



*Ingénieurs Assistance Internationale
Ingénieurs sans Frontières
a.s.b.l.*

Dossier de synthèse sur les différents types de moulins dans les pays en développement

Paul Blockmans, François Dewaele

Juin 2006

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	3
2	Les principales céréales.....	3
3	Caractéristiques communes.....	4
4	Le décortilage	7
5	La mouture.....	7
5.1	<i>Les produits de mouture.....</i>	7
5.2	<i>Méthodes traditionnelles de mouture des céréales.....</i>	8
5.2.1	Les moulins à meules	8
5.2.2	Les moulins ou broyeurs à marteaux.....	15
5.2.3	Comparaison des moulins à meules motorisés et des broyeurs.....	18
6	Les moteurs	20
7	Les fournisseurs	21
7.1	<i>Evolution de l'offre</i>	21
7.2	<i>Les prix</i>	22
8	Conclusion	23
9	Bibliographie.....	24

1 Introduction

Dans les pays en voie de développement, les céréales ont toujours occupé une place prédominante dans l'alimentation des populations les plus pauvres. En Afrique de l'Ouest, le mil, le sorgho, le riz, et le maïs fournissent aux populations l'essentiel de leur ration calorique (jusqu'à 80% des besoins quotidiens). C'est donc, en moyenne, 170 kg de céréales par an et par personne qui sont consommés.

Cependant, du grain récolté au plat cuisiné, les céréales doivent subir toute une série de préparations. C'est en effet sous forme de semoule ou de farine que les céréales entrent dans la composition des plats, particuliers à chaque région. Leur transformation est donc, elle aussi, primordiale et joue un rôle économique majeur dans les pays en voie de développement.

Le présent document traite du procédé de mouture, et en particulier du choix des moulins pour les pays en voie de développement. Il s'adresse donc tout particulièrement aux acteurs locaux et ONG qui recherchent des informations sur les équipements adaptés à ces pays.

2 Les principales céréales

Dans les pays en voie de développement, la principale utilisation des moulins et des broyeurs concerne les céréales. Ce document portera donc principalement sur quatre céréales qui occupent une place importante dans de nombreux pays en développement : maïs, riz, sorgho et mil. Dans les pays situés au sud du Sahara, le climat chaud et sec n'autorise pas la culture du blé. Dans ces pays, le mil et le sorgho représentent plus de la moitié de la consommation alimentaire. Le fonio est, lui aussi, peu cultivé (voir figure 1). Le blé et le fonio ne seront donc pas traités en détail dans ce dossier.

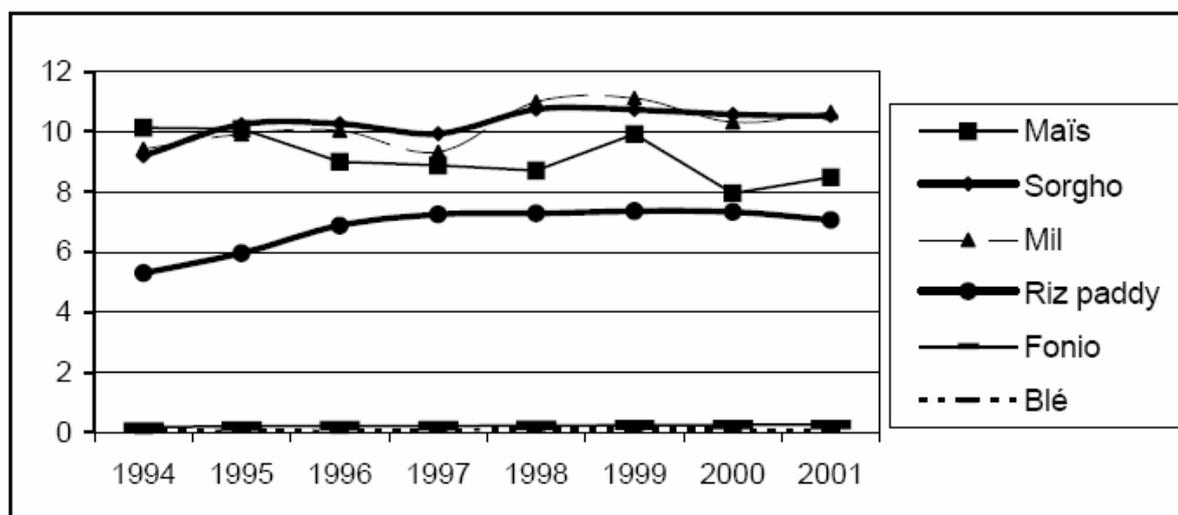


Figure 1 : Production de céréales en Afrique de l'Ouest de 1994 à 2001 (en millions de tonnes).
Département de Nutrition et Sciences Alimentaires, Fac. Agronomie, Université d'Abomey-Calavi 01 BP 526 Cotonou, Bénin

3 Caractéristiques communes

Les céréales sont les graines de plantes herbacées cultivées. Elles ont toutes une structure assez similaire, dont les variations déterminent l'essentiel de leur traitement. Elles sont constituées par : le germe qui donne la plantule, l'amande appelée endosperme ou albumen, tissu de stockage qui fournit au germe les réserves nécessaires à sa croissance (jusqu'au premières feuilles), et les enveloppes protectrices ou sons, qui comprennent la testa et le péricarpe. Ces caractéristiques communes cachent, en fait, des formes, des tailles, des compositions et des textures très différentes selon le type de céréales, chacun requérant un traitement après-récolte spécifique. Néanmoins certains principes généraux peuvent s'appliquer à toutes les espèces. C'est ce qui est résumé au paragraphe suivant.

Les disparités de forme, de taille, de composition et de texture entre différents types de céréales, mais aussi entre différentes variétés d'une même espèce induisent des procédés de transformation spécifiques. Avant la mouture ou le broyage, chacune de ces céréales nécessite donc un traitement particulier.

Le maïs :

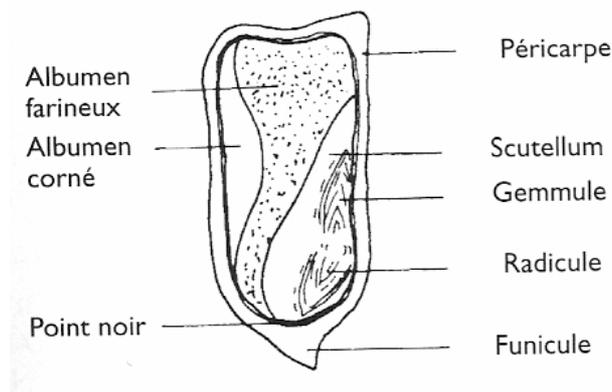


Figure 2 : structure du grain de maïs. Réf. [14]

Céréale originaire des zones tropicales d'Amérique, le maïs est une graminée dont la culture est l'une des plus répandues au monde. Le maïs peut être récolté soit en épis, soit en grains. La récolte des épis peut s'effectuer à la main ou à l'aide de machines agricoles appropriées (corn-picker).

