

SOMMAIRE

Chapitre I : Synthèse bibliographique	3
1 MIL ET SORGHO : GRAIN ET UTILISATION ALIMENTAIRE	4
1.1 Classification et zone de culture.....	4
1.1.1 Sorgho	4
1.1.2 Mil	6
1.2 Grains : structure, composition biochimique et valeur nutritionnelle.....	8
1.3 Production et importance alimentaire en Afrique de l'Ouest.....	9
1.3.1 Les bières traditionnelles en Afrique : cas du dolo	11
1.3.2 Le gowé au Bénin.....	13
1.3.3 Les bouillies	15
2 CRITERES DE QUALITE DU MALT	15
2.1 Malt pour la brasserie	15
2.1.1 Pouvoir diastasique	15
2.1.2 Extrait de malt hydrosoluble	19
2.2 Malt et aliment de complément : farine infantile	20
2.3 Malt et qualité sanitaire	21
3 MALTAGE ET FACTEURS INFLUENTS	22
3.1 Généralités sur le maltage	22
3.2 Maltage traditionnel en Afrique de l'Ouest.....	22
3.3 Trempage.....	24
3.3.1 Prétraitement et composition de l'eau de trempage	24
3.3.2 Durée et température de trempage	25
3.3.3 Apport d'oxygène pendant la trempage	25
3.4 Germination.....	25
3.4.1 Température et durée de germination.....	26
3.4.2 Humidité relative de l'air de germination	26
3.5 Séchage et facteurs influents	26
3.5.1 Température et durée de séchage	27
3.5.2 Humidité relative de l'air de séchage.....	27
3.6 Maltage et influence variétale	27
4 CONCLUSION ET OBJECTIFS.....	28
Chapitre II : Matériel et méthodes	31
5 MATERIEL VEGETAL	32
5.1 Grains bruts de mil et de sorgho.....	32
5.2 Grains de mil et de sorgho maltés	33
6 MALTAGE DES GRAINS ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....	34
6.1 Nettoyage des grains	34
6.2 Trempe des grains	34
6.3 Germination des grains.....	36
6.4 Séchage des grains germés.....	36

6.5	Dégermage des grains germés.....	37
7	METHODES ANALYTIQUES.....	37
7.1	Caractérisation physico-chimique des grains.....	37
7.1.1	Poids de mille grains	37
7.1.2	Mesure des dimensions des grains	38
7.1.3	Mesure de la vitrosité des grains	38
7.2	Composition	38
7.2.1	Eau.....	38
7.2.2	Matières minérales (Cendres).....	38
7.2.3	Protéines totales.....	38
7.2.4	Amylose	39
7.2.5	Sucres et Acides organiques.....	39
7.3	Evaluation de la qualité technologique des malts	40
7.3.1	Pouvoir diastasique	40
7.3.2	Activité α et β -amylasique	41
7.3.3	Extrait hydrosoluble à chaud.....	42
7.3.4	Analyses statistiques	44
	Chapitre III : Résultats et discussion	45
8	CARACTERISATION DES MALTS TRADITIONNELS OU SEMI INDUSTRIELS	
	46	
8.1	Malts du Burkina Faso	46
8.2	Malts produits au CIRAD lors d'études antérieures	47
8.2.1	Caractéristiques des malts	47
8.2.2	Caractérisation de l'extrait hydrosoluble à chaud.....	50
8.3	Bilan	51
9	MISE AU POINT DU PILOTE DE MALTAGE	51
9.1	Introduction	51
9.2	Diagnostic du fonctionnement du pilote de maltage.....	52
9.3	Modification du pilote de maltage	53
9.3.1	Augmentation de la capacité du bac de trempage.....	53
9.4	Modification de l'étuve de germination.....	54
9.4.1	Installation d'un bac thermostaté de préchauffage de l'eau et réduction du débit d'eau d'humidification.....	54
9.5	Validation du pilote de maltage	60
9.5.1	Suivi de l'humidité relative de l'air et de la température de l'enceinte de germination.....	61
9.5.2	Reproductibilité sur les produits maltés	62
9.6	Bilan	67
10	EFFET DU MODE DE STABILISATION SUR LES ACTIVITES AMYLASIQUES	68
11	APTITUDE AU MALTAGE DE QUELQUES VARIETES DE MIL ET DE SORGHOS	69
11.1	Caractéristiques des grains	69

11.1.1	Caractéristiques géométriques.....	69
11.1.2	Caractéristiques physico-chimiques des grains.....	72
11.2	Dynamique d'absorption d'eau	73
11.2.1	Méthode de suivi de la trempe/cinétique d'absorption d'eau	73
11.2.2	Fiabilité de la méthode de suivi de la trempe.....	73
11.2.3	Détermination des temps de prélèvement des grains pendant la trempe.....	74
11.2.4	Dynamique d'absorption d'eau à 30°C	75
11.2.5	Vérification de la pertinence du modèle de type diffusif.....	77
11.2.6	Détermination du coefficient de diffusion.	77
11.2.7	Diffusion à différentes températures pour différents grains.....	79
11.3	Vers la définition d'une teneur en eau optimale en fin de trempe ?.....	81
11.3.2	Choix des conditions de maltage.....	83
11.3.3	Caractérisation des malts.....	83
11.3.4	Analyses de corrélation	86
11.3.5	Analyse en composante principale (ACP)	89
11.3.6	Bilan	92
Conclusion et perspectives.....		94
Références bibliographiques		97
Annexes		105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition (% M.S.) du mil et du sorgho (adapté de Serna-Saldivar et Rooney, 1995).....	9
Tableau 2: les marqueurs de l'utilisation alimentaire du sorgho (Dicko, 2006)	11
Tableau 3: Quelques types de bouillies traditionnelles de sevrage en Afrique de l'Ouest (d'après Onofiok et Nnanyelugo, 1998).....	15
Tableau 4: Enzymes amylolytiques et produits d'hydrolyse de l'amidon	16
Tableau 5 : Synthèse bibliographique sur les conditions de maltage du mil, sorgho et d'autres céréales.....	29
Tableau 6: Liste des variétés de mil et de sorgho utilisées dans l'étude	32
Tableau 7: Liste des malts caractérisés pour évaluer leur qualité technologique	34
Tableau 8: Caractéristiques des malts produits au CIRAD lors d'études antérieures.....	49
Tableau 9: Caractéristiques de l'extrait hydrosoluble à chaud des malts produits au CIRAD lors d'études antérieures.....	49
Tableau 10: Approche utilisée pour le diagnostic du fonctionnement du pilote de maltage ...	52
Tableau 11: Nombre d'orifices à prévoir en fonction du diamètre	58
Tableau 12: Pouvoir diastasique (PD) des grains germés 72h sans prélèvement	62
Tableau 13: Analyse de variance des résultats du pouvoir diastasique des grains germés 72h63	
Tableau 14: Augmentation de la teneur en eau et le pouvoir diastasique avec la durée de la germination.....	64
Tableau 15: Analyse de variance des résultats de la teneur en eau au cours de la germination	64
Tableau 16: Analyse de variance des résultats du pouvoir diastasique au cours de la germination.....	65
Tableau 17: Evolution de la teneur en amylose et en sucres au cours de la germination	66
Tableau 18: Pourcentage de pertes d'activité amylasique du malt vert selon le mode de stabilisation.....	69
Tableau 19: Caractéristiques géométriques des grains	71
Tableau 20: Caractéristiques physico-chimiques des grains.....	72
Tableau 21: Reproductibilité de la méthode de suivi de la trempe	74
Tableau 22: Détermination du temps théorique de mesure de la cinétique d'absorption au cours de la trempe	75
Tableau 23: Diffusivité apparente, teneur en eau à l'équilibre et retard à différentes températures pour différentes variétés	80
Tableau 24: Estimation des durées de trempe auxquelles la germination modifierait sensiblement l'hydratation.	82
Tableau 25: Caractéristiques des malts	84
Tableau 26: Tableau de corrélations des caractéristiques des malts	87
Tableau 27: Tableau de corrélations des caractéristiques des grains avec ceux des malts	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1: 5 races principales de sorgho et leur distribution (Harlan et De Wet, 1972) in Chantreau et Nicou, 1994.	5
Figure 2: Répartition des différentes espèces de mil dans le monde (adapté de Dendy, 1995 et de FAO, 1995).....	7

Figure 3: Grain de sorgho d'après Sautier et O'Deye, 1989 in Fliedel, 1996.....	8
Figure 4: Afrique de l'Ouest et production de mil et de sorgho	10
Figure 7: Mode d'action de l' α - amylase sur l'amylose (a) et l'amylopectine (b)	17
Figure 8: Mode d'action de la β - amylase sur l'amylose (a) et l'amylopectine (b)	18
Figure 10: Schéma de principe de fonctionnement du bac de trempage	35
Figure 11: Positionnement des paniers dans le bac de trempage	53
Figure 12: Etuve de germination sans canalisation d'air	55
Figure 13: Répartition des cinq sections de passage d'air sur le tuyau de canalisation d'air ..	56
Figure 14: Répartition de 30 ouvertures sur la canalisation d'air	58
Figure 15: Evolution de la température et de l'humidité de l'air pendant la germination	61
Figure 16: Evolution de la teneur en eau, du pouvoir diastasique et de l'activité α -amylasique au cours de la germination	66
Figure 17: Effet du mode de stabilisation sur les activités enzymatiques.....	69
Figure 18: Evolution de la teneur en eau du grain au cours de la trempage à 30°C	76
Figure 19: Exemple de teneur en eau réduite (E) à 30°C en fonction du temps (Agbinni)	77
Figure 20: Exemple de comparaison expérience – modèle en représentation semi- logarithmique de la teneur en eau réduite (E) en fonction de $D(t\text{-retard})/R^2$; variété Agbinni à 30°C.....	78
Figure 21: Exemple de comparaison expérience – modèle en représentation de l'humidité en fonction du temps ; variété Agbinni à 30°C	79
Figure 22: Effet de la température sur l'absorption d'eau au cours de la trempage : Cas du Agbanni	79
Figure 23: Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la température	81
Figure 24: Evolution de la teneur en eau au cours de la trempage et de la germination (cas du sorgho vrac à 30°C).....	81
Figure 25: Projection des caractéristiques des malts sur un plan à deux axes	89
Figure 26: Représentation des 23 variétés sur le 1er plan principal de l'ACP identifié par le pouvoir diastasique et l'activité alpha amylasique (Axe1) et la teneur en glucose, fructose	90
Figure 27: Projection des caractéristiques des malts sur le plan factoriel (1 x 2)	91
Figure 28: Projection des variétés sur le plan factoriel (1 x 2)	92

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 1: Nettoyage manuel des grains	34
Photo 2: Module de trempage	35
Photo 3: Module de germination	36
Photo 4: Dégermage des grains germés et séchés	37
Photo 5: Paniers utilisés pour la trempage et la germination	54
Photo 6: Module actuel de germination	60

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: caractéristiques structurales des graines de sorgho et de certains mils	106
Annexe 2: Photo des grains utilisés dans l'étude.....	107
Annexe 3: Mycotoxines et moisissures responsables de leur production	109
Annexe 4: Photos de référence pour notation visuelle de la vitrosité des grains	110
Annexe 5: Exemple de courbe de la gamme d'étalon maltose	111

Annexe 6: Abaque de variation de la pression en fonction du débit d'air (A.E.I.B, 1995)....	112
Annexe 7: Tableau de corrélation entre les paramètres de contrôle de la qualité du malt.....	113
Annexe 8: Viscosité du culot au cours de la phase de gélatinisation de l'amidon lors du brassage au RVA.....	114
Annexe 9: Effet de la température sur l'absorption d'eau au cours de la trempe	115
Annexe 10: Courbe référence de $\ln(E)$ en fonction de $\frac{D \times t}{R^2}$ (Geankoplis, 1993).....	117
Annexe 11: Tableau de corrélations entre le coefficient de diffusion et les autres caractéristiques du grain.....	118

INTRODUCTION

Le sorgho et le mil sont les céréales de base de l'alimentation de plusieurs millions de personnes des zones arides et semi-arides en Afrique, en Inde et en Asie (Cox et *al.*, 1997). Ces céréales sont utilisées directement ou sous forme maltée et/ou fermentée dans la préparation de plusieurs aliments traditionnels dont les bouillies (spécialement pour enfants), les porridges et les boissons alcoolisées et non alcoolisées (Gadaga et *al.*, 1999 ; Oi et Kitabatake, 2003 ; Diko et *al.*, 2006).

Le maltage est une germination des grains dans des conditions contrôlées. Ce procédé enrichit les céréales en enzymes hydrolytiques, en sucres, en acides aminés libres, en vitamines et, améliore la qualité technologique et nutritionnelle (Chavan, et *al.*, 1981 ; Sripriya et *al.*, 1997 ; Elmaki et *al.*, 1999 ; Mbithi-Mwikya et *al.*, 2000 ; Mbofung et Fombang, 2003).

Le principal défaut des bouillies traditionnelles pour enfant est leur faible densité en nutriments. De plus, les micronutriments généralement présents en faible quantité ne sont pas toujours biodisponibles. Le maltage et l'addition de malt dans les bouillies constituent l'un des principaux moyens accessibles au pays en développement d'améliorations de la biodisponibilité des micronutriments, de diminution des facteurs antinutritionnels des céréales et de fabrications des bouillies de haute densité en nutriments (Malleshi et Desikachar, 1988 ; Trèche, 1995 ; Elkhailil et *al.*, 2001 ; Tou et *al.*, 2003, Towo et *al.*, 2003).

Dans certains pays d'Afrique de l'ouest, comme le Burkina Faso, la production de la bière traditionnelle est très importante. A Ouagadougou, on estime que 600 dolotières produisent 36 millions de litres de dolo par an, ce qui correspond à 9000 tonnes de malts de sorgho par an. A contrario, à Cotonou au Bénin, la production du malt a tendance à baisser à cause des contraintes technologiques (procédé très long) et parfois d'une perte de savoir-faire. De plus, le malt est parfois remplacé par du sucre (Broutin et *al.*, 2003), compromettant ainsi les avantages nutritionnels reconnus des produits incorporant le malt comme le gowé. Un autre problème est la variabilité de la qualité du malt fabriqué (Traoré et *al.*, 2004) ainsi que les risques sanitaires.

Par ailleurs, l'importance des modifications biochimiques qui se produisent dans les grains pendant le maltage et qui leur confèrent leur intérêt technologique et nutritionnel, dépend des conditions de maltage et de la variété de céréales utilisées (Beta, et *al.*, 1995). Peu d'informations sont disponibles sur les variétés les plus adaptées à la production de la bière ou de farines infantiles en Afrique de l'Ouest. En général, les dolotières utilisent le sorgho rouge pour la bière, la variété blanche étant en majorité réservée à la consommation directe.

Cette étude rentre dans le cadre du projet DURAS. Celui-ci a pour but de promouvoir en Afrique de l'Ouest la production de malts de sorgho ou de mil de meilleure qualité à l'échelle artisanale ou semi industrielle pour des utilisations en bouillies infantiles et en boissons alcoolisées ou non.

Mon travail avait pour objectifs principaux :

- ✎ Mettre au point les outils et méthodes pour étudier les conditions de maltage ;

- ↬ Déterminer le potentiel de maltage de quelques variétés de mil et de sorgho du Bénin et du Burkina-Faso ;
- ↬ Compléter les connaissances de l'influence des paramètres de trempe, de germination et de séchage sur la qualité des malts et d'optimiser les conditions de maltage au niveau pilote;

La présentation de ce travail est divisée en quatre grands chapitres :

- ↬ Le chapitre I est une synthèse bibliographique dont les objectifs sont une brève description du mil et du sorgho et leur principale utilisation en Afrique de l'Ouest, plus particulièrement au Bénin et Burkina-Faso ; un rappel des critères de qualité d'un malt de brasserie et d'un malt pour l'alimentation infantile ainsi que des propriétés des α et β -amylases et enfin une synthèse sur les conditions de maltage et leur influence sur la qualité du malt.
- ↬ Le chapitre II regroupe les matériels, les protocoles d'études et les méthodes analytiques utilisés.
- ↬ Le chapitre III présente et discute les résultats répartis en quatre sous chapitres :
 - * Evaluation de la qualité technologique de quelques malts notamment les malts traditionnels ;
 - * Diagnostic, modification et validation du pilote de maltage CIRAD ;
 - * Compréhension des phénomènes ayant lieu lors de la trempe et évaluation de sa durée de trempe ;
 - * Aptitude au maltage de quelques variétés de mil et de sorgho du Bénin et du Burkina-Faso.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1 MIL ET SORGHO : GRAIN ET UTILISATION ALIMENTAIRE

1.1 Classification et zone de culture

1.1.1 Sorgho

Le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) appartient à la famille des *poacées*, genre *Sorghum*, espèce *bicolor*. Plusieurs types de sorgho sont cultivés : le sorgho sucré, le sorgho fourrager, le sorgho balais, le sudan grass ou Johnson grass et sorgho grain (Flidel et *al.*, 1996).

Le sorgho grain (*Sorghum bicolor* subsp. *Bicolor*) est classé en cinq races¹ principales selon les caractéristiques de la panicule et de l'épillet (Figure 1) :

- ✧ Bicolor : ce sont des sorghos les plus primitifs. Les panicules sont généralement lâches. Les grains sont très petits et enveloppés par de longues glumes. Ils sont rencontrés un peu partout.
- ✧ Durra : ce sont des sorghos aux panicules très compactes et aux grains globuleux enserrés dans de courtes glumes ; ils sont essentiellement présents en Afrique de l'Est, au Moyen- Orient et en Inde.
- ✧ Caudatum : ces sorghos sont cultivés surtout en Afrique centrale et en Afrique de l'Est, ont des panicules de forme variable, les grains dissymétriques et souvent farineux.
- ✧ Kafir : ces sorghos sont répandus en Afrique Australe, aux panicules relativement compactes et cylindriques, les grains sont symétriques et enfermés dans des glumes de tailles variables.
- ✧ Guinée : ces sorghos d'Afrique de l'Ouest sont aussi présents dans le sud du continent. On distingue plusieurs types dont le type *margaritifera* à grains vitreux et petit, le type *gambicum* à gros grains et assez vitreux et le type *guineense* à gros grains et peu vitreux.

Il existe dix races intermédiaires présentant une combinaison de caractères de plusieurs races principales.

Le sorgho peut aussi être classé en deux grands groupes de variétés (Cox et *al.*, 1997) :

- ✧ Les variétés de sorgho marron, riches en tannins présents dans la testa pigmentée ; elles ont un péricarpe généralement marron, mais on peut rencontrer des grains à péricarpe blanc, jaune-rose, orange ou rouge.
- ✧ Les variétés de sorgho blanc, sans testa pigmentée et donc sans tannin ; elles ont un péricarpe translucide, blanc, jaune, rose, orange ou rouge.

¹ Le terme « race » est utilisé par Harlan et De Wet, 1972 in Chantereau et Nicou, 1994 pour la classification des sorghos en fonction des caractéristiques morphologiques du grain et de la panicule.

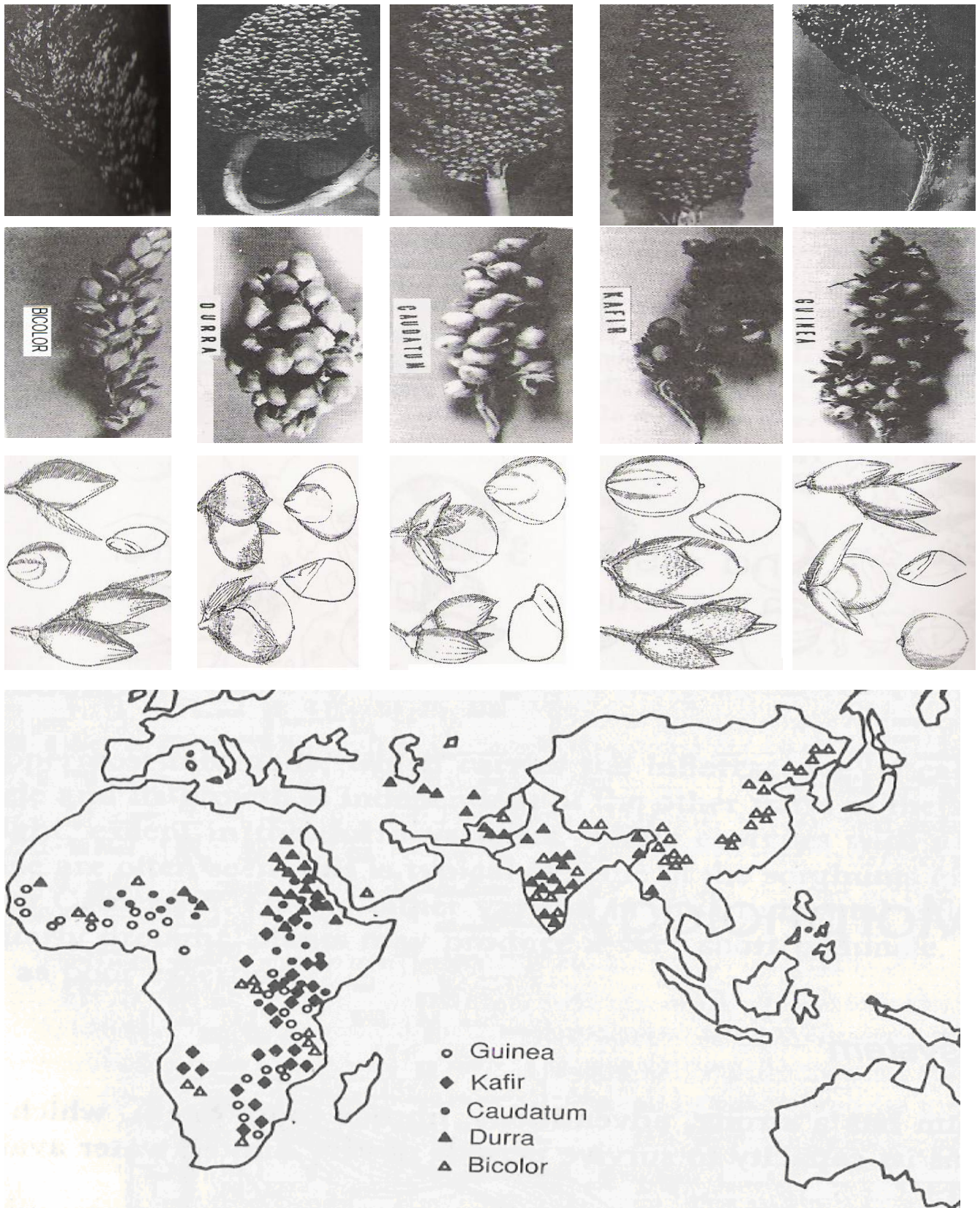


Figure 1: 5 races principales de sorgho et leur distribution (Harlan et De Wet, 1972) in Chantereau et Nicou, 1994.

1.1.2 Mil

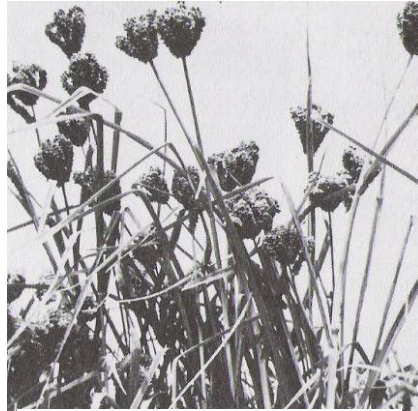
Il existe plusieurs espèces de mil dont trois sont les principales rencontrées en Afrique (Figure 2):

- ↪ **Mil pénicillaire** encore appelé mil à chandelle, mil perlé ou babala (*Pennisetum glaucum*, *P. typhoides*, *P. typhodeum*, *P. americanum*), avec pour forme cultivée *P. glaucum subsp. Glaucum*. C'est l'espèce la plus cultivée et ses grains sont plus gros que ceux des autres espèces excepté le mil commun. On le rencontre en Inde et en Afrique et 70 % des superficies cultivées se trouvent principalement en Afrique de l'ouest.
- ↪ **Eleusine** (*Eleusine coracana*), appelée ragi en Inde, est une culture vivrière importante en Afrique Orientale, en Inde et au Népal. Il tolère moins la sécheresse que les autres espèces de mil et ses grains sont plus petits que ceux de la plupart d'entre elles.
- ↪ **Teff** (*Eragrostis tef*) est la céréale des régions montagneuses de l'Ethiopie et ses grains sont très petits.

Les autres espèces de mil sont : le **millet commun** (*Panicum miliaceum*) cultivé dans des climats tempérés, le **millet des oiseaux** (*Setaria italica*) aussi adapté aux climats tempérés et très cultivé en Chine, le **fonio blanc** (*Digitaria exilis*), le **fonio noir** (*Digitaria iburua*) et le **fonio à grosses graines** (*Brachiaria deflexa*) qui sont des céréales mineures cultivées en Afrique de l'Ouest dans les régions sèches sub-sahéliennes. Il existe aussi des espèces mineures telles que l'**herbe à épée** (*Paspalum scrobiculatum*), céréale spontanée en Afrique occidentale et en Inde, et le **coix** (*Coix lachryma-jobi*), aussi appelé larme de Job, céréale très secondaire, surtout cultivée dans le sud-est asiatique.



