

SONIA COLLIN

TRAITÉ DE
BRASSERIE

TOME 2

ÉTAPES DU PROCÉDÉ BRASSICOLE

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel
Graphisme de couverture : Pierre André Gualino
Illustration de couverture : Ab InBev

© Dunod, 2022
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-084447-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Partie A

Le bloc chaud

Chapitre 1 ■ Le concassage	3
Étienne Bodart, Sonia Collin	3
1 Introduction	3
1.1 But du concassage	3
1.2 Risques au concassage	4
1.3 Contrôle de la mouture	5
1.4 Incidence du concassage	6
1.5 Installation générale	8
2 Types de concasseurs	11
2.1 Généralités sur les moulins à cylindres	11
2.2 Les moulins à deux cylindres	13
2.3 Les moulins à quatre cylindres	14
2.4 Les moulins à six cylindres	15
2.5 Les moulins à marteaux	17
2.6 La mouture sèche conditionnée sur moulins à cylindres	19
3 La mouture humide pour cuve-filtre	20
3.1 Avantages et inconvénients de la mouture humide	20
3.2 La mouture humide conditionnée	22
3.3 Cas du malt vert	23
4 La trémie à farine	23
5 Comparaison des types de mouture	24
Chapitre 2 ■ Le brassage proprement dit ou extraction du grain	27
Cécile Chenot, Pablo Alvarez, Sonia Collin	27
1 Objectifs	27
2 Conduite du brassage	28

2.1 Propriétés des enzymes actives au brassage	28
2.2 Transformation de l'amidon en sucres fermentescibles	29
2.3 Réflexion sur le diagramme de brassage	33
2.4 Quelques considérations sur l'utilisation d'enzymes exogènes	36
3 Technologie du brassage	38
3.1 Empâtage	39
3.2 Méthodes de brassage	43
3.3 Cuves de brassage	45
3.4 Méthodes de chauffe	47
3.5 Agitateur à pales	49
3.6 Exemple de cuve moderne avec système innovant d'agitation et de chauffage	50
Chapitre 3 ■ Filtration du moût et lavage des drêches	51
Frédérique Harmegnies, Christian De Brackeleire	51
1 Introduction	51
2 Théorie de la filtration avec gâteau	52
2.1 Loi de Darcy et linéarisation de Ruth	52
2.2 Coefficient de filtrabilité F_k	54
2.3 Paramètres influençant la filtrabilité du moût	55
3 Lavage des drêches	61
4 Filtration du moût au moyen d'une cuve-filtre	63
4.1 Introduction	63
4.2 Description d'une cuve-filtre	64
4.3 Fonctionnement d'une cuve-filtre conventionnelle	69
5 Filtration du moût au moyen d'un filtre-presse	72
5.1 Filtre à moût traditionnel	72
5.2 Filtre à couche mince à membranes : le filtre MEURA2001	76
5.3 Autres filtres-presses à couche mince modernes	85
6 Systèmes dynamiques de filtration du moût	89
6.1 Le décanteur centrifuge	89
6.2 Le système Nessie	91
7 Drêches	92
7.1 Composition de la drêche	92
7.2 Transport, stockage et séchage des drêches	92
7.3 Valorisation de la drêche	94

Chapitre 4 ■ La cuisson et le houblonnage du moût	97
Cécile Chenot, Sonia Collin	97
1 Stérilisation, inactivation/destruction des enzymes et coagulation des protéines pro-troubles	97
1.1 Stérilisation	98
1.2 Destruction de l'activité enzymatique	98
1.3 Amélioration de la stabilité colloïdale	98
2 Dissolution et transformation des composés du houblon	100
2.1 Isomérisation des résines amères	100
2.2 Utilisation des composés aromatiques du houblon	105
3 Ajout d'épices ou de plantes aromatiques	105
4 Élimination des composés volatils indésirables	106
4.1 Contrôle du diméthylsulfure (DMS)	106
4.2 Évaporation des aldéhydes de Strecker et autres produits issus des réactions de Maillard ou de la dégradation des acides gras	109
5 Systèmes d'ébullition	109
5.1 Historique des chaudières d'ébullition en cuivre avec chauffage direct ou à la vapeur	110
5.2 Cuves d'ébullition avec cuiseur interne ou externe	110
5.3 Exemple de cuiseur interne	112
5.4 Autres technologies d'ébullition	114
Chapitre 5 ■ La clarification et le refroidissement du moût	121
Cécile Chenot, Sonia Collin	121
1 La clarification du moût	121
1.1 Le bac décanteur ou le décanteur Devreux	121
1.2 Whirlpool	123
1.3 La centrifugeuse	124
1.4 Comparaison des différentes technologies de clarification	126
2 Le refroidissement du moût et la formation d'un trouble au froid ou trub fin	126
2.1 Refroidissement du moût	126
2.2 Élimination ou non du trub fin	128

Chapitre 6 ■ Construction de la salle de brassage	129
Frédérique Harmegnies, Christian De Brackeleire	129
1 Introduction	129
2 Salle de brassage industrielle	130
2.1 Configuration générale	130
2.2 Meunerie et broyage	132
2.3 Empâtage, cuve matière et cuiseur à grains crus	134
2.4 Filtration du moût	136
2.5 Ébullition du moût	136
2.6 Clarification du moût	139
2.7 Refroidissement du moût et récupération d'énergie	140
2.8 Transfert vers le groupe froid	144
3 Brassage à haute densité	144
4 Brassage continu	147
4.1 Principes du brassage continu	147
4.2 Brassage continu HEINEKEN	148
4.3 Brassage continu Meurabrew	150
4.4 Autres développements relatifs au brassage continu	152
Chapitre 7 ■ La qualité du moût	155
Margaux Simon, Sonia Collin	155
1 Importance de la composition du moût	155
2 Hydrates de carbone du moût	156
2.1 Extrait et sucres fermentescibles totaux	157
2.2 Dosage individuel des sucres par HPLC	159
3 Lipides et trouble du moût	162
3.1 Dosage des acides gras totaux d'un moût sous forme de FAME	162
3.2 Mesure de la turbidité au néphélomètre	164
3.3 Dosage du trub au cône d'Imhoff	165
4 Matières azotées du moût	166
4.1 Matières azotées totales et FAN	166
4.2 Dosage individuel des acides aminés du moût par HPLC ou UPLC	167
5 Polyphénols	169
5.1 Méthodes empiriques	169
5.2 Dosage individuel des polyphénols par HPLC-UV ou -MS/MS	169

6 Charge thermique du moût	172
6.1 ITT	173
6.2 TBA et RSV	174
Chapitre 8 ■ Le rendement au brassage	177
Nicolas Declercq, Sonia Collin	177
1 Introduction	177
2 Les différents rendements de la salle de brassage	178
2.1 Considérations générales	178
2.2 Rendement théorique maximum (R_{tm})	178
2.3 Rendement du brassin (R_b)	178
2.4 Rendement global (R_g)	180
2.5 Rendement à l'entonnement (R_e)	180
3 Paramètres qui influencent le rendement	180
3.1 Matières premières	181
3.2 Conditions de stockage du malt	182
3.3 Concassage des grains	182
3.4 Équipement	182
3.5 Processus de fabrication	183
4 Droits d'accises	184
4.1 Introduction	184
4.2 Notion d'entrepôt agréé	185
4.3 Entrepôt fiscal	186
4.4 Suspension de droits d'accises	186
4.5 PLDA/ AC4	186
4.6 E-AD	186
4.7 Exemples de droits d'accises selon différents pays européens	187
Chapitre 9 ■ Le nettoyage et la désinfection du matériel de brasserie	189
Marc Maudoux, Sonia Collin	189
1 L'hygiène en brasserie	189
2 Le nettoyage	190
2.1 Rôle du nettoyage et paramètres impactant son efficacité	190
2.2 Types de détergents et d'additifs	191