Le riz

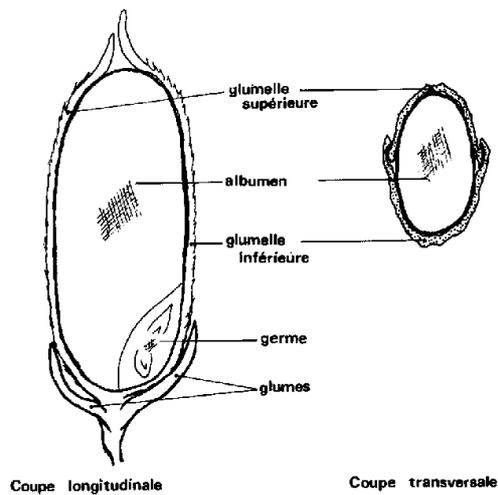


Figure 3: structure d'un grain de riz. Réf. [www.fao.org]

Graminée originaire des régions tropicales de l'Asie (Chine et Indochine), le riz est l'aliment de base d'une grande partie de l'humanité. On emploie en Afrique la méthode de culture asiatique en rizières inondées. Après un pré séchage in situ, on effectue le battage manuellement ou mécaniquement, pour séparer le paddy, c'est-à-dire l'ensemble du grain et de ses enveloppes protectrices (balles), de la paille.

Après le battage, le paddy obtenu contient souvent des impuretés (terre, pierres, résidus végétaux, etc.) qu'il faut éliminer et sa teneur en eau, supérieure à 20%, doit être ramenée à 14%. Le paddy séché et nettoyé est prêt à être traité, c'est-à-dire soumis au décorticage et au blanchiment.

Le riz blanc, peut être soumis à d'autres traitements de polissage ou de glaçage. Le riz ainsi obtenu est prêt à être emballé et commercialisé.

100 kg de paddy traité dans des rizeries industrielles, donnent environ 60 kg de riz blanc, 10 kg de brisures, 10 kg de son et farine, et 20 kg de balles.

Le sorgho

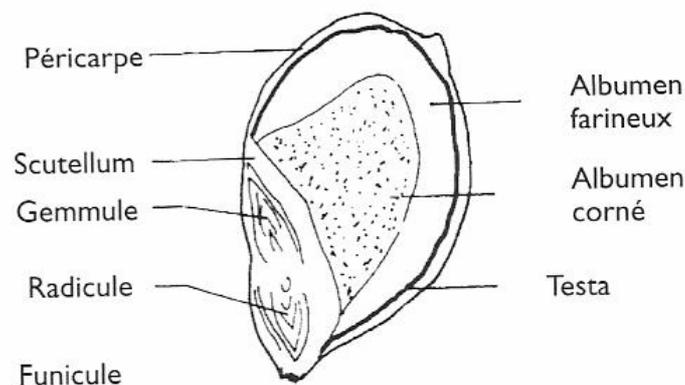


Figure 4 : structure du grain de sorgho. D'après réf.[14]

Le sorgho, appelé également gros mil, est une graminée originaire des zones d'Afrique centrale et orientale (Éthiopie, Soudan). Il résiste mieux que le maïs et d'autres céréales à la sécheresse. Ce sont d'intéressantes cultures alimentaires car la quasi-totalité des sorghos contiennent plus de protéines que le maïs.

Lorsqu'elles ont atteint la maturité, les particules de sorgho sont coupées et on les laisse sécher au soleil. Les épis de grains ainsi obtenus peuvent être conservés dans des greniers traditionnels, ou bien soumis directement au battage, manuel ou mécanique.

Si les grains présentent une teneur en eau supérieure à 13%, il faut procéder au séchage. Une fois séché, le sorgho est nettoyé, puis conservé (en sacs ou en vrac) Le sorgho séché et nettoyé est prêt pour la vente ou pour les transformations ultérieures du produit avant de pouvoir le conserver ou le traiter

Le mil

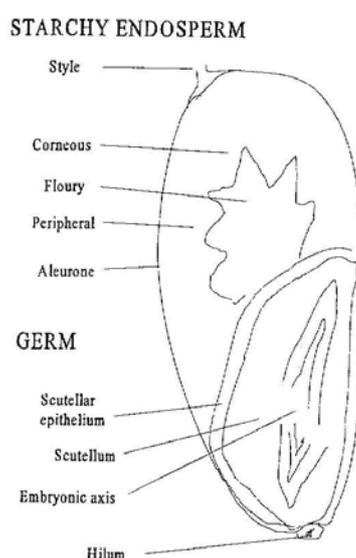


Figure 5 : structure d'un grain de mil. Ref [www.fao.org]

Le terme "mil" ou "millet" désigne de nombreuses plantes herbacées à très petites graines, largement répandues en Afrique et en Asie. Les grains de mil sont durs par rapport aux grains de maïs, de sorgho ou de blé. Les millets sont les plus petites graines céréalières cultivées.

En ce qui concerne les caractéristiques chimiques, le traitement et l'utilisation du mil, les mêmes commentaires que pour le sorgho peuvent être faits, ces deux céréales étant en effet très proches.

4 Le décortiquage

L'opération de décortiquage consiste à débarrasser le grain de son enveloppe, le péricarpe, et d'une partie du germe. Le péricarpe est en effet riche en fibres cellulosiques indigestes et peut contenir des tanins amers (cas du mil et du sorgho) qui entravent l'assimilation des substances nutritives et sont à l'origine de saveurs peu appréciées.

L'étape de décortiquage est déterminante pour le choix d'une technique de mouture. En effet le décortiquage s'accompagne souvent d'une humidification des grains, ce qui rend délicat l'utilisation des broyeurs à marteaux, sauf si une étape intermédiaire de séchage est ajoutée.

5 La mouture

Contrairement au décortiquage qui demande une technologie spécifique pour chaque céréale, les procédés de mouture sont communs à tous les grains. Seuls les réglages des machines diffèrent.

A coté des technologies traditionnelles (mortier et pilon, mouture à la molette) encore utilisées dans les zones rurales africaines, sont apparus de petits moulins dans les villes, puis dans les villages.

Ce paragraphe traite des aspects généraux de la technique de mouture, et présente les différentes solutions techniques non-industrielles adaptées au milieu rural et urbain des pays en voie de développement.

5.1 Les produits de mouture

Les céréales sont à la base de très nombreux plats, spécifiques à chaque région : couscous, tortillas, bouillies... La farine, la semoule et la brisure résultent de la mouture et du broyage, et parfois d'une fermentation des grains de céréales décortiqués. C'est sous ces formes que les céréales sont employées dans les préparations culinaires ; il est en effet très rare de voir consommer des grains entiers, sauf dans le cas du riz.

La granulométrie

Les produits de mouture se distinguent entre eux par la finesse des particules : la granulométrie. La farine est composée de particules d'une dimension inférieure à 0,2 mm, la farine de couscous varie de 0,2 mm à 0,7 mm, la semoule entre 0,7 mm et 1 mm. Ces produits sont obtenus dans la plupart des cas par un procédé à sec et présentent un taux d'humidité final faible (inférieur à 10%) qui assure une longue conservation.

Pour obtenir une appréciation générale d'un moulin ou d'un procédé de mouture sur la finesse de la matière moulue, il faut donc une méthode de mesure particulière, car les farines sont non homogènes. Elles sont en effet constituées de particules de dimensions différentes (en moyenne 80 % (en masse) des particules ont une taille variant entre 0,1 et 1 mm).

On définit un index de finesse calculé sur base de tamisages normalisés de la farine qui séparent le mélange en cinq classes de particules. Leur part, en % de la masse totale de l'échantillon est multipliée par un facteur de pondération. La somme des cinq résultats constitue l'index de finesse.