Pennisetum glaucum



Eleusine coracana



Eragrostis tef

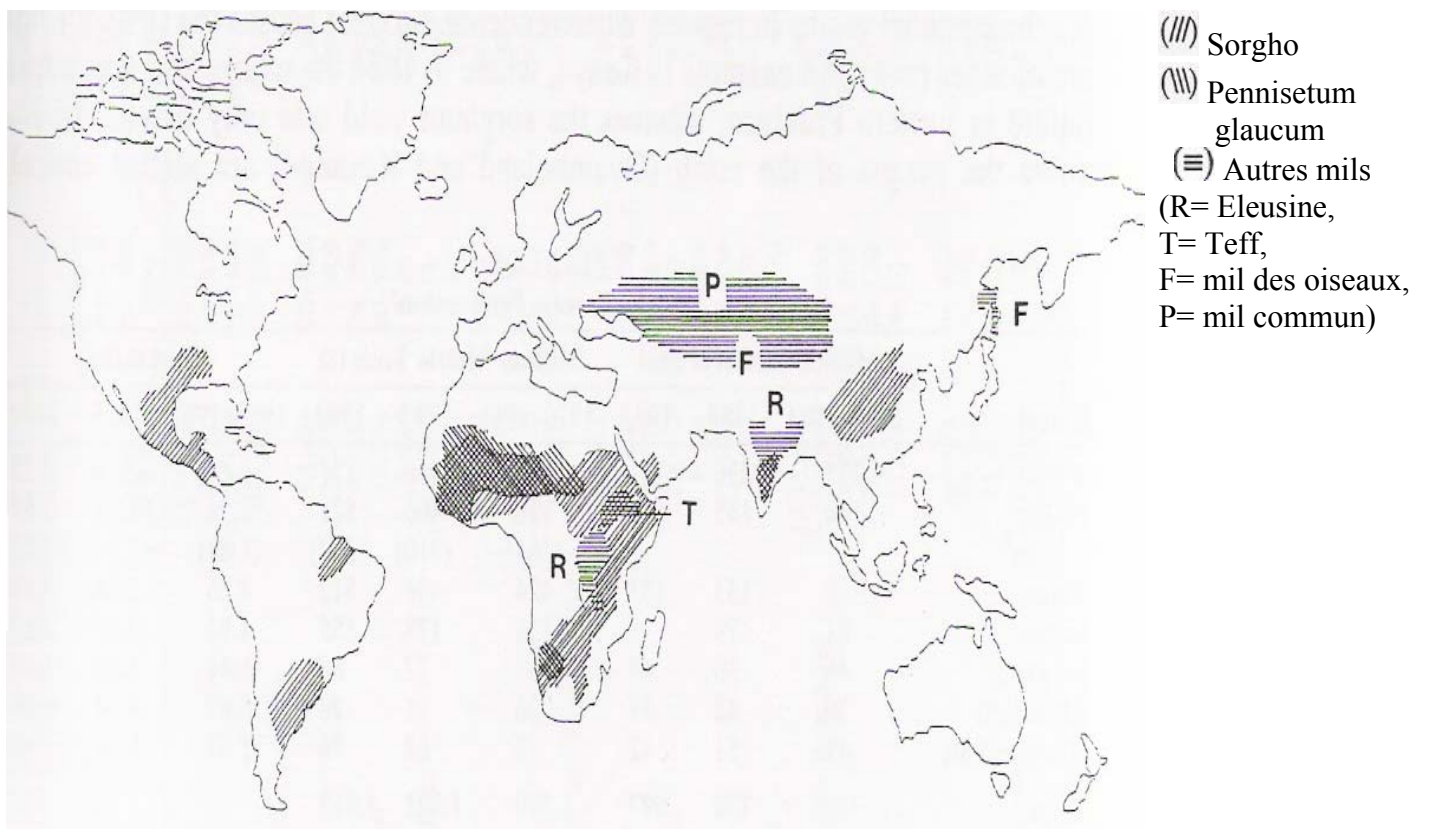


Figure 2: Répartition des différentes espèces de mil dans le monde (adapté de Dendy, 1995 et de FAO, 1995)

1.2 Grains : structure, composition biochimique et valeur nutritionnelle

Les grains de mil et de sorgho se caractérisent par une variation considérable de couleur, de formes, de dimensions et de certains éléments anatomiques (Figure 3). Leur structure de base est semblable et on distingue, comme pour les autres céréales, le péricarpe, le germe et l'albumen. Les grains de sorgho et le mil pénicillaire sont des caryopses (le péricarpe est complètement adhérent à l'albumen). Le péricarpe joue un rôle important dans l'hydratation du grain au cours de la trempe et de la germination. La testa, pigmentée, située sous le péricarpe contient les tannins condensés qui diminuent la valeur nutritive des céréales en formant avec les protéines un complexe indigestible. Les tannins interféreraient aussi avec les enzymes digestives (Anatharaman et Finot, 1993).

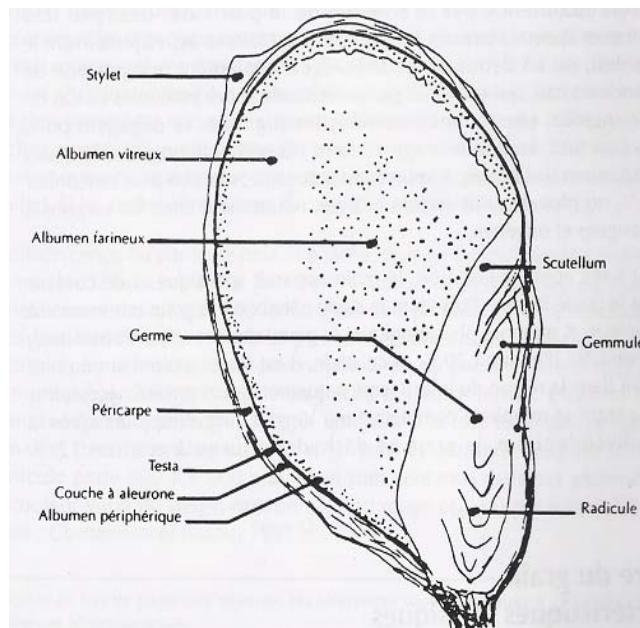


Figure 3: Grain de sorgho d'après Sautier et O'Deye, 1989 in Fliedel, 1996

Le germe est constitué de l'embryon qui donnera la future plantule, et du scutellum dont le rôle pendant la germination est de mobiliser les réserves de l'albumen vers la plantule. Il est riche en lipides, protéines, enzymes, minéraux et vitamines.

L'albumen est constitué, de l'extérieur vers l'intérieur, par la couche d'aleurone, riche en protéines et en minéraux, et par l'albumen périphérique, l'albumen vitreux et l'albumen farineux constitués essentiellement d'amidon et de protéines. Au niveau de la couche à aleurone, le phosphore est représenté à 85 à 92 % par de l'acide phytique (Mahgoub et Elhag, 1998). L'acide phytique inhibe l'activité des enzymes digestives (trypsine, α -amylase, phosphatase, carboxypeptidases) (Singh et Krikorian, 1982) et complexe les cations divalents (fer, calcium, zinc) diminuant ainsi leur biodisponibilité (Evers et *al.*, 1999).

En ce qui concerne la composition chimique, elle est généralement fonction de la variété et des conditions agro climatiques. Le mil pénicillaire contient plus de protéines et de lipides que le sorgho (Tableau 1). Les deux céréales sont déficientes en lysine comme toutes les autres céréales, mais dans l'ensemble la valeur protéique du mil est supérieure à celle du sorgho (Serna-Saldivar et Rooney, 1995).

Les glucides sont composés de l'amidon constituant le plus important, de sucres solubles, de pentosanes, de cellulose et d'hémicellulose.

Les minéraux sont plus concentrés dans les parties périphériques du grain (péricarpe, germe et couche à aleurone). Le germe et le péricarpe représentent respectivement 7 % et 3% du grain de mil et de 10 % et de 2 % du grain de sorgho. Ils contiennent respectivement pour le mil et le sorgho, 72 % et 68 % (germe) et 14 % et 11% (péricarpe) du total des minéraux du grain.

Tableau 1: Composition (% m.s.) du mil et du sorgho (adapté de Serna-Saldivar et Rooney, 1995)

		Grain entier (%)	Albumen (%)	Germe (%)	Péricarpe (%)
Mil à Chandelle	Grain entier	100	75,1	16,5	8,4
	Protéines	13,3	10,9	24,5	17,1
	Lipides	6, 3	0,5	32,2	5
	Amidon	71,6	ni	ni	ni
	Cendres	1,7	0,3	7,2	3,2
Sorgho	Grain entier	100	84,2	9,4	6,5
	Protéines	12, 3	10,5	18,4	6
	Lipides	3,6	0,6	28,1	4,9
	Amidon	73,8	82,5	13,4	34,6
	Cendres	1,6	0,4	10,4	2

1.3 Production et importance alimentaire en Afrique de l'Ouest

Les productions mondiales du mil et du sorgho en 2004 ont été respectivement de 28,8 et de 58.9 Mt, avec 50 % du mil et 36 % du sorgho produits uniquement en Afrique. L'Afrique de l'Ouest fournit 79 % et 56 % de la production africaine de mil et de sorgho. Ces deux céréales sont plus cultivées au Burkina Faso qu'au Bénin et leur production représente environ 8 % (mil) et 12,5 % (sorgho) de toute la production de l'Afrique de l'Ouest (Figure 4).

Production 2004 en Mt (FAO, 2005)		
	Mil	sorgho
Monde	28,8	58,9
Afrique	14,3	21
Afrique de l'ouest	11,3	11,8
Burkina Faso	0,9	1,5
Bénin	0,04	0,2

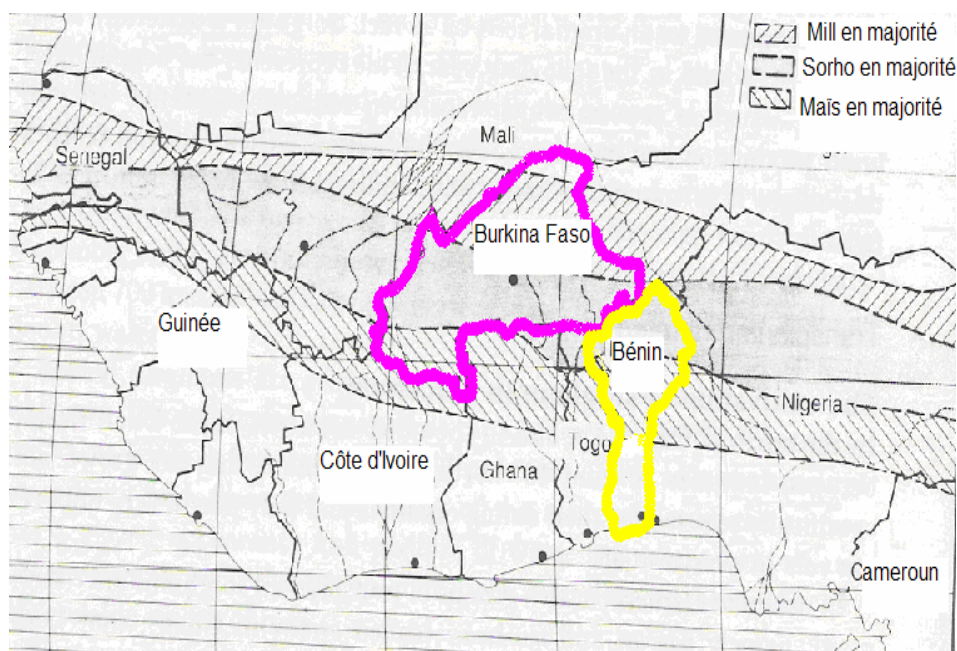


Figure 4: Afrique de l'Ouest et production de mil et de sorgho

Les produits et plats traditionnels à base de sorgho, mil et autres céréales dites « sèches » (maïs, fonio) en Afrique de l'ouest peuvent être classés en quatre grands groupes en plus des beignets, biscuits et galettes. Les marqueurs qui orientent l'utilisation sont regroupés dans le Tableau 2.

- ✧ Les bouillies à base de farine, de pâte fermentée, de semoule et de granule de farine roulée, consommées dans tous les pays : foura, koko, aklui et sorou au Bénin, moni et degue au Mali et Burkina Faso, fonde, cakry, laax, sanxal au Sénégal.
- ✧ Les couscous et plats apparentés.
- ✧ Les pâtes élaborées à partir de farine maltée ou non et / ou fermentée ou non sont consommées seulement dans certains pays (tô au Burkina Faso et Mali ; sifanou, akassa au Bénin ; ogi, agidi au Ghana et Nigéria).
- ✧ Les boissons alcoolisées essentiellement des bières de mil, sorgho et maïs dont le dolo (Burkina Faso) et le tchoukoutou (Bénin) et les boissons non alcoolisées à base de pâte fermentée et diluée dans de l'eau ou du lait (gowé au Bénin).

Tableau 2: Les marqueurs de l'utilisation alimentaire du sorgho (Dicko, 2006)

Produits alimentaires	Couleur du grain	Germination	Teneur en amidon	Teneur en amylose	α / β -amylase
Bouillie pour enfant	blanc	oui	élevée	faible	élevé
Dolo	rouge	oui	élevée	élevée	élevé
Bière industrielle	blanc	oui	élevée	faible	élevé
Tô	blanc	non	élevée	élevée	faible
Couscous	blanc	non	moyen	faible	moyen
Pain	blanc	non	élevée	élevée	élevé

1.3.1 Les bières traditionnelles en Afrique : cas du dolo

Les bières fabriquées à partir des céréales locales des pays africains ont des caractéristiques différentes selon les céréales utilisées et les procédés qui, eux aussi, varient d'un pays à l'autre. On peut citer :

- ↪ le dolo (mil et sorgho) au Burkina Faso, Mali et au Sud du Sénégal ;
- ↪ le tchoukoutou (mil ou sorgho) au Togo et au Bénin ;
- ↪ le amgba ou le laffouk (sorgho) au Cameroun ;
- ↪ le pito et le burukutu (mil, sorgho et parfois maïs) au Ghana et au Nigéria ;
- ↪ le tchapalo (sorgho ou mil, maïs) en Côte d'Ivoire et Bénin ;
- ↪ le kafir (sorgho) en Afrique du Sud ;
- ↪ le omalovu (mil), tombo et epwaka (sorgho) en Namibie ;
- ↪ amarwa (sorgho) au Rwanda ;
- ↪ doro/ uthwala and chikokivana (mil et sogho) au Zimbabwe.

Selon Dicko et *al.* (2006), le dolo est une bière opaque, faiblement alcoolisée (2 à 4 degrés), acide (pH 4-5). Sa couleur dépend de la variété de sorgho ou de mil utilisée pour sa préparation. Autrefois réservé aux cérémonies rituelles, il est aujourd'hui une boisson de consommation courante. Jadis assurée par quelques femmes dans les villages, pour une consommation très localisée, la production du dolo s'est développée en milieu urbain. La durée de conservation du dolo est de 2 à 3 jours (Broutin et *al.*, 2003), pourtant sa durée de fabrication est très longue et peut aller jusqu'à 12 jours. Le procédé de fabrication du dolo comprend trois principales étapes : maltage, brassage et fermentation (Figure 5) avec un rendement de production d'environ 4 litres de dolo par kilogramme de grains germés au Burkina Faso et 2 litres de tchoukoutou par kilogramme de grains germés au Bénin.

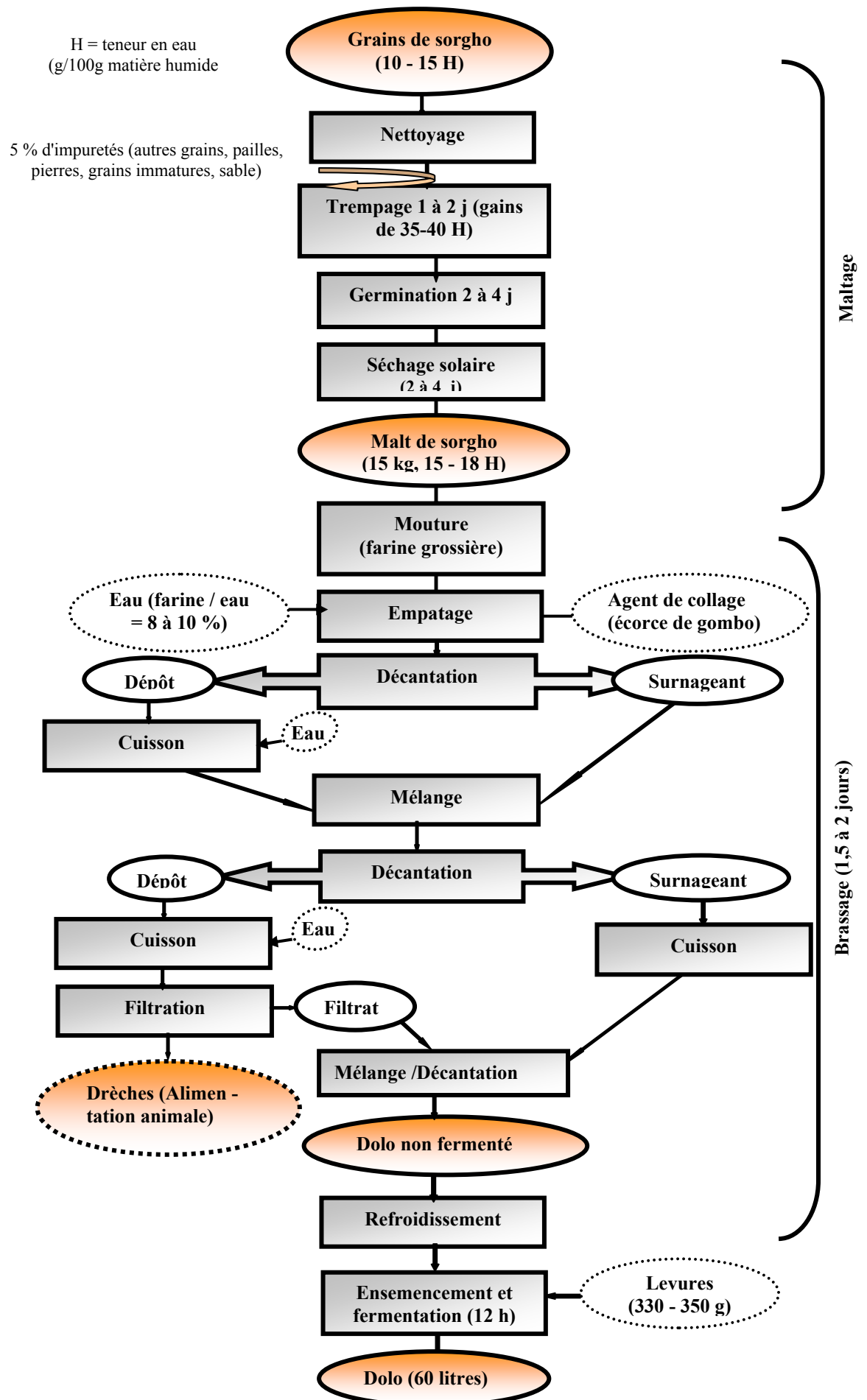


Figure 5 : Diagramme de fabrication du dolo au Burkina Faso (adapté d'après Broutin et al. 2003)

1.3.2 Le gowé au Bénin

Le gowé est une pâte fermentée, à base de sorgho ou éventuellement de maïs, les grains étant maltés. Le procédé de fabrication du gowé comprend le maltage, la fermentation et la cuisson. Les grains de sorgho non maltés broyés et mélangés à du malt sont transformés en une pâte après ajout d'eau qui subit une première fermentation au soleil pendant environ 8 h. Cette pâte fermentée est ensuite mélangée à de la bouillie de sorgho non germée et l'ensemble est mis à cuire après une deuxième fermentation d'environ 10 h à l'ombre puis, emballé dans les feuilles de teck (*Tecktona grandis*), de bananier (*Musa*) ou de « afléma » (*Thalia welwichii*). Il existe aussi une variante du procédé de fabrication traditionnelle du gowé de durée plus longue où toute la fermentation se fait à l'ombre. La durée de fabrication du gowé est alors d'environ 11 jours.

Le gowé constitue une source importante de revenu pour les femmes au Bénin qui la pratiquent. Michodjehoun (2000) estime à 38 kFCFA le bénéfice mensuel d'une vendeuse de gowé. Le gowé est consommé sous forme de boisson reconstituée en le diluant dans de l'eau sucrée ou du lait auquel on ajoute parfois des morceaux de glace. Cette boisson, riche en éléments nutritifs et très appréciée par les enfants et adultes est très consommée en période chaude, pendant les périodes de fête et de Ramadan.

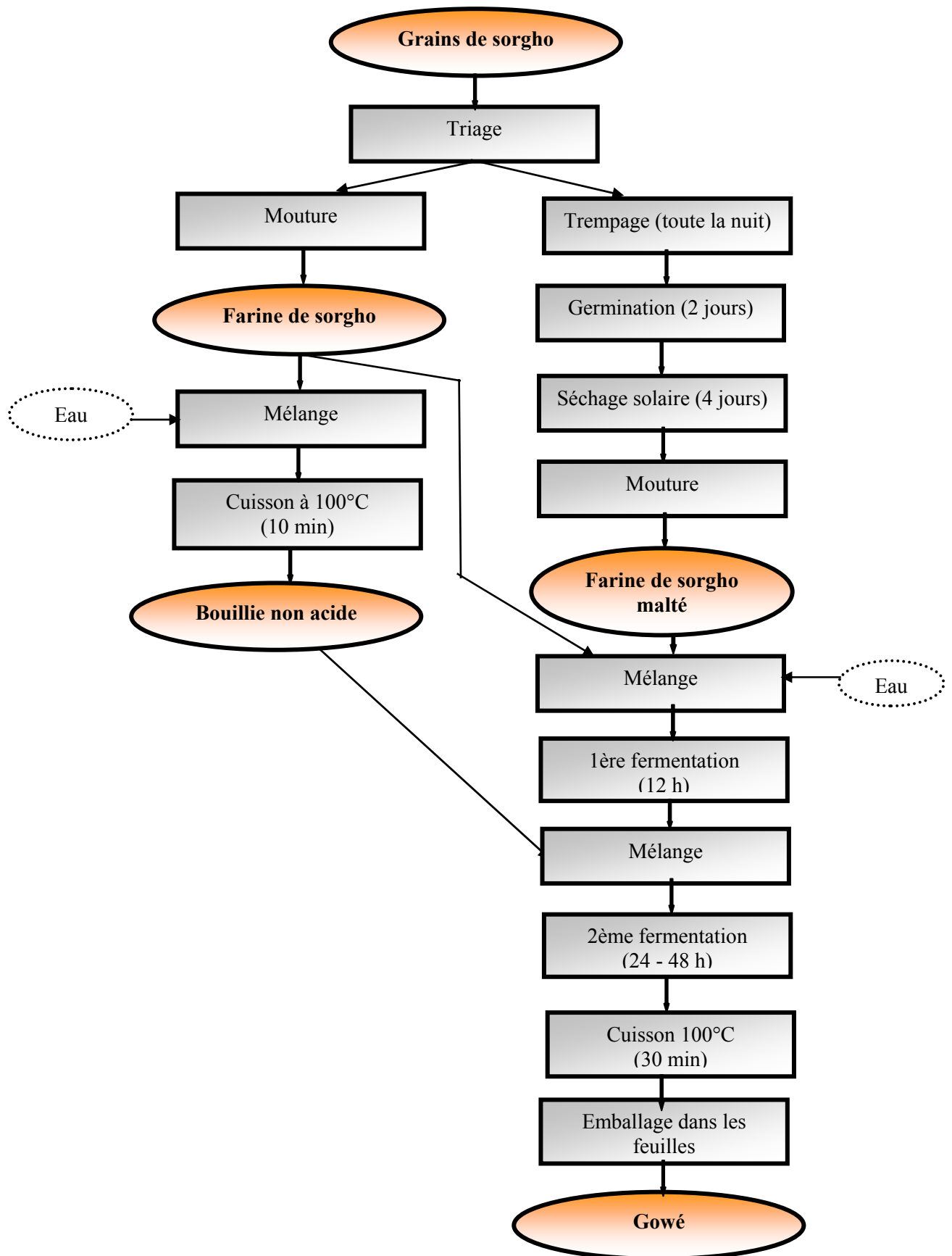


Figure 6: Diagramme de fabrication traditionnelle du Gowé au Bénin (adapté d'après Michodjehoun-Mestres et al. 2005)

1.3.3 Les bouillies

Les bouillies sont des aliments préparés généralement selon un protocole dont les principales opérations unitaires sont : trempage/fermentation, broyage, tamisage/filtration et cuisson. Il existe des variantes de fabrication avec germination des grains de céréales ou sans fermentation, la farine étant tout simplement mélangée petit à petit dans de l'eau bouillante. On distingue les bouillies épaisses telles que le tô (Burkina Faso) et l'ugali au Kenya, Ouganda et Tanzanie et les bouillies légères comme le Ben-saalga au Burkina Faso et le gougoumbe au Bénin généralement utilisées comme aliment de complément en Afrique (Tableau 3). La viscosité de ces bouillies à base d'amylacés augmente très rapidement avec la concentration, compte tenu des propriétés physico-chimiques des amidons qui en constituent la source énergétique principale. Les bouillies légères traditionnelles, ont par conséquent une densité énergétique faible (36 -60 kcal/ 100g selon les études de Trèche en 1995) et l'enfant est rassasié sans satisfaire ses besoins nutritionnels ce qui induit un risque de malnutrition. Par ailleurs, il ressort des études de Delpuech et *al.* (1996), que la dévaluation du franc CFA en 1994 a entraîné une réduction de consommation des farines infantiles importées (peu visqueuses pour un fort apport énergétique et riches en nutriments) au profit de l'utilisation des aliments locaux de sevrage.

Tableau 3: Quelques types de bouillies traditionnelles de sevrage en Afrique de l'Ouest (d'après Onofiok et Nnanyelugo, 1998)

Pays	Bouillies	Age (mois) d'introduction	Appellation
Bénin	Bouillie de maïs, mil ou sorgho fermentés	3 -6	Ogi, Koko
Burkina	Bouillie de mil ou sorgho fermentés	/	Ben-saalga
Ghana	Bouillie de mil, sorgho fermenté	3 -6	Ogi ou Koko
Nigeria	Bouillie de maïs, mil ou sorgho fermentés	3 -6	Ogi ou koko, akamu

2 CRITERES DE QUALITE DU MALT

La qualité du malt se définit par l'usage que l'on veut en faire.

2.1 Malt pour la brasserie

La valeur brassicole d'un malt est principalement déterminée par son pouvoir diastasique et son extrait hydrosoluble.

2.1.1 Pouvoir diastasique

Le pouvoir diastasique représente l'activité enzymatique de l'ensemble des quatre enzymes hydrolysant l'amidon en sucres fermentescibles. Elles sont l' α et la β -amylase (les principales), l' α -glucosidase et la dextrinase limite.

La production d'enzymes hydrolytiques dans les grains maltés est un phénomène complexe, influencé par plusieurs facteurs tels que la génétique, les conditions environnementales et agro climatiques. Elle peut aussi être reliée à la composition des grains, la structure et texture de l'albumen, l'aptitude du grain à produire les enzymes et la mobilité de ces dernières à l'intérieur de l'albumen.

2.1.1.1 Généralités sur les enzymes amylolytiques

Les enzymes amylolytiques sont des hydrolases capables de dégrader spécifiquement les liaisons glycosidiques de l'amidon (amylose, amylopectine) et des produits de dégradation (maltodextrines) jusqu'au stade d'oligosaccharides. Elles sont largement répandues chez les végétaux, animaux et microorganismes, où elles participent à de nombreux processus biologiques tels que la germination et la maturation des graines, la digestion des substrats amylacés par les animaux et les microorganismes.

Les enzymes amylolytiques sont classées en trois groupes (Tableau 4):

- ↻ Enzymes spécifiques de la liaison α -(1→4) encore appelées amylases subdivisées selon leur mode d'action en endo-enzyme (α -amylase) et en exo-enzyme (β -amylase) ; leurs produits d'hydrolyse sont le glucose, le maltose et des dextrines.
- ↻ Enzymes spécifiques de la liaison α -(1→6), enzymes déramifiant les α -glucanes ramifiés (amylopectine, glycogène) et leurs produits de dégradation. Elles sont présentes seulement dans les plantes supérieures et les microorganismes où elles sont classées selon leur mode d'action en deux groupes : les enzymes capables d'hydrolyser directement les liaisons α -(1→6) de l'amylopectine et/ou du glycogène natifs (pullulanase et isoamylase) et celles nécessitant une modification préalable du substrat par l'action d'autres enzymes. Elles libèrent uniquement les dextrines.
- ↻ Enzymes spécifiques de la liaison α -(1→4) et α -(1→6), appelées amyloglucosidases ou glucoamylases ou glucamylases (E.C.3.2.1.3.) qui sont des exo-enzymes libérant du β -glucose. Elles sont principalement produites par les moisissures du genre *Aspergillus*, *Penicillium* et *Rhizopus*.