3	La désinfection	198
3.1	La désinfection physique	198
3.2	La désinfection chimique	199
4	Mise en place du nettoyage et de la désinfection du matériel de production	200
4.1	Procédures à privilégier	200
4.2	Procédure manuelle de nettoyage et de désinfection	201
4.3	CIP et COP	202
5	Nettoyage et désinfection des locaux en brasserie	203
6	Conception et mise en place d'un plan de nettoyage et de désinfection	204

Partie B

Le bloc froid

Chapitre 10 ■ Théorie de la fermentation	209
Pablo Alvarez, Cécile Chenot, Sandro Alvarez, Sonia Collin	209
1 Paramètres régulateurs du profil aromatique fermentaire	209
2 Levures basses et levures hautes	211
3 Morphologie des cellules de levure : paroi et membrane plasmique	214
3.1 Paroi cellulaire	214
3.2 Espace périplasmique	217
3.3 Membrane plasmique	217
3.4 Flocculation – Flocculence	223
4 Assimilation des nutriments : sucres et azote assimilable	227
4.1 Assimilation des sucres	228
4.2 Assimilation des matières azotées	231
5 Métabolisme des sucres	235
5.1 Catabolisme des sucres	236
5.2 Stockage ou anabolisme des sucres	243
5.3 Cycle de croissance : phase de latence, exponentielle et stationnaire	245
6 Métabolisme des acides aminés	246
6.1 Voie d'Ehrlich	248
6.2 Voie de Genevois	250

7 Produits-métabolites secondaires excrétés par la levure pendant la fermentation	252
7.1 Acides organiques, acides gras et stérols	253
7.2 Aldéhydes et cétones	258
7.3 Alcools supérieurs	266
7.4 Esters	268
7.5 Composés soufrés	274
7.6 Composés phénoliques	285
8 « Fermentescibilité » du moût	286
8.1 Définitions de l'atténuation apparente, réelle et limite	286
8.2 Modulation de l'atténuation par des enzymes exogènes	289
9 Propagation de la levure	294
 Chapitre 11 ■ Technologie de fermentation et construction du bloc froid	 297
William Donck, Benoît Descamps, Sonia Collin	297
1 Types de cuves de fermentation	297
1.1 Cuves de fermentation traditionnelles	297
1.2 Cuves cylindro-coniques	301
2 Contrôle de la fermentation	312
2.1 Diagrammes de fermentation	312
2.2 Suivi des principaux paramètres de fermentation	316
2.3 Récupération du CO ₂	327
3 Propagation de levures	330
3.1 Introduction et rappel des différentes phases de croissance de la levure	330
3.2 Étapes d'une propagation de levure humide	333
3.3 Développement des procédés de propagation	336
3.4 Technologie de propagation	338
4 Utilisation de levures humides	341
4.1 Besoins en oxygène et contrôle des propriétés de la levure prête à l'ensemencement	341
4.2 Taux d'ensemencement et stockage entre deux fermentations	345
4.3 Protocoles d'ensemencement	346
4.4 Lavage acide de la levure d'ensemencement en cas d'infection	348

5	Utilisation de levures sèches	348
5.1	La levure sèche active (ou LSA)	348
5.2	Production de levures sous forme sèche	350
5.3	Qualité des levures sèches	353
5.4	Modes et taux d'ensemencement	353
6	Récupération de la levure et des bières résiduelles	356
6.1	Systèmes de filtration des levures	357
6.2	Systèmes de centrifugation	359
6.3	Réinjection des levures en cours de transfert	362
6.4	Décantation naturelle des levures	363
6.5	Récupération des levures via un décanteur (centrifugeuse horizontale)	363
Chapitre 12 ■ La garde, la stabilisation colloïdale et le houblonnage à cru		365
Carlos Silva Ferreira, Pablo Alvarez, Sonia Collin		365
1	La fermentation secondaire ou garde	365
1.1	Principaux objectifs de la garde	365
1.2	Conduite de la garde	368
2	La stabilisation colloïdale	371
2.1	Traitements de clarification	371
2.2	Traitements de stabilisation colloïdale	372
3	Le houblonnage à cru	377
3.1	Principaux composés volatils extraits pendant le houblonnage à cru	378
3.2	Principaux composés non volatils extraits pendant le houblonnage à cru	382
3.3	Les variables d'un houblonnage à cru	387
3.4	Techniques de houblonnage à cru et équipements	390
Chapitre 13 ■ La filtration de la bière		403
Nicolas Declercq, Pierre Adam, Sonia Collin		403
1	Introduction	403
2	La centrifugation de la bière	404
2.1	Base théorique de la centrifugation	404
2.2	Les spécifications des centrifugeuses	410
2.3	Utilisation d'une centrifugeuse	412

3	La filtration de la bière avec adjuvants non régénérables	412
3.1	La filtration avec kieselguhr	413
3.2	La filtration tangentielle sur membrane	425
4	Les filtres à stabilisant régénérable	432
4.1	Le filtre discontinu à PVPP régénérable (batch)	432
4.2	Les filtres continus à PVPP régénérable	434
5	La filtration fine	436
5.1	Utilité d'une filtration fine en brasserie	436
5.2	Mécanismes de capture	436
5.3	Description du support filtrant	436
5.4	Assemblage des supports filtrants	437
5.5	Les caractéristiques du support filtrant	438
5.6	Exemples de filtration fine appliquée à la bière	440
6	Adjuvants de filtration et de stabilisation	442
6.1	Les adjuvants de filtration	442
6.2	Les adjuvants de stabilisation	448
7	Préparations diverses	452
7.1	Eau de dilution	452
7.2	Station de coupage	453
7.3	Station de dosage des additifs	454
8	Saturation avant soutirage	454
8.1	Éléments de théorie et principe	454
8.2	Unités de carbonatation	456
Chapitre 14 ■ Le conditionnement et la refermentation		
	en bouteille, en fût ou en canette	461
	Nicolas Declercq, Pierre Baraut, Sonia Collin	461
1	Le conditionnement	461
1.1	Les enjeux du conditionnement	461
1.2	Cave de bière filtrée	465
1.3	Techniques de soutirage en bouteilles	468
1.4	Techniques de soutirage en canettes	487
1.5	Techniques de soutirage en fûts	490
1.6	Installation et organisation générale de la bouteillerie	506
2	La refermentation	514
2.1	Avantages et inconvénients d'une refermentation	514

2.2 Paramètres d'une refermentation en bouteille	515
2.3 Activités de la levure en refermentation	519
2.4 Cas particuliers de la refermentation en fûts ou en canettes	522
Chapitre 15 ■ La pasteurisation et le contrôle microbiologique de la bière	523
Marc Maudoux, Sonia Collin	523
1 La pasteurisation	523
1.1 But de la pasteurisation et sources de contamination en brasserie	523
1.2 Cinétique de destruction thermique des micro-organismes	526
1.3 Différentes technologies de pasteurisation	529
2 Contaminants microbiologiques de la bière	535
2.1 Tests microbiologiques de base et milieux de culture	535
2.2 Bactéries contaminantes en brasserie	541
2.3 Levures contaminantes en brasserie	548
 Partie C	
 La gestion de production et les services généraux	
 Chapitre 16 ■ Gestion de la production en brasserie et développement durable	555
Serge Deboot, Nicolas Declercq, Sonia Collin	555
1 Introduction à la gestion de production en brasserie	555
2 « <i>Safety first</i> »	557
3 Gestion de la qualité	560
3.1 Définition de la qualité et application au cas particulier de la brasserie	560
3.2 Les différentes composantes de la qualité en brasserie	561
3.3 Le coût de la qualité et de la « non-qualité » en brasserie	571
3.4 Introduction aux bonnes pratiques d'hygiène et à l'HACCP	573
4 Gestion de la production et de la performance	576
4.1 Principaux indicateurs de performance	576
4.2 Autres indicateurs de performance	584