Plus l'index de finesse est grand, moins la farine est fine. L'index de finesse des farines courantes en Afrique se situe entre 1 et 2.

Farine humide ou farine sèche ?

L'humidité des grains, et donc de la farine, joue un rôle important dans sa durée de conservation, dans le choix du matériel de mouture et dans le goût du produit fini. Plus une farine est sèche et mieux elle se conserve. Le taux d'humidité limite acceptable est de 16%.

5.2 Méthodes traditionnelles de mouture des céréales

La mouture est une des plus anciennes techniques culturelles de l'humanité. Il existe deux techniques traditionnelles, par battage (mortier et pilon) et par frottement des grains entre deux pierres (moulin à molette).

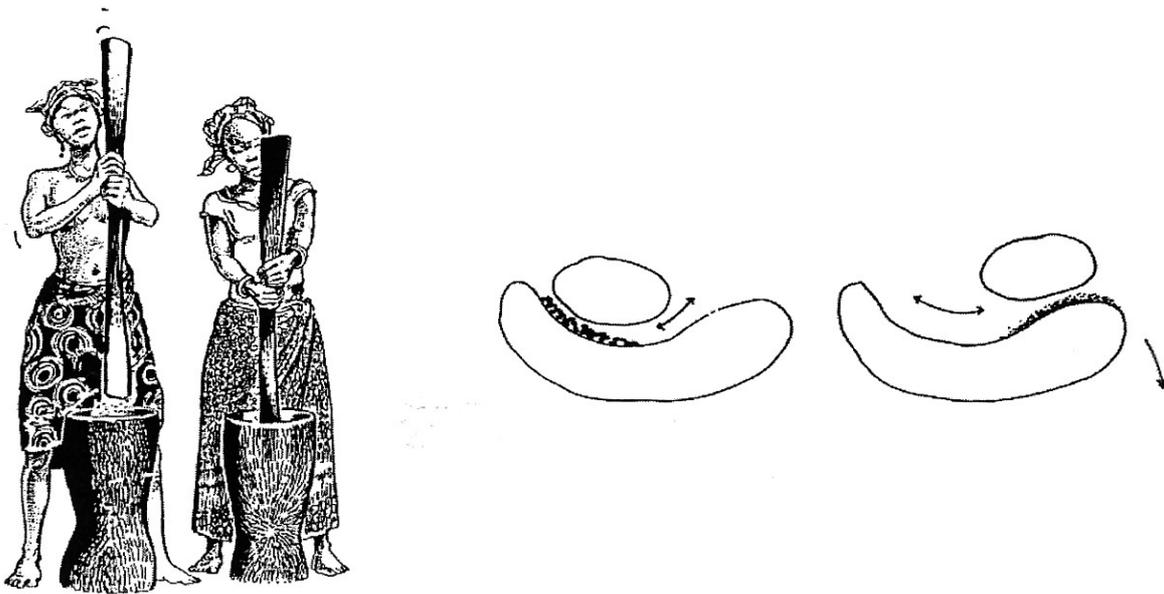


Figure 6 : le travail de pilage et le moulin à molette (Ref [4])

Outre ces techniques traditionnelles, deux grands types de moulins, fonctionnant sur des principes différents, se partagent le marché : les moulins à meules et les moulins à marteaux.

5.2.1 Les moulins à meules

Il existe plusieurs types d'entraînement possibles, chacun correspondant à un type de moulin différent : les moulins manuels, à traction animale, à moteur et même à eau.

5.2.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des moulins à meules est le broyage du grain par écrasement entre deux surfaces abrasives : les meules. Ils sont constitués d'une meule fixe et d'une meule mobile tournant sur la première, dans un plan horizontal ou vertical. Les deux meules sont de matière et de dimensions identiques.

Les moulins à meules horizontales et ceux à meules verticales donnent des résultats différents. Dans le cas des moulins à meules horizontales, le grain est progressivement amené à la périphérie, guidé par les cannelures de la meule, sous l'effet de la seule force centrifuge. Dans

le cas des moulins à meules verticales, le grain subit en plus l'effet de son poids, qui l'entraîne vers le bas, donc vers la périphérie de la meule. Il en résulte un temps de passage plus court, ce qui donne une farine moins régulière qu'avec des meules horizontales. (voir fig 6 et 7)

Cependant, la fabrication des moulins à meules horizontales est plus complexe car elle nécessite un renvoi d'angle dans la transmission pour l'installation d'un moteur thermique. Ceci entraîne un coût d'achat et une charge d'entretien plus importante. C'est pourquoi les moulins à meules verticales sont beaucoup plus répandus, la construction des moulins à meules horizontales ne se justifiant que pour des meules lourdes (de diamètre supérieur à 50 cm).

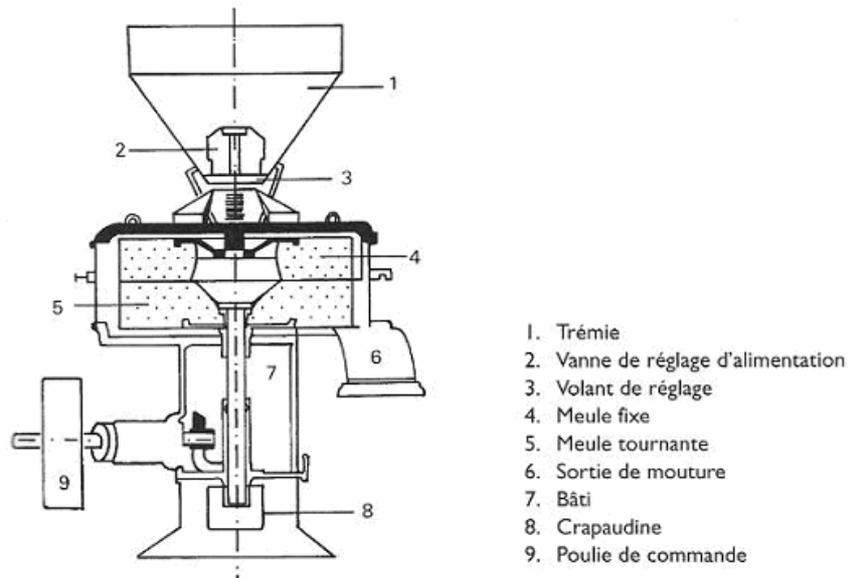


Figure 7 : moulin à meules de pierres (horizontales) Ref [14]

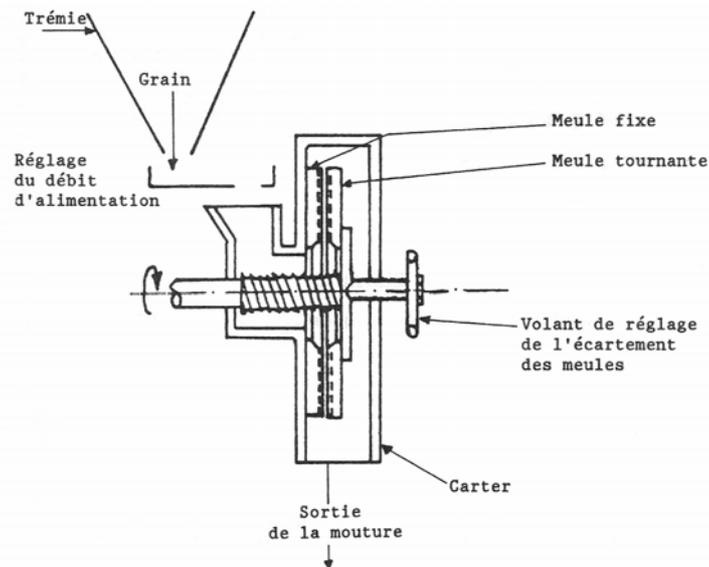


Figure 8 : coupe verticale schématique d'un moulin à meules métalliques verticales. Ref [2]