Tableau 4: Enzymes amylolytiques et produits d'hydrolyse de l'amidon

Substrats	Enzymes	Liaisons hydrolysées	Produits
Amylose + amylopectine	α -amylase	α -(1→4) au hasard	Dextrines et oligoholosides (6-7 résidus), maltose, glucose
Amylose + amylopectine	β -amylase	α -(1→4) à partir de l'extrémité non réductrice	β -maltose, dextrine limite
Amylopectine	Amylopectine α -(1→6)-glucosidase	α -(1→6) de l'amylopectine	Dextrines
Amylose + amylopectine	Glucoamylase ou amyloglucosidase	α -(1→4) et α -(1→6)	Glucose

2.1.1.2 α -amylase

L' α -amylase (α -(1→4) D-glucano-4-glucan hydrolase, E.C. 3.2.1.1.) joue un rôle principal dans le métabolisme de l'amidon aussi bien que dans le processus de germination des céréales où elle initie la dégradation de l'amidon.

L' α -amylase hydrolyse au hasard les liaisons α -(1 $\rightarrow$ 4) interne de l'amylose et de l'amylopectine avec libération des molécules de 1 à 7 unités de glucose ou plus, le degré de polymérisation étant fonction des conditions d'hydrolyse telles que le pH, la température et l'état du substrat (Figure 7). Il s'en suit une diminution rapide de la viscosité des solutions d'amidon. Grâce à cette propriété de diminution de viscosité, elle est appelée enzyme liquéfiant et est utilisée pour la fabrication des farines infantiles à haute densité énergétique.

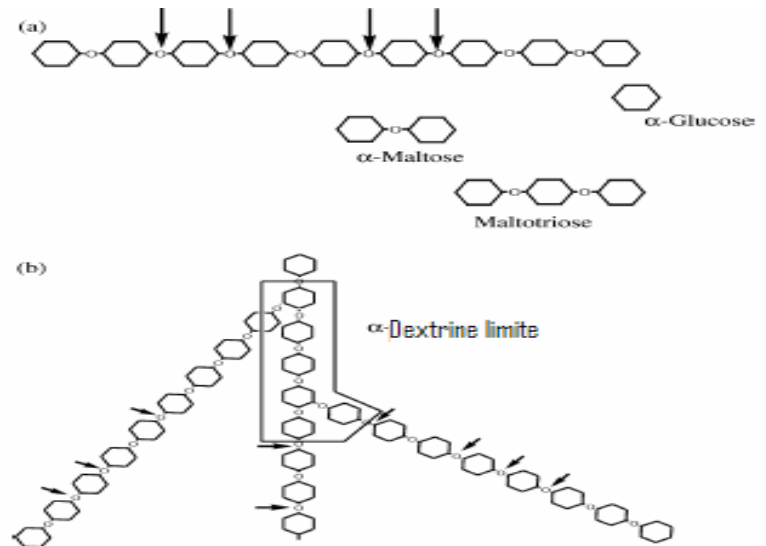


Figure 7: Mode d'action de l' α - amylase sur l'amylose (a) et l'amylopectine (b)

2.1.1.2.1 Caractéristiques

Dans les céréales, l'enzyme existe sous forme de plusieurs isoenzymes qui peuvent avoir des caractéristiques différentes. Le nombre d'isoenzymes dépend du type de céréales. Par exemple dans le malt du maïs, on rencontre quatre isoenzymes allant de α - amylase 1 à 4 (Subbarao et *al.* 1998) ; celui du mil (*Eleusine corocana*) en contient trois, α - amylase 1, 2 et 3 (Nirmala et Muralikrishna, 2003 a).

L' α -amylase des céréales est soluble dans l'eau (Muralikrishna et Nirmala, 2005). En général, les α -amylases sont complètement inactivées à des pH inférieurs à 4 et des températures supérieures à 70°C. Les ions Ca^{2+} (5 – 7,5 mM) augmentent leur stabilité thermique (Nirmala et Muralikrishna, 2003 b). Leur pH optimal se situe entre 4,5 et 5,5. Les isoenzymes présentes dans une même céréale peuvent ou non avoir le même pH optimal, il en est de même de la température optimale. Ainsi, dans l'Eleusine, la forme $\alpha 1$ a respectivement pour pH et température optimum 5,0 et 45°C et elle est complètement inhibée à 75°C. L' $\alpha 2$ et l' $\alpha 3$ ont des optima de pH et de température respectivement de 5,5 et 5,0 et de 50°C et 40°C et sont complètement inactivées à 55°C et 70°C (Nirmala et Muralikrishna, 2003a). La forme la plus active est l' $\alpha 3$ (Nirmala et Muralikrishna, 2003c).

L' α -amylase est une métallo-enzyme possédant l'ion Ca^{2+} qui agit comme activateur allostérique (Muralikrishna et Nirmala, 2005) ; l' α -amylase du sorgho en contient 3 à 4 atomes par mole (Botes et *al.*, 1967). D'autres cations divalents tels que le Ba^{2+} , Mg^{2+} et le Sr^{2+} sont aussi des activateurs de l' α -amylase. A contrario, tous les chélateurs de métaux (Al^{3+} , Hg^{2+} , F^{2+} , EDTA) sont des inhibiteurs de l' α -amylase.

2.1.1.2.2 Méthodes de dosage

Dans la littérature il existe plusieurs méthodes de dosage de l'activité α -amylasique. L'activité enzymatique est définie comme la quantité de substrat transformé ou de produits formés par unité de temps. Elle peut être exprimée en katal (mole de substrat ou de produit par seconde) ou en micromoles de substrat ou de produit par min ou en équivalence maltose par min. Les méthodes utilisées sont entre autres :

- ⌘ Les méthodes colorimétriques de mesure de groupes réducteurs par utilisation des réactifs comme l'acide 3,5, dinitrosalicylique (réactif le plus utilisé parce que fiable et simple d'après Muralikrishna et Nirmala, 2005).
- ⌘ La méthode semi-quantitative pouvant être utilisée en routine qui consiste à mesurer la diminution de la couleur bleue du complexe amidon-iodé. Elle est basée sur l'endoclivage de l'amidon par l' α -amylase.
- ⌘ La mesure de la diminution de la viscosité d'une solution d'amidon, basée aussi sur l'endoclivage de l'amidon par l' α -amylase.
- ⌘ L'utilisation des substrats chromogéniques, le chromogène étant généralement le P-nitrophényl. C'est le cas des kits enzymatiques, méthode très onéreuse.
- ⌘

2.1.1.3 β -amylase

La β -amylase α -(1 $\rightarrow$ 4) glucane maltohydrolase, EC 3.2.1.2.) est une exo-hydrolase qui libère le β -maltose à partir de l'extrémité non réductrice ainsi que les β -dextrines limites (Figure 8). C'est l'enzyme qui contribue le plus au pouvoir diastasique et est essentiel en brasserie. L'enzyme attaque successivement plusieurs liaisons glycosidiques d'une même chaîne d'amidon, mais ne peut directement agir sur les granules d'amidon. Elle dégrade les intermédiaires d'hydrolyse par l'amylase (Ziegler, 1999).

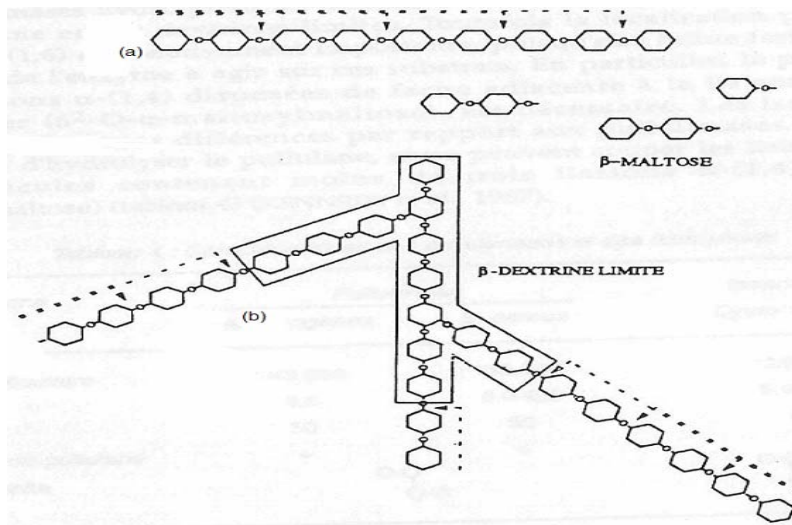


Figure 8: Mode d'action de la β -amylase sur l'amylose (a) et l'amylopectine (b)

2.1.1.3.1 Caractéristiques

Les β -amylases contiennent deux groupements sulfhydryl qui peuvent participer directement ou indirectement au processus catalytique. Ces groupements sont capables de fixer des inhibiteurs de l'activité enzymatique tels que les dérivés mercuriques ou d'autres peptides (Leloup et Buléon, 1994). L'enzyme est inhibée par les ions métalliques (Hg^{2+} , M^{2+} et Cu^{2+}) et Laurière et *al.* (1992) ont montré que sa synthèse pendant la germination du maïs est calcium dépendante.

Dans le grain de mil, de seigle et de sorgho, la β -amylase existe sous forme libre et liée. La forme libre est extractible avec de l'eau ou des solutions salines et la forme liée ne peut être extraite qu'avec des agents réducteurs ou des protéases parce qu'elle est liée aux protéines solubles de l'albumen et des inhibiteurs protéiques via des ponts disulfures (Ziegler, 1999).

Les β -amylases ont généralement un pH optimal compris entre 5 et 6 et sont plus thermolabiles que les α -amylases. D'après Okon et Uwaifo (1984), il existe trois isoenzymes de la β -amylase dans le sorgho de température optimale comprise entre 30 et 40°C. Botes et *al.* (1966) ont mis en évidence l'inactivation totale de l'activité de la β -amylase entre 68 et 70°C.

2.1.1.3.2 Méthodes de dosage

Plusieurs auteurs déterminent l'activité β -amylasique par la méthode de différence qui consiste en une détermination de l'écart entre le pouvoir diastasique et l'activité α -amylasique après inhibition thermique ou chimique de la β -amylase de l'extrait enzymatique. L'activité β -amylasique peut aussi être déterminée directement par extraction de l'enzyme avec l'oxalate d'ammonium qui inhibe l' α -amylase (Taylor, 1992 ; Pelembe et *al.*, 2002) ou par la méthode ELISA (Evans et *al.*, 1997).

L'inhibition chimique de la β -amylase peut se réaliser avec une solution d'acide P-chloromercuribenzoïque (Dufour et Mélotte, 1992). L'inhibition de la β -amylase à 68-70°C, généralement utilisée, est problématique. D'après Egliton et *al.* (1998), et Muralikrishna et Nirmala (2005), l'inactivation des amylases par la température est très complexe et donne des résultats difficiles à interpréter parce qu'elle ne dépend pas seulement de la température et de la durée d'application, mais aussi de plusieurs autres facteurs tels que : le pH et la teneur en glucosides, de la teneur en protéines de l'extrait qui varie elle-même avec la variété et des interactions possible entre les protéines de l'extrait.

2.1.2 Extrait de malt hydrosoluble

Le brasseur achète du malt pour en extraire la matière soluble. Plus la quantité de l'extrait est grande, meilleure est la qualité du malt. Le brassage a pour but d'extraire du malt, un moût contenant des sucres fermentescibles (maltose, glucose) et des acides aminés nécessaires respectivement comme source de carbone et d'azote pour les levures de bières. Les valeurs de l'extrait (matière sèche soluble) de mil et de sorgho rencontrées dans la littérature varient de 35 à 89 % de malt sec en fonction des conditions de maltage et de brassage. Les malts d'orge ont un extrait de 76 -81%.

En laboratoire un micro brassage permet d'évaluer la qualité de l'extrait de malt. Pour l'orge, il existe un brassin conventionnel à 65°C avec empâtage à 45°C. Des études ont montré que cette méthode ne convient pas au sorgho et au mil (Taylor, 1992 ; Olatunji et *al.*, 1993 ; Agu et Palmer, 1997a ; Igyor et *al.*, 2001). Contrairement à l'orge dont la température de gélatinisation de l'amidon est de 55-60°C, le mil et le sorgho gélatinisent à des températures voisines de 75°C, ce qui cause aussi l'inactivation des enzymes, principalement la β -amylase. Un brassage à trois étapes comme celui du brassage traditionnel qui permet de protéger les enzymes tout en gélatinisant l'amidon est appliqué au sorgho et au mil :

- ↬ Empâtage / extraction d'enzymes à une température variant de 40 à 55°C.
- ↬ Gélatinisation du résidu après séparation de l'extrait enzymatique à une température de 80-100°C. D'après Igyor et *al.* (2001), la gélatinisation à 100°C permet d'obtenir un moût de meilleures propriétés comparé à celui obtenu avec une gélatinisation à 80°C.
- ↬ Saccharification où l'extrait enzymatique est mélangé au résidu gélatinisé à des températures situées entre 55-66°C.

Pendant ce micro brassage, d'autres informations sur la qualité du malt sont généralement recueillies :

- ↬ **L'aspect du moût** (clair, trouble). Il ne doit pas être trouble dans le cas de l'orge parce que la bière obtenue de ce moût doit être limpide.
- ↬ **La couleur du moût** qui dans le cas de l'orge varie selon le type de malt d'une valeur inférieure à 3 (malt extra-pâle) à 12-27 unités EBC (malt foncé). Les malts de couleurs intermédiaires sont le malt pâle (3-4,5 unités EBC) et le malt ambré (5-8 unités EBC). En ce qui concerne le mil et le sorgho, la couleur

varie de 5,5 à 12 (Agu et Palmer, 1998), mais certaines variétés blanches peuvent donner des malts pâles, de couleur comprise entre 4,5 et 3,5 unités EBC (Odibo *et al.*, 2002).

- ☞ **Les protéines solubles du moût** dont les valeurs varient de 3,4 à 4,5 % de malt sec dans le cas de l'orge. Le rendement azoté ou indice de Kolbach ou indice de modification chimique (protéines solubles / protéines totales) permet aussi de juger de la qualité du malt. Selon Allosio *et al.* (1997), un indice de Kolbach inférieur à 35 % traduit une « désagrégation » insuffisante de divers substrats biochimiques pendant le maltage et une valeur supérieure à 45 % est la conséquence d'une meilleure « désagrégation » et donc une meilleure qualité du malt d'orge.

Par ailleurs, la qualité et la quantité d'acides aminés libres dans le moût déterminent la qualité de la bière (Taylor *et al.*, 1985) car ils influencent le métabolisme des levures et donc la vitesse de la fermentation et la synthèse des composés aromatiques de la bière. D'après Taylor et Boyd (1986), leur production est optimale pour un brassage à 51°C à un pH de 4,6. Les acides aminés sont d'ailleurs classés en quatre groupes A, B, C et D selon leur vitesse et la durée de leur absorption par les levures durant la fermentation (A : absorption immédiate au début de la fermentation ; B : absorption progressive ; C : absorption après les acides aminés du groupe A ; D : absorption très faible en anaérobiose) ou en trois classes en fonction de leur importance dans le métabolisme des levures de bière : classe 1 : peu importante, classe 2 et 3 : les plus importantes. Goode et Arendt (2003) classent ainsi comme suit les acides aminés : asparagine et lysine (A) ; acide aspartique, acide glutamique, serine, glutamine et thréonine (A, 1) ; arginine (A, 3) ; méthionine et isoleucine (B) ; valine (B, 2) ; leucine (B, 3) ; tryptophane (C) ; glycine, alanine, tyrosine, phénylalanine (C, 2).

- ☞ **le pH du moût.** L'activité enzymatique et la solubilité des protéines étant fonction du pH, la quantité de sucres et de protéines solubles en dépend. Le pH est généralement compris entre 5,5 et 6,1 pour l'orge et les pH plus acides donnent des extraits plus élevés. Dans le cas du mil et du sorgho, les pH sont de l'ordre de 5,4 (Agu, 1995).

2.2 Malt et aliment de complément : farine infantile

Une farine infantile est une farine composée donnée aux enfants dès l'âge de 6 mois, jusqu'à 1 à 2 ans environ, sous forme de bouillie, en complément du lait maternel.

La composition et les caractéristiques des farines infantiles doivent être telles que les quantités de bouillie ingérées par l'enfant lui fournissent suffisamment d'énergie et de nutriments pour couvrir ses besoins nutritionnels en complément du lait maternel. La quantité d'énergie qu'un enfant peut consommer chaque jour à partir des bouillies dépend de la densité énergétique de celle-ci, du nombre de prises et des quantités ingérées à chaque prise.

Les bouillies traditionnelles ont généralement une densité énergétique de l'ordre de 50 kcal / 100 g. De plus, la capacité stomacale des enfants est réduite (30 à 40 ml de bouillie par kilogramme de poids corporel à chaque repas). Pour que les besoins de l'enfant soient couverts, il faut des farines permettant la préparation de bouillies d'une densité énergétique de l'ordre de 110 à 130 kcal pour 100 g de bouillie et que cette dernière reste fluide de façon à être facilement ingérée par l'enfant. Bennett *et al.* (1999) ont d'ailleurs montré que la quantité de bouillie consommée par les enfants est plus élevée lorsqu'elle a une viscosité faible comparée à une bouillie très visqueuse. Il existe deux voies qui permettent d'atteindre ces objectifs (Dillon J.C., 1989).

- ✧ La modification de la structure des grains d'amidon pour qu'ils absorbent moins d'eau lors de la cuisson par la réticulation (addition de molécules organiques polaires comme les monoglycérides ou des acides gras qui entraînent le passage de l'amylose de la forme amorphe à la forme compacte en hélice empêchant ainsi l'eau de pénétrer dans la molécule)
- ✧ La dépolymérisation de l'amidon en dextrines de plus faible capacité de gonflement, obtenue soit par des traitements hydrothermiques drastiques (séchage sur cylindres ou cuisson-extrusion qui provoque l'éclatement des grains d'amidon, le dépliement et la cassure des chaînes constitutives), soit par l'hydrolyse acide (qui solubilise préférentiellement les zones amorphes de l'amidon) ou enzymatique avec l'incorporation de l' α -amylase ou du malt dans les bouillies.

L'utilisation des céréales germées est possible au niveau artisanal contrairement aux autres procédés (cuisson extrusion, séchage sur cylindre) qui sont coûteux et impossibles à réaliser au niveau familial ou posent des problèmes par rapport à la législation (hydrolyse acide).

Un malt de bonne qualité technologique pour les farines infantiles doit avoir une activité α -amylasique élevée et une activité β -amylasique la plus faible possible. Cette dernière entraînerait une augmentation de l'osmolarité des bouillies avec pour conséquence l'apparition des diarrhées chez l'enfant. D'après Trèche et *al.* (1993), l'incorporation de malt à des taux de 5 % à 15 % dans le mélange avec lequel sera préparé les bouillies est suffisante si on dispose d'espèces et de variétés développant une forte activité α -amylasique pendant le maltage.

En plus de la diminution de la viscosité des bouillies, Onyeka et Dibia (2002) ont conclu suite à des évaluations sensorielles, que les bouillies à base des produits maltés ont une meilleure qualité organoleptique et sont plus acceptées par les enfants que l'akamu (bouillie traditionnelle à base de maïs, mil ou sorgho au Nigéria). Toutefois il y a un risque important de contamination par des moisissures pendant le maltage.

2.3 Malt et qualité sanitaire

Une température de l'ordre de 30°C et une humidité supérieure à 85 % sont nécessaires pour une bonne germination. Elles sont aussi les conditions idéales pour le développement des moisissures. Aussi, les spores des microorganismes présentes à la surface des grains germent pendant le maltage. Ilori et *al.* (1991) ont identifié dans les grains et malts de sorgho *Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter aerogènes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Klesiella aerogenes*, *Sarcina sp*, *Lactobacillus sp.*, *Botryodiplodia theobromae*, *Aspergillus flavus*, *Rhizopus stolonifer*, *Penicillium sp*, *Fusarium sp* et *Aspergillus niger*. Les mycotoxines qui ont été déjà isolées du sorgho et du mil sont entre autres la patuline, la trichothécène, la zéaralénone et les aflatoxines B1, B2, G1 et G2 (Mc Farlane et *al.*, 1995). Ces mycotoxines et les microorganismes producteurs sont présentés en Annexe 3. Les études de Dufour et Melotte (1992) sur 50 échantillons et 49 variétés de sorgho en provenance d'Afrique (Afrique du Sud, Cameroun, Burundi, Ghana, Kenya, Nigeria, Rwanda et Soudan) et de Taiwan ont montré que 80 % sont contaminés par les aflatoxines dont 19 % (avant maltage) et 52% (après maltage) contiennent de l'aflatoxine B1. Selon Ratnavathi et Sashdhar (2000), les variétés rouges de sorgho constituent un milieu moins favorable au développement des mycotoxines, principalement les aflatoxines, que les variétés jaunes et blanches.

Le procédé de fabrication de la bière diminue mais n'élimine pas les toxines (Trinder, 1988 ; Dufour et Melotte, 1992).

3 MALTAGE ET FACTEURS INFLUENTS

3.1 Généralités sur le maltage

Le maltage est un procédé technologique à trois principales étapes : le trempage, la germination et le séchage des grains germés. Il favorise des modifications biochimiques intéressantes mais peut entraîner aussi des pertes considérables de matières du grain ainsi qu'une augmentation de la teneur en nitrolosides, en particulier les β -glycosides cyanogénétiques toxiques telle que la durrhine.

La trempage contribue à l'élimination des facteurs de flatulence (stachyose, raffinose) et à la diminution de la teneur en phytates. La germination amorce, grâce aux amylases et protéases synthétisées, l'hydrolyse de l'amidon et des protéines, fournissant ainsi des sucres et des acides aminés directement assimilables par l'organisme. Le coefficient d'efficacité protéique, la lysine disponible et la teneur en vitamines augmente (Malleshi et *al.*, 1989). D'après Wang et Fields (1978), la germination augmente la teneur en lysine, tryptophane et en méthionine avec passage de la valeur nutritive relative de 66,8 et 55,5 % (grains non germés) à 99,5 et 78,3 % (grains germés) pour le maïs et le sorgho respectivement. On note également une diminution de la teneur en acide phytique avec l'augmentation de la durée de germination (Badau et *al.*, 2005).

Avant le maltage proprement dit, les grains sont généralement triés et calibrés afin d'avoir des lots "purs" et de même calibre pour une trempage et une germination homogènes. Le dégermage à la fin du procédé permet d'éliminer ou de réduire la teneur en cyanures, 99% de cyanures étant concentrés dans les racines et tigelles (Ikediobi et *al.*, 1988; Halkier et Moller, 1989). Le cyanure est inhibiteur du cytochrome oxydase, enzyme respiratoire. Cependant, le dégermage entraîne une diminution de la teneur en amylases et en protéines.

3.2 Maltage traditionnel en Afrique de l'Ouest

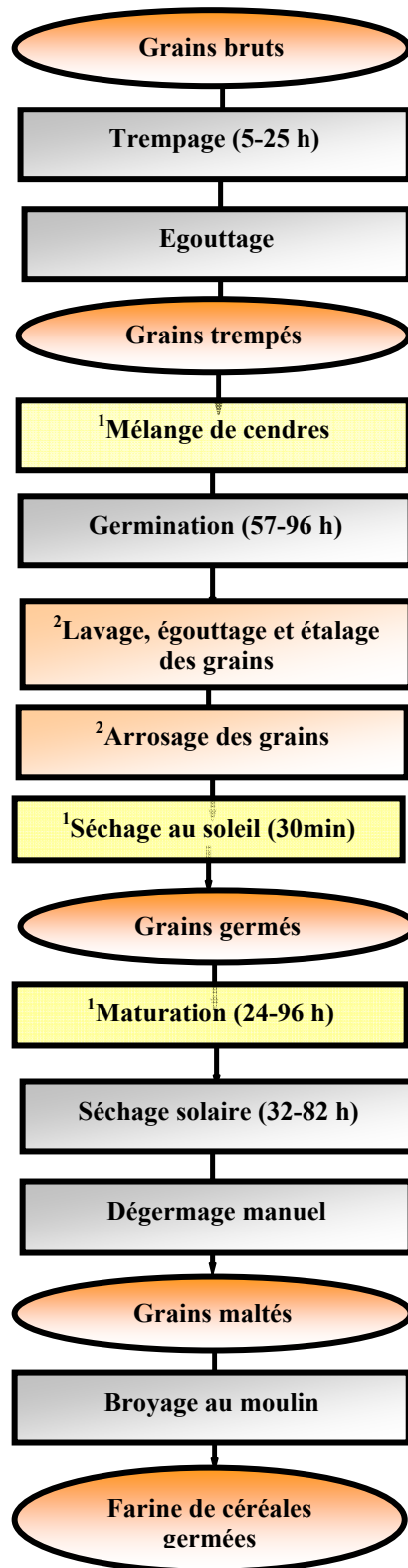
L'opération de maltage traditionnel (Figure 9) commence par une étape de nettoyage manuel des grains en utilisant un tamis, opération parfois complétée par un lavage à l'eau s'il y a présence de terre ou de sable.

Les grains sont mis à tremper dans des canaris en terre cuite munis de couvercle, à moitié enterrés dans le sol pour une meilleure isolation thermique pendant 5 à 25 h, mais on peut rencontrer des durées de trempage plus longues (24 à 48 h).

La germination des grains se déroule à température ambiante et à l'abri des rayons solaires dans des canaris, sur des aires cimentées, sur des tissus maintenus humides ou sur des sacs en plastique pendant 57 à 96 h avec arrosage à des intervalles variables ; toutes les 12 h d'après Fliedel et *al.* (1996). L'épaisseur de la couche peut atteindre 30-50 cm. Au Burkina Faso, cette étape peut être suivie d'une phase de maturation dite « germination haute » où les grains sont placés dans un panier ou sur le sol couvert de toile de jute, de nattes ou d'une feuille de polyéthylène et les températures peuvent atteindre 60°C au cœur des grains.

Le séchage au soleil sur des nattes posées au sol dure de 32 à 82 h, mais peut être de 96 h ou plus en fonction des conditions climatiques et de l'épaisseur de la couche.

Le dégermage n'est pas réalisé par tous les fabricants de malt alors qu'il favorise une réduction de la teneur en cyanures de 72 et 74 % dans le mil et le sorgho (Traoré et *al.*, 2004).



¹ Opération facultative

² Nombre de répétitions variable selon les ateliers

Figure 9 : Schéma général de maltage des céréales observé dans 191 ateliers à Ouagadougou (Traoré et al., 2004)

3.3 Trempage

La trempe permet de porter la teneur en eau du grain à une valeur favorable aux activités respiratoires et métaboliques ainsi qu'à la mobilisation des métabolites primaires et secondaires, rendant ainsi possible la germination. Elle assure aussi un nettoyage complémentaire.

La qualité du malt (pouvoir diastasique, acides aminés libres et extrait) de sorgho est directement corrélée positivement à la teneur en eau du grain à la fin du trempage (Dewar *et al.*, 1997). Selon la méthode EBC (European Brewery Convention), un grain d'orge bien trempé doit avoir une humidité finale comprise entre 43 et 45 % bh.