5	Gestion de la capacité en brasserie	584
5.1	Capacité d'une installation industrielle	585
5.2	Calcul de la capacité en brasserie	591
5.3	Gestion de la capacité en brasserie	603
5.4	Dimensionnement d'une nouvelle brasserie	609
6	Gestion de la production et développement durable	610
Chapitre 17 ■ Organisation des services techniques généraux et des utilités		613
Serge Deboot, Nicolas Declercq		613
1	Électricité	613
2	Eau	616
2.1	Captage et traitement de d'eau	617
2.2	Consommation et utilisation de l'eau	619
2.3	Épuration des eaux usées et récupération éventuelle	619
3	Vapeur	619
3.1	Production de vapeur	620
3.2	Distribution et consommation de vapeur	624
4	Production et consommation de froid	626
4.1	Production et distribution du froid	626
4.2	Consommation de froid	628
5	CO ₂	629
6	Air comprimé	631
7	Installation générale de la brasserie	632
Références		635
Livres communs à tous les chapitres		635
Partie A		636
Partie B		646
Partie C		667
Index		673

Partie A

Le bloc chaud

Chapitre 1 ■ Le concassage.....	3
Chapitre 2 ■ Le brassage proprement dit ou extraction du grain	27
Chapitre 3 ■ Filtration du moût et lavage des drêches.....	51
Chapitre 4 ■ La cuisson et le houblonnage du moût	97
Chapitre 5 ■ La clarification et le refroidissement du moût	121
Chapitre 6 ■ Construction de la salle de brassage	129
Chapitre 7 ■ La qualité du moût.....	155
Chapitre 8 ■ Le rendement au brassage.....	177
Chapitre 9 ■ Le nettoyage et la désinfection du matériel de brasserie	189

Chapitre 1

Le concassage

ÉTIENNE BODART, SONIA COLLIN

1 Introduction

1.1 But du concassage

À l'étape du brassage, l'amidon et les protéines du malt (et grains crus) sont transformés par les enzymes et dissous pour produire l'extrait. Le principal défi du brasseur est d'obtenir un maximum d'extrait, dans un moût clair, et en un minimum de temps.

Les substances à dissoudre étant à l'intérieur du grain (l'endosperme), il est nécessaire de rompre son enveloppe. Cette extraction est facilitée par un concassage du grain.

S'il ne s'agissait que d'une étape d'extraction, on réduirait le malt en farine très fine. Mais après l'extraction vient la filtration, étape durant laquelle le moût est séparé de la drêche formée par les enveloppes du grain et tout ce qui ne s'est pas solubilisé. Suivant le type de filtre utilisé (cuve-filtre ou filtre à moût), il faudra adapter la mouture.

Une cuve-filtre (cuve avec un faux fond plat perforé de fentes de 2 à 3 cm de long et de 0,4 à 0,7 mm de large, cf. chapitre 3) ne donnera un moût clair que si celui-ci est passé à travers un gâteau de drêche suffisamment épais et poreux. Ainsi, lors du versement dans la cuve de brassage, les pailles du malt devront être détachées de l'amande du grain mais rester entières. La filtration proprement dite se fait au travers de la couche d'enveloppes constituant le gâteau (construit après recyclage des premiers moûts troubles). Des enveloppes fragmentées forment un gâteau trop dense qui filtrera lentement et sera difficile à laver.

Ce travail sera correctement réalisé par un moulin à cylindres dont les écartements seront ajustés avec précision. Il peut être simple (une seule paire de cylindres) ou complexe (quatre, cinq ou six cylindres), avec des

tamis qui redirigent les particules en fonction de leur taille vers les cylindres appropriés. Le malt y est simplement concassé entre les cylindres. Paille entière et farine fine ne peuvent être obtenues qu'avec un malt friable bien désagrégé, sec et bien calibré.

Il a fallu attendre le développement du filtre-pressé (cf. chapitre 3) pour se permettre d'utiliser des moutures beaucoup plus fines, plus adaptées à une récupération maximale de l'extrait. Un filtre-pressé dont les cadres sont peu épais ne demande pas de gâteau poreux. Les pailles de l'enveloppe ainsi que l'amande peuvent dès lors être réduites en petites particules.

Ce type de mouture fine est obtenu dans un moulin à marteaux constitué d'une chambre cylindrique aux parois rainurées, d'un rotor actionnant les marteaux et d'une grille de sortie de la farine. Les grains sont percutés par les marteaux, et brisés entre le stator et le rotor. La grille ne laissera sortir qu'une farine très fine et homogène. Les enveloppes pailleuses y sont également réduites en fines particules. Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, cette technologie autorise de travailler avec des maisches beaucoup plus denses tout en assurant l'obtention de moûts clairs dans un laps de temps satisfaisant. Le rendement d'extraction sera également supérieur à celui d'une cuve-filtre.

Les concasseurs à marteaux ont une capacité supérieure aux concasseurs à cylindre. Le choix du concasseur est toutefois déterminé par le type de filtre, lui-même étroitement lié à la capacité de production envisagée. Dans les grosses brasseries, ils permettent aujourd'hui d'assurer plus de 14 brassins par jour.

Le type de concasseur a relativement peu d'impact sur les qualités organoleptiques de la bière. Toutefois, l'incorporation d'air lors du concassage et du transport de la farine vers la cuve-matière doit être évitée pour le défaut d'arôme de carton (*trans*-2-nonénal) créé au vieillissement (cf. chapitre 12 du Tome 1). Des systèmes modernes de mouture sous eau et CO₂ contribuent à un meilleur vieillissement de la bière.

Il est conseillé de moudre le malt juste avant le brassage car la farine absorbe facilement l'humidité ambiante et peut s'acidifier.

1.2 Risques au concassage

L'explosion de poussière est un accident que l'on rencontre parfois dans les meuneries. Elle peut causer de graves dégâts corporels ainsi que détruire le matériel.

On attribue ces explosions à l'accumulation de charges électrostatiques dans les nuages de farine, tout comme cela se présente dans les nuages de l'atmosphère. On les rencontre d'ailleurs dans toutes les industries où l'on manipule des matières poudreuses. Ces zones sont délimitées et marquées

ATEX (ATmosphères EXplosives). Cette réglementation est issue de deux directives européennes, 2014/34/UE ou ATEX 95 pour les équipements destinés à y être utilisés, et 1999/92/CE ou ATEX 137 pour la protection des travailleurs. Pour les éviter, on propose de relier les parties métalliques du moulin à la terre. On place aussi des aimants pour retenir les morceaux de fer qui pourraient provoquer des étincelles sur les cylindres. Dans quelques cas où ces mesures ne se sont pas avérées suffisantes, il a été proposé de créer une ouverture dans la trémie à farine (habituellement tout à fait hermétique), garnie d'un filtre en étamine (pour éviter la poussière).

Le malt réceptionné en brasserie doit répondre à un cahier des charges bien précis. En amont, il a déjà fait l'objet d'un nettoyage par le malteur. Toutefois, il peut encore subsister quelques corps étrangers (métalliques ou non métalliques) susceptibles de provoquer des étincelles (explosion de poussières) ou d'endommager les concasseurs. Pour éviter ce type de problème, les grains passeront le long d'un aimant avant d'être concassés et les cylindres seront généralement munis d'un système de protection leur permettant de s'écarter lors du passage d'un objet dur.

1.3 Contrôle de la mouture

La mouture sera d'abord examinée visuellement pour vérifier que les pailles ne sont pas trop déchiquetées et qu'elle ne contient plus de grains entiers. Ces derniers peuvent indiquer qu'il y a un manque de parallélisme ou un défaut dans l'un des cylindres ou des tamis.