5.2.1.2 Les meules

Matériaux utilisés

- *les meules métalliques* : ont des plaques en fonte ou en fonte aciérée. Elles sont très solides, peu coûteuses et permettent de broyer une grande variété de produits secs ou légèrement humides (céréales, arachides, noix de karité,...). Il existe toutefois un risque d'échauffement de la farine, et il faut la repasser deux fois si l'on veut une farine fine.
- *Les meules en pierre* : on distingue les meules en pierre naturelle, généralement en silice, parfois en granit ou basalte. Et les meules en particules d'abrasif (corindon) agglomérées par un ciment d'oxychlorure de magnésium. L'usure de ces meules n'entame pas leur pouvoir abrasif, puisque de nouvelles arêtes apparaissent toujours en surface.

Matériaux	Avantages	Inconvénients
Métal	- grande solidité	- risque d'élévation de température à la mouture
	- débit important	- finesse de mouture moins bonne qu'avec les meules en corindon
	- coût réduit à l'achat et à la recharge	
	- retailable	
Corindon vitrifié	- solide, plus léger que le métal	- coût élevé
	- relativement insensible aux conditions atmosphériques	- uniquement céréales bien séchées
	- mouture fine	
	- retailable	
Pierre naturelle	- solide	- assez lourd
	- large surface abrasive	- uniquement céréales bien séchées
	- mouture fine	

Tableau 1 : avantages et inconvénients des principaux matériaux utilisés pour les meules.

Un habillage étudié

L'habillage d'une meule consiste à entailler sa surface travaillante d'une série de rayons, dont le nombre, la forme et les dimensions dépendent de la nature des grains à moudre et du degré de finesse désiré. Les rayons répartissent les grains sur toute la surface travaillante et assurent le refroidissement de la meule et de la farine (voir figure 8 et 9).

Les variations de forme et de disposition des rayons sont innombrables. Quelques-uns des types les plus courants sont représentés sur la figure 9.

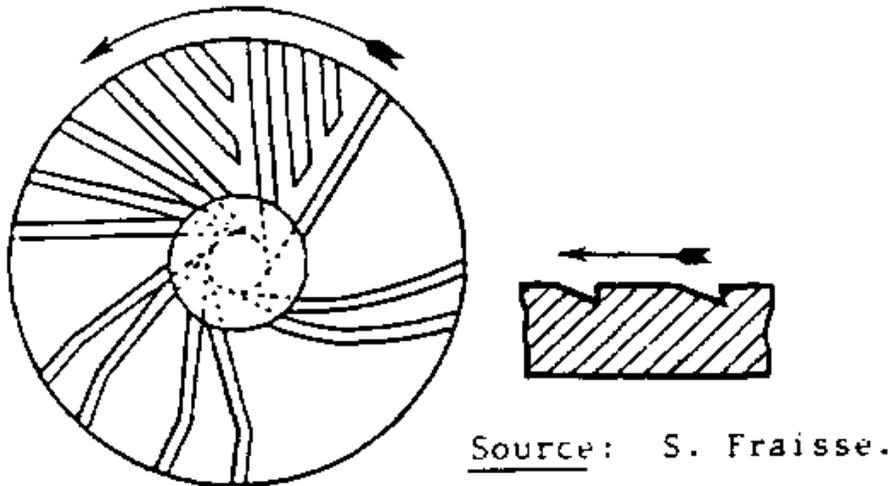


Figure 9 : l'habillage d'une meule. Ref [18]



Figure 10 : différentes meules. D'après <http://www.engsko.com/>

Le réglage

Celui-ci doit être précis. En effet, l'écartement des meules détermine la finesse de la farine. Le réglage s'effectue en serrant les meules par l'intermédiaire d'un volant. Un système de ressort de sécurité permet d'éviter que les meules ne soient trop endommagées par le passage accidentel d'un corps étranger (caillou, monnaie,...).

Les vitesses de rotation varient entre 350 tr/min et 900 tr/min avec un écart de 25%.

Durée de vie

Celle-ci est difficile à évaluer vu le grand nombre de paramètres variables : vitesse, dureté des grains, finesse recherchée et l'attention portée. Un changement périodique est de toute façon à prévoir

5.2.1.3 Les modes d'entraînement

Il existe différents types d'entraînement des moulins à meules : ceux-ci peuvent être manuels, entraînés par un manège à traction animale, par l'eau, ou encore par un moteur thermique ou électrique.

Les moulins manuels : un échec relatif

Ce sont de petits moulins, dont le débit est de l'ordre de 10 kg/h (pour de la farine grossière). Ils sont entraînés par une manivelle et sont équipés de meules de 9 à 10 cm de diamètre. Des tentatives ont eu lieu pour diffuser en Afrique ces moulins de petite capacité, correspondant à un usage domestique et non à un service villageois. Ces essais se sont souvent soldés par des échecs. Non pas à cause du prix de ces appareils, mais principalement parce que, pour obtenir une farine de finesse équivalente à celle obtenue avec le mortier et le pilon, il est nécessaire d'effectuer deux ou trois passages au moulin. La dépense en temps et en énergie est plus importante que dans la mouture traditionnelle

Les moulins à moteurs : répandus mais coûteux

Les moulins à meules sont souvent équipés d'un moteur thermique ou électrique de 3,5 à 8 ch de puissance. La puissance du moteur varie en fonction du type et de la taille des meules, ainsi que de la vitesse de rotation et de la finesse de la farine désirée. La vitesse de rotation est de l'ordre de 600 tr/min pour des meules métalliques et de 400 à 500 tr/min pour des meules en pierre et en corindon.

Parmi les marques de moulins à meules métalliques, Hunt (modèle 1A ou 2A) et Bentall sont très courantes. Mais de plus en plus souvent et même quasiment exclusivement à l'heure actuelle on trouve leur réplique indienne (Amuda), voire tanzaniennes, moins chères.

Mais ces moulins sont difficiles à construire, en particulier le système de réglage des meules, et très peu d'artisans locaux se sont lancés dans cette fabrication.

Chers à l'achat, leur entretien est également plus complexe et coûteux que celui des broyeurs à marteaux. Aussi, ces derniers rencontrent-ils plus de succès que les moulins à meules.

Comme déjà dit plus haut, les moulins à meules de pierre naturelle ou de corindon n'ont pas la polyvalence des moulins à meules métalliques mais produisent une farine de meilleure qualité. Aussi, en rencontre-t-on surtout en ville où les consommateurs sont plus exigeants.

Des résultats précis (finesse de la farine, puissance requise, vitesse de rotation,..) d'essais réalisés sur des moulins à meules et à moteur sont donnés dans le paragraphe comparatif des moulins à meules et des moulins à marteaux.

Le moulin à traction animale

Ce type de moulin représente une technologie intermédiaire entre les méthodes manuelles (pilon et mortier, moulin à bras) et les moulins à moteur.

Ces moulins à traction animale peuvent être entièrement fabriqués sur place par des artisans/mécaniciens, sauf pour les meules qui sont souvent importées. Pour réussir la fabrication locale, la maîtrise de la soudure est indispensable.