En ce qui concerne le mil et le sorgho, les valeurs varient selon les auteurs de 33 à 45 %. Agu et Palmer (1998) pensent que la teneur en eau optimale (33-36 %) retenue pour le sorgho par plusieurs chercheurs serait insuffisante et qu'elle serait complétée par une aspersion d'eau pendant la germination. Aisien et Ghosh (1978) ont conclu à une teneur en eau optimale entre 35-40% et Ogbonna *et al.* (2004) ont montré qu'une teneur en eau de 37- 43 % (selon les variétés de sorgho) permet d'avoir une activité protéolytique et carboxypeptidasique optimale pendant la germination. La teneur en eau d'équilibre (saturante) est plus élevée pour le sorgho (45%) comparée à celle du mil (30 à 35%) dans les mêmes conditions de trempage (Malleshi et Desikachar, 1986). L'absorption d'eau dépend de multiples facteurs : la composition de l'eau de trempage, la variété et les conditions de stockage des grains, la durée et la température de trempage.

3.3.1 Prétraitement et composition de l'eau de trempage

Les grains de céréales sont parfois traités avant et / ou après le trempage avec des produits chimiques tels que le formaldéhyde (0,2%) (Elmaki *et al.*, 1999), l'hypochlorite de sodium (1% de chlore actif) (Ogbonna *et al.*, 2004), l'éthanol (70%) (Mbofung et Fombang, 2003) pour éviter le développement des moisissures. Ces produits diminuent le pouvoir germinatif des grains excepté le formaldéhyde efficace, mais pose un problème de santé pour l'utilisateur. L'extrait de citron à 0,1 % (Malleshi et Desikachar, 1986) et les cendres au niveau traditionnel (Traoré *et al.*, 2004) sont également utilisés.

La trempe en milieu alcalin réduit la teneur en composés phénoliques (Towo *et al.*, 2003) et le développement microbien. De plus, elle entraîne une diminution des pertes de matières pendant la germination (Okolo et Ezeogu, 1996) ainsi qu'une mobilisation des protéines de réserve conduisant à une augmentation des acides aminés libres. Les études de Beta *et al.* (2000) montrent qu'une trempe avec du NaOH 0,3 % favorise une augmentation de la vitesse d'absorption d'eau (diminue la durée de trempage) et du pouvoir diastasique des malts des sorghos riches en tannins. Il est connu que les bases dégradent les polysaccharides non digestibles des parois cellulaires ce qui, selon Verbruggen *et al.* (1995) facilite une mise place rapide des activités métaboliques et une production de malt de bonne qualité en une durée plus courte. La nature de la base utilisée influencerait le mode de réponse des enzymes aux conditions de séchage d'après les travaux de Okungbowa *et al.* (2002). Ils ont constaté en faisant une trempe dans du KOH, NaOH et Ca(OH)₂ tous à 0,1% et un séchage à 40 et 50°C qu'une trempe dans du Ca(OH)₂ favorise une augmentation de l'activité β -amylasique à 50°C qu'à 40°C alors que le KOH a l'effet contraire. En comparant les résultats obtenus avec une trempe dans ces solutions alcalines avec ceux d'autres auteurs et ceux d'une trempe avec de l'eau distillée, ils concluent que le KOH a un effet suppresseur sur la synthèse de la β -amylase tandis que le NaOH en a un effet inducteur, mais un effet suppresseur pour l' α -amylase. Toutefois il est à noter que ces effets varient en fonction des variétés.

3.3.2 Durée et température de trempe

La durée de trempe détermine le degré d'hydratation des grains à la fin du trempage. La durée optimale de trempe est influencée par la température de trempe et la teneur en eau initiale de la céréale à faire germer. La vitesse de réhydratation des grains dépend de la température de l'eau de trempe. Les températures élevées accélèrent l'absorption d'eau et diminuent le temps nécessaire pour une absorption maximale. Les grains de faible teneur en eau nécessitent une plus longue durée de trempe pour avoir une teneur en eau adéquate (Shambe et *al.*, 1989).

Les conditions de trempe du mil et du sorgho, généralement retenues dans les publications, varient de 8 à 51 h à des températures comprises entre 25 et 35°C ; la plupart se situe entre 16 et 24 h à 30°C. La qualité globale du malt augmente avec la durée de trempe. Le pouvoir diastasique du malt de sorgho augmente avec la température de trempe avec un optimum à 30°C alors que l'extrait de malt ainsi que les acides aminés libres sont plus importants avec une trempe à 25°C (Dewar et *al.*, 1997). Une très longue période de trempe peut conduire à une germination très rapide et à une perte très élevée de matières (Pathirana et *al.*, 1983 ; Bhise et *al.*, 1988), ou à une putréfaction des grains plutôt qu'à une germination (Shambe et *al.*, 1989).

Par ailleurs, les études de Ezeogu et Okolo (1994 et 1995) et de Okolo et Ezeogu (1995) montrent qu'une trempe à deux régimes (trempe normale, suivi d'une trempe à température élevée (40°C) augmente l'activité enzymatique et la matière sèche soluble du malt. La longueur des radicelles et tigelles diminue au fur et à mesure que la durée de la phase de trempe à 40°C augmente entre 1,5 et 3 h ; le pouvoir diastasique et l'activité α -amylasique optimaux sont obtenus en 3 h. L'activité β -amylasique est optimale soit à 3 h, soit à 7,5 h de trempe chaude selon les variétés (Okolo et Ezeogu, 1995).

3.3.3 Apport d'oxygène pendant la trempe

L'aération favorise la respiration du germe. En absence d'air, il végète et s'asphyxie. Pour le trempage de l'orge, l'aération se fait soit par des renouvellements d'eau et entre deux renouvellements consécutifs les grains sont laissés sans eau pendant des temps variant d'une demi heure à 4 heures (trempes intermittentes), soit par des périodes sous eau avec injection d'air comprimé, ou encore par des périodes à découvert avec aspiration du gaz carbonique.

L'aération des grains de sorgho pendant la trempe conduit à une augmentation du pourcentage de grains germés, de la matière sèche soluble du malt, des teneurs en azote total et en acides aminés libres (Dewar et *al.*, 1997). Beta et *al.* (1995) ont constaté, après maltage de 16 variétés de sorgho, que les malts des sorghos trempés dans des jarres, où les mouvements d'air sont moindres, ont tous eu un pouvoir diastasique, une activité α et β -amylasique et une teneur en protéines plus faibles comparés à ceux obtenus à partir de grains de sorgho trempés dans un container aéré, excepté la variété Framida. Les pertes pendant le maltage diminuent avec l'augmentation de la durée sous air. De même, une trempe alternée avec une période sous air de 3 h donne des malts de meilleure qualité comparée à une aération de 1, 2 et 4 h (Ezeogu et Okolo, 1995). Dans le même sens, les études de Iwuoha et Aina (1997) montrent qu'une trempe alternée de 24 h avec 6 h sous eau et 30 min sous air accompagnée d'une ventilation entraîne une importante augmentation du pouvoir diastasique.

3.4 Germination

La germination en malterie reproduit le même phénomène que la germination dans le sol mais en conditions contrôlées. Les grains non germés ou mal germés ne contribuent pas à la

production d'enzymes et aux modifications nécessaires pour l'obtention de malt de qualité technologique et / ou nutritionnelle intéressantes. En plus ils sont source d'infection microbienne et de production de toxines (Agu et Palmer, 1998).

3.4.1 Température et durée de germination

Les températures optimales de germination du sorgho et du mil recueillies dans la littérature sont comprises entre 25 et 30°C, contrairement à l'orge qui germe autour de 16-17°C. La germination à 20°C réduit les pertes au maltage causées par une croissance poussée des racelles contrairement à une germination à 30°C qui engendre beaucoup de pertes, mais augmente l'activité amylasique (Agu et Palmer, 1997b).

La synthèse des enzymes est rapide et importante avec l'élévation de la température de germination. Les pertes de matières pendant le maltage sont directement proportionnelles à la durée de germination (Pathirana *et al.*, 1983 ; Agu et Palmer, 1997b). Les malts de sorgho germé à 25°C donnent un meilleur moût comparé à celui de grains germés à 20°C. Une germination du sorgho à 30°C pendant plus de 4 jours entraîne une diminution des peptides dans le moût (Agu et Palmer, 1999). L'activité α -amylasique est optimale au 3^{ème} jour de germination et est plus élevée dans les malts de sorgho blanc que dans ceux de sorgho rouge alors que l'activité β -amylasique est optimale respectivement le 3^{ème} et le 4^{ème} jour de la germination à 30°C pour le sorgho rouge et le sorgho blanc (Uvere *et al.*, 2000). De même Capanzana et Buckle (1997) ont conclu à une activité amylasique optimale pour la germination du riz à 30°C pendant 3 jours. Une germination du mil (*Eleusine coracana*) à 30°C pendant plus de 48 h conduit à une perte élevée de matières sans un apport significatif des caractéristiques recherchées du malt obtenu (Mbithi-Mwikya *et al.*, 2000).

Par ailleurs, Wang et Fields (1978) ont conclu, par rapport à l'amélioration de la valeur nutritive à travers le maltage, qu'il faut 4 jours de germination à 25°C ou 2 jours à 30°C ou 3 jours à 35°C pour le maïs et 5 jours à 25°C ou 6 jours à 30°C ou 3 jours à 35°C pour le sorgho afin d'avoir les valeurs les plus élevées.

3.4.2 Humidité relative de l'air de germination

Le malt ne doit pas perdre d'humidité au cours de la germination. Les activités métaboliques qui se produisent dans le grain pendant la germination entraînent un dégagement de la chaleur et une augmentation de la température. L'air humide permet de réguler la température et d'éviter le dessèchement. En conditions d'humidité non contrôlée comme dans la germination traditionnelle, les grains sont arrosés à des intervalles réguliers ; toutes les 8 h (Taylor, 1983) ou toutes les 6 h (Taylor *et al.*, 1994) ou 2 à 3 fois par jour (Pelembé *et al.*, 2004) ou en fonction d'une observation visuelle de l'état de dessèchement des grains. Les grains sont généralement mis à germer à des humidités comprises entre 85 à 100 %. Plusieurs auteurs préfèrent plutôt une légère sursaturation ou des humidités de 90 à 100 %.

3.5 Séchage et facteurs influents

Le séchage permet de baisser l'activité de l'eau du malt favorisant ainsi un blocage de l'activité enzymatique et une bonne conservation. La teneur en cyanures des grains germés diminue pendant le séchage (Aniche, 1990 ; Traoré *et al.*, 2004). Il est recommandé pour les farines infantiles, une teneur en eau inférieure à 7 %. Lasekan et Lasekan (2000) ont démontré qu'une farine de sorgho malté ne peut être stable pendant le stockage entre 25 et 30°C que si sa teneur en eau est comprise entre 4,6 et 5,8 %. En malterie d'orge, le touraillage permet d'atteindre 4 % d'humidité et d'assurer une bonne conservation du malt ainsi que de

développer l'arôme et la couleur. La question est de savoir comment réduire l'humidité du malt à de faibles valeurs tout en conservant ses activités enzymatiques. Autrement dit quels sont les facteurs qui peuvent permettre d'optimiser les conditions du séchage du malt ?

3.5.1 Température et durée de séchage

Les températures de séchage des malts de sorgho et de mil rencontrées dans la littérature varient de 30 à 65°C avec différents barèmes. On peut noter : 30°C/12 h suivi de 50°C/24 h (Demuyakor et Ohta, 1992) ; 30-35°C/24 h suivi de 55°C/24 h (Aisien, 1982) ; 40°C (Olatunji et al., 1993) ; 55°C jusqu'à 5,8 % puis 65°C jusqu'à 4 % (Lasekan, 1991). La plupart des auteurs choisissent 50°C pendant 24 h (Beta et al. 1995 ; Subramanian et al., 1995 ; Igyor et al., 2001).

Les activités amylasiques diminuent au fur et à mesure que la température de séchage augmente. Il y a perte de 70 % des α -amylases et de 80 % des β -amylases lorsque l'orge est séchée à 60-80°C. Le séchage du sorgho à 35, 40 et 45°C diminue son activité diastasique de 7,7, 8,7 et 12,4 % respectivement (Agu et Palmer, 1996). D'après Traoré et al. (2004), le séchage solaire réduit de 16 % l'activité α -amylasique dans le mil et le sorgho.

Le séchage à 50°C diminue l'activité amylasique, durrhinasiq, ainsi que le rendement en alcool dans le burukutu. Les activités α -amylasiques et β -amylasiques sont réduites de 25 % et 9 % pour les variétés de sorgho rouge et de 18 % et 64 % pour le sorgho blanc respectivement. De plus les pertes d'activité sont différentes selon la durée de germination, traduisant la présence des α -amylases et β -amylases de différentes stabilités thermiques en fonction de la durée de germination (Uvere et al., 2000).

Owuama et Asheno (1994) ont constaté une faible teneur en protéines et en sucres et donc une inactivation des enzymes dans les malts de sorgho séchés à 65°C comparés à ceux séchés à 55°C ou à 55°C pendant 6 h puis 65°C. Par ailleurs, les malts issus du séchage à deux régimes (55°C à 65°C) ont présenté les teneurs les plus élevées en sucres réducteurs.

3.5.2 Humidité relative de l'air de séchage

L'humidité relative ou le degré hygrométrique de l'air indique le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau. Par définition, elle est considérée comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air à la pression de vapeur saturante à la température de l'air.

Dans les publications consultées, les auteurs ne précisent généralement pas les humidités relatives de l'air de séchage ni la vitesse de l'air. Ainsi, les conditions de séchage ne sont pas réellement définies. Toutefois les travaux de Aviara et al. (2005) permettent de déterminer l'activité de l'eau du malt de sorgho et donc l'humidité relative de séchage en fonction de la température et de la teneur en eau du malt souhaitée à la fin du séchage.

3.6 Maltage et influence variétale

Plusieurs études montrent que les conditions optimales de maltage sont différentes en fonction des variétés de mil et de sorgho. En fait, les variétés réagissent différemment sous l'effet des facteurs extrinsèques (température, aération, ...) pouvant influencer le maltage et la qualité du malt. La vitesse d'absorption d'eau et la teneur en eau saturante pendant la trempe dépendent des variétés.

D'après Agu et Palmer (1997a), les variétés de sorgho colorées ont une activité α et β -amylasiques plus élevée que celles des variétés blanches, mais donnent plus de pertes pendant le maltage. De même, Eneje et al. (2004) ont conclu à une activité enzymatique et un rendement en extrait plus élevés dans le maïs jaune que dans le maïs blanc. Cependant,

certaines études parviennent à des résultats contraires ce qui traduirait une impossibilité de classement absolu des grains par rapport à leur aptitude à la germination selon leur couleur.

En général, les grains à haute teneur en protéines donnent des malts et des extraits à teneur élevée en protéines (Odibo et *al.*, 2002). Dans les mêmes conditions de maltage, certaines variétés de grains ont leur activité β et α -amylasiques optimales après 3 et 4 jours de germination tandis que pour d'autres ces activités continuent à augmenter avec la durée de germination (Agu et Palmer, 1997b). Il existe des variétés qui produisent plus d' α -amylase et ou de β -amylases (Dufour et Melotte, 1992, Subramanian et *al.*, 1995) ou des variétés plus sensibles aux conditions d'anoxie que d'autres (Beta et *al.*, 1995).

4 CONCLUSION ET OBJECTIFS

En conclusion, les conditions de maltage recensées dans la littérature sont nombreuses. Le sorgho en regroupe quelques unes. Celles retenues par les auteurs sont généralement en rapport avec un optimum de pouvoir diastasique, d'activité α -amylasique et / ou β -amylasique ainsi qu'à l'obtention d'une teneur en extrait de malt et en acides aminés libres importantes et à un minimum de pertes de matières pendant la production du malt. Les optima sont très variés en fonction des auteurs et parfois contradictoires. Par exemple, au niveau de la trempe, les durées optimales de trempe peuvent être de l'ordre de 9 à 40 h à la même température. Dans le même sens, la durée optimale de germination varie avec les variétés ; on observe le plus souvent des courbes en cloche, ce qui nous permet de penser qu'une approche cinétique serait intéressante pour cette étude.

Il ressort également de cette étude bibliographique que les facteurs pouvant influencer sur la qualité du malt sont nombreux et il serait judicieux de déterminer le poids de chaque facteur afin de définir la fonction objective.

L'objectif de ce travail est de poser les bases pour l'optimisation des conditions de maltage:

- ✧ Proposer un modèle de prédiction de la durée de trempe à une température donnée en fonction des caractéristiques géométriques et physico-chimiques des grains ;
- ✧ Valider la possibilité de réaliser des études de cinétique de germination par prélèvement préférentiellement à des arrêts ;
- ✧ Identifier les variétés de mil ou de sorgho produites au Bénin et au Burkina-Faso qui ont une bonne aptitude à synthétiser de l' α ou la β -amylase.

Tableau 5 : Synthèse bibliographique sur les conditions de maltage du mil, sorgho et autres céréales

Denrées	Prétraitement	Trempage	Germination	Séchage	Conditions retenues	Références
Sorgho	Hypochlorite de sodium (1%) 40 min	Eau désionisée (eau/grain = 2) à 30°C pendant 12, 24, 30, 36, 40 et 45 h en cycle de 6 h sous eau et 3 h sous air	30°C pendant 1-8 jours	50°C ; 24 h	Trempe : 40 h (37-43 % d'eau) Germination : 4-5 jours	Ogbonna et <i>al.</i> (2004)
Sorgho	Ethanol 70 % 2 min	Eau distillée (eau/grain = 5) à 28, 30, 35°C après avoir rincé les grains	30°C pendant 1, 2 et 3 jours avec pulvérisation d'eau 3 fois par jour	45°C 24 – 48 h	Trempe : 30- 33°C pendant 10 à 16 h Germination : 3 jours	Mbofung et Fombang (2003)
Sorgho	NaOH (0,3%) 8 h	Eau à 25°C pendant 16h sous eau avec un cycle de 4 h sous eau et 1 h sous air	25°C à 100 % humidité pendant 2 - 5 jours	50°C ; 48 h	-	Beta et <i>al.</i> (2000)
Sorgho	-	Eau à 30°C pendant 18 h	30°C avec pulvérisation d'eau toutes les 12 h pendant 5 jours	50°C ; 24 h	-	Uvere et <i>al.</i> (2000)
Sorgho	-	Eau de robinet à 20, 25 ou à 30°C pendant 16, 24 ou 40 h en condition aérée (pompage de l'air dans l'eau de trempage ou cycle sous air et sous eau) ou non	25°C à humidité saturée pendant 2 jours	50°C ; 24 h	Trempe : 25- 30°C ; 40 h avec aération Germination : 2 jours	Dewar et <i>al.</i> (1997)
Sorgho	NaOCl 1% pendant 20 min	Eau distillée à 30°C pendant 42 h et 6 h à 40°C suivant un cycle eau/air avec période sous air de 1, 2, 3 et 4 h	30°C pendant 4 j	50°C ; 24 h	Trempe à 30°C pendant 42 h et 6 h à 40°C suivant un cycle eau/air avec période sous air de 3 h	Ezeogu et Okolo (1995)
Sorgho	-	Eau courante 30°C pendant 22 h avec renouvellement d'eau la 12 ^{ème} h	30°C pendant 24, 48, 62, 72, 96 et 120 h avec arrosage toutes les 6 h	30°C ; 12 h puis 50°C ; 24 h	Germination 4-5 jours	Demuyakor et Ohta (1992)
Sorgho	-	Eau de robinet à 30°C pendant 8, 18 et 32 h	30°C pendant 2 à 6 jours avec pulvérisation d'eau	45°C jusqu'à 10 % d'eau	Trempe : durée légèrement > 18 h Germination : 4 à 5 jours	Pathirana et <i>al.</i> , 1983)
Sorgho et maïs	-	Eau courante à température ambiante pendant 16-18 h	25, 30 et 35°C pendant 2 à 6 jours	50°C une nuit	Germination (sorgho) 5 jours à 25°C ; 6 jours à 30°C ou 3 jours à 35°C	Wang et Field (1978)

Tableau 5 suite : Synthèse bibliographique sur les conditions de maltage du mil, sorgho et autres céréales

Denrées	Prétraitement	Trempage	Germination	Séchage	Conditions retenues	Références
Sorgho et mil	-	Eau à 25°C pendant des durées variées	10, 15, 20 et 30°C pendant 96 h	-	Trempe: 9-13 h (29-33 % d'eau)	Shambe et <i>al.</i> (1989)
Mil	-	Eau à 0,1 % de formaldéhyde à 25-30°C pendant 6 h suivi de 3 h d'aération sous air avec ventilation, puis trempage dans les mêmes conditions 16 h, 20 h et 24 h avec 2 h d'aération à la fin de chaque période de trempe ou non	25-30°C pendant 48, 72, 96 et 120 h avec pulvérisation d'eau à 0,1 % de formaldéhyde	50°C 24 h	Trempe : 16 h Germination : 72 h	Chaturvedi et Sarojini (1996)
Mil pénicillaire	-	Sac nylon avec de l'eau à 20, 25, 30 et 35°C pendant 8 h en cycle 2 h sous air (20-22°C) et 2 h sous eau	20, 25, 30 et 35°C pendant plus de 5 jours ; humidité proche de la saturation	50°C 24 h	Germination : 25-30°C pendant 3 à 5 jours	Pelembe et <i>al.</i> (2002)
Mil (<i>Eleusine</i>)	-	Eau distillée (température et durée non indiquées)	30°C pendant 1, 2, 3 et 4 jours	37°C 24 h	Germination : 2 jours	Mbithi-Mwikya et <i>al.</i> (2000)
Mil (<i>Eleusine coracana</i>)	-	Eau à 25°C pendant 24 h	25°C à humidité saturée pendant 1, 2, 3 et 4 jours	50°C 12 h	Germination : 3 jours	Nirmala et <i>al.</i> (2000)
Riz	-	Eau courante à 5, 15, 25, 35 et 45°C pendant 0, 8, 16, 24 et 32 h	10, 20, 30, 40 et 50°C pendant 0, 36, 72, 108 et 144 h à 90 ± 5 % d'humidité relative	50°C (10< teneur en eau)	Trempe : 24 h / 25°C ; 16 h / 35°C Germination : 72 h / 30°C	Capanzana et Buckle (1997)

Chapitre II : Matériel et méthodes

5 MATERIEL VEGETAL

5.1 Grains bruts de mil et de sorgho

Vingt trois échantillons dont 4 variétés de mil, 18 variétés de sorgho et un sorgho vrac acheté sur le marché de Cotonou au Bénin ont été utilisés dans cette étude. Tous ont été récoltés en décembre 2005, excepté le sorgho vrac récolté en 2004. Ils ont été collectés sur la base de leurs principales utilisations au niveau local. Des variétés de soudure ont été aussi collectées (Tableau 6) :

Tableau 6: Liste des variétés de mil et de sorgho utilisées dans l'étude

Pays	Fournisseurs	Variétés	Race/Région d'origine	Utilisations principales
Bénin	Producteurs	Fissouka	Djougou	Sorou, Dibou, Tchoukoutou
		Zomoaha 1	-	-
		Chabicouman à panicules rouges	Toucountouna/Natitingou	Tchoukoutou, Dibou
		Zomoaha 2	-	-
		Chassisoya	Toucountouna/Natitingou	Tchoukoutou, Dibou
		Agbanni	Bénin-Djougou	Dibou, Sorou, Tchoukoutou
		Soniya	Toucountouna/Natitingou	Dibou, Tchoukoutou
		Natisoya 1	Toucountouna/Natitingou	Dibou, Tchoukoutou
		Sotakaman	Toucountouna/Natitingou	Tchoukoutou
		Chabicouman à panicules noires	Toucountouna/Natitingou	Tchoukoutou
		Natisoya 2	Toucountouna/Natitingou	Dibou, Tchoukoutou
	Vendeur	Vrac	Marché Cotonou	-
Burkina Faso	CIRAD	Kapelga (sorgho blanc)	<i>guinée gambicum</i> / Manga	Tô
		Mewin (sorgho rouge)	<i>guinée margaritifera</i> /Bomborokuy	Dolo, Tô, Couscous
		Kioédré	<i>guinée gambicum</i> /Nouna	Dolo, Tô
		Pisnou (sorgho blanc, couche brune, farineux)	<i>Caudatum</i> /Manga	Variété de soudure
		Gnossiconi	Illa	Tô
		Kapelaga (mil blanc) M1	Manga	Bouillie
	Producteurs	Banninga (sorgho blanc) SB1	Manga	-
		Zoueloure (sorgho rouge)	Zoundweogo	dolo
		Ka-sablga (mil noir) M4	Mogtedo	-
		Kasui-pelga (mil blanc) M2	Gampela	-
		Kasui-pelga (mil blanc) M10	Kaïbo	-

Onze variétés de sorgho proviennent du Bénin et sont des écotypes locaux collectés dans les fermes. D'après Kayode et *al.* (2005), il n'existe pas au Bénin d'information génétique permettant de distinguer les variétés cultivées et les noms attribués par les producteurs aux différents phénotypes correspondant généralement au nom du village d'origine de la plante (Chabicouman), au nom du producteur qui l'a introduite dans la communauté, à une propriété agronomique spécifique (Chassisoya), à une apparence

morphologique (Fissouka), à la place occupée dans l'assurance de la sécurité alimentaire des foyers (Natisoya) ou à leurs qualités organoleptiques (Sotakaman).

- ⌘ Onze variétés dont quatre de mil et sept de sorgho proviennent du Burkina Faso. Cinq d'entre elles, dont on connaît la race, sont des variétés de sorgho provenant de la station de Saria et fournies par le Cirad – Burkina Faso ; les autres variétés sont des écotypes locaux.

Les photographies des différents échantillons sont regroupées en Annexe 2.

5.2 Grains de mil et de sorgho maltés

Vingt trois échantillons de malt ont été analysés (Tableau 7).

- ⌘ Douze malts de sorgho produits en 2004 au Cirad lors d'une étude précédente. Ils ont été fabriqués à partir de sorgho récolté en 2003 dans la station de Farako-bâ au Burkina Faso. Les conditions de trempage et de germination sont mentionnées dans le Tableau 7. Ils ont été séchés à 50°C et 20% HR pendant 24 h.
- ⌘ Dix malts produits en 2006 dans des conditions artisanales ou semi industrielles au Burkina-Faso. Nous n'avons pas eu connaissance des conditions de maltage ni de séchage.
- ⌘ Un malt produit en 2006 à l'IRD de Ouagadougou au Burkina Faso selon les conditions contrôlées. Les grains ont été trempés 10 h avec 15 min d'aération et renouvellement d'eau de trempage après 3 h 15 et 6 h 30 puis germés 4 jours sur des aires cimentées (température variant de 32 à 42°C) ; avec humidification des grains deux fois par jour (matin et soir) par trempage 10 min dans de l'eau et enfin séchés au soleil.