La finesse de la mouture se contrôle à l'aide de tamis standardisés selon le protocole MEBAK 1.5. On attendra un ratio approprié d'enveloppes, de gruaux et de farine plus fine, dépendant du système de filtration (tableau 1.1). Dans une cuve-filtre, une farine trop fine obstrue la couche de drêche, diminue la vitesse de filtration et rend le lavage du gâteau difficile.

Le système de tamis le plus connu en brasserie est le « plansichter de Pfungstadt », qui divise la mouture en six catégories. Les deux tamis supérieurs (1,27 et 1,01 mm) retiennent les enveloppes, les deux suivants (0,55 et 0,25 mm) les gruaux gros et fins, le cinquième (0,15 mm) la farine, le fond récupérant finalement la fraction la plus poudreuse. Aujourd'hui, ces tailles de tamis sont peu à peu remplacées par les normes DIN (DN 1,25, 1,00, 0,50, 0,25 et 0,125 mm). Bien que les différences soient minimales, il faut s'attendre à une légère modification des fractions obtenues dans les tableaux 1.2 et 1.3. Il n'est pas vraiment nécessaire de subdiviser en autant de portions, mais les différents tamis sont ainsi moins encombrés. Le contrôle peut aussi se faire avec des systèmes de tamis simplifiés.

Tableau 1.1 – Fractions d’enveloppes, gruaux et farine adaptés aux cuves-filtres et aux filtres à moût.

	Cuve-filtre	Filtre à maïs traditionnelle
Enveloppes	20 à 25 %	12 à 15 %
Gruaux	45 à 55 %	40 à 45 %
Farine	20 à 30 %	40 à 45 %

1.4 Incidence du concassage

Comme nous l’avons déjà mentionné, la finesse de la mouture améliorera l’extraction mais ralentira la filtration. Le brasseur devra donc trouver le meilleur compromis compte tenu de ses installations et des objectifs fixés. Le type de mouture et le réglage des moulins dépendront aussi de la qualité de la matière première, en particulier la taille des grains, le degré de désagrégation du malt et son humidité.

Les moulins à cylindres ne peuvent évidemment pas concasser uniformément des grains de calibres différents. Comme le montre le tableau 1.2, les grains les plus larges donnent des moutures plus fines (mesures sur le plansichter de Pfungstadt).

Tableau 1.2 – Répartition de la mouture dans le plansichter de Pfungstadt (%) en fonction de la dimension des grains.

Dimension des grains (mm)	> 2,8 mm	2,5-2,8 mm	2,2-2,5 mm
Tamis 1 + 2	45,2	47,9	51,6
Tamis 3 + 4	36,1	33,2	31,0
Tamis 5 + fond	18,7	18,9	17,4

L’état de désagrégation du malt joue également un rôle important. Les grains mal désagregés donnent de plus larges particules, récupérées sur le tamis 1 et 2, et moins de farine (tamis 5 et fond).

Tableau 1.3 – Répartition de la mouture dans le plansichter de Pfungstadt (%) en fonction du degré de désagrégation du malt (d’autant plus élevé que la différence fine-gros mouture est faible).

Différence fine-gros mouture	5,8 %	2,2 %	1,2 %
Tamis 1 + 2	42	36	29
Tamis 3 + 4	35	38	43
Tamis 5 + fond	23	26	28

La finesse de la mouture est aussi particulièrement influencée par l'humidité des grains. Lors du passage entre les cylindres du moulin, les grains très secs explosent littéralement. L'abondance de fine farine réduira la porosité de la couche de drêche et la filtration sera laborieuse, avec des lavages irréguliers. À l'opposé, un malt trop humide s'écrase entre les meules, donnant lieu à une pâte plutôt qu'une farine. Ces grosses particules pâteuses se saccharifieront difficilement et le rendement en extrait en sera altéré.

Le type de versement et la méthode de brassage peuvent parfois influencer le choix des paramètres du concassage. Ainsi, l'utilisation de proportions élevées de grains crus ($> 30\%$) ou l'usage de malts spéciaux peuvent nécessiter une mouture plus grossière du malt, afin de ne pas ralentir exagérément la filtration du moût. De même, des brassages longs avec des pompages de maische trop fréquents, ou avec une agitation brutale, réduisent la taille des gruaux en accentuant les forces de cisaillement.

C'est cependant la méthode de filtration qui imposera le type de mouture. La mouture sèche classique obtenue sur cylindres sera privilégiée pour une cuve-filtre (ou un filtre à moût ancienne génération) tandis que le moulin à marteaux sera réservé au filtre-pressé à membranes.

Les spécifications reprises au tableau 1.4 ne sont qu'indicatives, celles-ci devant être adaptées au matériel et aux matières premières utilisées. En principe, on réglera le moulin pour obtenir le maximum d'extrait avec une durée de filtration compatible avec le nombre de brassins journaliers (figures 1.1 et 1.2). Bien qu'ayant peu d'impact sur la teneur en sucres fermentescibles et en substances protéiques du moût, une mouture plus fine favorisera nettement l'extraction des bêta-glucanes. Le réglage n'est pas une opération figée. Il doit être régulièrement adapté aux matières premières utilisées et plus spécialement à l'humidité des malts.

Tableau 1.4 – Spécifications des différentes fractions (en %) sur le plansichter de Pfungstadt selon le mode de filtration.

Tamis	Dimensions (mm)	Types	Cuve-filtre	Filtre à moût	Filtre-pressé
1	1,27	Pailles	18	11	1
2	1,01	Gros gruaux	8	4	4
3	0,55	Fins gruaux I	35	16	9
4	0,25	Fins gruaux II	21	43	26-32
5	0,15	Farine	7	10	19-25
Fond	–	Fine farine	11	16	< 35

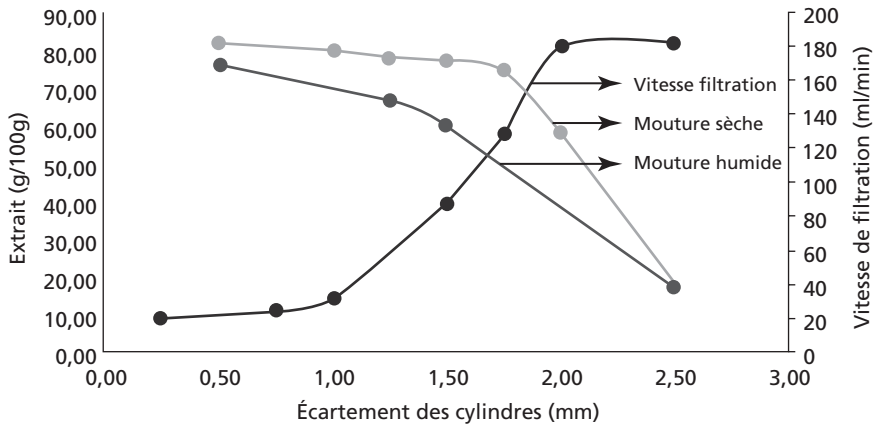


Figure 1.1 – Influence de l'écartement des cylindres sur le rendement en extrait et la vitesse de filtration.

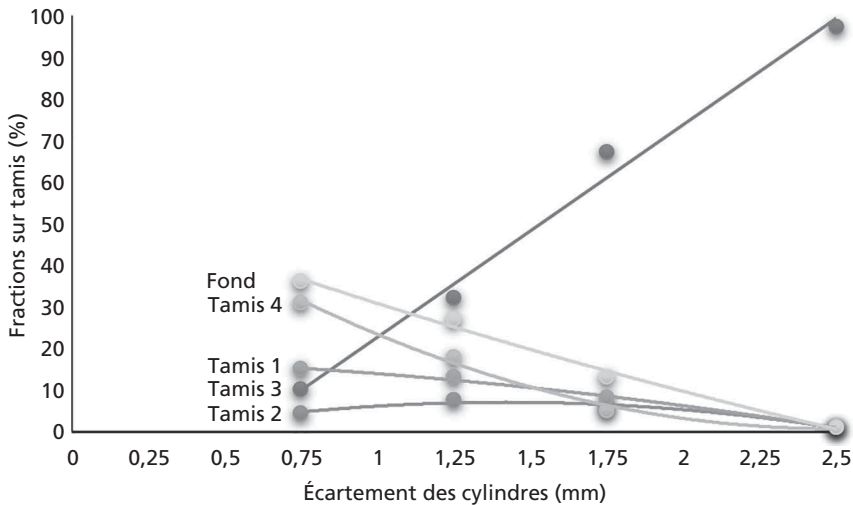


Figure 1.2 – Influence de l'écartement des cylindres sur la finesse de la mouture.

