitier
  - entre 30 et 40 kWh / tonne pour le broyage des cendres

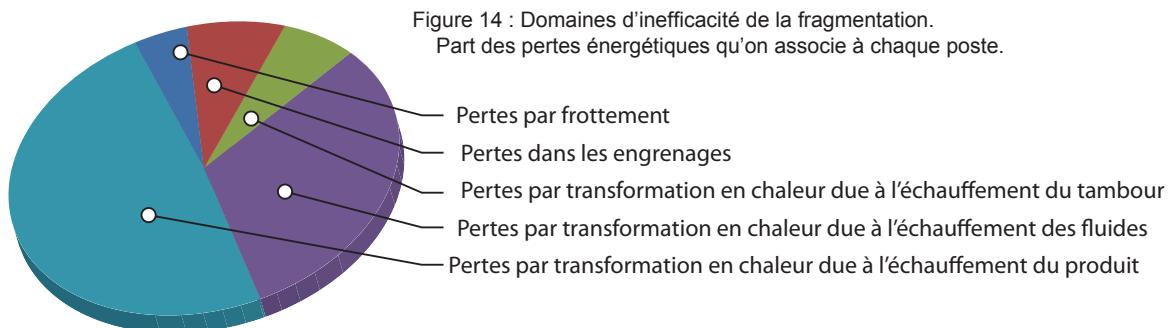
Un des enjeux mondial de ce siècle sera de trouver un moyen de réduire cette consommation en énergie, soit en optimisant les machines et procédés existants, soit en en créant de nouveaux.

Par exemple, en terme d'optimisation des procédés, on soulignera la nécessité de fragmenter « juste à point ». Autrement dit, éviter autant que possible ce qu'on appelle l'« overgrinding », soit le broyage excessif. Il sera également nécessaire de favoriser des opérations de concassage aux opérations de broyage. En effet, il est 5 fois plus efficace de concasser que de broyer ; d'où la nécessité d'inclure les opérations de concassage en priorité absolue dans une chaîne de fragmentation.

## Les pertes énergétiques durant la fragmentation

Aucune relation ne permet de calculer d'une manière satisfaisante l'énergie qu'il faut réellement dépenser pour effectuer un broyage donné. On peut néanmoins affirmer avec certitude que l'opération de broyage a un très faible rendement énergétique (de l'ordre de 1%). Autrement dit, parmi les 70% de l'énergie nécessaire à la fragmentation, seul 1 % est réellement utilisé pour la réduction de taille des particules.

Lors d'une opération de fragmentation, les pertes énergétiques sont nombreuses. Ce sont ces pertes qui sont à l'origine des très faibles rendements énergétiques des opérations de broyage/concassage. Les domaines d'inefficacité où l'énergie est dépensée en pure perte, voir en puissances, sont les suivantes :



À noter que de nombreux développements sont en cours pour limiter ces pertes.

## Les récentes améliorations des équipements de broyage/concassage

La technologie a permis une meilleure instrumentation et régulation pour améliorer les rendements des équipements de fragmentation. Les instruments d'aujourd'hui détectent non seulement l'état de santé de l'équipement, mais contrôlent également les conditions de fonctionnement telles que l'obstruction, le taux d'entrée en alimentation et la distribution granulométrique d'alimentation.

La technologie a également permis la mise au point de machines plus performantes. Parmi ces machines, les cylindres de broyage haute pression (HPRG – High Pressure Grinding Rolls) en font parties, également appelé presses à rouleaux. Ce système est de plus en plus utilisé pour la fragmentation des roches dures du fait de leur efficacité énergétique. D'autres machines telles que les systèmes ISA-mill ou encore SELFRAG sont clairement des technologies innovante en terme d'efficacité énergétique.

Les trois systèmes énoncés ci-avant font très certainement partie des « best available technologies » dans leur domaine. Ces machines sont décrites ci-dessous.