Tableau 7: Liste des malts caractérisés pour évaluer leur qualité technologique		
Ateliers /Villes de production	Matières premières	Conditions de fabrication
CIRAD/Montpellier	Sorgho (Silmiga)	TA / GH
	Sorgho (Kassougou)	TA / GH
	Sorgho (IRAT 9)	TA / GH
	Sorgho (Framida)	TA / GH
	Sorgho (Silmiga)	TA / GS
	Sorgho (Kassougou)	TA / GS
	Sorgho (IRAT 9)	TA / GS
	Sorgho (Framida)	TA / GS
	Sorgho (Silmiga)	TN / GS
	Sorgho (Kassougou)	TN / GS
	Sorgho (IRAT 9)	TN / GS
	Sorgho (Framida)	TN / GS
Faso Riibo/ Ouagadougou	Sorgho rouge	-
	Mil jaune	-
Misola/Kongoussi	Sorgho rouge	-
	Sorgho rouge	-
Atelier n°1 (PC/ 147)	Sorgho rouge	-
Atelier n°2 (P/C 130)	Sorgho rouge	-
Atelier n°3 (P/C 127)	Mélange sorgho rouge et blanc	-
Atelier n°3 (P/C 148)	Mélange sorgho rouge et blanc	-
Atelier n°1 (P/C 128)	Sorgho rouge	-
Atelier n°2 (P/C 129)	Sorgho rouge	-
IRD/Ouagadougou	Mil jaune	Conditions ci-dessus

TA : Trempe alternée (24 h de trempe en cycle de 6 h sous eau et 3 h sous air)

TN : Trempe normale sans aération (24 h de trempe en continu) à 30°C

GS : Germination standard à 30°C/48 h, 85% HR ;

GH : Germination haute température (30°C/24 h, 85% HR suivi de 50°C/24 h, 65% HR)

6 MALTAGE DES GRAINS ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

6.1 Nettoyage des grains

Les grains de mil et de sorgho ont été nettoyés en utilisant un tamis de maille inférieure à la taille des grains (900 µm à 2500 µm en fonction du diamètre des grains). Toutes les particules étrangères (pierres, sable, poussières, glumes et grains cassés ou immatures) plus petites que les grains passent à travers du tamis et les impuretés de diamètre supérieur ou égal à celui des grains ont été triées manuellement (pailles, grains étrangers et cailloux).



Photo 1: Nettoyage manuel des grains

6.2 Trempe des grains

L'opération de trempe a été réalisée dans un bac de trempe fabriqué par le CIRAD. Ce bac piloté par un automate possède un régulateur programmable (PID) de température qui permet d'entrer une valeur de consigne et affiche la température réelle du bac avec une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$ et une horloge programmable qui permet de régler le nombre de cycles (durée d'immersion, durée sous air) pour faire une trempe alternée ou continue.

La trempe est effectuée suivant un programme prédéfini comprenant la température, la durée d'immersion sous l'eau, la durée d'aération et le nombre de cycles.

L'eau du réseau est préalablement filtrée dans des cartouches de charbon actif puis d'échangeur d'ions avant de rentrer dans le bac de préchauffage où elle est chauffée jusqu'à la température de consigne. Lorsque la température de consigne et le niveau d'eau requis sont atteints, la pompe se met en route et refoule l'eau dans le bac de trempe proprement dit. Le bac de préchauffage contient pendant le cycle une certaine quantité d'eau qui assure le maintien de la température du bac de trempe. A la fin de l'immersion, le bac de trempe se vide dans l'évier à l'extérieur, la pompe aspire un peu d'eau dans le bac de préchauffage pour rincer le circuit et le bac de trempe (8 à 10 s). Dans le cas d'une trempe alternée, à la fin du cycle, le bac de préchauffage se remplit à nouveau pendant le temps émergé et un autre cycle commence (Figure 10 et Photo 2).

Les grains de mil ou de sorgho sont mis dans des paniers en acier inoxydable, de forme cylindrique. Puis les paniers sont placés dans le bac de trempe pour une trempe de durée, de température et de cycle, préprogrammés en fonction de l'expérimentation à réaliser.

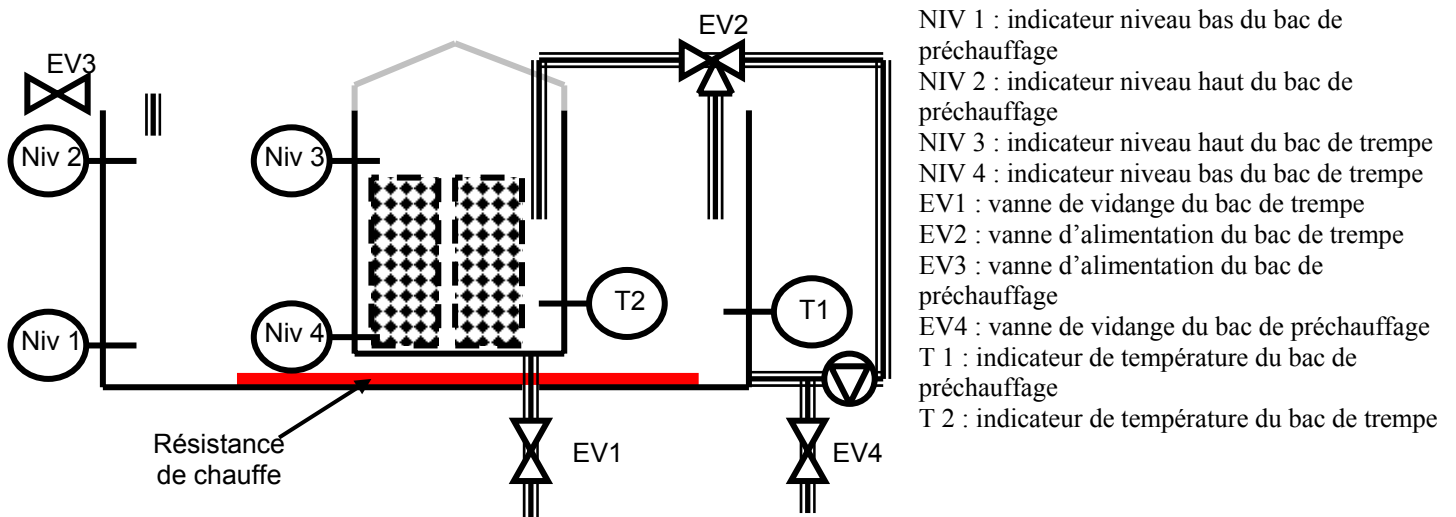


Figure 10: Schéma de principe de fonctionnement du bac de trempe



Photo 2: Module de trempe

6.3 Germination des grains

L'opération de germination a été réalisée dans un module de germination fabriqué en janvier 2001 par la société STEAP STAILOR (Photo 3).

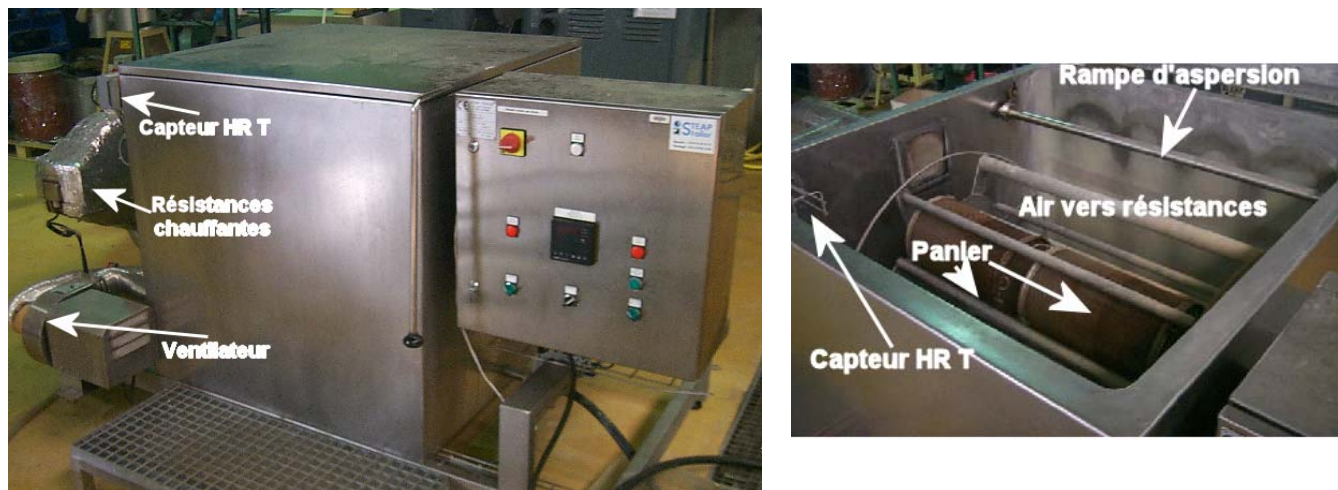


Photo 3: Module de germination

Les paniers contenant les grains trempés sont fixés sur le tambour qui tourne en continu à une vitesse de 0,30 tour/min (3 min 15 s en un tour), ce qui permet d'aérer les grains sans casser les radicules et tigelles. La germination s'effectue suivant un programme prédéfini de température, d'humidité relative et de durée.

Un régulateur programmable permet d'avoir une température et une humidité relative de consigne au sein de l'étuve, pour une durée déterminée.

La régulation de l'humidité se fait au moyen d'une **rampe d'aspersion**. Dès que l'humidité mesurée est inférieure à l'humidité de consigne, une aspersion d'eau fait remonter l'humidité. L'aspersion ne se fait pas directement sur les grains et cette eau est évacuée de l'étuve grâce à son fond penché et une ouverture vers l'extérieur.

La régulation de la température est faite sur l'air. Un **ventilateur** prélève de l'air humide au sein de l'enceinte et le fait entrer en contact avec une **résistance chauffante** avant de le réinjecter avec une humidité moindre dans l'étuve. Si la température réelle dépasse celle de consigne, un **clapet** situé sur le circuit d'air s'ouvre et prélève de l'air ambiant (frais) pour baisser la température.

6.4 Séchage des grains germés

Les grains germés, pour la validation du pilote de germination, ont été étalés sur du papier aluminium et séchés dans une étuve de laboratoire à 45°C pendant 24 h. Les essais préliminaires ayant montré que le séchage dans cette étuve n'était pas homogène, les grains germés dans le but de comparer leur aptitude à la germination ont été séchés dans un séchoir UTA² à 45°C. En nous référant à la littérature, nous avons cherché à stabiliser nos grains vers une teneur en eau de l'ordre de 9 % MH. Nous avons choisi une humidité relative de l'air de séchage en nous basant sur la formule d'Oswin modifiée proposée par Avaria et al. (2005),

² Séchoir à claies de laboratoire. La surface de claies est très supérieure à notre besoin. Les claies étaient chargées avec une couche d'environ 1 cm de grains germés. Cette couche est très aérée. Le séchage se fait par léchage avec une vitesse d'air supérieure à 2 m/s.

qui donne l'activité de l'eau (a_w en [0 1]) en fonction de la teneur en eau (M en g eau/g MS). La structure de la formule et les valeurs des paramètres sont les suivantes :

$$a_w = \frac{1}{\left[\left(\frac{A + BT}{M} \right)^C + 1 \right]}$$

$A = 53,808$; $T = \text{Température absolue (°K)}$
 $B = 0,1373$; $M = \text{teneur en eau base sèche}$
 $C = 2,724$

La valeur choisie est de 45% HR. Cela conduirait à une teneur en eau à l'équilibre de l'ordre de 8.9 % MH.

6.5 Dégermage des grains germés

Cette opération a été réalisée en frottant les grains séchés contre une claie métallique. Trois claies de mailles différentes ont été utilisées : 900, 1200 et 2000 μm pour les mils, les petits sorghos et les gros sorghos respectivement. L'opération est complétée par un tamisage et/ ou un tri manuel des radicelles et tigelles.



Photo 4: Dégermage des grains germés et séchés

Les grains une fois dégermés, ont été broyés avec un broyeur à marteaux de laboratoire (Perten, 3100). La granulométrie moyenne du broyat obtenu est inférieure à 100 μm . Il est ensuite conservé dans un bocal fermé dans une chambre thermostatée à 20°C.

Les pertes (P) pendant le maltage sont calculées selon la formule suivante :

$$P = m_i \times x_i - m_f \times x_f$$

avec

m_i = masse initiale des grains ;
 x_i = teneur en matière sèche initiale ;
 m_f = masse des grains après dégermage ;
 x_f = teneur en matière sèche des grains dégermés.

7 METHODES ANALYTIQUES

7.1 Caractérisation physico-chimique des grains

7.1.1 Poids³ de mille grains

Le poids de mille grains a été déterminé en utilisant un compteur automatique (Numigral) qui isole 1000 grains que l'on pèse. Le poids mesuré en base humide (PH) est ensuite ramené à la base sèche selon la formule :

$$PS = \frac{100 \times PH}{MS}$$

Avec PS = Poids de 1000 grains base sèche ; MS = Teneur en matière sèche des grains.

³ Le terme « poids » est incorrect et devrait être remplacé par le terme « masse ». Nous employons néanmoins « poids » car c'est celui utilisé dans la filière.

7.1.2 Mesure des dimensions des grains

Les dimensions des grains ont été mesurées avec une précision de 1/10 mm à l'aide d'un pied à coulisse numérique. 100 g de grains sont divisés avec un diviseur d'échantillon rotatif de laboratoire en deux lots. Un des lots est divisé de nouveau et ainsi de suite jusqu'à obtenir une masse d'environ 10 g. Ces grains ont été ensuite étalés sur une surface plate et 5 grains de mil ou de sorgho sont choisis visuellement de façon à couvrir l'ensemble des tailles (du plus petit au plus gros).

Pour chaque mesure, 5 grains sont positionnés sur un support et les dimensions sont mesurées selon trois directions (diamètres latéral, longitudinal et transversal).

Pour un échantillon, 15 mesures (5 x 3) comme décrites ci-dessus ont été faites. Les valeurs de chaque diamètre représentent la moyenne de 5 mesures.

7.1.3 Mesure de la vitrosité des grains

Vingt grains ont été coupés dans le sens longitudinal en leur milieu et positionnés sur un support (pâte à modeler), puis une note de 1 à 5 a été attribuée visuellement à partir de photos référence (Annexe 4). La note 1 correspond à un albumen 100 % vitreux et la note 5 à un albumen 100 % farineux.

7.2 Composition

Les teneurs en eau, protéines totales, matières minérales, amylose, sucres et acides organiques ont été déterminées dans les grains bruts et dans les grains maltés, broyés au Perten 3100 afin de connaître leur évolution au cours de la transformation. Les protéines ont aussi été dosées dans les extraits hydrosolubles des malts.

7.2.1 Eau

La teneur en eau des grains et des malts a été déterminée selon la Norme NF V03-707 qui consiste à sécher à une température comprise entre 130°C et 133°C, pendant 2 h environ 2 g de prise d'essai broyée. Les résultats, exprimés en pourcentage, représentent la perte de masse subie par le produit dans ces conditions. La teneur en eau des grains à la fin de la germination a été déterminée par séchage dans une étuve à 110°C pendant 24 h.

$$\text{Humidité(g/ 100g MH)} = (M_0 - M_1) \times \frac{100}{M_0} \quad \text{MH= Matière humide}$$

M_0 = masse (g) de la prise d'essai ;

M_1 = masse (g) prise d'essai après déshydratation.

7.2.2 Matières minérales (cendres)

La teneur en matières minérales est déterminée par gravimétrie après calcination de 5 g de prise d'essai à 500°C pendant 2 h.

$$\text{Teneur en cendres (g/ 100g MS)} = M \times \frac{100}{\text{PE} \times \text{MS}} \quad \text{M= masse (g) du résidu}$$

MS= matière sèche

PE= prise essai (g)

7.2.3 Protéines totales

Les protéines totales ont été dosées par la méthode de Kjeldhal (Norme NF V03-050) qui consiste à doser l'azote organique contenu dans un échantillon après minéralisation de ce dernier en présence d'acide sulfurique concentré et d'un catalyseur ($\text{CuSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{TiO}_2$). Le sulfate d'ammonium contenu dans la solution minéralisée libère, après alcalinisation, de

l'ammoniac qui est entraîné par distillation (Tecator automatique Kjeltex) et piégé dans une solution d'acide borique, puis titré avec une solution d'acide sulfurique 0,1N. Cette teneur en azote est ensuite convertie en protéines totales en utilisant le coefficient de conversion 6,25 pour le sorgho et 5,83 pour le mil (Adrian et *al.*, 1998). La teneur en protéines est exprimée en g pour 100 g de matière sèche.

$$\text{Teneur en protéines (g/100 MS)} = \frac{14 \times V_t \times K}{PE \times MS}$$

Avec,

14 = masse molaire de l'azote ; MS = matière sèche de l'échantillon (%)

Vt = volume du titrant (ml) ; K = coefficient de conversion de l'azote en protéines (g de protéines/g N)

PE = prise d'essai (g)

7.2.4 Amylose

La teneur en amylose et la température de gélatinisation ont été déterminées par Analyse Enthalpique Différentielle (A.E.D.) ou Differential Scanning Calorimetry (D.S.C.) avec un Perkin Elmer, Norwalk, Usa, selon la méthode de Mestres et *al.* (1996).

La DSC étudie le comportement endothermique ou exothermique d'un échantillon et son principe repose sur la mesure des différences d'enthalpie entre un échantillon et une référence soumis à une cinétique de chauffage et de refroidissement linéaires.

La capsule d'échantillon (10-11mg d'échantillon et 50 µl de L- α -lysophosphatidylcholine (2%)) et la capsule de référence (50 µl d'eau ultra pure) sont placées dans une enceinte adiabatique et soumises au cycle de température de 22 min suivant : montée de 25°C à 160°C (augmentation de 10°C/min), puis maintien à 160°C pendant 2 min et refroidissement de 160°C à 60°C (10°C/min).

A partir du thermographe enregistré, sont calculées :

- ↻ les températures de début, pic et fin de gélatinisation, déduites de la portion endothermique obtenue lors du chauffage entre 60 et 90°C ;
- ↻ L'aire du pic exothermique obtenue au cours du refroidissement entre 91 et 65°C, correspondant à la variation d'enthalpie associée à la formation d'un complexe entre amylose et le phospholipide ajouté. Cet exotherme est proportionnel à la teneur en amylose de l'échantillon qui est déterminée par comparaison à un témoin (100 % d'amylose de pomme de terre).

La quantité d'amylose rapportée à la matière sèche contenue dans l'échantillon est calculée en pourcentage de la variation d'enthalpie obtenue pour le standard d'amylose pure de pomme de terre.

$$\text{Teneur en amylose (g/100g MS)} = \frac{\Delta H (\text{échantillon})}{\Delta H (\text{amylose pure de pomme de terre})} \times 100$$

ΔH (échantillon) = variation de l'enthalpie de l'échantillon entre 65 et 91°C en J/g.

ΔH (amylose pure de pomme de terre) = variation moyenne de l'enthalpie de 2 échantillons d'amylose pure de pomme de terre entre 65 et 91°C en J/g.

7.2.5 Sucres et Acides organiques

Les sucres simples (saccharose, glucose et fructose) et les acides organiques (acides citrique, lactique et acétique) ont été extraits et dosés par chromatographie liquide haute performance

sur colonne d'exclusion d'ions (colonne pour analyse d'acides organiques par HPLC : Aminex HPX-87H, 300mm X7,8mm, BIORAD).

25 mg d'échantillon additionnés de 1ml de H₂SO₄ 0,005M agités pendant 1 h sur agitateur rotatif (Agitest 34050, Biobloc) puis centrifugés 5 min à 10000 g. 1ml du surnageant est filtré (filtre millipore 0,45 µm, 13 mn Millex) et 20 µl de ce filtrat sont injectés et élués à un débit isocratique de 0,6 ml/min avec la solution d'extraction suivi d'une double détection par réfractométrie et par l'UV à 210 nm.

La teneur en chaque sucre ou acide organique est calculée en se référant aux standards injectés sous forme d'étalon externe (la concentration injectée pour chaque étalon est de 1 mg/10ml H₂SO₄ 0,005M).

Les valeurs retenues pour les sucres et acide citrique sont uniquement celles issues de la détection IR alors que pour les autres acides organiques il faut une concordance entre les résultats IR et UV pour être valables.

Teneur en sucres (g/ 100g de malt sec) = (SRe x f x 100)/ (CRs x PE x MS/100)

Avec

SRe = Surface de réponse du sucre dans l'échantillon ;

F = facteur de dilution

CRs = coefficient de réponse du standard (surface du pic/quantité injectée)

PE = Prise d'essai ; MS : matière sèche du malt

7.3 *Evaluation de la qualité technologique des malts*

La qualité du malt a été évaluée en déterminant son pouvoir diastasique, son activité α et β - amylasique et en caractérisant son extrait hydrosoluble à chaud après brassage au RVA (Rapid-Visco-Analyser).

7.3.1 Pouvoir diastasique

Le pouvoir diastasique a été déterminé selon la méthode de Bernfeld (1955) modifiée par Giamarchi (1992). Elle consiste à faire agir, un extrait enzymatique sur une solution d'amidon. Les sucres réducteurs et fonctions réductrices ainsi libérés sont dosés par colorimétrie (540 nm) en présence de l'acide 3-5 dinitrosalicylique.

↪ Obtention de l'extrait enzymatique

50 ml d'eau ultra pure ou d'une solution de CaCl₂ (3,3g/l) sont ajoutés à 0,5 g de malt dans un flacon à vis selon que l'on veut déterminer le pouvoir diastasique à l'eau ou au CaCl₂. L'ensemble est placé dans le bain-marie à 40°C sous agitation pendant 1 h. Le mélange est ensuite filtré (papier filtre standard n°2). Les 40 premiers millilitres sont éliminés et le reste de filtrat (extrait enzymatique) obtenu est utilisé pour déterminer le pouvoir diastasique à l'eau.

↪ Dosage

0,5 ml d'extrait sont ajoutés à 0,5 ml d'amidon (10 g/l) et 1 ml de tampon acétate. Ce mélange est incubé 30 min à 40°C. La réaction est arrêtée avec 1 ml de solution d'acide 3-5 dinitrosalicylique qui, chauffé 10 min à 100°C forme avec les groupes réducteurs libérés de la réaction un complexe qui absorbe à 540 nm.

Une gamme d'étalon maltose est réalisée et dosée dans les conditions précédentes. L'activité enzymatique est déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage : Absorbance = f (concentration massique du maltose) et est exprimée en milli équivalent maltose/min/g de malt (U PD) selon la formule :

$$\text{Pouvoir diastasique (U PD)} = \frac{[\Delta \text{ maltose}]}{30} \times \frac{\text{Volume d'extraction (ml)}}{\text{PE} \times \text{MS}} \times f$$

$$[\Delta \text{ maltose}] = \text{Concentration en maltose (g/l)} = \frac{\Delta A}{a}$$

Avec,

ΔA = différence entre l'absorbance à 540 nm de l'échantillon et celle du blanc

a = coefficient directeur de la droite $\Delta A = f([\text{maltose}])$

f = facteur de dilution ; PE = prise d'essai ; MS = matière sèche

Un exemple de la courbe d'étalonnage est présenté en Annexe 5.

7.3.2 Activité α et β -amylasique

L'activité α -amylasique a été déterminée selon la méthode Bernfeld (1955) modifiée par Giamarchi (1992) et par kit Mégazyme.

7.3.2.1 Méthode de Bernfeld modifiée par Giamarchi (1992)

L'activité α -amylasique a été déterminée selon le même principe que celui du pouvoir diastasique après extraction des enzymes avec une solution de CaCl_2 (3,3g/l) et inactivation de la β -amylase à 68 °C pendant 15 min. L'activité β -amylasique est déduite par la différence entre le pouvoir diastasique au CaCl_2 et l'activité amylasique.

7.3.2.2 Méthode utilisant le kit Mégazyme

Les activités α et β -amylasiques ont été déterminées en respectant la procédure indiquée par Mégazyme. Afin de réduire le coût des analyses, seul le substrat de la réaction a été acheté chez Mégazyme, les solutions d'extraction et d'arrêt de la réaction étant préparées comme indiqué par Mégazyme à partir des réactifs du laboratoire.

↪ α -amylase

0,5 g de malt de sorgho ou de mil broyé sont mélangés au tampon d'extraction (acide malique, 1M + hydroxyde de sodium, 4M + chlorure de sodium, 1M + azide de sodium, 0,1 %) (volume total 100 ml). L'ensemble est placé dans un bain marie à 40°C pendant 20 min avec agitation toutes les 2 à 3 min. Cette phase d'extraction est suivie d'une filtration avec le papier filtre n° 2.

0,5 ml de l'extrait (dilué selon l'activité enzymatique estimée) est incubé pendant 10 min à 40°C en présence de 0,1 ml de substrat (Bolked p-Nitrophenyl maltoheptaoside (BPNPG7)) et d'une α -glucosidase). L' α -amylase présente dans l'extrait, libère par hydrolyse des liaisons α -1,4 du BPNPG7 une molécule de p-nitrophényl maltosaccharide qui sera à son tour scindée par l' α -glucosidase en une molécule de glucose et une molécule de p-nitrophénol qui a son maximum d'absorbance à 400 nm. L'absorbance obtenue à 400 nm est directement proportionnelle à l'activité α -amylasique exprimée en unité d'activité enzymatique par g de malt (U/g). Une unité d'activité enzymatique (Unité CERAPHA) est définie comme la quantité d'enzyme nécessaire pour libérer en présence d'un excès d' α -glucosidase, une μ mole de p-nitrophénol par minute à partir de BPNPG7.

$$\text{Activité alpha amylasique (U/g malt)} = \frac{\Delta A_{400}}{\text{Temps d'incubation (10 min)}} \times \frac{V_r}{P_e (0,1 \text{ ml})} \times \frac{1}{18,1} \times \frac{V_e}{PE} \times f$$

Avec,

ΔA = Différence d'absorbance à 400 nm entre l'essai hydrolysé et le blanc

V_r (1,7 ml) = volume réactionnel

V_e (100ml) = volume d'extraction

18,1 = coefficient d'extinction molaire (à 400nm) du P-nitrophénol dans 1 % de phosphate tri-sodique

f = facteur de dilution

PE = prise d'essai du malt (base humide)

Ce résultat est ramené à l'activité par g de malt sec.

↪ β -amylase

0,5 g de malt de sorgho ou de mil broyé sont mélangés avec 5 ml de tampon d'extraction (EDTA disodique, 1 mM + cystéine, 20 mM + Trizma base, 50 mM) dans un tube de centrifugation. L'extraction se fait à température ambiante pendant 1h avec agitation toutes 12 min. Le mélange est centrifugé à 1000 g pendant 10 min. Le surnageant représente l'extrait enzymatique.

L'activité enzymatique est dosée de la même façon que pour la α -amylase en présence de son substrat (mélange de p-nitrophényl maltopentaoside (PNPG5) et d'une α -glucosidase). La β -amylase présente dans l'extrait analysé libère par hydrolyse de cet oligosaccharide une molécule de maltose et de p-nitrophényl maltotriose qui sera à son tour scindée par l' α -glucosidase libérant une molécule de glucose et une molécule de p-nitrophénol qui absorbe à 400 nm. L'absorbance obtenue à 400 nm est directement proportionnelle à l'activité bêta-amylasique exprimée en U / g de malt. Une unité d'activité enzymatique (Unité BETAMYL) est définie comme la quantité d'enzyme nécessaire pour libérer une μ mole de p-nitrophénol par minute à partir de PNPG5.

L'équation utilisée pour exprimer l'activité alpha amylasique est valable pour l'activité bêta amylasique sauf que le volume d'extraction (V_e) est de 5 ml.