1.5 Installation générale

En brasserie, le malt doit pouvoir être conservé plusieurs mois (idéalement jusqu'à 2 ans, moyennant un contrôle strict sur l'absence de charançons). Une humidité inférieure à 5 % lui assurera une activité de l'eau suffisamment basse pour éviter la reprise des activités enzymatiques (surtout protéolytiques qui, à terme, réduiraient la qualité de la mousse). Si l'humidité dépasse 7-8 %, le rendement en extrait en sera également impacté, la mouture classique étant peu efficace sur un malt « plastique » qui a tendance à s'écraser.

Le malt et les grains crus sont transportés vers la brasserie, soit en vrac (camion-citerne ou container), soit en sacs. Le transport en sacs de jute plastifiée ou doublés d'un sac plastique soudé est apprécié pour l'exportation par voie maritime (transport à longue distance, sans risque de reprise d'humidité). On les utilise aussi pour les malts spéciaux pour lesquels une utilisation rapide est préconisée (humidité plus facilement reprise et risque de pertes d'arômes).

Il n'y a aucun intérêt économique à conserver le malt en brasserie. Il faut toutefois se laisser le temps de réaliser des contrôles de qualité, nécessaires notamment pour fixer le versement de chaque brassin et la proportion idéale de chaque type de malt. Un stock minimum d'un mois est par ailleurs conseillé si l'on veut juger des réelles qualités de la matière première pour la recette mise en œuvre, par exemple en produisant deux ou trois bières à partir de brassins mono malt successifs (évaluation de la vitesse réelle de filtration, de la qualité de la mousse, de la stabilité colloïdale, du goût et des arômes obtenus...).

Par ailleurs, il est admis qu'un malt fraîchement touraillé est susceptible de créer plus de difficultés en salle de brassage (saccharification et filtration plus lentes). De l'eau physiquement ou chimiquement liée aux structures moléculaires du grain a été éliminée dans la touraille. Il est probable qu'un temps minimum (+/- trois semaines) soit ensuite requis pour que l'équilibre se rétablisse. Ces problèmes sont toutefois loin d'être systématiques. Une brasserie belge a utilisé pendant plusieurs années du malt sortant directement de la touraille sans le moindre incident. Il faut cependant préciser qu'il s'agissait dans ce cas d'une mouture humide (cf. paragraphe 3).

Le malt arrivant en citerne passe dans une trémie (grand entonnoir de forme pyramidale), puis est transporté vers les silos par des élévateurs mécaniques ou pneumatiques avec une pesée en continu (figure 1.3). Le transport pneumatique reste plus délicat, l'abrasion au niveau des coudes conduisant à des fuites ainsi qu'à plus de grains cassés, surtout dans le cas de malt fort désagréé.

Les grains brisés forment des poussières qui s'accumulent à la base des silos. Riches en silice et en cellulose, celles-ci représentent un réel danger pour la santé du personnel et un risque d'incendie. Si des quantités importantes passent en fabrication, elles conduisent par ailleurs à des erreurs de calcul de densité et éventuellement un excès de diacétyle dans la bière (plus d'acides aminés du premier groupe, cf. chapitre 10).

La brasserie doit disposer de plusieurs silos de manière à séparer les arrivages, les variétés et les origines. Il est conseillé d'utiliser toujours au moins

trois malts d'origines géographiques et de variétés différentes. La brasserie devra donc être équipée d'un minimum de quatre silos, chacun ayant idéalement une capacité d'un mois de production. Ces silos peuvent être construits en béton, ou mieux en métal (plus rapidement installés, déplacés plus aisément, et généralement moins coûteux tout au moins s'ils sont de petites dimensions).

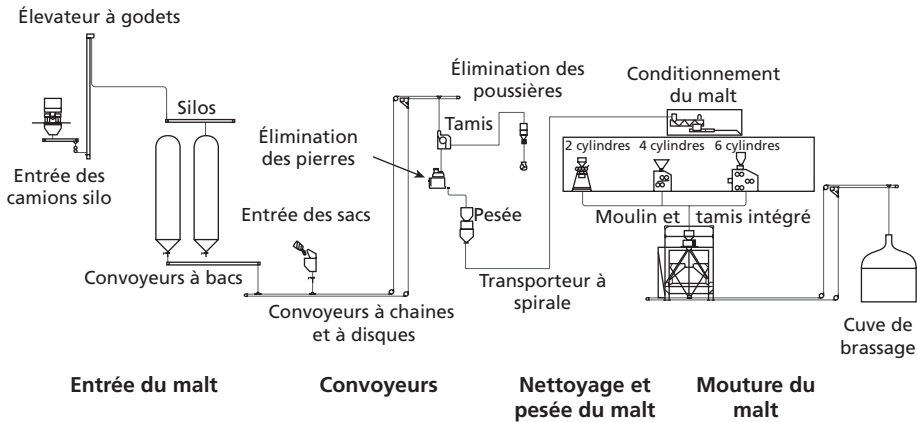


Figure 1.3 – Acheminement du malt jusqu'à la production de la mouture.

Lors de la confection d'un nouveau brassin, le malt est transporté des silos vers le concasseur. Des doseurs rotatifs situés sous chaque silo ou des pesées successives (généralement plus précises) des différents malts permettront d'obtenir le mélange adéquat.

Avant de passer dans le concasseur, les malts sont nettoyés dans un séparateur magnétique, un tamis vibrant et une polisseuse. Ces appareils ne sont pas absolument indispensables, mais ils permettent d'éviter les accidents, des incendies, voire des explosions provoquées par le passage de pièces métalliques ou de cailloux dans les meules du concasseur. Les poussières inévitablement formées lors de la manipulation des grains sont retenues par des filtres et accumulées dans un silo spécifique. Elles seront, soit vendues comme aliment pour bétail, soit recyclées peu à peu dans les brassins. On recueille ainsi de 0,2 à 0,5 % de poussières en fonction du nombre de transferts que le malt a subis. Cette poussière est assez riche en extrait (tableau 1.5) et contient, comme déjà évoqué un peu plus haut, plus d'acides aminés de la première famille. Cela explique pourquoi la bière produite avec les fonds de silos (riches en poussières) peut développer des teneurs anormalement élevées en diacétyle.

Tableau 1.5 – Analyse comparative d'un malt et des poussières qui en dérivent.

	Malt	Poussières
Extrait (%)	81,2	36,7
Azote total (%)	11,0	13,8
Azote soluble (%)	4,4	6,9
Azote α aminé (ppm) (11,7 °P)	219	343,0

Les appareils de nettoyage et de polissage du malt ainsi que la pesée avant mouture sont, soit placés verticalement en cascade, soit, comme souvent dans les brasseries modernes, sur le même plan que la mouture (bâtiment ne nécessitant plus de multiples étages mais usage dans ce cas de plusieurs élévateurs).

Le débit des appareillages sera calculé de manière que la mouture soit prête en une heure trente, voire deux heures (durée obligatoirement inférieure au temps qui sépare deux brassins).

La trémie à farine est généralement de forme cylindro-conique et munie d'une porte. Sa contenance sera de 300 litres par 100 kg de malt (occupation de 220 à 300 litres selon la finesse de la mouture).