Le modèle présenté succinctement ici est celui réalisé par I.T.Dello.

Le manège à traction animale entraîne un moulin à meules. L'âne, le cheval ou le mulet tourne autour d'un muret sur lequel repose une roue. Lorsque l'animal avance, la roue est entraînée et transmet à son axe un mouvement de rotation. Un système de transmission par chaîne et pignons permet d'entraîner, à vitesse multipliée, l'axe de la meule mobile du moulin (voir figure 10). Les meules sont verticales et se situent au centre de rotation de l'ensemble.



Figure 11: moulin à traction animale à Lambock (Sénégal). Ref[4]

Le débit est de l'ordre de 10 à 20kg/h. Ce débit est un débit moyen et ne tient pas compte des temps d'arrêt de l'animal.

Le coût d'un tel moulin variait en 1986 de 350.000 à 370.000 F CFA environ (en 2006 cela équivaut environ à 700.000 – 720.000 F CFA), moulin à meules de fabrication locale compris.

Le moulin à traction animale n'est pas, de par son débit modeste, conçu pour remplacer les moulins à moteur, mais constitue une bonne alternative dans les régions rurales enclavées, les petits villages et les régions à faible densité de population où le nombre d'utilisateurs est trop restreint pour rentabiliser un moulin à moteur,

Le moulin à eau

Ce sont essentiellement des moulins à meules de pierre horizontales entraînés par un courant d'eau. Comme celui donné par un torrent en montagne. La figure 12 présente la coupe transversale d'un moulin à meules actionné par le courant. Le courant, dont le débit minimal doit être de 500 l/s environ, fait tourner une roue à aubes en bois qui entraîne la meule supérieure par l'intermédiaire d'un axe vertical en bois. Cette meule tourne à une vitesse d'environ 120 tr/min, la meule inférieure étant fixe.

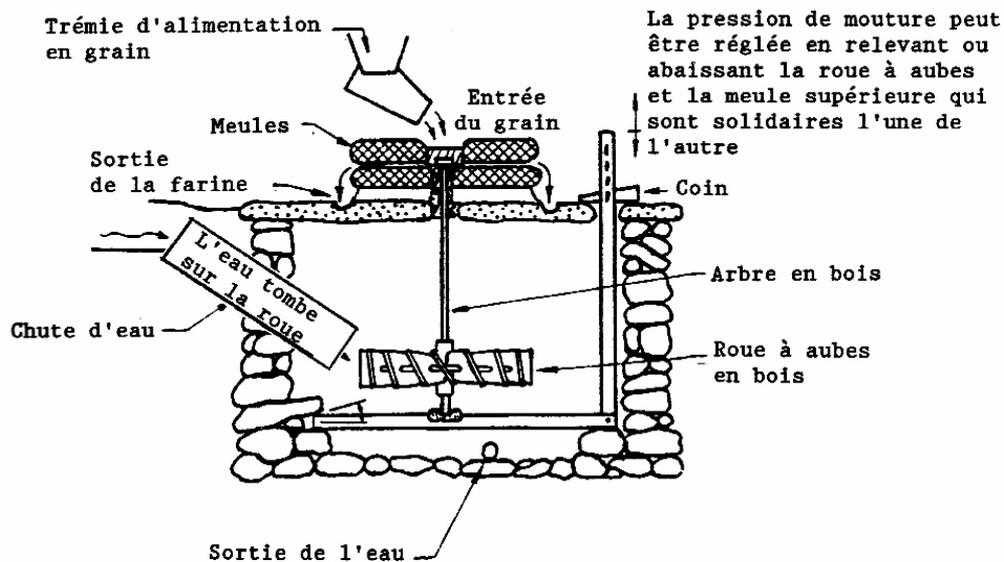


Figure 12 : coupe verticale d'un moulin à eau Ref [2]

Les moulins à eau, équipés de meules de 75 cm de diamètre environ, produisent de 25 à 50 kg de farine par heure, selon le degré de finesse désiré. La vitesse de rotation des meules est, elle, fonction du débit de l'eau. Les moulins à eau peuvent être construits par les artisans locaux à partir de matériaux disponibles sur place.

5.2.1.4 La puissance et le débit

La puissance absorbée par un moulin à meules dépend des paramètres suivants:

- le débit d'alimentation du grain:
- la vitesse de rotation de la meule mobile:
- le diamètre des meules: les grandes absorbent une plus forte puissance
- les rainures des meules: un plus grand nombre augmente le débit
- les meules rapprochées requièrent une puissance plus grande.
- la nature du produit à moudre.
- le taux d'humidité des céréales fait croître la puissance absorbée.

5.2.1.5 Résumé comparatif

	Manuel	Motorisé	A traction animale	A eau
Débit	+/- 10 kg/h	+/- 350 kg/h (25kg/h/ch)	10 à 20kg/h.	25 à 50 kg/h
Vitesse de rotation de la meule mobile	350 tr/min	300-900 tr/min	100 à 200 tr/min	120 tr/min
Prix (2006)	De 70.000 à 200.000 F CFA	A partir de 1.500.000 F CFA (moteur électrique)	~ 700.000 F CFA	-

Tableau 2 : comparaison des moulins à meules.

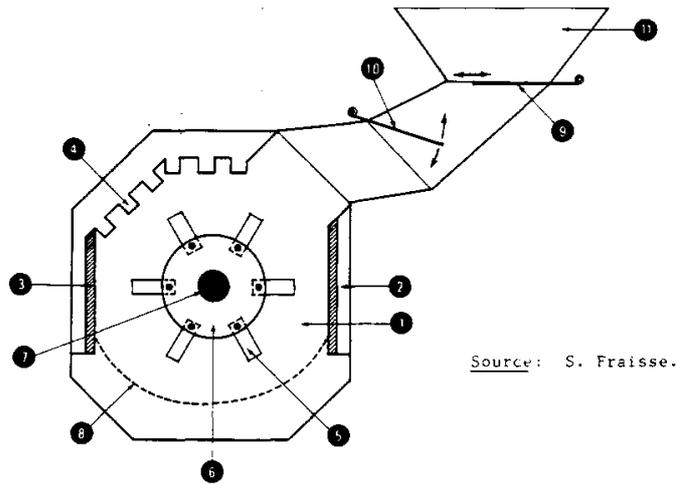
5.2.2 Les moulins ou broyeurs à marteaux

La vitesse de rotation des broyeurs à marteaux varie entre 2.500 et 6.000 tours par minute. Les principaux avantages du broyeur sont son efficacité et sa simplicité de fabrication, permettant une construction locale aisée : nombreux sont les artisans à le fabriquer localement. De plus, son entretien est simple et peu coûteux.

Son principal inconvénient est son manque de polyvalence : il ne peut traiter les oléagineux et les céréales trop humides qui colmatent les grilles. Par contre toutes les céréales sèches peuvent être broyées sans difficultés.

5.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est le broyage par pulvérisation : le grain est pulvérisé en le projetant à grande vitesse contre les parois de la chambre de broyage, à l'intérieur de laquelle tourne un rotor sur lequel sont fixés les marteaux. Les produits (farine, semoule) sortent par une grille (ou tamis) située à la base de la chambre de broyage.



Source: S. Fraisse.