7.3.3 Extrait hydrosoluble à chaud du malt

Les teneurs en matière sèche (extrait sec) soluble et en azotes solubles de l'extrait de malt ont été déterminées et ramenées au malt sec. La couleur, le pH, la turbidité de l'extrait à chaud ont été aussi évaluées.

7.3.3.1 *Obtention de l'extrait hydrosoluble à chaud (EHC)*

L'extrait de malt à chaud est obtenu selon un programme de brassage au Rapid Visco Analyser (RVA) développé au CIRAD (Renan, 2001). Il comprend 3 phases principales :

↪ Extraction d'enzymes

Environ 23 g d'eau sont ajoutés à 2,5 g de malt (base sèche) dans la capsule RVA de façon à obtenir un poids final de 26 g. La capsule est placée dans le RVA pour en extraire les enzymes. La durée totale d'extraction est de 60 min. Elle est conditionnée à 35°C pendant 3 min puis la température est élevée à 40°C en 4 min (6°C/min), maintenue à 40°C pendant 20 min puis refroidie à 35°C (6°C/min). Une centrifugation à 4000 g pendant 10 min permet de séparer le surnageant contenant les enzymes du culot riche en amidon.

↪ Gélatinisation de l'amidon du culot

Après séparation de l'extrait enzymatique (15 ml), le culot est chauffé au RVA après avoir ajouté 2 ml d'eau. La durée totale de cette phase est de 36 min. La capsule contenant le culot est conditionnée pendant 2 min à 40°C puis la température est élevée à 90°C (6°C/min), maintenue 15 min avant d'être refroidie à 40°C (6°C/min).

☞ Saccharification

Le surnageant est mélangé au culot et placé au RVA à 40°C pendant 60 min pour permettre l'hydrolyse de l'amidon gélatinisé. Le mélange est ajusté à 50 g avec de l'eau et filtré avec le papier filtre n°2. Le filtrat obtenu est appelé moût ou extrait hydrosoluble à chaud.

7.3.3.2 Caractérisation de l'extrait hydrosoluble à chaud (EHC)

7.3.3.2.1 Matière sèche de l'extrait hydrosoluble à chaud du malt (MEC)

Une prise d'essai de 2 ml de filtrat est évaporée dans une capsule toute une nuit à 100 °C. La teneur en MEC est exprimée par rapport à 100 g de malt sec selon la formule :

$$\text{MEC (g/100 g MS)} = \text{MSm} \times \frac{(H + q)}{100 - \text{MSm}} \times \frac{100}{(100 - H)}$$

Avec,

MS = matière sèche du malt

MSm = matière sèche du moût (g/100g de moût)

H = teneur en eau du malt (g/100g matière humide)

$q = \frac{100 \times A}{\text{PE}}$ = quantité d'eau ajoutée à 100g de malt (g)

A = quantité d'eau ajoutée à la prise d'essai (g)

PE = prise d'essai du malt pour l'obtention du moût (g)

7.3.3.2.2 Protéines de l'extrait hydrosoluble à chaud du malt (PEC) / azote de l'extrait hydrosoluble (NEC)

Une prise d'essai de 10 ml de filtrat est minéralisée tel que décrit dans la méthode de Kjeldhal en présence d'un anti moussant. La teneur en azote de l'extrait est exprimée par rapport à 100g de malt sec selon la formule :

$$\text{NEC (g/100g MS)} = \frac{N \times V_t \times 14 \times 100}{\text{PE} \times 1000} \times \frac{\text{MEC}}{\text{MSm}}$$

Avec,

MS = matière sèche du malt

N = normalité du titrant (mole/l)

V_t = volume du titrant (ml)

14 = masse molaire de l'azote (g)

MEC = matière sèche d'extrait hydrosoluble à chaud (g/100g de malt sec)

PE = prise essai du moût (ml)

MSm = matière sèche du moût (g/100g de malt sec)

La teneur en protéines est obtenue en utilisant le coefficient de conversion de l'azote en protéines (6,25 pour le sorgho et 5,83 pour le mil).

Le degré de solubilité ou indice de solubilité ou indice de Kolbach (IK) est déterminé selon l'équation suivante :

$$\text{IK} = \frac{\text{teneur en azote soluble (g/ 100g de malt)}}{\text{teneur en azote du malt (g/ 100g de malt)}} \times 100$$



7.3.3.2.3 Couleur du moût

La couleur du moût est une indication de la couleur de la bière qui sera obtenue à partir de ce moût. La couleur du moût a été mesurée par spectrométrie à 430 nm selon la méthode de White (1995) utilisée pour l'orge et que nous avons légèrement modifiée.

Comme la couleur évolue au cours du temps, l'absorbance est mesurée sur les 30 premiers millilitres du filtrat (moût) dans les cuves standard contre l'eau ultra pure.

Les résultats sont exprimés en unité EBC selon la formule :

$$C = 25 \times A_{430} \times F$$

Avec

C : couleur en unité EBC ;

25 : coefficient de conversion en unité EBC ;

F : Facteur de dilution

A_{430} = Absorbance à 430 nm.

7.3.3.2.4 Filtrabilité

La filtrabilité est la durée nécessaire pour filtrer (filtre n°2) les 50 g de produit de brassage obtenu en 333.1.

7.3.3.2.5 Le pH du moût

Le pH du moût a été mesuré avec le pHmètre Inolab.

7.3.3.2.6 Aspect du moût : mesure de la turbidité

La turbidité du moût a été mesurée avec le turbidimètre de paillasse à microprocesseur LP2000. La valeur lue correspond à l'unité FTU. Lorsque cette valeur dépasse 40 FTU, l'échantillon est dilué avant lecture puis la valeur est multipliée par le facteur de dilution.

7.3.4 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Statistica (StatSoft Inc. 2005, version 7.1).

L'analyse de variance a été utilisée pour comparer les moyennes des données quantitatives après avoir vérifié qu'elles suivent une distribution normale. Le test de Newman-Keuls a été utilisé pour répartir les classes moyennes.

L'analyse de corrélation a été faite pour vérifier les liaisons possibles entre les différentes caractéristiques des malts d'une part et les caractéristiques des grains et des malts d'autre part.

L'analyse en composante principale (ACP) a été également réalisée. L'ACP est une méthode essentiellement descriptive qui permet de condenser l'essentiel des informations apportées par les variables observées. Cette méthode statistique est appliquée aux données quantitatives à partir de tableaux composés de n-lignes (individus) et de p-colonnes (variables) avec $p < n$. L'ACP recherche les facteurs indépendants les plus importants de l'espace multidimensionnel afin de condenser les informations contenues par les p variables en un lot réduit de variables synthétiques appelées « composantes principales ». Elle permet de visualiser des données multidimensionnelles dans des espaces de faibles dimensions (plans principaux) en perdant le moins d'informations possibles.

Chapitre III : Résultats et discussion

8 CARACTERISATION DES MALTS TRADITIONNELS OU SEMI INDUSTRIELS

Les caractéristiques des malts présentés dans cette partie sont celles des malts qui proviennent du Burkina Faso et des malts produits au niveau pilote au CIRAD lors de travaux antérieurs.

8.1 Malts du Burkina Faso

Les malts produits au Burkina Faso ont été analysés pour deux objectifs :

- ✎ Connaître leur qualité technologique (pouvoir diastasique total, activités α et β -amylasiques et teneur en sucres) et, la comparer à celle des malts produits au niveau pilote ;
- ✎ Savoir si au cours du maltage traditionnel il se produit une fermentation. C'est pourquoi les acides organiques (acides lactique et acétique) ont été dosés.

Tableau 8: Caractéristiques des malts en provenance du Burkina Faso

PD = pouvoir diastasique à l'eau (mg d'équivalent maltose/g de malt sec/min, UPD) ; α -amylase = activité α -amylasique (unité CERALPHA/ g de malt sec, U/g) ; β -amylase = activité β -amylasique (unité BETAMIL/ g de malt sec, U/g) ; les sucres et acides organiques sont exprimés en g/100g de malt sec								
Atelier de production	PD	α -amylase	β -amylase	α/β -amylase	Saccharose	Glucose	Fructose	Acide lactique
Faso Riibo 1	47	28	21	1,3	1,2	1,3	0,5	0,0
Misola1	108	68	60	1,1	2,3	2,8	0,9	0,0
Misola 2	85	78	49	1,6	2,6	4,0	1,2	0,0
Faso Riibo 2	96	44	27	1,6	2,7	2,2	1,0	0,0
IRD Ouaga	104	72	28	2,5	4,4	5,9	2,2	0,0
Atelier n°2 P/C 130	62	28	51	0,6	3,6	7,9	1,2	0,1
Atelier n°1 P/C 147	70	24	41	0,6	1,7	5,4	1,3	0,1
Atelier n°3 P/C 127	58	21	40	0,5	2,4	4,0	1,1	0,0
Atelier n°3 P/C 148	60	18	42	0,4	2,5	4,9	1,1	0,0
Atelier n°1 P/C 128	90	35	38	0,9	2,3	5,9	2,5	0,0
Atelier n°2 P/C 129	60	26	37	0,7	3,7	5,9	0,9	0,1
Ecart-type	2	1	2		0,1	0,1	0,1	0,0

n= 2

Les résultats (Tableau 8) montrent que les pouvoirs diastasiques varient de 47 UPD (Faso Riibo) à 108 UPD (Misola 1). Le pouvoir diastasique (104 UPD) du malt produit à l'IRD de Ouagadougou à partir du mil jaune est comparable à 108 UPD, valeur obtenue pour l'un des malts produits avec le sorgho rouge par l'entreprise Misola. Le pouvoir diastasique (47 UPD) du malt produit par Faso Riibo à partir du sorgho rouge est très faible par rapport à 96 UPD obtenu pour le malt produit par la même entreprise à partir du mil jaune. On constate aussi que les malts provenant de Misola, tous produits avec le sorgho rouge ont des pouvoirs diastasiques différents (85 et 108 UPD). Ce constat rejoint celui de Traoré et *al.*, 2004) qui

ont rapporté une grande variation des activités amylasiques des malts produits au Burkina Faso.

Quant aux activités α et β -amylasiques, elles varient de 18 (Atelier n°3 P/C 148) à 78 unités CERALPHA/g de malt (Misola 2) et de 21 (Faso Riibo 1) à 60 unités BETAMIL/ g de malt (Misola 1) respectivement. Dans l'ensemble, les rapports d'activité α/β -amylasiques varient de 0,4 à 2,5. On note également que les malts des petits ateliers ont une activité β -amylasique plus importante que l'activité α -amylasique. Ces malts sont bons pour le dolo.

Les teneurs en saccharose, glucose et fructose varient de 1,24 (Faso Riibo1) à 4,40 g/100 g (IRD), 1,27 (Faso Riibo 1) à 7,86 g/100 g (atelier n°2 P/C 130) et 0,46 (Faso Riibo 1) à 2,53 g/100 g (atelier n°1 P/C 128) respectivement. L'atelier n°2 a une teneur en sucres simples élevée et comparable à celle obtenue par Traoré et *al.* (2004) dans des malts provenant d'une germination avec une phase de maturation. Ces auteurs ont montré que la maturation augmente de 30, 89 et 85 % la teneur en saccharose, glucose et fructose du malt respectivement.

Les acides lactique et acétique sont présents seulement dans trois malts de petits ateliers. Ils sont la conséquence probable d'une fermentation hétérolactique lors de leur fabrication ou de leur conservation.

8.2 *Malts produits au CIRAD lors d'études antérieures*

Pour ces malts, les pouvoirs diastasiques ont été déterminés après extraction de l'extrait enzymatique avec de l'eau (PD eau) ou une solution de CaCl_2 (PD CaCl_2). L'activité α -amylasique a été déterminée par colorimétrie après inhibition thermique de la β -amylase dans l'extrait au CaCl_2 . L'activité β -amylasique a été estimée par la différence entre le PD CaCl_2 et l'activité α -amylasique puis, le pourcentage de l' α -amylase a été calculé (Tableau 8).

En plus des analyses faites sur les malts du Burkina Faso, l'extrait hydrosoluble à chaud (EHC) obtenu après un brassage au RVA des malts a été caractérisé (Tableau 9).

8.2.1 *Caractéristiques des malts*

Les résultats (Tableau 8) montrent que les pouvoirs diastasiques à l'eau sont supérieurs aux pouvoirs diastasiques au CaCl_2 . Ils varient de 29 et 16 UPD (IRAT 9, TA/GH) à 117 et 85 UPD (Kassougou, TN/GN) pour le PD eau et le PD CaCl_2 respectivement. Renan (2001) a également obtenu des pouvoirs diastasiques très variés en fonction des variétés (12- 502 milli équivalents /g de malt sec/ min).

Les activités α et β -amylasiques varient respectivement de 12 et 4 (IRAT 9, TA/GH) à 65 et 20 milli équivalent/g de malt sec/min) (Kassougou, TN/GN) Ces valeurs correspondent également aux variétés à faible et à pouvoir diastasique élevé.

Le rapport α/β est compris entre 1,8 (Silmiga, TA/GH) et 4,6 milli équivalents/g de malt sec/min (Kassougou, TA/GS). Les malts ont une activité α -amylasique plus élevée comparée aux malts des petits ateliers précédemment présentés. Kassougou serait intéressant pour les farines infantiles car elle présente une importante activité α -amylasique.

Les teneurs en saccharose et glucose suivent en général la même évolution que les activités amylasiques. On note que Kassougou TN/GS qui a l'activité amylasique la plus élevée a aussi les teneurs en saccharose (5,45 g/100 MS) et en glucose (6,58 g/100 MS) les plus élevées.

L'acide acétique est présent dans tous les malts analysés. Les malts provenant de TA/GH et TN/GS ont tous de l'acide lactique. La trempe en continu et la germination à température élevée favoriseraient une fermentation. Une durée de trempe très longue (24 h) sans aération constitue une condition d'anaérobiose et de fermentation.

Tableau 8: Caractéristiques des malts produits au CIRAD lors d'études antérieures

TA = trempe alternée ; GH germination haute température ; TN = trempe normale ; GS = germination standard ; PD milli équivalent/g de malt sec/min, (UPD) ; α -amylase (activité α -amylasique, milli équivalent/g de malt sec/min, (U/g)) ; β -amylase = activité β -amylasique, milli équivalent /g de malt sec/ min, (U/g)) ; Protéines, amylose, sucres et acides organiques sont exprimés en g/100g de malt sec

Variétés	Essai maltage	PD eau	PD CaCL2	α -amylase	β -amylase	α -/ β -amylase	Protéines	Amylose	Saccharose	Glucose	Fructose	A.lactique	A. acétique
Silmiga	TA / GH	48	30	20	11	1,8	8,2	23	1,86	1,9	0,3	0,0	0,0
Kassougou	TA / GH	67	41	29	12	2,4	6,9	18	4,04	4,8	0,7	0,1	0,0
IRAT 9	TA / GH	29	16	12	4	3	11,4	20	0,59	1,1	0,3	0,1	0,1
Framida	TA / GH	60	40	28	12	2,3	13,8	16	1,9	2,4	0,5	0,1	0,1
Silmiga	TA / GS	100	68	52	16	3,3	7,3	14	3,38	3,3	0,4	0,0	0,0
Kassougou	TA / GS	103	67	55	12	4,6	7,1	11	4,51	5,8	0,6	0,0	0,0
IRAT 9	TA / GS	51	29	21	8	2,6	11,3	19	0,92	1,2	0,5	0,0	0,1
Framida	TA / GS	96	62	49	13	3,8	12,7	11	1,5	1,6	0,4	0,0	0,0
Silmiga	TN / GS	109	82	64	18	3,6	7,4	14	4,68	4,6	0,5	0,0	0,0
Kassougou	TN / GS	117	85	65	20	3,3	6,7	11	5,45	6,6	0,8	0,0	0,0
IRAT 9	TN / GS	47	28	21	7	3	11,6	18	1,07	1,9	0,5	0,0	0,1
Framida	TN / GS	106	80	61	19	3,2	13,1	10	3,88	3,8	0,8	0,0	0,1
Ecart-type		2	2	3	3		0,5	1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0

n= 2

Tableau 9: Caractéristiques de l'extrait hydrosoluble à chaud des malts produits au CIRAD lors d'études antérieures

MEC = matière sèche de l'extrait (g/100g de malt sec) ; NEC = azote soluble (g/ 100g malt sec) ; IK = indice de Kolbak (% azote soluble/azote malt) ; Vmax = viscosité maximale (unité RVA) ; Vmin = viscosité minimale (unité RVA) ; Vf = viscosité finale (unité RVA) ; Couleur (unité EBC) ; Turbidité (FTU) ; Durée de filtration totale (min)

Variétés	Essai maltage	MEC	NEC	IK	Vmax	Vmin	Vf	Couleur	pH	Turbidité	Durée filtration
Silmiga	TA / GH	72,2	0,3	19,8	29	0,2	3	3,0	5,9	17	32
Kassougou	TA / GH	76,5	0,3	26	40	-0,5	-0,1	5,7	5,6	41	15
IRAT 9	TA / GH	64,4	0,3	15,9	55	13,3	21,6	5,0	5,7	41	57
Framida	TA / GH	65,2	0,5	21,7	25	-2,7	-0,3	5,8	5,6	47	16
Silmiga	TA / GS	78,1	0,3	32,9	11	-0,4	0	4,7	5,8	34	10
Kassougou	TA / GS	79,8	0,4	31,6	5	-1,2	0,3	6,4	5,7	29	17
IRAT 9	TA / GS	65,9	0,3	16,4	44	5,6	11,2	5,9	5,8	66	52
Framida	TA / GS	68,9	0,5	26	11	-0,5	0,5	7,5	5,6	50	10
Silmiga	TN / GS	78,5	0,3	28,1	7	-1,6	0	5,9	5,8	54	15
Kassougou	TN / GS	79,9	0,3	30,7	5	-2,3	-1,8	6,4	5,7	72	33
IRAT 9	TN / GS	69,8	0,4	22,1	41	3,5	8,6	7,1	5,5	85	78
Framida	TN / GS	70,2	0,6	30,4	5	-2,1	-1,3	8,7	5,6	89	30
Ecart-type		0,7	0,1		3	2	3	0,3	0,2	4	5

n=2

L'ANOVA appliquée aux données du Tableau 8 montre un effet variétal et un effet des conditions de maltage significatifs au seuil de 5% sur le pouvoir diastasique, les activités α et β -amylasiques, les teneurs en amylose, en saccharose et glucose des malts.

Le test de Newman-Keuls montre qu'il n'y a pas de différence entre les pouvoirs diastasiques des malts produits avec une trempe alternée ou continue. Il révèle par contre une différence par rapport aux variétés et conditions de germination. Au niveau du pouvoir diastasique, Silmiga, Framida et Kassougou ne sont pas différents ; seul IRAT 9 se démarque du lot. Quant aux conditions de germination, le test classe les malts en deux groupes :

- ↪ Le groupe 1 de pouvoir diastasique, d'activité α et β -amylasiques faibles issu d'une germination haute température
- ↪ Le groupe 2 de pouvoir diastasique, d'activité α et β -amylasiques plus élevés issu d'une germination standard.

8.2.2 Caractérisation de l'extrait hydrosoluble à chaud

On constate que les matières sèches de l'extrait (MEC) varient de 64,4 (IRAT 9, TA/TH) à 79,9 g/ 100 g de malt sec (Kassougou, TN/ GS). Ces résultats sont comparables à 66-77 g/ 100 g de malt sec rapporté par Demuyakor et Ohta (1992). Les variétés qui ont un MEC faible ont également des activités amylasiques faibles. Les résultats de Agu (2005) vont dans le même sens.

L'indice de Kolbach varie de 15,9 (IRAT 9, TA/GH) à 32,9 g/100g de malt sec (Silmiga, TA/ GS). Ces valeurs sont de loin inférieures à 46,6 g/100 g de malt sec rapporté par EtokAkpan (2004) pour les sorghos. Sans négliger les conditions de maltage et la différence variétale, ces faibles valeurs pourraient s'expliquer par les conditions de brassage différentes. La phase de saccharification qui permet aux protéases présentes dans le malt d'hydrolyser les protéines et d'enrichir le moût en azote et acides aminés solubles se déroule à 40°C, inférieure à 50°C, température optimale rapportée par Goode et Arendt (2003) pour les protéases du sorgho.

Les couleurs varient de 3 unités EBC (Silmiga, TA/GH) à 8,7 unités EBC (Framida, TN/GS). Ces valeurs correspondent respectivement aux malts pâle et ambré. Elles sont dans la gamme des couleurs du moût rencontrée dans la littérature. Odibo et *al.* (2002) ont également rapporté que la couleur du moût varie avec la variété. Elle varierait aussi avec la teneur en protéines et en sucres dans le moût qui favorise la réaction de Maillard pendant le brassage et par conséquent une augmentation de couleur.

Le pH du moût est compris entre 5,5 et 5,9. Ces valeurs sont comparables à 5,0-5,5 recommandées par Taylor et *al.* (1994) pour avoir des concentrations élevées en sucres fermentescibles dans le moût.

La turbidité varie de 17 à 89 FTU. Il est difficile de comparer ces valeurs à celles de la littérature parce qu'en brasserie la turbidité est mesurée par colorimétrie et les résultats exprimés en unité EBC.

La durée de filtration varie de 10 min à 78 min. Il serait difficile de produire la bière avec IRAT 9 qui présente une durée de filtration très longue quelle que soit les conditions de maltage. Cette variété produirait moins de β -glucanase que les autres. D'après Agu (1995), une faible filtrabilité du moût est due à une synthèse de β -glucanase pendant le maltage.

L'ANOVA portée sur des données de ces extraits (Tableau 9) montre un effet variétal et de condition de maltage significatif au seuil 5% sur la MEC, NEC, la couleur et la turbidité. La teneur en protéines du malt dépend seulement de la variété.

Le tableau de corrélation (Annexe 7) montre que le pouvoir diastasique, les activités α et β -amylasiques sont corrélées négativement avec la teneur en amylose, les viscosités maximale, minimale et finale au cours de la phase de gélatinisation de l'amidon lors du brassage. Elles sont par contre corrélées positivement avec l'indice de Kolbach, la matière sèche hydrosoluble, la teneur en saccharose et en glucose.

Ces corrélations pourront servir d'indicateur pour un contrôle qualitatif des malts si on ne dispose pas d'outil pour déterminer les activités amylasiques.

8.3 *Bilan*

Après caractérisation des malts traditionnels et des malts produits au CIRAD lors d'études antérieures, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✧ Les malts présentent une très grande variabilité aussi bien au niveau de leurs activités amylasiques qu'au niveau de leur composition en sucres simples, en acides organiques et en acides.
- ✧ Il existe une hétérogénéité dans la qualité des malts au sein d'un même atelier de production avec la même matière première.
- ✧ La germination haute température n'est pas favorable pour un bon développement des activités amylasiques.
- ✧ La méthode de brassage utilisée au CIRAD peut bien permettre de discriminer les malts. Cependant il serait souhaitable d'augmenter la température de saccharification et de faire une saccharification à plusieurs régimes. Ce programme devant permettre de balayer aussi bien les températures optimales des protéases (50°C) que des amylases (50-65°C) suivi de 75°C pour inactiver les enzymes et standardiser la méthode.
- ✧ Il serait également nécessaire de déterminer la filtrabilité seulement sur les 30 premiers millilitres du filtrat afin de pallier au problème de filtration difficile des dernières gouttelettes et de standardiser la méthode.

Tenant compte de ces observations il est nécessaire de maîtriser parfaitement les conditions de maltage si on désire avoir des malts comparables d'une production à l'autre.

9 *MISE AU POINT DU PILOTE DE MALTAGE*

9.1 *Introduction*

La mise au point du pilote de maltage est essentielle pour l'étude de l'aptitude au maltage des variétés ainsi que pour identifier les paramètres influents sur la qualité des malts et leur optimisation. Il se compose d'un équipement de trempe et d'un équipement de germination.

Préalablement à mon travail, la répétabilité des essais sur ces équipements n'avait pas été étudiée. Par ailleurs, les opérateurs avaient remarqué une forte influence de la position des paniers dans l'équipement de germination.

Sur ces bases, une démarche de vérification du fonctionnement, d'amélioration et d'étude de la répétabilité du pilote de maltage a été conduite. Elle est présentée ci-dessous.

9.2 Diagnostic du fonctionnement du pilote de maltage

Un diagnostic du fonctionnement du pilote de maltage a été réalisé afin de maîtriser son fonctionnement et de mieux décider des paramètres influents sur la qualité du malt et pouvant être optimisés au niveau de ce pilote. Les conclusions sont rapportées dans le Tableau 10. Nous avons augmenté la capacité du bac de trempe et modifié l'étuve de germination afin d'accroître l'ergonomie et la productivité des essais.

Tableau 10: Approche utilisée pour le diagnostic du fonctionnement du pilote de maltage

Dispositifs expérimentaux	Paramètre de contrôle	Méthode utilisée	Observations	Travail à faire
Bac de trempe	Température de l'eau de trempe	Mesure avec le thermomètre et comparaison avec consigne	30°C : OK 25°C et 35°C : déviation de plus de 2°C	Modifier la régulation. Reste à faire
	Homogénéité de température	Thermomètre manuel	La température n'est pas homogène dans le bac	Installer un dispositif d'agitation ou de circulation. Reste à faire.
	Capacité du bac de trempe / Paniers	Mesure des dimensions du bac/paniers	Capacité du bac de trempe < capacité de l'étuve de germination	Fabriquer des paniers plus petits pour augmenter indirectement la capacité du bac de trempe
Etuve de germination	Humidité relative / Température	Suivi des mesures	Montée difficile en humidité relative voire impossible en cas d'eau froide (18-20°C) et de débit important (~65% au lieu de 85 % souhaité)	Mettre un système de préchauffe d'eau qui circule dans la rame d'humidification et diminution du nombre de buses
		Contrôle par capteur d'humidité / température autonome	Saturation en eau du capteur par dépôt de gouttelettes	Changer la position du capteur
		Suivi des mesures	Abaissement de l'HR (5-10% en fonction de celle de l'air ambiant) lors du refroidissement par renouvellement d'air	Climatiser l'environnement du pilote pour permettre un travail en toutes saisons : en cours
		Observation directe	De l'air très chaud se dégage pendant 10 minutes après l'arrêt du ventilateur. Cela s'explique par des résistances électriques à forte inertie, mal ventilée.	Le dispositif de chauffe de l'air devrait être refait. Cela n'a pas été possible au cours du stage. On a alors procédé en arrêtant la ventilation 10 minutes après l'arrêt de la régulation
	Humidité des grains	Pesée des grains après essorage	Séchage des grains, poids différents en fonction de la position dans l'étuve (11-56 g/100g de grain base humide : mauvaise répartition de l'aspersion et de l'air	Rendre homogène la répartition d'air dans l'étuve
	Interaction entre régulation de l'air et aspersion	Suivi des actionneurs et pesée des grains	L'aspersion des parois pour humidification de l'air « mouille » certains paniers	Rendre indépendant l'humidification de l'air et le mouillage des grains

9.3 Modification du pilote de maltage

9.3.1 Augmentation de la capacité du bac de trempe

Nous avons constaté que le bac de trempe ne pouvait contenir que 4 paniers vendus par le constructeur du module de germination (Photo 5) alors que l'étuve de germination pouvait en contenir 8. Ces paniers sont en grille inoxydable de forme cylindrique de 17 cm de diamètre et de 38 cm de hauteur.