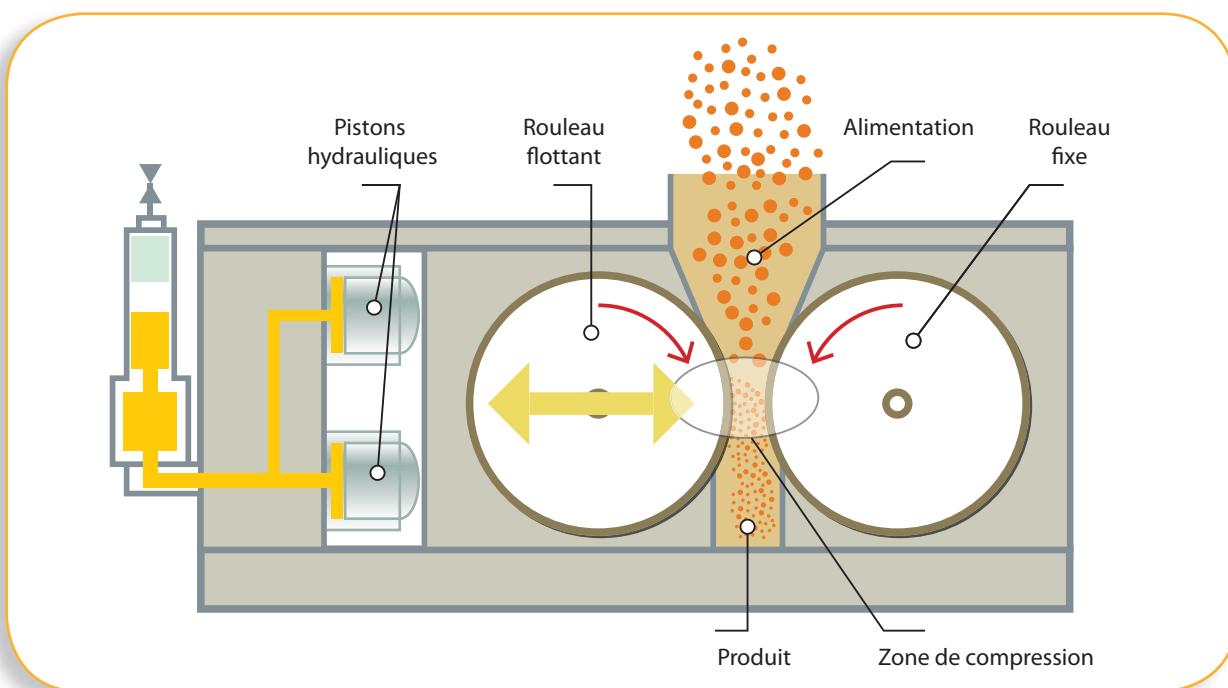


Figure 15 : principe d'une presse à rouleaux haute pression.

### Les cylindres de broyage à haute pression

Les cylindres de broyage à haute pression correspondent en quelque sorte à la nouvelle génération des concasseurs à rouleaux, et sont de plus en plus présents dans l'industrie extractive. L'avantage de ce dernier est que l'espace entre les cylindres est modulable tandis que pour le modèle précédent, il était fixe. Grâce à l'électronique, l'écart entre les rouleaux peut être modulé suivant le type de roche extraite traité.



Broyeur à cylindres haute pression. Source : Enduron ® RPM.

La pression est largement supérieure dans ce dispositif par rapport à la méthode de concassage conventionnelle. La pression croît au fur et à mesure que l'on diminue l'écartement, elle va de 50 à 300 MPa. Les hautes pressions engendre la formation de micro crack dans l'alimentation et génère une grande part de particules fines qu'on n'aurait pas pu obtenir à des pressions normales. De plus, grâce à ces niveaux de pression disponibles, un plus large panel de roche peut être traité.

Ce système fonctionnant à haute pression rencontre de plus en plus de succès dans l'industrie extractive ; ce qui peut notamment s'expliquer par le fait que cette machine permet d'éviter le broyage, qui normalement arrive en aval du concassage. Avec ce système innovant, la taille des particules peut atteindre la taille voulue en une seule opération. Bien que les particules grossières peuvent éventuellement être recirculées. Cette technique permet en outre l'obtention d'une courbe de distribution granulométrique plus large en sortie du HPRG (voir Figure 16) ainsi que d'importantes économies d'énergie.