Légende

- | | | |
|--|-----------------------------------|---|
| 1. Intérieur du moulin ou chambre de broyage | 4. Contre-marteaux | 9. Trappe ouvrante réglant la descente du grain |
| 2. Coque ou carcasse du broyeur | 5. Marteaux | 10. Volet inclinable réglant la descente du grain |
| 3. Plaques de choc ou plaques d'usure | 6. Rotor | 11. Trémie alimentant le broyant en grain |
| | 7. Axe ou arbre du moulin | |
| | 8. Grille d'évacuation du broyeur | |

Figure 13: principe de fonctionnement d'un broyeur à marteaux. Ref [18]

5.2.2.2 Les composants

La chambre de broyage

L'intérieur de celle-ci ne doit pas être totalement lisse, pour que le grain rencontre suffisamment d'obstacles pour être pulvérisé.

Les marteaux

Leur rôle est de frapper les grains et de leur communiquer une vitesse suffisamment importante pour qu'ils se pulvérisent contre les parois de la chambre de broyage. L'efficacité des marteaux est augmentée par la multiplication des angles d'attaque. En général, les marteaux sont réversibles, c'est-à-dire que l'on peut les retourner, de manière à changer la partie travaillante, ce qui permet d'augmenter leur durée de vie (voir figure 21).

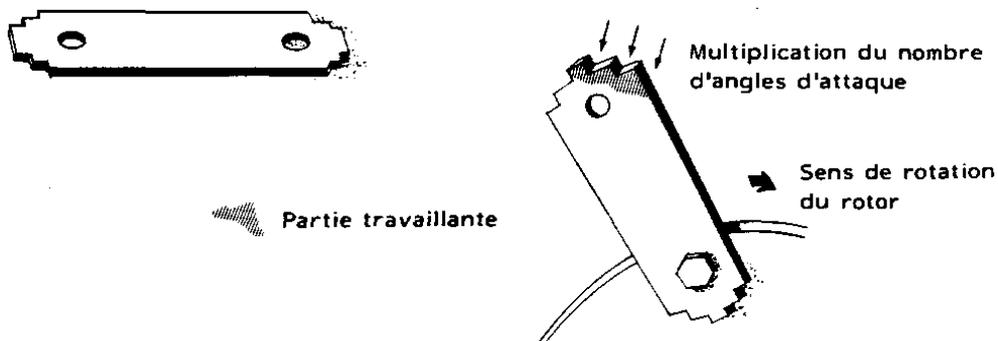


Figure 14 : marteaux réversibles quatre fois. Ref [18]

L'avantage du rotor à marteaux fixes est sa facilité de construction. Par contre si un corps étranger passe par accident dans la chambre de broyage, il créera bien plus de dégâts que si les marteaux étaient mobiles, où ceux-ci « s'effaceront » au passage.

Les marteaux réversibles peuvent écraser en moyenne 450 kg de céréales avant d'être changés (d'après réf.[4]).

La grille

Son rôle est de ne laisser passer que les particules suffisamment fines, et ceci en fonction de la granulométrie recherchée.

La carcasse

La carcasse est constituée de la chambre de broyage, de la trémie et des pieds. Elle peut être réalisée en fonte ou en tôle soudée.

5.2.2.3 Performances

Vitesse de rotation et puissance

La vitesse de rotation des marteaux doit être d'au moins 1500 tr/min, un moteur est donc obligatoire. En-dessous de cette vitesse, le broyage n'est plus possible car les grains ne sont pas projetés contre les parois avec une vitesse suffisante pour être pulvérisés.

En général, la vitesse de rotation est de 3000 tr/min. Certains fabricants (Electra notamment) utilisent une vitesse de rotation allant jusqu'à 6000 tr/min, la farine obtenue pouvant être très fine, mais la dépense d'énergie est accrue.

La puissance, quant à elle, peut varier de 5 à 15 ch, la plage 9-11 ch étant la plus courante.

Débit

Ce débit est influencé par différents facteurs :

- La grille : le diamètre et le nombre de perforations ;
- Le taux d'humidité : une augmentation de 1% du taux d'humidité entraîne une diminution de 10% du débit. De plus, des graines trop humides colmatent la grille et bloquent le fonctionnement du moulin ;
- La puissance du moteur et la vitesse de rotation des marteaux. Pour la farine, la vitesse de rotation des marteaux recommandée est de 3500 à 4000 tr/min, elle descend à 1800 tr/min pour la semoule.
- La nature du produit à broyer.

Globalement, le rendement horaire est, le plus souvent compris entre 150 et 400 kg/h.

5.2.2.4 Fabrication artisanale

L'un des avantages du broyeur à marteaux est de pouvoir être construit localement, dans des ateliers artisanaux équipés de postes de soudure, en utilisant des matériaux disponibles en milieu urbain et dans la majorité des zones rurales

Ce type de moulin est donc financièrement accessible, facile et peu coûteux à entretenir.

Il faut toutefois avoir les ressources nécessaires pour une maintenance correcte du moteur.

5.2.2.5 Cas particulier : le moulin monté sur bicyclette et le broyeur à pédalier

Ces moulins ont été mis au point par le TDRI, Tropical Development Research Institute, en Angleterre et sont cités ici pour être complets. La force motrice est produite en pédalant. Il n'a pas rencontré un grand succès vu que les utilisateurs (principalement des femmes) n'ont guère l'habitude de monter sur une bicyclette.

5.2.3 Comparaison des moulins à meules motorisés et des broyeurs

Le tableau 3 présente les éléments de comparaison entre moulins à meules ou à marteaux. Mais il est aussi nécessaire de tenir compte du type le plus couramment employé dans la région.

	Moulin à meules	Broyeur à marteaux
Principe	Broyage par écrasement	Broyage par percussion
Utilisation	Mouture des céréales sèches ou légèrement humides, des graines oléagineuses (karité, arachides,...)	Mouture des céréales ou autres produits secs non oléagineux
Granulométrie de la farine	Déterminée par l'écartement entre les meules et leur degré d'usure. Possibilité de faire de la farine très fine en repassant le produit plusieurs fois	Définie par le diamètre des perforations du tamis et la vitesse de rotation des marteaux Farine plus grossière
Débit théorique	De 120 à 350 kg/h.	150 à 400 kg/h
Entraînement	Moteur thermique dans la plupart des cas (4 à 12 ch). Les modèles manuels ou à traction animale se sont avérés peu intéressants	Moteur thermique (diesel, essence) ou électrique (5 à 10 ch)
Maintenance	Meules (taillage ou changement)	Marteaux (retournement ou changement), tamis (changement)
Observation	Plus onéreux que le broyeur	Fabrication locale très répandue

Tableau 3 : comparaison des moulins à meules et broyeurs à marteaux. D'après réf.[14].

Le choix se réduit souvent aux modèles en vente dans le pays. Il est fait en fonction de plusieurs critères, économiques et techniques, à savoir :

- Le nombre de personnes que le broyeur est censé servir ;
- La simplicité de maniement de la machine ;
- La facilité de réglage de l'appareil ;
- La facilité d'accès aux pièces d'usure courantes (meules, marteaux, grilles,...) et leur coût ;
- La réversibilité de certaines pièces (marteaux ou meules) ;
- La robustesse de l'appareil ;
- Les débits réels et la relation consommation spécifique/débit.

Le tableau 9 donne une comparaison d'un moulin à meules métalliques motorisé et d'un broyeur à marteaux.