2 Types de concasseurs

2.1 Généralités sur les moulins à cylindres

L'obtention d'une mouture reproductible et de bonne granulométrie requiert une arrivée régulière du grain dans le moulin, ancré horizontalement. Afin de répartir les grains sur toute la surface des cylindres, le malt y entre via un distributeur. Sans ce premier cylindre à cannelures profondes, il arriverait en trop grande abondance à certains endroits, ce qui aurait aussi pour conséquence d'écarter les cylindres du moulin et de les user prématurément.

Pour qu'il se présente toujours longitudinalement à l'écrasement, on le fait glisser à la sortie du distributeur via une plaque à cannelures parallèles aux cylindres. Notons qu'un farinatome (constitué d'une paire de cylindres à rainures très profondes) est parfois placé entre le distributeur et les premiers cylindres pour couper le grain longitudinalement et faciliter son concassage ultérieur. Une réelle amélioration n'est toutefois observée qu'avec des moulins d'ancienne génération, et non sur les moulins modernes à plusieurs passages.

L'écartement entre les cylindres doit être en moyenne de 1,3 mm pour la première paire, de 0,8 mm pour les cylindres qui reprennent les enveloppes, et de 0,35 mm pour ceux qui travaillent les gruaux. Ces cylindres sont faits en fonte dure. Les rainures ne peuvent en aucun cas être tranchantes, au risque de déchirer les enveloppes. La première paire est généralement faiblement rainurée (figure 1.4) et les cylindres sur lesquels repassent les enveloppes ne le sont pas. Des vitesses différentes sont parfois appliquées aux cylindres à gruaux, pour mieux les écraser.

Les deux cylindres d'une paire, tournant en sens contraire, doivent être parfaitement parallèles, et leur écartement réglable entre 0,2 et 2 mm, avec une précision de 1/30 mm. La distance qui les sépare est réglée par une butée, déplaçable par un volant à vis micrométrique (modifiable pendant le fonctionnement du moulin). Une aiguille indique la distance sur le volant de réglage. L'écartement et le parallélisme des cylindres sont contrôlés avec des jauges d'épaisseur.

Comme déjà mentionné, ces cylindres doivent aussi pouvoir s'écarter automatiquement l'un de l'autre au cas où un corps dur se présenterait. Pour cette raison, seul un des cylindres est mis en rotation par une poulie, l'autre étant entraîné par le premier à l'aide d'une roue dentée ; le cylindre entraîné repose sur des coussinets mobiles maintenus en position par des ressorts, ce qui lui permet de reculer lorsque se présente l'intrus. Les coussinets et tourillons doivent être grands et bien graissés (si possible avec une bague de graissage pour éviter toute usure).



Figure 1.4 – Paire de cylindres cannelés (Source : Schneider Jaquet) et détail de la surface du cylindre (Crédits : GEA).

Les cylindres feront entre 350 à 1 250 mm de longueur et leur diamètre sera au minimum de 250 mm, sinon l'angle d'entrée des grains serait trop obtus (ils glisseraient au lieu d'être happés) et la durée de concassage trop

courte. Ce sont les cylindres à malt qui tournent le plus lentement, les cylindres à gruaux fins le plus vite. La vitesse périphérique sera de 2,5 mètres par seconde pour les grains et de 4 mètres par seconde pour les fins gruaux.

Le débit d'un moulin à une paire avoisinera les 100-200 kg par heure et par décimètre de longueur des cylindres. Il atteindra 200 à 300 kg/h/dm pour ceux à plusieurs passages.

Il est bon de prévoir une puissance disponible de 1,5 kW par 500 kg/h. La puissance absorbée dépendra toutefois beaucoup de la dureté du malt, avec des valeurs plus souvent voisines de 1,5 kW par 1 000 kg/h (un peu moins encore pour les grands moulins).

Pour réduire les risques d'explosion de poussières, certains systèmes prévoient que la farine tombe des cylindres dans une auge, pour la ramener ensuite sur le haut du tamis (farine ainsi mieux séparée des pailles). Une raclette en caoutchouc peut aussi venir racler la farine restée sur les cylindres.

Les moulins sont équipés de tiroirs permettant la prise d'échantillons à chacune des étapes. Le prélèvement au sein d'un sac ou d'un tas ne sera jamais représentatif en termes de distribution des pailles et des farines.

2.2 Les moulins à deux cylindres

Le concasseur le plus simple ne possède que deux cylindres cannelés (figure 1.5). L'écartement des cylindres est ajustable de 0 à 2,5 mm et la longueur avoisine les 15 cm. Ces petits moulins d'amateurs ne fonctionnent qu'avec des malts très bien désagrégés. Leur capacité atteint 50 kg/heure s'ils sont motorisés.

Notons qu'ils ne possèdent pas comme les concasseurs plus élaborés, un distributeur qui répartit le malt sur l'entière des cylindres, ni un aimant qui retient les particules métalliques. Ils n'offrent pas non plus la possibilité d'écartement des rouleaux en cas de passage d'un objet dur, les cylindres étant figés dans leurs coussinets.



Figure 1.5 – Moulin d'amateur à deux cylindres (Source : MashMaster).

Une version industrielle de moulins à deux cylindres (25 à 30 cm de diamètre, 200 tours par minute) a été utilisée dans quelques petites brasseries, notamment en Belgique. L'extrait n'était toutefois acceptable que sur des malts très désagregés et très secs. Ils sont encore parfois utilisés pour la mouture de grains crus.

2.3 Les moulins à quatre cylindres

Au sein d'un caisson étanche, une première paire de cylindres cannelés ouvre les enveloppes (210-230 tours par minute, mouture très grossière) tandis que la seconde, plus serrée et lisse, réduit les gros gruaux et les bouts durs du grain (280 tours par minute) (figure 1.6). Un seul cylindre de la seconde paire de rouleaux est entraîné mécaniquement. Un système anti-explosion étouffe l'étincelle à la sortie des cylindres.

Des tamis vibrants ou rotatifs sont habituellement introduits entre les deux paires (figure 1.7) de manière que seuls les gros gruaux atteignent la seconde étape, la présence de farine fine réduisant son efficacité. Ces tamis intermédiaires (24 à 200 mailles par cm^2 selon le tamisage souhaité) sont inclinés et secoués par un excentrique tournant à 400 tours/min. Des balles en caoutchouc déposées sur le fond permettent de les désobstruer.

En l'absence de tamis, ce que nous ne conseillons pas vu l'impact négatif de la fine farine sur le bon fonctionnement de la seconde paire, le concasseur sera muni d'un batteur améliorant la séparation des gruaux et des pailles entre les deux paires, ce qui permettra de les travailler indépendamment (figure 1.6).

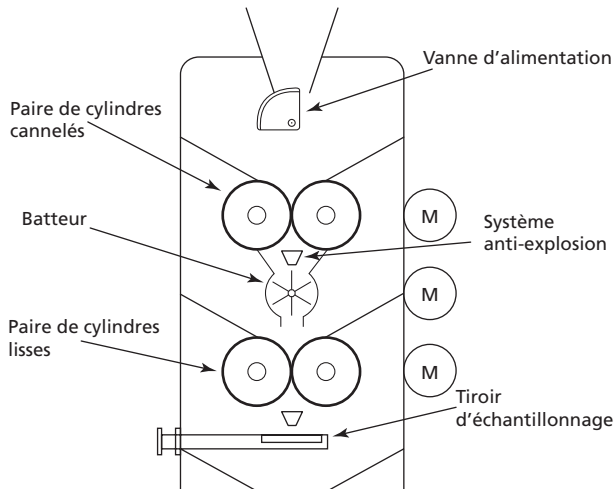


Figure 1.6 – Concasreur à quatre cylindres sans tamis.