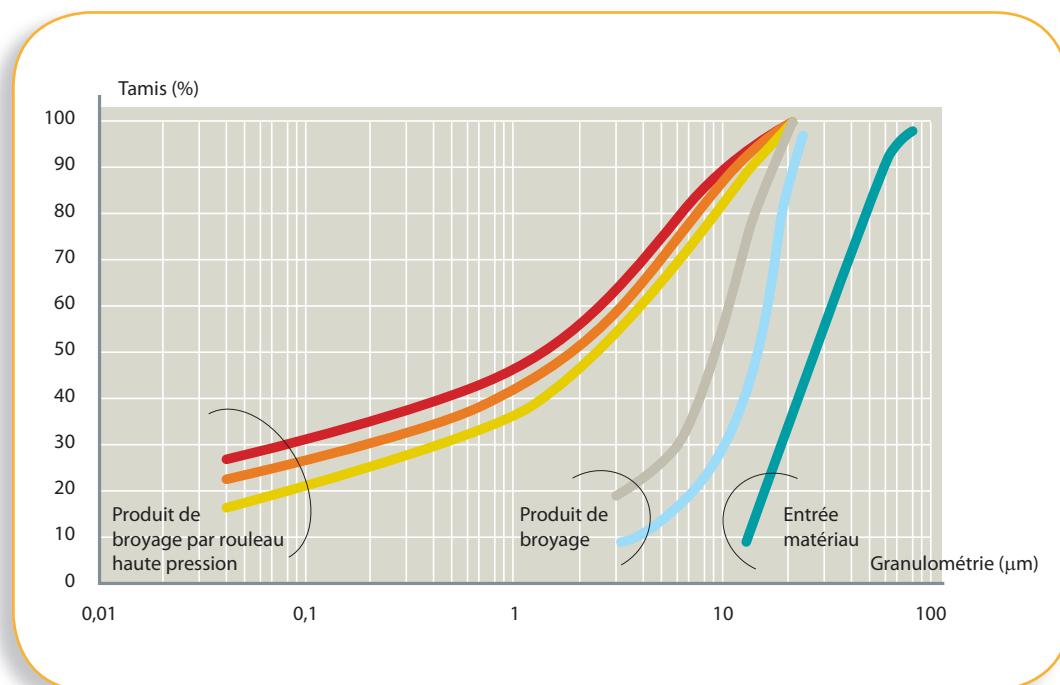
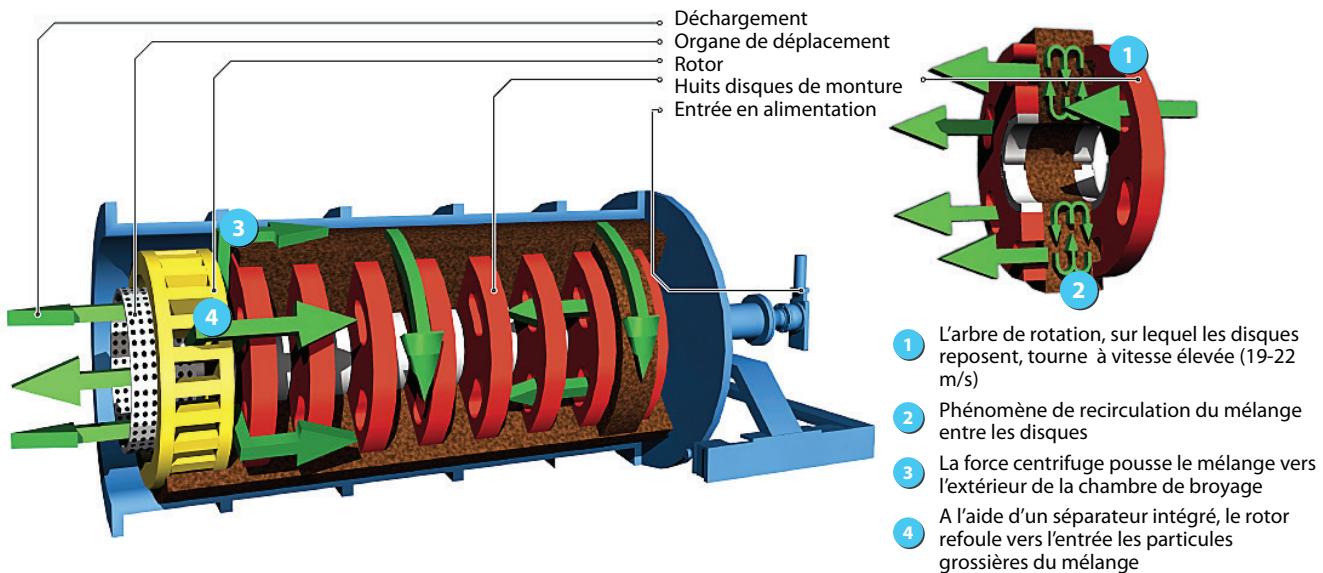


Figure 16 : Distribution granulométrique des produits issus d'un HPRG



### ISAmill

À l'inverse des broyeurs à boulets et des broyeurs à barres, dans lesquels le corps broyant et la roche sont soumis des actions répétées de tonnelage, l'IsaMill se base, pour sa part, sur du broyage par agitation.

Concrètement, cette machine est constituée d'agitateurs montés sur un arbre rotatif horizontal. La chambre de broyage est presque entièrement (70-80%) remplie du corps broyant et des granulats à broyer en suspension dans de l'eau ; ce qui diffère à nouveau des broyeurs rotatifs traditionnels, pour lesquels la chambre de broyage n'est que partiellement remplie (environ 30%).

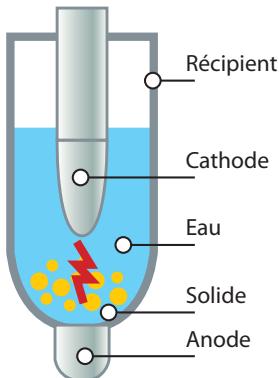
Lorsque l'IsaMill est en fonctionnement, les agitateurs mettent le mélange de la chambre de broyage en mouvement et provoquent des collisions entre le corps broyant et les particules de roche, ainsi qu'entre les particules de roche elles-mêmes. Cette action met essentiellement en jeu de l'attrition et de l'abrasion ; opération visant à détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules par friction des particules les unes contre les autres. Il en résulte la formation de particules fines. Cette opération diminue les consommations énergétiques par rapport à un système de broyeur à boulets ou de broyeur à barres, dans lesquels les consommations énergétiques sont largement supérieures de par les pertes énergétiques beaucoup plus importantes dans ces derniers.