	Teneur en humidité (%)	Moulin à disques			Broyeur à marteaux		
		Dépense d'énergie spécifique (kJ/kg)	Rendement (kg/h)	Index de finesse	Dépense d'énergie spécifique (kJ/kg)	Rendement (kg/h)	Index de finesse
Sorgho	10 – 12	58,4	172	2,0	99,8	255	1,9
	23 – 25	61,5	157	1,3	-	-	-
Petit mil	10 – 12	54,5	247	2,0	97,4	242	1,9
	23 – 25	-	190	1,3	-	-	-
Maïs	10 - 12	60,2	207	2,0	92,9	261	1,9
Maïs*	10 - 12	-	209	2,2	-	-	-

* moulin à disques de type « Premier 1A » de Hunt

Tableau 4 : mesures comparatives moulin à disques/broyeur à marteaux.

6 Les moteurs

Il existe trois types de moteur pouvant être couplés avec un moulin : à essence, diesel, et électrique. Le tableau 10 donne une comparaison de ces moteurs.

	Moteur diesel	Moteur essence	Moteur électrique
Achat	Le plus cher	Intermédiaire	Le moins cher
Energie	Gasoil, carburant répandu et peu coûteux.	Essence, carburant répandu mais plus cher que le gasoil.	Electricité, énergie la moins chère mais réservée aux zones urbaines, à moins de disposer de panneaux solaires. Le passage par un groupe électrogène diminue le rendement par rapport à l'utilisation directe d'un moteur thermique.
Fonctionnement et entretien	Le plus complexe. Formation poussée des meuniers à prévoir.	Plus simple que le moteur diesel mais formation tout aussi indispensable.	Le plus simple.
Robustesse	Le plus robuste	Plus fragile que le moteur diesel. Maniement plus délicat pour éviter les pannes.	Eviter les surchauffes (durée d'utilisation trop longue, moteurs sous-dimensionnés).
Pièces de rechange	Moteur très répandu en milieu rural sahélien. Les réseaux de distribution de pièces existent.	Moins répandu que le moteur diesel, pièces plus difficiles à obtenir.	

Tableau 5 : comparaison des trois types de moteurs.

Les moteurs électriques utilisent la source d'énergie la moins coûteuse et la plus pratique et ils sont moins chers à l'achat et à l'entretien que les moteurs Diesel.

Moteur et moulin sont généralement des éléments séparés. La puissance du moteur doit donc être adaptée au moulin.

Des puissances encore supérieures engendrent des consommations en carburant élevées, tandis que des puissances inférieures sont à l'origine de pannes fréquentes. Pour un moteur électrique, une puissance trop faible est la cause d'un échauffement excessif du moteur.

Enfin, la transmission entre le moteur et le moulin doit aussi être adaptée : alignement des poulies, réglage de la tension des courroies, section de courroie adaptée à la puissance,...

7 Les fournisseurs

7.1 Evolution de l'offre

L'essentiel des références bibliographiques sur la mouture et les moulins appropriés pour l'Afrique et les pays en voie de développement en général, datent des années 1984 à 1992.

Les fournisseurs, ainsi que les types et prix des machines proposées, n'existent plus forcément à l'heure actuelle. Sur l'ensemble des constructeurs situés dans les pays industrialisés, seuls quelques-uns fabriquent encore des moulins adaptés aux pays en voie de développement, la plupart s'étant tournés vers des productions de produits destinés à l'industrie, ou ayant tout simplement disparu. Ceci peut notamment s'expliquer par le fait que la production est de plus en plus locale, les produits fabriqués étant de fait bien moins coûteux (parfois près de 10 fois moins cher).

Un autre facteur est l'importation en masse de moulins provenant de constructeurs indiens, qui ont repris les modèles fabriqués en Europe il y a une vingtaine d'année. Ces constructeurs indiens disposent en outre souvent de succursales dans différents pays d'Afrique de l'Ouest, notamment pour l'entretien et les réparations de leurs moulins. Certains constructeurs disposent même, sur place, d'unités de fabrication de leurs moulins. L'importation n'étant plus nécessaire, les coûts se sont encore réduits.

Enfin, certains constructeurs ont abandonné le marché africain pour cause d'instabilité politique, suite au pillage de leurs bureaux ou ateliers locaux.

La production étant fortement localisée, il est difficile d'établir une liste de fournisseurs et de prix, qui devrait être faite par pays.

A l'heure actuelle, les fournisseurs dont l'existence est avérée, sont ceux référencés par le site du « Worldwide Agricultural Machinery and Equipment Directory » :

<http://www.agmachine.com>

Malheureusement, ceci ne prouve pas qu'ils fabriquent toujours les modèles cités, en particulier pour les firmes occidentales ayant abandonné la production de moulins de faible débit (ex : Alvan Blanch au Royaume-Uni, SKIOLD au Danemark,...)

Reste alors les sites internet des fabricants eux-mêmes, disponibles pour nombre de firmes indiennes, et pour quelques entreprises françaises ainsi que danoises. Malheureusement, certains de ces sites ne fournissent que le nom et une photo des modèles fabriqués, aucune information technique n'étant disponible. Toutefois leurs modèles sont toujours très proches de ceux fabriqués par d'autres entreprises, notamment en Inde où le « Premier 1A , 2A », le « Diamond » ainsi que le « Danish type », sont proposés par différents fabricants, les caractéristiques techniques étant disponibles sur au moins un de leur site.

Signalons encore le site de la Food and Agricultural Organisation (FAO), lui aussi laconique en ce qui concerne les distributeurs, ce qui prouve une fois de plus la difficulté d'obtenir des informations complètes et utiles.

7.2 Les prix

Les prix, eux aussi, ne sont jamais disponibles sur Internet, et, malgré des formulaires de demande d'informations et de prix disponibles sur la plupart des sites (auquel cas un mail leur était envoyé), nous n'avons reçu que trois réponses (ENGSKO, ELECTRA, BDC Systems), la liste de leurs produits et leurs tarifs ont été mis en annexe (annexes 3,4,12).

De plus, vu le manque d'informations sur les artisans locaux, les prix pratiqués sur place ne peuvent être déterminés précisément. Seul une marge peut être donnée (voir tableau 11), ces informations datant de janvier 1986, prix ajustés après la dévaluation du FCA

Fabrication sénégalaise	Broyeur NOFLAYE (fabriqué par SISMAR) avec moteur diesel	Prix 1985 avec moteur : 3.200.000 F CFA TTC
Fabrication artisan sénégalais		Prix sans moteur : 400.000 à 700.000 F CFA TTC Moteur diesel 6 ch : 1.200.000 à 1.300.000 F CFA TTC
Importation française	Broyeur PULVERIX type 2 (proche du modèle des artisans) à marteaux fixes	Prix à Dakar Sans moteur : 2.900.000 F CFA TTC Prix du moteur : DEUTZ diesel 9.2 ch 1.900.000 F CFA TTC
Importation Cote d'Ivoire	Broyeur SACK	Sans moteur : 1.376.000 F CFA TTC
Importation Danemark	Broyeur à marteaux mobiles SKIOLD SB	Prix sans moteur : 1.000.000 F CFA HT Prix avec moteur : HARTZ E.89 Diesel 11 ch 3.960.000 F CFA TTC

Tableau 6 : comparaison des broyeurs à marteaux à Dakar en janvier 1986. Source ENDA

Les artisans proposent donc des broyeurs à marteaux à un prix largement inférieur à celui des broyeurs importés, la différence allant de 20 à plus de 40%. A l'heure actuelle, la qualité est quasi la même, s'améliorant d'année en année depuis plus de vingt ans, au commencement de la construction locale. Ces broyeurs sont particulièrement intéressants pour les groupements de femmes qui ont généralement peu de moyens.