Reconcassage des enveloppes

Reconcassage des gruaux

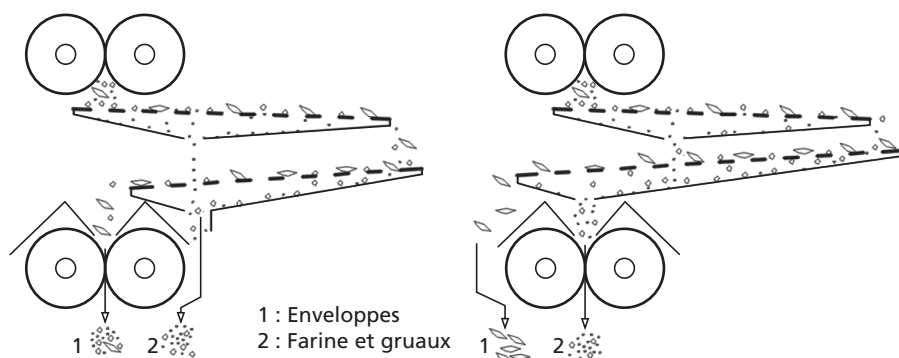


Figure 1.7 – Concasseur à deux paires de cylindres, avec tamisage intermédiaire pour re-concasser ensuite soit la farine et les gruaux, soit les enveloppes.

2.4 Les moulins à six cylindres

2.4.1 Systèmes traditionnels

Lorsque l'on vise des rendements en extrait élevés et une filtration rapide avec des malts moins bien désagregés, il est conseillé de se tourner vers un moulin à six cylindres (ou cinq, un des cylindres étant dans ce cas commun à la première et la seconde paire).

L'écart entre les deux premiers cylindres, faiblement rainurés, est réglé entre 0,9 mm (filtre à moût) et 1,6 mm (cuve-filtre). À la sortie se succèdent deux tamis (n° 1 et n° 2, figure 1.8).

Les gruaux, arrêtés entre le premier et le second tamis, sont conduits vers la troisième paire de cylindres (habituellement rainurés) tournant à grande vitesse (280 tours par minute) et dont l'écart est réglé entre 0,2 et 0,5 mm. Pour faciliter la destruction des gros gruaux, les deux cylindres tournent parfois à vitesses différentes. Les fins gruaux et la fine farine sont recueillis après être passés au travers du tamis n° 5 (figure 1.8).

Ne pouvant pas franchir le premier tamis, les enveloppes passent sur la seconde paire de cylindres. Celle-ci est destinée à éliminer les fractions d'endosperme et de gros gruaux adhérant aux enveloppes sans toutefois les altérer. Les cylindres de la seconde paire sont obligatoirement lisses, leur écartement étant fixé entre 0,4 et 0,9 mm. À la sortie, la farine et les enveloppes sont triées sur tamis. Les enveloppes sont retenues sur le tamis n° 3 alors que les gruaux franchissent les tamis n° 3 et n° 4 pour être repris par la troisième paire de cylindres.

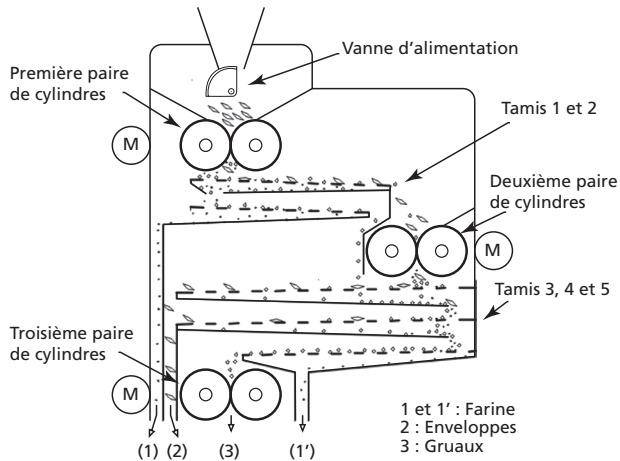


Figure 1.8 – Concasseur à six cylindres.

La surface des tamis est généralement insuffisante pour assurer un triage correct des différentes fractions. On a par ailleurs constaté que près de 90 % de la première farine grossière passaient sur la seconde paire de cylindres. Sur les moulins modernes, les deux premiers tamis ont dès lors été supprimés et les suivants ont été élargis. Toute la farine passe ainsi sur les deux premières paires de cylindre. Après tamisage, seuls les gros gruaux sont envoyés sur les deux derniers cylindres. Dans ces versions avancées, les tamis sont placés en opposition de manière à réduire les vibrations. Le parallélisme et l'écart entre cylindres sont par ailleurs réglés électroniquement. La capacité maximum est de 12 t/h de farine grossière pour cuve-filtre et de 9,5 t/h pour filtre à moût.

2.4.2 Technologie du Dry-Dehusking (DDH)

La technologie du Dry-Dehusking (DDH) proposée par le groupe BÜHLER permet une récupération sélective des enveloppes (figure 1.9) qui seront soit définitivement écartées (si l'on utilise un système de filtration où elles ne sont pas indispensables en grand nombre), soit rajoutées au stade de la filtration pour participer à la structure du gâteau.

Dans le premier cas, les composantes plus astringentes des enveloppes (polyphénols et dérivés oxydés) ne se retrouveront pas dans le moût. La question reste ouverte dans le second cas, car il n'est pas exclu que les polyphénols puissent très rapidement se dissoudre à la filtration et dès lors d'autant mieux survivre en aval du processus (pas de perte par co-précipitation comme c'est le cas lors de la coagulation des protéines au brassage).

Le procédé DDH permet aussi de mieux rentabiliser la cuve de brassage (gain énergétique et de volume). Cette réduction de mouture à empâter sera particulièrement utile dans le cas de moûts haute densité.

L'utilisation d'enveloppes moins désagréées permettrait par ailleurs d'améliorer la vitesse et la qualité de la filtration sur les cuves-filtres. Les enveloppes récupérées peuvent aussi être réutilisées pour améliorer la porosité de la maische de brassins faits avec beaucoup de grains crus. Une attention particulière devra toutefois être portée au conditionnement des enveloppes.

La technologie BÜHLER repose sur leur système de concassage « Malto-malt III » à six cylindres (tamis placés entre la seconde et la troisième paire de cylindres, figure 1.9). Un rainurage particulier permet une excellente récupération des enveloppes dans une trémie séparée. Farine et gruaux seront directement envoyés à l'empâtage, tandis que les enveloppes seront réintégré à l'étape de filtration ou utilisées pour d'autres applications.

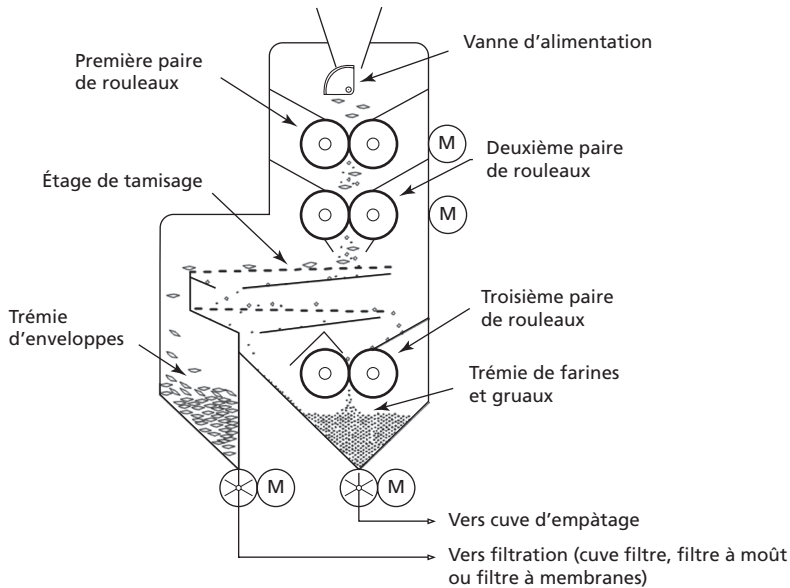


Figure 1.9 – Technologie du Dry-Dehusking de BÜHLER (Source : BÜHLER).