Pour ce qui est de la taille des particules, les broyeurs IsaMill permettent d'obtenir un produit compris entre 25 et 60µm. Cette taille peut par ailleurs également s'obtenir en sortie d'un circuit de broyage traditionnel tel qu'un broyeur à barres, suivi d'un broyeur à boulets avec éventuellement un séparateur du type cyclone qui sépare les particules fines des grossières qui ont besoin d'être broyées plus finement. Dans un broyeur du type IsaMill, les particules grossières sont renvoyées au broyeur par l'action centrifuge et forment ce que l'on appelle une «charge de remise en circulation». L'action centrifuge du broyeur fait effectivement en sorte que seules les fines particules quittent le broyeur, tandis que les particules grossières recirculent à nouveau. Les consommations énergétiques associées au fonctionnement d'un broyeur IsaMill sont dès lors bien inférieures aux consommations induites par un circuit de broyage traditionnel. En effet, un seul broyeur IsaMill suffit pour obtenir un produit compris entre 25 et 60µm, alors que ce ne sera très certainement jamais le cas avec un seul passage dans un broyeur à boulets ou un broyeur à barres.

La commercialisation de cette nouvelle technologie a réellement débuté en 2013. À ce jour, la technologie ISAmill est présente sur les 5 continents où 127 installations sont recensées pour une puissance totale installée de 212.892 kW. À l'avenir, cette technologie va continuer à croître et venir remplacer par son caractère innovant les broyeurs conventionnels.



Source : ISAmill.



Source : SelFrag.

Figure 17 : principe de fragmentation par SelFrag

### Le SelFrag

Le SelFrag est une technique de fragmentation par décharges électriques à très haut voltage. Cette technique permet de substituer les concasseurs dans le pré-traitement de la roche (ou des déchets comme ce sera abordé plus loin dans ce cahier technique). Son utilisation permettrait de réduire ou éliminer le besoin d'un broyeur à boulets plus tard dans le processus de fragmentation. Il s'en suit donc de moindres consommations énergétiques sur l'ensemble de ce processus.

Concrètement, un générateur à impulsion électrique propulse une décharge électrique, comparable à l'éclair, à travers la roche immergée dans l'eau. L'eau est traitée en amont pour une réduction de sa conductivité, pour que celle-ci agisse comme un matériau isolant.

Les différences de conductivité électrique entre les composants de la roche génèrent des fractures aux interfaces. Cette technique favoriserait la scission de la pierre au niveau de ses plans de clivage. De plus, les fissures créées par l'onde de choc du SelFrag auraient tendance à créer des effets qui affaiblissent considérablement la roche, et facilite dès lors les opérations de broyage en aval du SelFrag.

La première installation de ce type au niveau mondial devrait être installée dans l'usine d'incinération de déchets ménagers de Posieux (FR), exploité par la société SAIDEF, et devrait être mise en service dans le courant de l'année 2016. Grâce à ce nouvel équipement, la société s'attend à réduire de 30% ses besoins de capacité de mise en décharge. En effet, cet équipement permettra d'augmenter largement la récupération des métaux ferreux et non-ferreux contenus dans les scories. De plus, les métaux récupérés par cette technique présenteront un haut niveau de pureté et bénéficieront donc d'un prix d'achat plus élevés.



Usine d'incinération de Posieux (FR) Source : newsmemory.com.

## La Fragmentation dans le traitement des déchets

Dans le traitement des déchets, l'objectif de la fragmentation est de récupérer au mieux les éléments de valeurs incorporés dans les déchets, pour ensuite permettre leur recyclage. Les déchets sont par définition des solides dont la composition est complexe et hautement hétérogène. De ce fait, la fragmentation des déchets en ces éléments constitutifs est une étape essentielle au recyclage dit « mécanique ».

Les équipements de fragmentation rencontrés dans le traitement des déchets par recyclage mécanique sont très proches des technologies présentées dans le traitement de la roche. Par ailleurs, certains flux comme les plastiques ont des propriétés très différentes des roches. En effet, les plastiques sont des matériaux ductiles tandis que les roches sont pour la plupart fragiles. De ce fait, d'autres équipements se prêtent mieux à la fragmentation de ces matériaux dits ductiles.