Des paniers plus petits ont été fabriqués par l'atelier mécanique du CIRAD. Ils ont été dimensionnés en tenant compte des dimensions du bac de trempe, de la quantité de malt nécessaire pour toutes les analyses de contrôle de la qualité du malt (30 g) et des pertes de matières pendant le maltage (40 %). La quantité ainsi calculée a été augmentée de 30 % par mesure de sécurité. Deux types de paniers en tissus métalliques inox (GANTOIS) ont été fabriqués :

- ↪ 8 paniers destinés à la production des malts de 22 cm de hauteur et 10 cm de diamètre ;
- ↪ 8 paniers de suivi de l'absorption d'eau pendant la trempe des grains de 10 cm de hauteur et 5 cm de diamètre ;

Pour chaque type de paniers, deux types de tissu métallique ont été utilisés selon le diamètre des grains :

- ↪ Un tissu d'ouverture nominale de 2,12 mm et d'un fil de 0,71 mm de diamètre avec un pourcentage de vide de 55 % a été utilisé pour fabriquer les paniers du sorgho à gros grains ;
- ↪ Un tissu d'ouverture nominale de 710 μm et d'un fil de 355 μm avec un pourcentage de vide de 45 % a été utilisé pour fabriquer les paniers destinés au mil ou au sorgho à très petits grains.

Ainsi, un essai complet correspond à 16 paniers qui rentrent dans le bac de trempe (Figure 11).

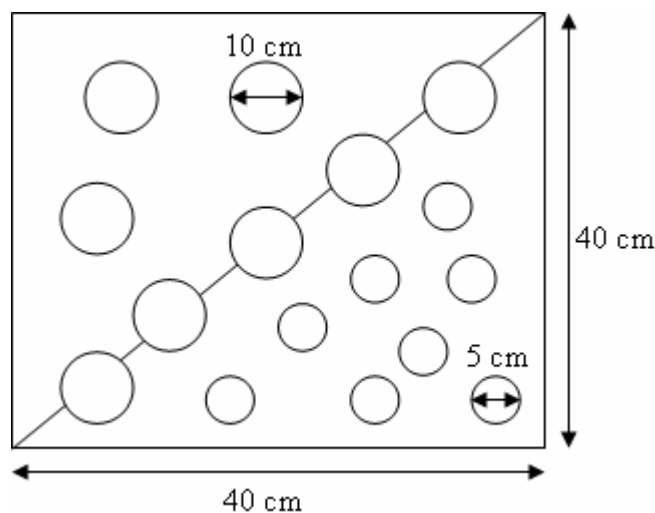


Figure 11: Positionnement des paniers dans le bac de trempe



Photo 5: Paniers utilisés pour la trempe et la germination

9.4 *Modification de l'étuve de germination*

Quatre principales modifications ont été apportées à l'étuve de germination. Elles sont détaillées dans les paragraphes suivants.

9.4.1 *Installation d'un bac thermostaté de préchauffage de l'eau et réduction du débit d'eau d'humidification*

Une pulvérisation d'eau courante est utilisée pour augmenter l'humidité dans l'enceinte. L'eau commence par se réchauffer depuis sa température initiale (18 à 20°C) jusqu'à la température humide de l'air puis elle s'évapore.

Dans la configuration initiale, il y avait quatre buses de brumisation. Le débit d'eau était trop important par rapport à la quantité d'énergie apportée par l'air pour permettre le réchauffement et la vaporisation. Le fonctionnement constaté montrait que la température d'air humide restait vers 22°C.

Pour pouvoir atteindre des humidités relatives plus élevées, nous avons cherché à réduire le besoin de réchauffement de l'eau. Pour cela, un préchauffage de l'eau a été fait grâce à un serpentin en cuivre immergé dans un bac thermostatique réglé à la température humide de l'air souhaitée et le débit d'eau a été réduit par obturation de trois des quatre buses de brumisation.

Ces modifications ont permis une augmentation sensible de la température humide et de l'humidité relative dans l'enceinte. Cependant, il a été constaté que l'humidité relative ne pouvait être augmentée au-delà de 85 % et qu'elle variait cycliquement avec une période journalière. Elle était plus basse la nuit que le jour.

Nous avons alors conclu que l'humidité relative maximale était définie par les ponts thermiques présents sur l'équipement. Cela a été confirmé par la suite.

Afin de permettre un travail reproductible toute l'année, la régulation en température de l'ambiance autour du pilote est nécessaire. Une salle devrait être équipée à cet effet et le pilote devrait y être installé à l'automne.

9.4.1.1 Répartition homogène d'air dans l'étuve

Nous avons constaté que les grains du côté ventilateur (arrivée d'air) séchaient au lieu de germer contrairement à ceux situés du côté moteur (opposé à l'arrivée d'air). Lorsque les paniers étaient placés juste près de l'entrée d'air, la teneur en eau était comparable à celle des grains non germés (13 g/100g de grains base humide). Après ce constat, nous avons déplacé les paniers de germination vers le centre de l'étuve lors des prochains essais de façon à les rapprocher de ceux du côté moteur. Les teneurs en eau des grains dans cette position sont passées à 11-25 g d'eau/g de grains base humide. Deux hypothèses ont été émises pour expliquer ce phénomène :

- ⌘ Forte probabilité du chemin préférentiel de l'air : l'entrée et la sortie de l'air de l'étuve étant situées du côté ventilateur, il ne passerait pas au niveau du côté moteur (Figure 12 et Photo 3)
- ⌘ Mauvaise humidification d'air :
 - ✱ l'air chaud qui arrive dans l'étuve est sec : l'humidification a lieu en haut de l'étuve au niveau des buses.
 - ✱ le fond de l'étuve penché côté moteur entraîne une évacuation de l'eau aspergée et l'empêche de réguler l'humidité relative de l'enceinte.

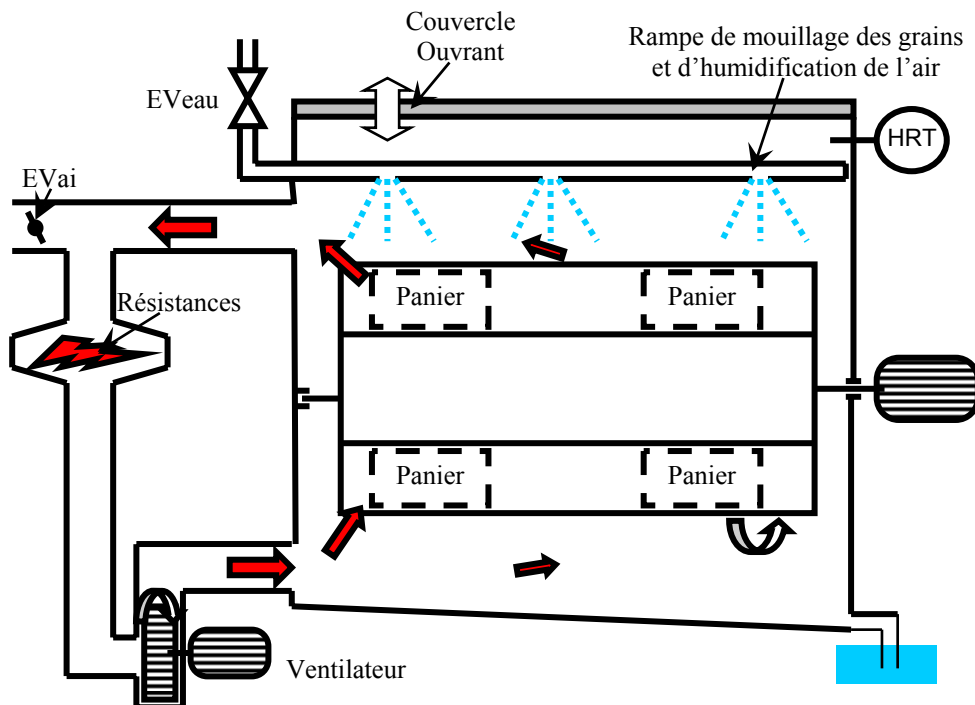


Figure 12 : Etuve de germination sans canalisation d'air

Pour à la fois éviter le problème de chemin préférentiel de l'air et mieux contrôler l'humidité relative au sein de l'étuve, des améliorations ont été faites.

9.4.1.1.1 Installation dans l'étuve d'un système de distribution d'air

Ce travail a été réalisé en 3 phases :

Phase 1

Deux tuyaux PVC, l'un relié à l'arrivée d'air rentrant dans l'étuve et l'autre relié à la sortie d'air ont été placés dans l'étuve. 3 trous rectangulaires de même largeur (15 mm) et de même longueur (150 mm) ont été percés le long de chaque tuyau sans aplanir. Aucun changement par rapport à la différence observée entre les paniers avant cette installation n'a été observée.

Phase 2

Deux des 3 sections précédemment créées ont été partiellement obstruées de façon à obtenir des sections plus grandes au fur et à mesure qu'on s'éloigne du côté ventilateur (Figure 13). Ceci avait pour but de maintenir un débit d'air constant en supposant que la vitesse d'air diminue quand on s'éloigne du ventilateur.

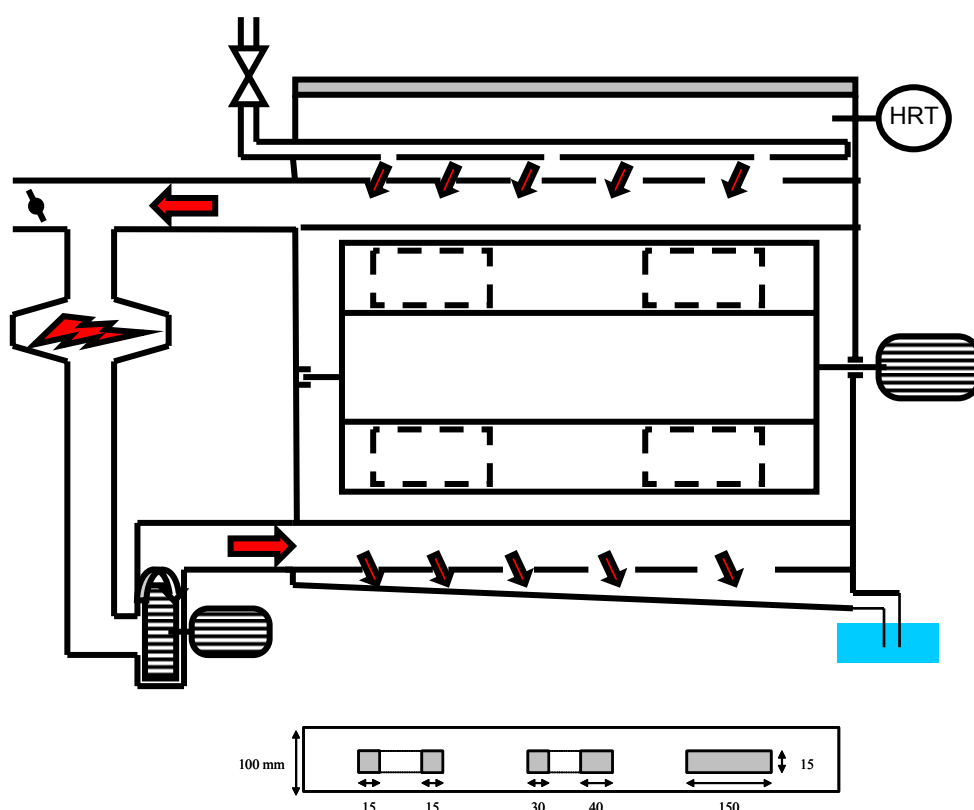


Figure 13 : Répartition des cinq sections de passage d'air sur le tuyau de canalisation d'air

Les tests, faits pour valider cette modification, n'ont pas conclu aux résultats escomptés mais ont montré une diminution du degré de dessèchement des grains du côté du ventilateur par rapport à ceux du côté opposé. Avant l'installation du système de distribution d'air, on notait un dessèchement total juste à l'entrée d'air, une différence de teneur en eau de l'ordre de 25% entre les paniers côté ventilateur et éloignés de l'entrée d'air et les paniers côté moteur et de 11% entre les paniers d'un même côté. Après canalisation, cette différence est passée à 10 % entre côté ventilateur et moteur. On n'observe plus de dessèchement total des grains à l'entrée d'air ni une différence entre les paniers d'un même côté.

Ces résultats nous ont amené à penser que les ouvertures faites le long des tuyaux de canalisation d'air étaient trop espacées entre elles pour assurer un débit d'air homogène le long des tuyaux. Cette réflexion a conduit à la phase 3 de cette modification.

Phase 3

Les deux tuyaux précédents ont été remplacés par deux autres possédant des trous à égale distance le long d'une génératrice. Cette configuration correspond à un équilibrage dynamique des flux d'air dans lequel les tubes jouent le rôle de plénum.

Pour dimensionner les trous, il nous faut:

- * Le débit d'air pulsé dans l'étuve. Le débit d'air réel pulsé dans l'étuve a été mesuré avec l'anémomètre (Solomat, anémomètre à fils chaud) au niveau des sections ouvertes des anciennes canalisations. Ce débit a été ensuite comparé au débit théorique du constructeur du ventilateur (cf. abaque, Annexe 6) afin de vérifier la caractéristique de fonctionnement du ventilateur
- * La vitesse maximale d'air dans l'étuve. Elle est obtenue via la courbe caractéristique du ventilateur.

Le débit évalué est comparable à celui indiqué par le constructeur A.E.I.B., de l'ordre de 55 m³/h. d'après les caractéristiques du ventilateur. Ce débit reste presque constant pour des pertes de charges comprises entre 100 et 200 Pa. Le circuit aéraulique étant très simple, nous avons considéré qu'il était possible d'ajouter environ 100 Pa de pertes de charges au circuit pour réaliser la répartition. Le choix a été de les répartir entre l'entrée et la sortie d'air à parts égales. Selon Comolet (1997), la relation entre la vitesse d'écoulement d'un gaz incompressible par un orifice « mince paroi » et la différence de pression peut être déterminée par la loi de Bernoulli sous sa forme la plus simple :

$$V = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} ;$$

avec ρ = masse volumique de l'air ; ΔP = Pertes de charges

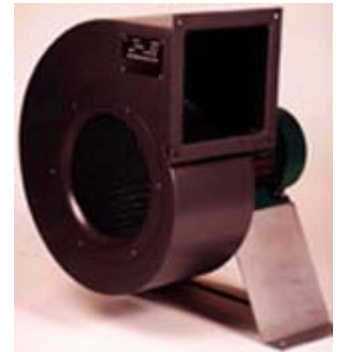
Dans notre cas, pour une perte de charge de 50 Pa, nous devrions avoir une vitesse d'air de 10 m/s. Pour un débit de 55 m³/h, cela correspond à une surface ouverte de 15 10⁻³ m². ($S_t = \frac{Q_v}{V} = N \times S_{\text{trou}} = N \times \pi \times \frac{d^2}{4} = 1,53E - 03 \text{ m}^2$)

Le Nombre de trous (N) a été déterminé en fixant son diamètre (d)

$$N = 1,53E - 03 \times \frac{4}{\pi \times d^2}$$

Nous avons testé différentes combinaisons entre le nombre de trous (N) et leur diamètre (d) (Tableau 11).

Les deux premiers choix ne sont pas réalisables car le nombre de trous est trop important. La solution de réaliser 20 trous de 10 mm n'est pas retenue car l'espacement entre chaque trou serait trop important (4,5 cm) donc la répartition de l'air le long de du tuyau risquerait de ne pas être homogène. Nous avons donc choisi de réaliser 30 trous de 8 mm de diamètre espacés de 30 mm le long de la génératrice de la canalisation d'air (Figure 14).



Ventilateur centrifuge
HCAE XI 340 MONO ;
230V/1,4A/50 Hz

Tableau 11: Nombre d'orifices à prévoir en fonction du diamètre

d (mm)	4	6	8	10
S (m ²)	1,26E-05	2,83E-05	5,02E-05	7,85E-05
N	122	54	30	20
Choix	Impossible à réaliser	Impossible à réaliser	Possible	possible

Les trous ont été réalisés avec une perceuse électrique.

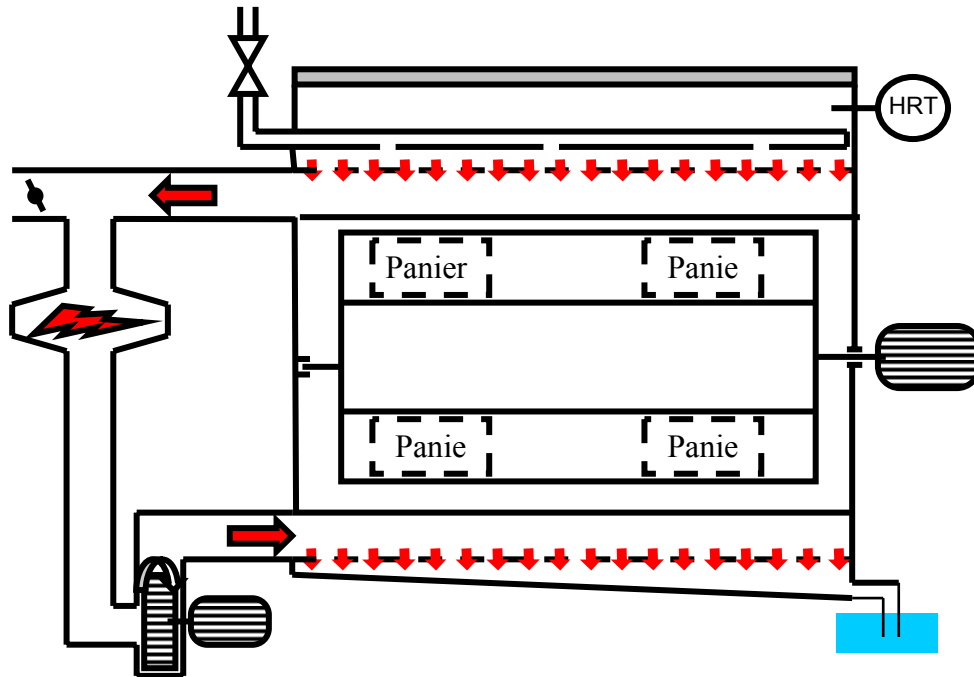


Figure 14: Répartition de 30 ouvertures sur la canalisation d'air

9.4.1.1.2 Installation d'un système d'humidification dès son arrivée dans l'étuve

L'étuve, à l'origine, a un fond oblique qui permet d'évacuer l'eau aspergée pour l'humidification de l'enceinte. Un côté de l'étuve a été surélevé de façon à la positionner horizontalement afin d'avoir de l'eau au fond de l'étuve en permanence pendant la germination. Il est important de maintenir une épaisseur d'eau constante (1 cm) car elle assure l'humidification de l'air chaud dès son arrivée dans l'étuve, et donc d'avoir une humidité homogène dans l'enceinte de l'étuve.

Un tissu hygroscopique a été placé également à cheval sur le tube de guidage d'air de fond de l'enceinte. Ses extrémités trempent dans l'eau. L'air doit passer au contact et en partie à travers ce tissu. La vitesse d'humidification de l'air est ainsi sensiblement augmentée. Cela est utile après des ouvertures pour prélèvement.

Au bilan de cette partie qui consistait en une répartition et une humidification d'air de façon homogène, les tests de vérification de la teneur en eau montrent qu'il n'existe plus de différence entre les teneurs en eau des différents paniers.

9.4.1.2 *Modification de la position du capteur*

Le capteur était positionné près de la paroi et du couvercle qui sont les zones froides de l'étuve ; les eaux condensées entraînaient une saturation du capteur lorsque l'humidité relative de l'enceinte atteignait 90 %. De plus il était situé loin des paniers de germination et nous avons émis l'hypothèse qu'il ne mesurerait pas les conditions réelles d'humidité dans l'étuve. Pour ces deux raisons, le capteur d'humidité a été placé au centre de la paroi latérale de l'étuve (Photo 6).

9.4.1.3 *Rendre indépendant l'humidification de l'air et l'arrosage des grains*

Sur le montage initial, la rampe de brumisation a les buses tournées vers les parois, mais des traces de cette eau humidifiait une partie des grains. Ce qui pourrait contribuer à rendre hétérogène l'humidification des grains.

Par ailleurs, l'arrosage des grains est une pratique traditionnelle au Bénin et au Burkina Faso. Nous avons voulu simuler les conditions traditionnelles.

Pour ces deux raisons, une deuxième rampe, parallèle à la première avec deux buses centrées au niveau des paniers a été installée. Cette rampe est reliée à une deuxième électrovanne et commandée par un relais temporisé qui permet de programmer les durées et les temps d'arrosage des grains selon les conditions de germination souhaitées. La rampe d'humidification initialement en place a été orientée de manière à ce que le brouillard n'atteigne pas les paniers

9.4.1.4 *Autre modification*

En plus de ces modifications importantes apportées à l'étuve, un adoucisseur d'eau a été installé pour éviter le bouchage des buses de brumisation et le dépôt de calcaire sur les parois de l'étuve.

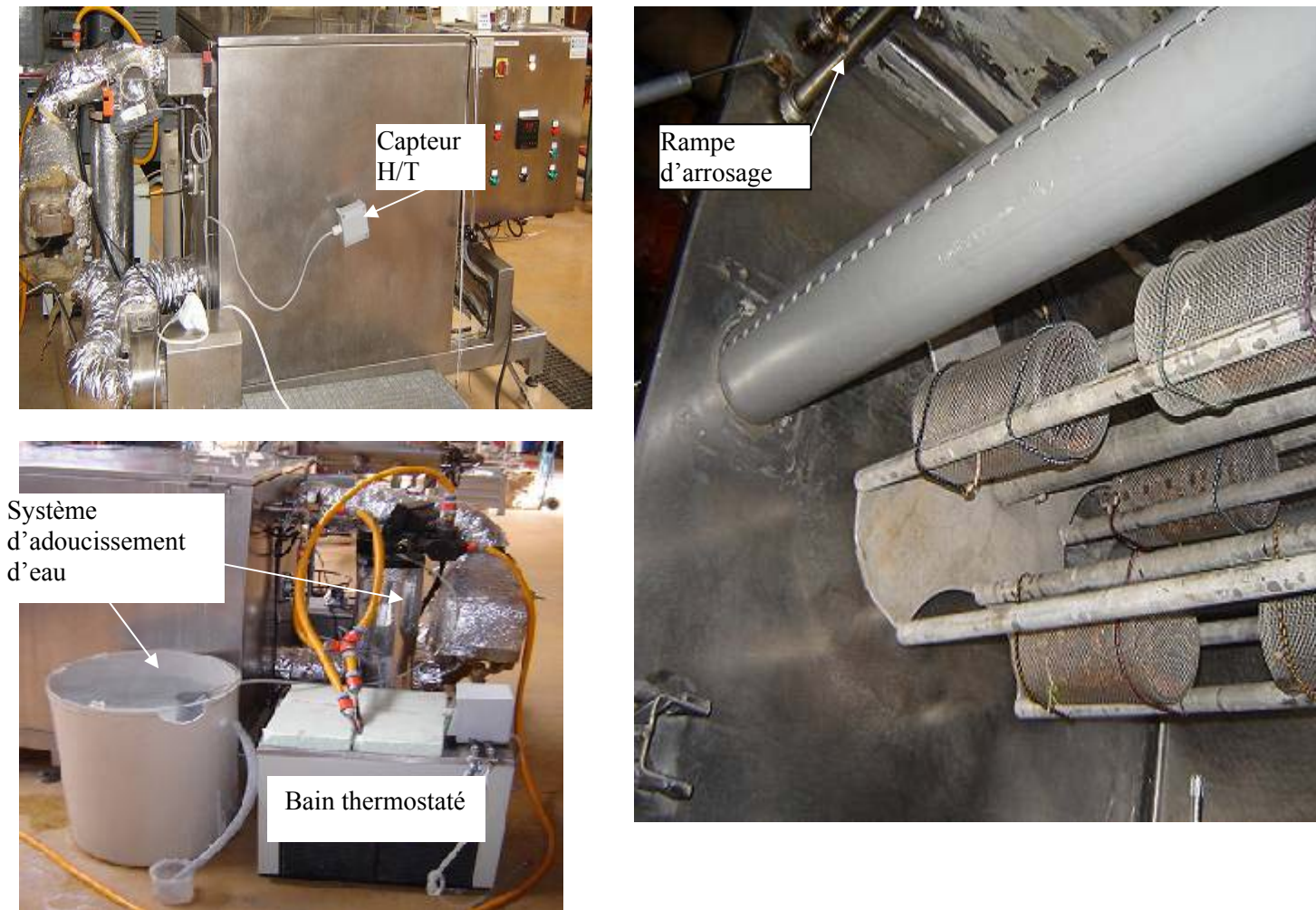


Photo 6: Module actuel de germination

9.5 Validation du pilote de maltage

Un double contrôle a été effectué pour valider les travaux réalisés sur l'étuve de germination.

- ↻ Une germination des grains de 72 h sans interruption sur lesquels seulement les pouvoirs diastasiques ont été déterminés.
- ↻ Une germination avec prélèvement pour le suivi de la teneur en eau et des activités amylasiques au cours de la germination. Ce suivi devait nous permettre, non seulement de valider le pilote, mais aussi de valider la possibilité de réaliser une approche cinétique sur l'évolution des activités enzymatiques par prélèvement de grains dans les paniers tout au long de la germination. Cette méthode devrait être beaucoup plus rapide et économe en temps qu'une approche avec arrêt de la germination pour chaque durée étudiée.

Le sorgho vrac a été malté en deux répétitions (production).

Pour chaque production, 8 paniers ont été utilisés. Chaque panier contenant 100 g de grains trempés 12 h à 30°C a été placé dans l'étuve de germination de façon à avoir 4 paniers côté moteur et 4 paniers côté ventilateur. 6 paniers (3 de chaque côté) ont été germés 72 h sans arrêt et 2 paniers (1 de chaque côté) ont servi pour le suivi. Des prélèvements ont été effectués

à 24 h, 32 h, 48 h, 54 h, 56 h et 72 h de germination. Tous ont été germés à 30°C avec arrosage toutes les 4 h sous une humidité relative de consigne de 95 % puis séchés dans une étuve ventilée à 45°C pendant 24 h.

9.5.1 Suivi de l'humidité relative de l'air et de la température de l'enceinte de germination

Pendant la germination, l'humidité relative de l'air affichée par le capteur intégré à l'étuve (nouvelle position) a varié de 79 % (juste avant arrosage) à 91 % (juste après arrosage) avec une moyenne sur 72 h de 84 ± 3 . Un capteur autonome placé à l'ancienne position du capteur de l'étuve a affiché des humidités plus élevées variant de 85 % (juste avant arrosage) à la saturation (juste après arrosage) (Figure 15).

Au nouveau point de mesure, les valeurs d'humidité relative sont inférieures de l'ordre de 10 unités à celles réalisées à l'ancien point de mesure et elles coïncident avec celles relevées par un capteur autonome.

Quant à la température, elle a varié de 28,5°C à 32°C ce qui correspond bien à la température mesurée à la nouvelle position du capteur. La moyenne de température sur 72h à cette nouvelle position est de $31^\circ\text{C} \pm 0,7$.

La modification de la position du capteur a permis non seulement de résoudre le problème de saturation mais aussi de mesurer les conditions réelles de l'humidité au niveau des paniers.