L'achat à un artisan local est de plus la meilleure solution pour le développement d'un pays, cela fournit du travail et des revenus aux artisans de la région.

Les prix des broyeurs importés dépendent aussi fortement du pays duquel on fait venir le moulin, mais aussi du lieu de l'importation, c'est-à-dire du pays dans lequel on l'installe. Les tarifs douaniers sont en effet différents d'un pays à l'autre.

Tout ceci rend impossible l'établissement d'une liste de prix précis.

8 Conclusion

Ce document constitue un survol des moyens disponibles pour la mouture du grain.

Si le lecteur désire avoir des renseignements plus précis sur un type de moulin, il peut s'adresser à :

Ingénieurs sans Frontières,
Avenue Marly, 48
1000 Bruxelles

Tél : 32.2.262.21.09

Mail : mail@isf-iai.be

NOTE :

Ci-après une bibliographie pour approfondir le sujet.

Les références des figures se rapportent aux numéros dans cette liste bibliographique.

9 Bibliographie

[1] **Evaluation et choix de moulins,**

Peter Löwe et Jean-Max Baumer,
Rapport de mission pour APICA, mars 1986, 50 p.

[2] **Production de farine de maïs à petite échelle,**

Bureau international du Travail, ONUDI, Genève, 1990 (Série Technologie, dossier technique no 7), 120 p.
ISBN : 92-2-203640-9

[3] **Traitement des céréales,**

UNIFEM, New-York, USA, 1989, 75 p.
Coll. : Manuel de technologies du cycle alimentaire, n° 3

[4] **Du grain à la farine : le décorticage et la mouture des céréales en Afrique de l'ouest,**

François, M.
GRET, Paris, 1988, 279 p.
Coll. : Le point sur les technologies ISBN : 2-86-844029-11

[5] **Equipements pour la transformation des produits agricoles à petite échelle dans les pays tropicaux et nouvelles formes de coopération industrielle,** ALTERSIAL, Ministère de la coopération, Rapport provisoire, février 1987, 215 p.

[6] **Matériels pour l'agriculture,** 1500 références pour l'équipement des petites et moyennes exploitations, ITDG & GRET, Paris, 1992, 301 p.
ISBN : 2-86844-051-7

[7] **Mouture de céréales par manèges à traction animale : expérimentation de prototypes de moulin manège au Burkina Faso et en France - Rapport technique,**

Sarda J.
Institut technologique Dello, Verberie, France, 1985, 58 p.

[8] **Procesamiento de cereales**

ITDG, UNIFEM, Lima, Pérou, 1998, 71 p.,
2è édition ISBN : 9972-47-021-3

[19] **Small-scale food processing, a guide to appropriate equipment**,
Fellows Peter, Hampton Ann
Intermediate Technology Publications in association with CTA , London, UK,
1992, 156 p.
ISBN : 1-85339-108-5

[10] **Tools for Agriculture, a guide to appropriate equipment for smallholder farmers** Intermediate Technology Publications in association with CTA and GRET ,
London, UK, 1992, 4^e édition, 238 p.
ISBN : 1-85339-100-X

[11] **David Livingstone Institute Series on Choice of Techniques in Developing Countries volume 1: *Brewing in Developing Countries***,
J Keddie & W. Cleghorn,
Scottish Academic Press, Edinburgh, Scotland, 1979, 134 p.
ISBN: 7073-0240-3

[12]) **David Livingstone Institute Series on Choice of Techniques in Developing Countries volume 2: *Choice of technique in maize milling***,
S.J. Uhlig & B.A. Bhat,
Scottish Academic Press, Edinburgh, Scotland, 1979, 121 p.
ISBN: 7073-0240-4

[13] **Transformation des productions agricoles : les moulins - le manioc**,
HESTIA Inter sprl, Bruxelles, 1995, 14p.
NO 528.1 - 531.21

[14] **Transformer les céréales pour les nouveaux marchés urbains**,
Broutin Cécile,
Collection Le Point Sur
AGRIDOC & GRET Paris, France, 2003, 296 p.
ISBN : 2-86844-142-4

[15] **L'après-récolte des grains. Organisation et techniques**,
De Lucia M., Assennato D.,
Bulletin des Services agricoles de la FAO n°93, 1992 ISBN : 92-5-203108-1

[16] **Production et valorisation du maïs à l'échelle villageoise en Afrique de l'Ouest**,
Actes du séminaire de Cotonou " Maïs prospère" 25-28 janvier 1994,
Montpellier, CIRAD/FSA.UNB, FAO, 1994, ISBN : 2-87614-206-6

[17] **Précis technique sur les farines composées, application des techniques existantes**, Commission Economique pour l'Afrique, Addis-Abeba, Ethiopie, 1985

[18] **Les programmes d'installation de moulins villageois. Quelles conditions pour leur réussite en milieu rural sahélien?**
V. Altarelli Herzog,
Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 1986

[19] **Guide de fabrication d'un moulin à maïs manuel**, équipement conçu et fabriqué en Haïti par les Ateliers-Ecoles de Camp Perrin, Carlier Philippe, Vanhoolandt Cédric, ISF, Bruxelles, 2003, 54 p.
Coll. : Manuels Techniques

[20] **Improvements and cost reducing changes on a treadmill (MATA : Moulin à Traction Animale),** Peeters L., van der Valk R.E., Prot F., UNATA Research and Development, Aarschot, 1994, 26p.

[21] **A pedal-operated grain mill,** Rural Technology Guide 5, Pinson G. S., Tropical Products Institute, London, 1978, 32 p.
ISBN : 0-85954-076-6

[22] **A hand-operated bar mill for decorticating sunflower seed,** Rural Technology Guide 9, Beaumont J. H., Tropical Products Institute, London, 1980, 32 p.
ISBN : 0-85954-120-7

[23] **A feeder to improve the performance of a hand-operated groundnut sheller,** Rural Technology Guide 4, Collins, G.A., Coward, L. D G., and Pinson G. S., Tropical Products Institute, London, 1977, 17 p.
ISBN : 0-85954-073-1

[24] **Gestion des moulins communautaires : 1 - comment bien choisir un moulin?**
INADES Formation, Abidjan, 1988, 47 p.

[25] **Gestion des moulins communautaires : 2 - comment savoir si un moulin est rentable?**
INADES Formation, Abidjan, 1989, 40 p.

[26] **Gestion des moulins communautaires : 4 - comment entretenir un moulin?**
INADES Formation, Abidjan, 1990, 37 p.

[27] **Nutrition humaine en Afrique tropicale,** M.C. LATHAM, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 1979, ISBN 92-5-200412-2 Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/X0081F/X0081.htm#Contents>

Sites d'informations générales :

<http://www.agmachine.com>

<http://www.gret.org>

<http://www.cota.be/>

<http://www.codeart.org/>

<http://www.agridoc.com>

<http://www.fao.org>

<http://www.agricta.org./indexfr.htm>

<http://www.cirad.fr/fr/index.php>

<http://www.isf-iai.be>

<http://www.bceao.int/internet/bcweb.nsf/pages/muse1>