Pour résumer de manière générale, **la fragmentation des déchets met en œuvre trois grandes classes d'appareils en fonction de la nature des matières à traiter :**

- **machines par compression** : réduction des matériaux durs, compacts et nettement abrasifs (ex : concasseurs à mâchoires, giratoire ou à cône) ;

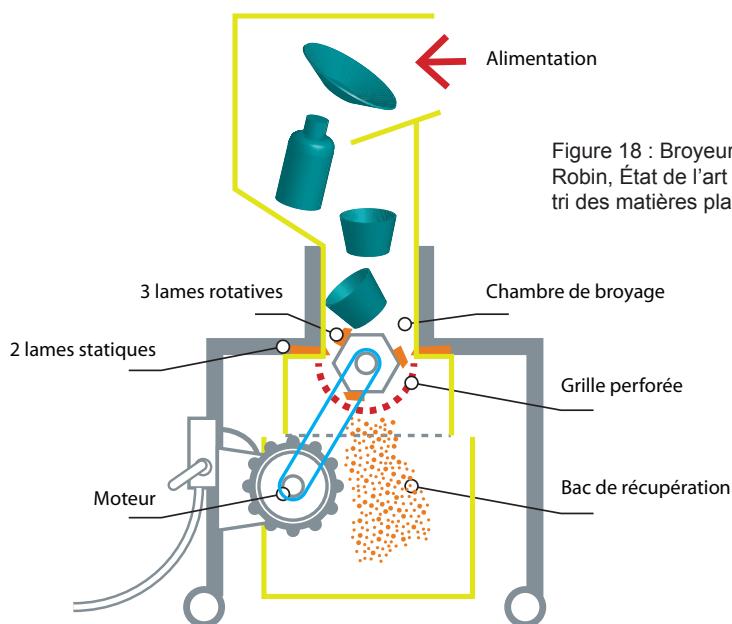
Ces équipements ont largement été exposés précédemment et ne sont dès lors pas détaillés dans cette partie.

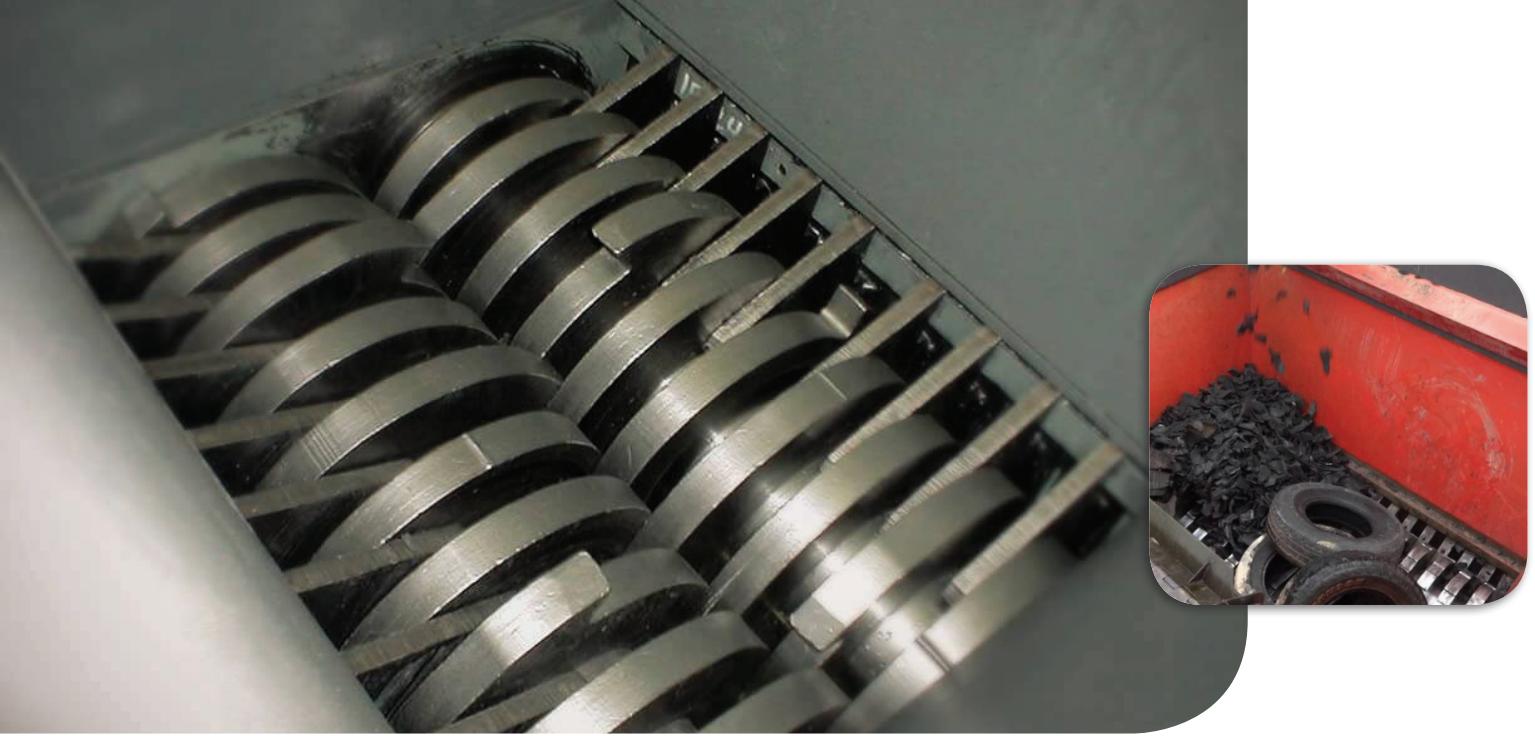
- **machines par percussion** : réduction des matériaux durs ou demi-durs, compacts ou friables, mais peu abrasifs (ex : concasseurs à percussion, broyeurs à boulets, broyeur à barres) ;