2.5 Les moulins à marteaux

Le moulin à marteaux, simple et bon marché, a d'abord été proposé pour la mouture des grains crus. Il est aujourd'hui utilisé pour moudre le malt dans les brasseries disposant d'un filtre-pressé à membranes (capable d'accepter

des farines très fines, la présence de pailles intactes n'étant plus nécessaire au sein des couches de drêche très minces, cf. chapitre 3).

La farine obtenue contient une large proportion de fine farine et très peu de pailles (tableau 1.6). La farine sortant d'un moulin à marteaux est plus fine encore que la fine mouture EBC, préconisée pour la détermination de l'extrait conventionnel d'un malt (cf. chapitre 9 du Tome 1).

Le moulin à marteaux se compose d'une chambre cylindrique horizontale ou verticale, dans laquelle tourne une série de rotors portant à leurs extrémités des pièces rectangulaires pivotantes (marteaux). Les marteaux soumis à une vitesse périphérique de 75-100 m/s effectuent le broyage des grains qui évoluent librement dans la chambre. Lorsque les particules sont suffisamment réduites, elles passent à travers les perforations des tamis situés sur la partie inférieure du moulin (perforations de 2 à 4 mm selon l'état de désagréation du malt).

Les disques peuvent tourner dans les deux sens (1 500 t/min), ce qui permet une usure alternative des deux coins extérieurs des marteaux. Ceux-ci peuvent par ailleurs être retournés lors du démontage de manière à faire travailler l'extrémité opposée.

Tableau 1.6 – Qualité de la farine obtenue sur un moulin à marteaux, pour deux types de tamis (2 et 4 mm).

Plansichter	Tamis du moulin à marteaux		Moulin EBC fine mouture
	4 mm	2 mm	
Tamis 1 + 2 (%)	5,2	1,5	2
Tamis 3 + 4 (%)	34,9	27,6	51
Tamis 5 + fond (%)	59,9	70,9	47

Le débit du moulin à marteaux est fort dépendant de la friabilité du malt. L'entrée des grains doit dès lors être régulée en fonction de la puissance absorbée par le moteur du moulin.

Pour éviter l'échauffement de la farine, il peut être intéressant de ventiler la partie interne du moulin pendant le concassage. L'air sera repris par un filtre à poussières, renvoyées ensuite dans la trémie à farine.

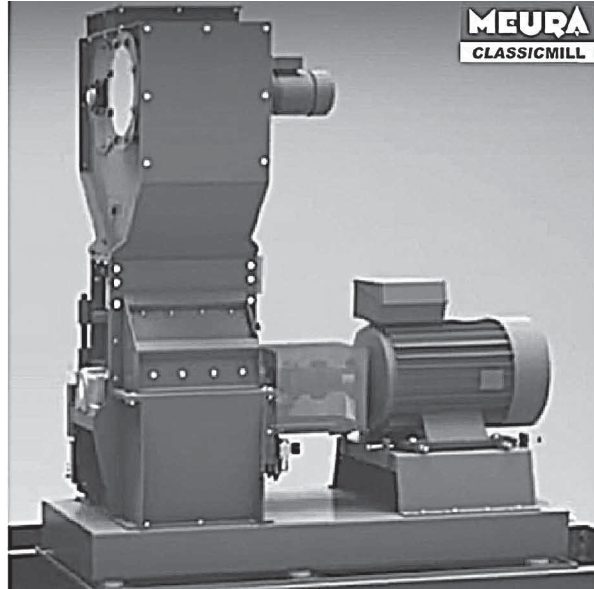
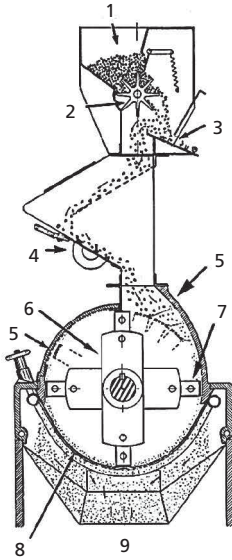


Figure 1.10 – Schéma d'un moulin à marteaux (MEURA) : (1) entrée du malt, (2) alimentation régulée, (3) entrée d'air et élimination des particules lourdes, (4) aimant, (5) stator, zone de chocs, (6) rotor, (7) marteau mobile, (8) tamis, (9) sortie de la farine (Crédits : MEURA).

2.6 La mouture sèche conditionnée sur moulins à cylindres



Figure 1.11 – Conditionneur de malt avec vis d'Archimède et contrôleur d'humidité (Source : BÜHLER).

Pour réduire l'absorption d'oxygène au broyage et à l'empâtage, mais aussi éviter de réduire les enveloppes en trop petits fragments, on pratique fréquemment une humidification préalable du grain avant l'entrée dans le moulin. Les pailles gagneront ainsi 3-4 % d'humidité. Le procédé rendra les enveloppes plus souples et moins cassantes. Pour qu'il soit suffisamment sec et friable lors du concassage, il faut toutefois éviter que l'endosperme ne reprenne plus de 0,2-0,5 % d'eau. Il est à noter que la mouture sèche conditionnée est compatible uniquement pour la cuve-filtre. Dans le cas de l'utilisation d'un moulin à 6 cylindres en aval, les espaces entre les paires de cylindres devront

être réduits avec 1,4 mm maximum pour la première paire, 0,6 mm pour la deuxième et 0,4 mm pour la dernière (contre 1,6, 0,9 et 0,5 mm en mouture sèche).

Entre la pesée et le broyage, le malt est humidifié pendant un temps très court (moins d'une minute) avec de la vapeur basse pression (0,5 bar) ou de l'eau finement pulvérisée au travers de buses (pas plus de 15-30 °C pour éviter d'endommager les enzymes de l'endosperme). Cette humidification est généralement réalisée par un rotor au niveau de la vis d'Archimède amenant le malt sur le moulin (figure 1.11). Le système est équipé d'une pompe doseuse et d'un débitmètre.

3 La mouture humide pour cuve-filtre

3.1 Avantages et inconvénients de la mouture humide

Dans le but de rendre le gâteau de filtration encore plus léger et poreux, la firme STEINECKER a introduit au début des années cinquante un procédé de mouture-empâtage combiné : la mouture humide. Son principe est simple : le malt est d'abord trempé au sein d'une trémie qui surmonte le moulin dans de l'eau tiède (20-50 °C pendant 15 minutes environ) jusqu'à atteindre une humidité de 25 à 30 %, puis il est moulu sur une seule paire de cylindres en acier inoxydable (pour éviter la corrosion) tournant à 400 t/min et dont l'écartement est réglé entre 0,35 et 0,45 mm (figure 1.12). Ils ont souvent une forme tronconique et de légères rainures pour favoriser la formation de fins gruaux. La farine humide tombe dans une chambre de mélange où elle est mélangée à l'eau d'empâtage et directement pompée dans la cuve-matière. Il n'est bien sûr pas pensable de stocker cette farine humide, car les enzymes y sont déjà actives. Un système de nettoyage en place (CIP, *Cleaning In Place*) permet d'éviter que la farine humide qui reste collée sur les parois internes du moulin ne s'infecte. Le procédé dure en moyenne 60-70 minutes (10 à 30 minutes de trempage, 5 à 10 minutes pour éliminer cette eau, 20 à 35 minutes pour le broyage proprement dit et 10 minutes de rinçage).

La technique permet d'obtenir de petits gruaux, peu de fine farine et des enveloppes intactes. La drêche est plus volumineuse, ce qui facilite la filtration. À titre d'exemple, là où la mouture sèche exige une cuve-filtre de 8 m de diamètre, la mouture humide permet de réduire ce diamètre à 6 m, en passant d'un versement de 160-180 kg/m² (cas de la mouture sèche) à