Comme pour les machines par compression, les machines par percussion ont été abordées précédemment. Il y a toutefois lieu de préciser ici que dans le cas du traitement des déchets, les concasseurs à percussion équipés de couteaux sont les plus couramment rencontrés ; étant donné que les déchets sont la plupart du temps des matériaux ductiles.

- **Machines par tranchage** : éclatement ou déchiquetages de matériaux tenaces, plastiques, fibreux (ex : déchiqueteurs, broyeurs à couteaux) ;

Les opérations de fragmentation par tranchage peuvent à la fois se faire par des équipements du type déchiqueteur ou du type broyeurs à couteaux. En pratique, les déchets passent en premier lieu dans des déchiqueteurs, et s'il y a lieu de broyer plus finement les produits, ceux-ci peuvent éventuellement passer dans un broyeur plus fin du type broyeur à couteaux (voir Figure 18).





De gauche à droite : déchiqueteur à deux arbres et déchiquetage de pneus.  
Sources : adrecyclingsolutions.com, youtube.

Les déchiqueteurs, ou plus précisément les déchiqueteurs à cisailles rotatives, sont composés d'arbres pourvus de couteaux en forme de disques à une ou plusieurs dents. Parmi les équipements disponibles sur le marché, il y a lieu de distinguer les déchiqueteurs à 2 ou 4 arbres. L'utilisation des déchiqueteurs à 4 arbres permet simplement d'augmenter les possibilités opérationnelles dans le traitement des déchets.

Les matériaux couramment déchiquetés sont les pneus, les métaux, les épaves automobiles, le bois, les plastiques, et les ordures ménagères.

Les déchiqueteurs traitent généralement les déchets en vrac. Lorsque ceux-ci arrivent en sacs, on rencontre fréquemment les déchiqueteurs du type ouvre-sacs. Ces équipements permettent le déchirement des sacs par le biais de couteaux spéciaux. Deux grands principes se retrouvent sur le marché ; le premier est celui du tambour équipé de dents assurant le déchirement, et le second est équipé d'un balancier.

Les déchets récoltés en aval des systèmes ouvre-sacs peuvent éventuellement être redirigées vers des unités de déchiquetage comme ceux précédemment introduit (et où les déchets sont traités en vrac) afin de réduire leur taille.

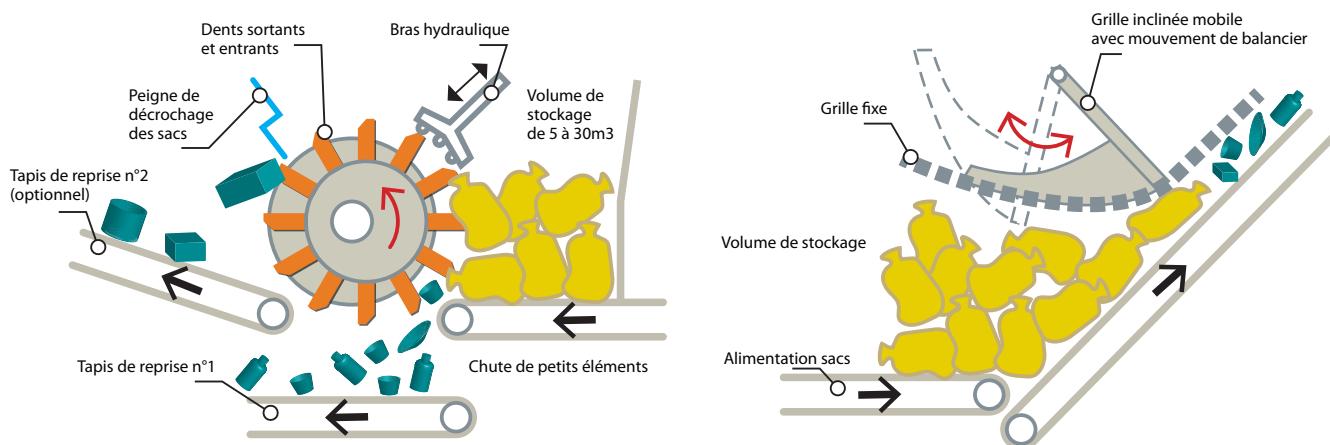


Figure 19 : Les systèmes ouvre-sacs sur le marché [2]

## Difficulté de la fragmentation dans le traitement des déchets

Le problème majeur du recyclage des déchets tels que les mâchefers ou scories (déchets que les incinérateurs génèrent après avoir brûlé nos poubelles), les DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques) ainsi que tout autre matériau composite, est la difficulté à les fragmenter par les techniques de broyage conventionnel. En effet, ces techniques ne sont pas très bien adaptées aux caractéristiques des composites car elles ne permettent pas d'assurer un degré de libération suffisant.

Or, il se trouve que certains déchets composites comme les mâchefers sont susceptibles de contenir une quantité importante de métaux (fer, cuivre,...). Le recyclage de ces flux de déchets apparaît dès lors très intéressant.

La libération des composants contenu dans certains matériaux composites (libération des métaux enfermés dans les cartes de circuits imprimés, séparation des composants dans des plastiques renforcées de fibres) doit dès lors se tourner vers des techniques spécifiques de fragmentation (fragmentation électrodynamique, broyage cryogène, etc...) qui ne sont pas encore 100% opérationnelles, et qui sont donc actuellement difficilement viables économiquement parlant.

## Équipements innovants

### Fragmentation électrodynamique

Parmi les technologies présentées ci-dessus, le SelFrag est une technologie permettant de contourner les difficultés rencontrées par les techniques de broyage conventionnel. En effet, le SelFrag est une technique se basant sur la fragmentation électrodynamique. Cet équipement est particulièrement bien adapté à la fragmentation des matériaux composites (notamment les mâchefers). Pour rappel, cette technique permet de libérer les différents constituants en désagrégant ces matériaux grâce à des décharges électriques. Comme illustré précédemment dans ce cahier technique, cette technologie devrait voir le jour très prochainement dans l'industrie.

Figure 20 : Traitement des scories des usines d'incinération d'ordures ménagères par la technologie SELFRAG [2]



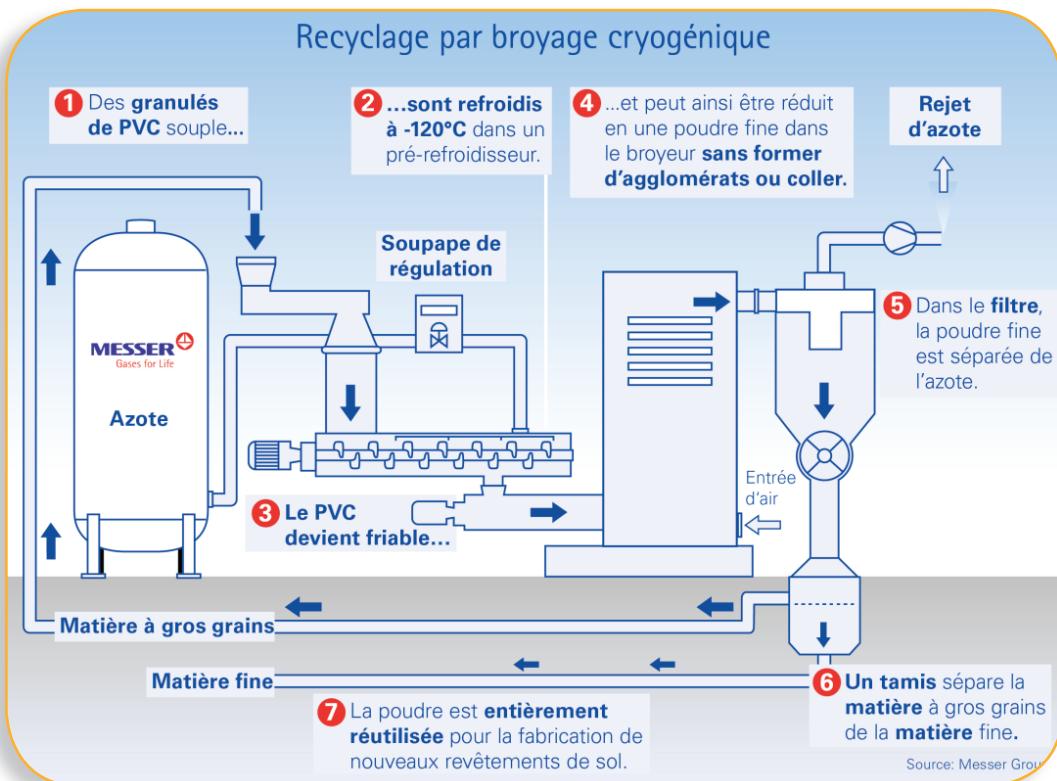


Figure 21 : Principe du recyclage par broyage cryogénique dans le cas du PVC [3]

### Broyage cryogénique

Outre la fragmentation électrodynamique, le broyage cryogénique fait également partie des techniques innovantes en matière de fragmentation des déchets.

Par les techniques de broyages conventionnelles, il n'est pas toujours évident de fragmenter les déchets solides. En effet, certains matériaux, comme les thermoplastiques, les caoutchoucs, les cires, et quelques métaux ont tendance à s'agglomérer sous l'effet de la chaleur ; chaleur émanant du fonctionnement du broyeur en lui-même.

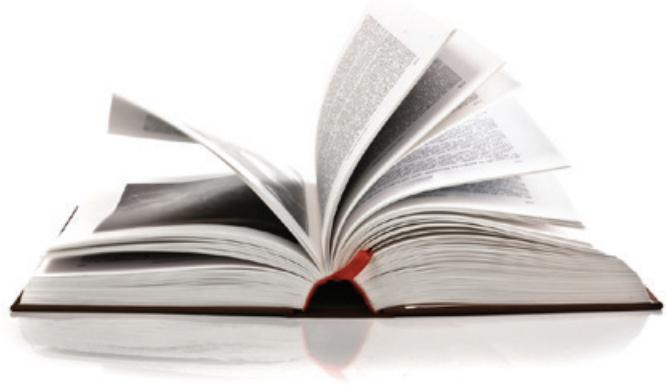
Les procédés cryogénique permettent dès lors de contourner cette difficulté en refroidissant ces matériaux avec de l'azote ou du dioxyde de carbone liquide. De là, les matériaux sont fragilisés et l'opération de broyage se verra nettement amélioré. En pratique, il est à noter un gain au niveau de la productivité ainsi qu'une économie en énergie.

La Figure 19 schématise le principe du recyclage du PVC par broyage cryogénique. Comme représenté sur cette illustration, les déchets de plastique grossièrement broyés en amont sont refroidis à une température de moins 120°C dans un refroidisseur grâce à des injections d'azote liquide. À si basse température, le PVC devient aussi fragile que du verre. Il peut alors dès lors être réduit en une poudre fine, qui pour autant, ne colle pas et ne forme pas d'agglomérats. La poudre de PVC ainsi produite peut être entièrement réutilisée sur le marché.

Le broyage cryogénique pourrait tout aussi bien s'adapter au recyclage des pneus ; domaine où l'industrie continue d'utiliser majoritairement des systèmes de broyage ambients classiques et peu innovants. En effet, d'après plusieurs tests réalisés par Air Products (groupe industriel américain spécialiste des gaz industriels et médicaux), le cryobroyage d'un produit standard de caoutchouc usagé permettrait un rendement de 160 kg/h contre à peine 30 kg/h avec un système classique.



Arbres de concassage secondaire. Source : broyeur C100x400, mecroanne.com.



## Bibliographie

- [1] S. Gaydardzhiev, Mineral Processing I, Support de cours ULG, 2015.
- [2] SELFRAG, «SELFRAG révolutionne le traitement des scories des usines d'incinération d'ordures ménagères.,» 2014. [En ligne]. Available: <http://www.selfrag.com/pdf/pressrelease/1214/selfrag-pressRelease-FR-1214.pdf>.
- [3] Messer, «Cryobroyage et recyclage selon Messer,» [En ligne]. Available: [http://www.messer.fr/\\_globalDownloads/\\_Downloads\\_brochures/Brochure\\_Poudres\\_fines.pdf](http://www.messer.fr/_globalDownloads/_Downloads_brochures/Brochure_Poudres_fines.pdf).
- [4] P. Blazy, E.-A. Jdid et J. Yvon, «Fragmentation : Technologie,» Techniques de l'ingénieur, 2006.
- [5] T. Serradj, «Techniques et méthodes d'exploitation à ciel ouvert : traitement des minerais,» Institut Algérien des Mines, 2013.
- [6] Glencore Technology, «IsaMill - Breaking the boundaries,» 2015. [En ligne]. Available: <http://www.glencoretechnology.com/EN/Publications/Publications/isamillbrochureEN.pdf>.
- [7] Messer, [En ligne]. Available: <http://www.gasesforlife.fr/areas-of-life/environment/pvc-recycling/index.html>.

## COLOPHON

Opérateurs désignés par la Région wallonne :



**Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD) asbl**  
Boulevard Frère Orban 4, 5000 NAMUR  
Rédaction : Maxime VENTURELLI, Responsable de Projets  
Tél. : 081 25 04 80 – Fax : 081 25 04 90  
Courriel : mv@icedd.be



Relecture : Claude SCHADECK, 3J consult et Pierre DEMESMAEKER,  
ICEDD - Responsable « Bâtiment - Consultance & Stratégie »

Pour le compte de :



**Service public de Wallonie**  
**Direction générale opérationnelle Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie**  
**Département de l'énergie et du Bâtiment durable**  
Chaussée de Liège 140-142, 5100 Jambes  
Tél : 081 48 63 56  
Courriel : Energie@spw.wallonie.be  
Site portail de l'énergie de la Région wallonne : <http://energie.wallonie.be>

Editeur responsable : Jean VAN PAMEL, Directeur

Photo en couverture : broyeur-concasseur SANDVIK. Source : aggman.com

1ère diffusion électronique, édition juillet 2016