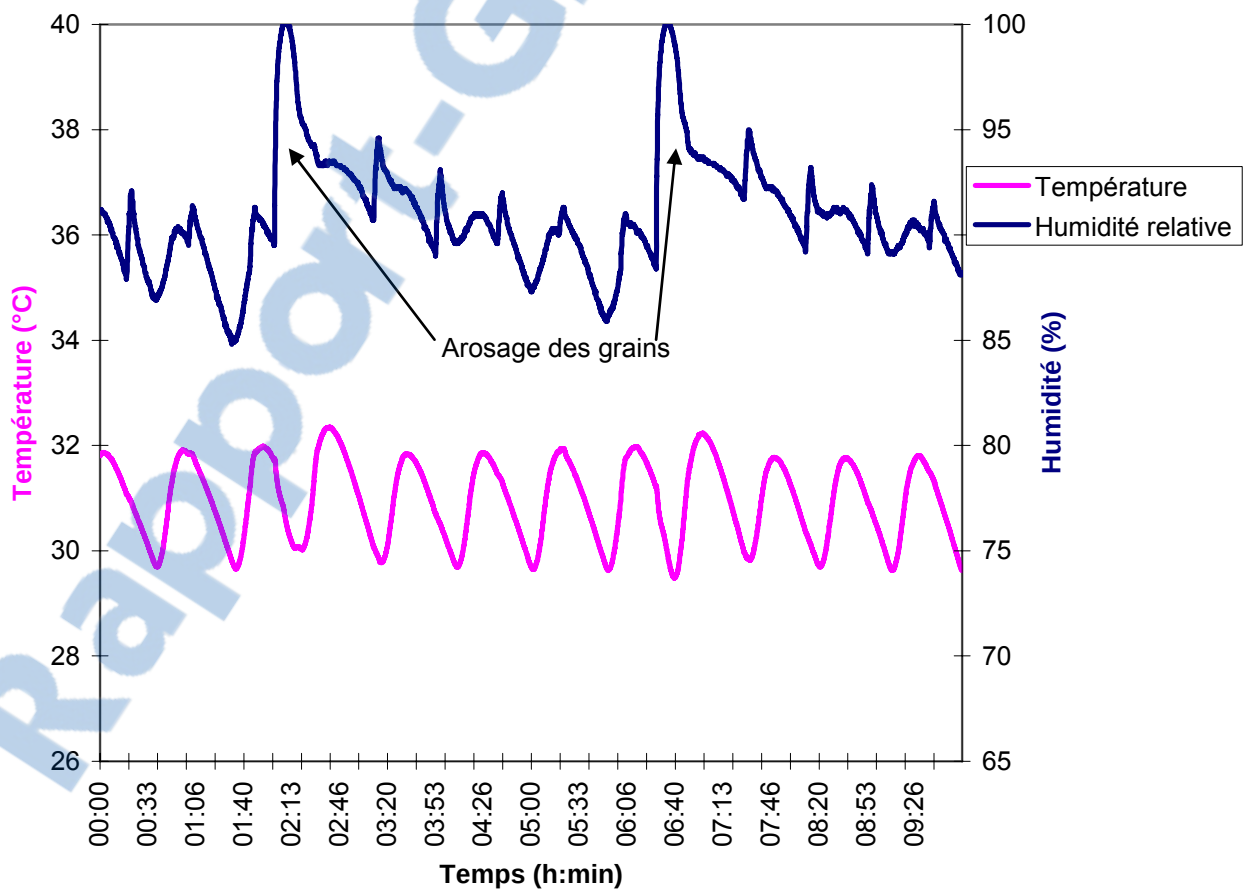


Figure 15: Evolution de la température et de l'humidité de l'air pendant la germination

9.5.2 Reproductibilité sur les produits maltés

9.5.2.1 Pouvoir diastasique des malts des grains germés 72 h

Les résultats du pouvoir diastasique sont présentés dans le Tableau 12. On constate que les valeurs varient de 111 à 123 milli équivalents maltose g / g de malt sec/min (UPD). Deux malts (malt 3 et 4 de la production n°2) ont un pouvoir diastasique faible par rapport aux autres. Ils ont été séchés une deuxième fois dans l'étuve à 45°C pendant 25 min car insuffisamment secs ; en conséquence, ils ont été exclus de l'analyse de variance.

L'analyse de variance (Tableau 13) des résultats montre qu'il n'existe ni un effet de position ni un effet d'interaction entre la production et la position au seuil de 5% entre les moyennes des pouvoirs diastasiques des malts des différents paniers quelle que soit la production ou la position dans l'étuve.

Le tableau d'analyse de variance montre que la variance de l'erreur pour le pouvoir diastasique (variance résiduelle des carrés moyens) est de 2,8. La variance obtenue des dosages étant de 2,2 la variance totale est de 5 ; soit un écart-type total de $\sqrt{5} \approx 2,4$. On pourra affirmer que deux malts sont différents avec un risque d'erreur inférieur à 5% dès que la différence de leur pouvoir diastasique sera supérieure à ± 5 UPD.

Tableau 12: Pouvoir diastasique (PD) des grains germés 72h sans prélèvement

Une unité pouvoir diastasique (U PD) est la quantité de milliéquivalent maltose libéré lors de l'hydrolyse de la solution d'amidon par les amylases présentes dans un gramme de malt par min			
N° Panier	Position	Production	PD (mg d'équivalent maltose/g de malt sec /min)
1	Moteur	1	122 ±2
2	Ventilateur	1	122 ±1
3	Moteur	1	120 ±2
4	Ventilateur	1	118 ±0
5	Moteur	1	121 ±2
6	Ventilateur	1	123 ±1
1	Moteur	2	119 ±1
2	Ventilateur	2	118 ±3
3	Moteur	2	112 ±2
4	Ventilateur	2	111 ±2
5	Moteur	2	120 ±2
6	Ventilateur	2	117 ±1

Tableau 13: Analyse de variance des résultats du pouvoir diastasique des grains germés 72h

	Degré. De liberté	Somme des carrés (SC)	Carré moyen (CM)	F (Snedecor)	Probabilité (P)
Ord. origine	1	137664,6	137664,6	48587,51	0,000
Position	1	2,4	2,4	0,85	0,3928
Production	1	15,0	15,0	5,29	0,0610
Position*Production	1	2,4	2,4	0,85	0,3928
Erreur	6	17,0	2,8		
Total	9	36,0			

9.5.2.2 Cinétique de la germination

9.5.2.2.1 Reproductibilité

Le suivi de l'évolution de la teneur en eau, du pouvoir diastasique a été fait sur deux productions. Celui de l'activité α -amylasique a été réalisé seulement sur une production (tenant compte de l'absence d'effet production préalablement déterminée sur le pouvoir diastasique). Faute de temps l'activité β -amylasique n'a pas été mesurée.

Ainsi la reproductibilité a été testée seulement pour le pouvoir diastasique et la teneur en eau. Les résultats sont présentés dans le Tableau 14. On constate que la teneur en eau et le pouvoir diastasique augmentent avec la durée de germination. Les valeurs évoluent de 45 (24h) à 70g/100g de malt vert (72h) et 36 U PD (24h) à 111 U PD pour la teneur en eau et le pouvoir diastasique respectivement.

On note également que les pouvoirs diastasiques des malts des paniers qui avaient servi pour la cinétique de germination sont inférieurs à ceux germés pendant la même durée (72h) sans prélèvement. Ils sont par contre comparables aux pouvoirs diastasiques des malts des paniers N° 3 et 4, production 2 (Tableau 12) qui ont été séchés une deuxième fois.

Ces résultats nous laissent penser que le séchage aurait une influence importante sur les activités amylasiques.

Tableau 14: Augmentation de la teneur en eau et du pouvoir diastasique avec la durée de germination

N° Panier	Position	Production	Durée (h)	Eau (g/100g malt vert)	PD (mg d'équivalent maltose/g de malt sec /min)
7	Moteur	1	24	46 ±1	38 ±0,
8	Ventilateur	1	24	45 ±0	37 ±1
7	Moteur	2	24	48 ±1	36 ±0
8	Ventilateur	2	24	46 ±1	37 ±2
7	Moteur	2	32	53 ±0	61 ±3
8	Ventilateur	2	32	51 ±0	58 ±1
7	Moteur	1	48	64 ±2	97 ±2
8	Ventilateur	1	48	63, ±0	94 ±0
7	Moteur	2	48	59 ±1	102 ±1
8	Ventilateur	2	48	59 ±3	98 ± 6
7	Moteur	1	52	64 ±1	100 ±2
8	Ventilateur	1	52	65 ±3	nd
7	Moteur	1	56	67 ±1	nd
8	Ventilateur	1	56	67 ±2	nd
7	Moteur	2	56	65 ±0	111 ±2
8	Ventilateur	2	56	68 ±4	107 ±0
7	Moteur	1	72	70 ±2	nd
8	Ventilateur	1	72	68 ±1	nd
7	Moteur	2	72	Nd	111 ±2
8	Ventilateur	2	72	nd	109 ±2

nd = non déterminé

L'ANOVA appliquée aux données (Tableau 14) a également conclu à l'absence d'effet de la production et de la position au seuil de 5% (Tableau 15 et Tableau 16).

Tableau 15: Analyse de variance des résultats de la teneur en eau au cours de la germination

	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Fisher Snedecor (F)	Probabilité (P)
Ord.Orig.	1	2057,2	2057,2	260,7	0,000
Durée	1	1018,9	1018,9	129,1	0,000
Position	1	0,8	0,8	0,11	0,75
Production	1	0,4	0,4	0,04	0,83
Position*Production	1	0,0	0,0	0,0	0,99
Erreur	13	102,5	7,9		
Total	17	1270,2			

Tableau 16: Analyse de variance des résultats du pouvoir diastasique au cours de la germination

	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F	P
Ord.Orig.	1	347,1	347,1	21,0	0,00
Durée	1	10936,3	10936,3	661,2	0,00
Position	1	7,1	7,1	0,4	0,53
Production	1	3,0	3,0	0,2	0,68
Position*Production	1	3,6	3,6	0,2	0,65
Erreur	8	132,3	16,5		
Total	12	11304,4			

9.5.2.2.2 Allure des cinétiques.

L'évolution de la teneur en eau, du pouvoir diastasique et de l'activité α -amylasique (Figure 16) montre que :

- ↻ La teneur en eau augmente de façon apparemment linéaire. Les valeurs évoluent de 45 (24h) à 70 g/100g de malt vert (72h)
- ↻ Le pouvoir diastasique et l'activité α -amylasique augmentent avec le temps et tend vers une valeur limite entre 56h et 60h de germination.

Cette allure presque en cloche montre bien qu'il est important d'utiliser une approche cinétique si on désire déterminer la durée de germination nécessaire pour avoir les activités amylasiques optimales. Pour ce sorgho, on peut dire que sa durée optimale est de 58h.

9.5.2.2.3 Amylose et sucres

On constate aussi que la teneur en amylose diminue au cours de la germination tandis que celle des sucres augmente (Tableau 17). Nous pensons que l'amylose se dégraderait en saccharose et glucose pendant la germination. Dans nos conditions de maltage, et pour ce sorgho, cette dégradation débute à partir de 32h ou la teneur en amylose passe de 23 (0 et 24h de germination) à 18 g/100g MS (72h de germination). Les teneurs en saccharose et glucose augmentent de 0,8 et de 0,3 g /100 g MS (0h de germination) à 2,5 et 2,4 g /100 g MS (72h de germination) respectivement.

La teneur en fructose et en acide citrique ne varie presque pas pendant la germination pour ce sorgho.

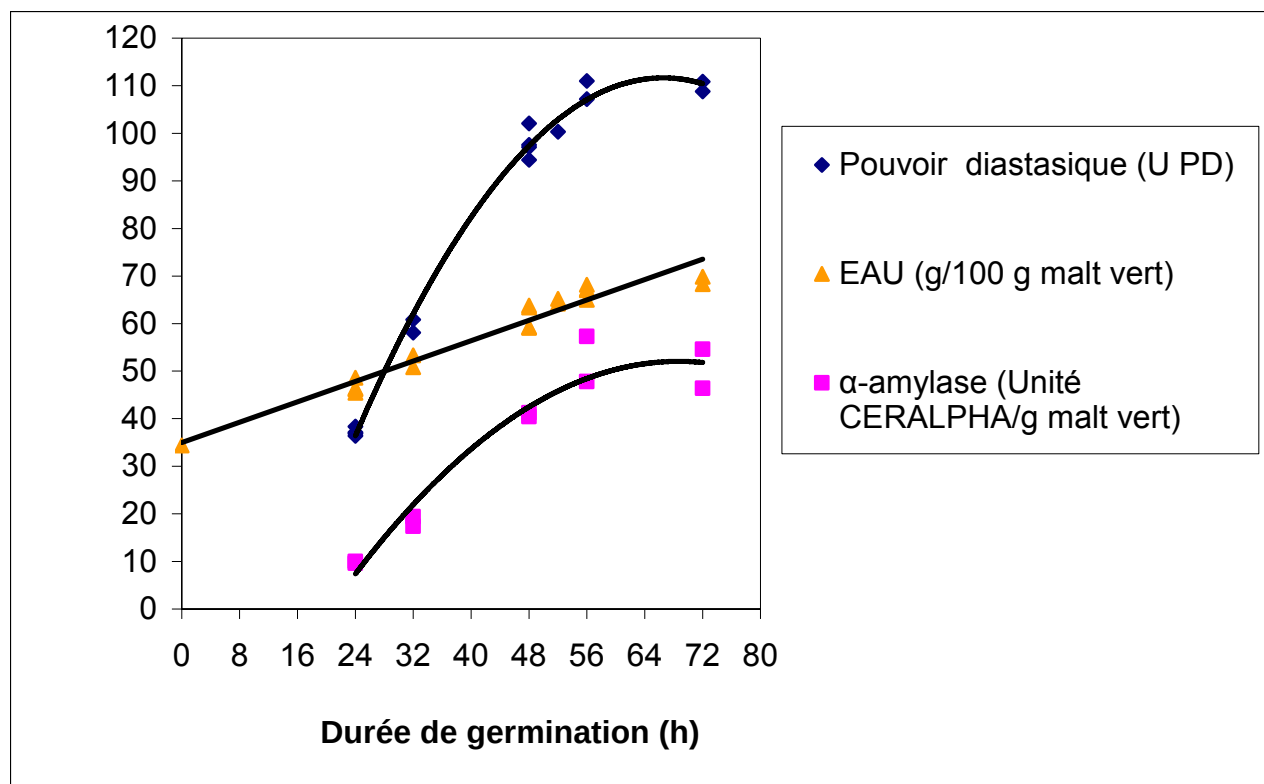


Figure 16: Evolution de la teneur en eau, du pouvoir diastasique et de l'activité α -amylasique au cours de la germination

Tableau 17: Evolution de la teneur en amylose et en sucres au cours de la germination

Durée de germination (h)	Amylose (g/100g malt sec)	Saccharose (g/100g malt sec)	Glucose (g/100g malt sec)	Fructose (g/100g malt sec)
0	23	0,8	0,3	0,2
24	23	0,9	0,7	0,1
32	21	1,2	1,0	0,1
48	20	1,9	1,5	0,2
56	19	2,2	1,6	0,2
72	18	2,5	2,4	0,3
Ecart-type	1	0,1	0,1	0,1

n= 2

9.5.2.3 Pertes pendant le maltage

Les pertes, pendant le maltage, représentent la quantité de malt obtenu (base sèche) par rapport à la quantité de grains qui a servi à sa production. Elles incluent les pertes de matières dans l'eau de trempage, les pertes dues au métabolisme respiratoire des grains pendant la germination et les pertes dans les radicelles et tigelles.

Les pertes de matières sèches pendant le maltage rentrent dans la fonction objective des conditions de maltage. Il faut trouver un compromis entre les pertes de matières qu'il faut minimiser et les activités enzymatiques qu'il faut maximiser.

Elles ont été calculées pour les grains germés 72h sans arrêt en vue de déterminer l'intervalle de confiance dans lequel on pourrait dire qu'une variété présente plus de pertes que l'autre.

Nous avons obtenu pour ce sorgho une perte de matières sèches moyenne (sur 6 paniers) de 21 g /100 g de sorgho brut avec un écart type de 2 soit un écart de confiance de 4 à 95 %.

9.6 Bilan

Le travail, décrit dans les paragraphes ci-dessus, avait deux principaux objectifs :

- ✧ La mise au point du pilote de maltage et sa validation à travers les études de reproductibilité ;
- ✧ Valider la possibilité de déterminer la durée de germination optimale par un suivi des activités enzymatiques via des prélèvements de grains dans les paniers tout au long de la germination ; méthode plus rapide et économe en temps qu'une approche avec arrêt de la germination pour chaque durée à étudier.

Par rapport au pilote de maltage, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✧ Il n'existe plus d'effet de la position des paniers au sein de l'étuve de germination ;
- ✧ Le pilote permet de faire des essais de maltage reproductibles. Pour le pouvoir diastasique, on peut s'attendre à une variation d'une production à l'autre ou au sein d'une même production de ± 5 U PD qui représente l'intervalle de confiance à 95%. Deux variétés ne seront par conséquent différentes que si la différence entre leur pouvoir diastasique est supérieur à 5 U PD.
- ✧ Huit lots de grains peuvent être maltés en une seule production.

Cependant des améliorations restent à faire et notamment :

- ✧ Bac de trempe
 - ✱ Ajout d'agitation dans les bacs
 - ✱ Modification de la régulation pour la rendre efficace à des températures autres que 30°C.
- ✧ Etuve de germination
 - ✱ Modification de la partie chauffe (veine d'air + résistance) pour éviter les risques de surchauffe lors de l'arrêt de la ventilation ;
 - ✱ Finaliser la climatisation de l'ambiance autour de l'équipement pour permettre de faire des essais en toutes saisons. Pour l'instant, les variations de température environnantes limitent les températures de germination possibles. Le refroidissement du pilote se fait par perte thermique à travers les parois, ainsi, les températures de germination doivent être au moins supérieures de 5°C à la température ambiante. Par ailleurs, l'humidité relative maximale dans l'étuve est imposée par les points de condensation venant de ponts thermiques non éliminables. Au bilan, dans la configuration actuelle, il n'est pas possible de travailler en dessous de 35°C dans l'étuve pour une température ambiante de plus de 30°C au niveau de l'étuve.

Pour l'approche cinétique, on constate :

- ✧ Le pouvoir diastasique et l'activité α -amylasique évoluent et tendent vers une valeur limite, indiquant ainsi l'importance d'une optimisation par approche cinétique de la durée de germination ;
- ✧ Il est possible de faire un suivi de l'évolution des activités amylasiques au cours du temps par prélèvement à condition de standardiser les conditions de séchage. Nous constatons que l'impact du séchage sur les activités amylasiques est très important par rapport à celui des ouvertures du pilote de germination.

10 EFFET DU MODE DE STABILISATION SUR LES ACTIVITES AMYLASIQUES

Pour déterminer l'effet du séchage sur les activités amylasiques, le sorgho vrac a été trempé et germé dans les conditions précédemment décrites pour la validation du pilote. A la fin de la germination, les grains ont été divisés en 3 lots :

- ↪ Le lot 1 frais, analysé à la suite de la germination après dégermage manuel et broyage avec un broyeur à bille (Dangoumill 300, PROLABO) pendant une minute ;
- ↪ Le lot 2 séché à 45°C pendant 24h sous une humidité relative d'air de 45% dans le séchoir UTA suivi du dégermage manuel et broyage avec le broyeur Perten ;
- ↪ Le lot 3 surgelé juste après germination 4h à -50°C avec un surgélateur ventilé (F.A.C.I.S.) puis conservé au congélateur (-18°C) pendant une semaine.
 - * Une partie de ce lot congelé a été lyophilisée et traitée par la suite comme le lot 2 (lot 3') ;
 - * Une autre partie a été décongelée une nuit à 4°C et traitée comme le lot 1 (lot 3'').

Les résultats des analyses des différents lots concluent à une diminution des activités amylasiques quel que soit le mode de conservation du malt vert (Figure 17). Le séchage réduit les activités amylasiques du malt vert de façon drastique par rapport à la congélation et la lyophilisation. Il entraîne une perte de 43% du pouvoir diastasique et de l'activité α - amylasique et de 47 % de l'activité β -amylasique (Tableau 18). Ces pertes sont très élevées par rapport à 12 % rapporté par Agu et Palmer (1996) pour le pouvoir diastasique du malt de sorgho séché à 45°C. L'écart considérable entre nos valeurs pourrait s'expliquer par une différence de conditions de maltage, d'analyse ou variétale. D'après Uriyo (1999), la sensibilité de la α et la β -amylase à la chaleur varie avec la durée de germination. Eglinton et al. (1998) ont rapporté que la substitution de deux acides aminés, la valine et la leucine par l'alanine et la leucine cause une augmentation de la stabilité thermique de la β -amylase de certaines variétés d'orge.

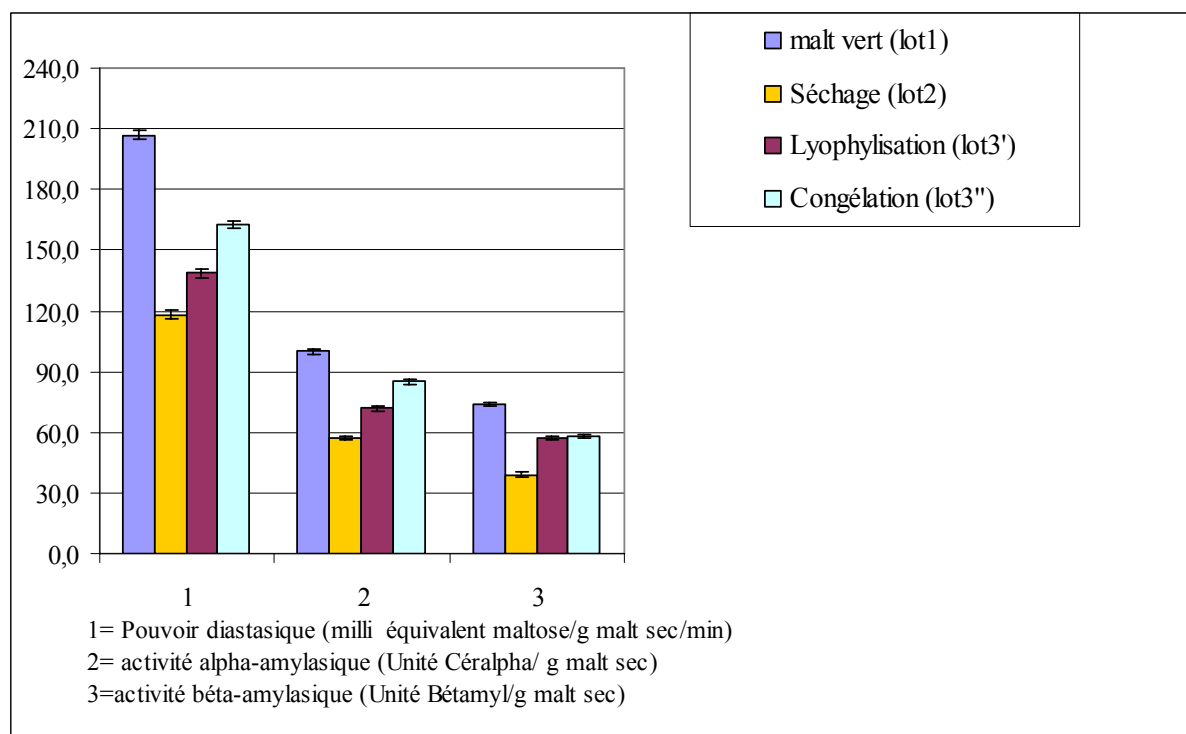


Figure 17: Effet du mode de stabilisation sur les activités enzymatiques

Tableau 18: Pourcentage de pertes d'activité amylasique du malt vert selon le mode de stabilisation

Mode de stabilisation	% perte du pouvoir diastasique	% perte de l'activité α -amylasique	% pertes de l'activité β -amylasique
Congélation	21	15	21
Lyophilisation	33	28	22
Séchage	43	43	47

En conclusion, ce travail méthodologique montre que la stabilisation modifie très sensiblement les activités amylasiques. Pour les étudier, il serait utile de choisir une technique qui conduise à des résultats aussi proches que possible de ceux sur produits frais, l'étude de l'impact du mode de stabilisation devant être faite par ailleurs. Il serait utile de reprendre et de poursuivre ce travail.

Pour nos essais, nous avons utilisé une stabilisation par séchage en essayant de travailler dans des conditions standardisées. Cette technique a été choisie car c'est celle très majoritairement utilisée.

11 APTITUDE AU MALTAGE DE QUELQUES VARIETES DE MIL ET DE SORGHO

11.1 Caractéristiques des grains

11.1.1 Caractéristiques géométriques

Le volume (V) et la surface (S) des grains ont été calculés grâce au logiciel COMSOL (3.1) en utilisant ses diamètres. En assimilant les grains à une sphère, son rayon est calculé par

formules : $R = \frac{3V}{S}$. Comme les grains ont plus une forme elliptique triaxiale, la sphéricité est déterminée selon la méthode de Pomeranz et *al.* (1985) :

$$\text{Sphéricité} = \frac{\sqrt[3]{a * b * c}}{a}$$

Avec a= Ø mesuré au milieu du grain dans le sens longitudinal;

b= Ø latéral; c= Ø transversal (face plate).

Les résultats (deuxième colonne du Tableau 19) montrent que la plus grande dimension varie de 2,93 (mil) à 3,85-5,24 mm (sorgho). La deuxième dimension est comprise entre 2,22 (mil) et 3,13-4,38 mm (sorgho). Ces résultats correspondent à ceux rapportés par Evers et *al.* (1999) qui sont de : 2 (mil) et 3-5 mm (sorgho) pour la grande dimension et de 1-2,5 (mil) et 2-5mm (sorgho) pour la deuxième dimension.

Les rayons moyens équivalents (troisième colonne du Tableau 19) varient de 1.12 mm (Kapelaga, mil) à 1.83 mm (Fissouka, sorgho).

Les sphéricités (quatrième colonne du Tableau 19) obtenues varient de 0,68 (Chabicouman à panicules rouges) à 0,86 (Zomoaha1). Les grains ont été groupés en fonction de leur sphéricité en 3 classes :

- ↬ Classe 1, où $1 \leq \text{Sphéricité} \leq 0,80$. Cette classe regroupe les grains qui ont une forme très proche de la sphère. Seule Sotakaman et Zomoaha1 sont de ce groupe.
- ↬ Classe 2, où $0,80 < \text{Sphéricité} \leq 0,70$. Classe intermédiaire, la majorité des grains mesurés appartient à cette classe.
- ↬ Classe 3, où $0,70 < \text{Sphéricité} \leq 0,60$. C'est la classe des grains de forme plus aplatie. Parmi les grains mesurés, seulement Chabicouman à panicules rouge fait partie de cette classe.

On peut se permettre de dire qu'à l'exception de Chabicouman à panicules rouge, toutes les variétés mesurées ont une forme proche d'une sphère.

Tableau 19: Caractéristiques géométriques des grains

Variétés	Dimensions en 3D (mm)	Rayon équivalent (mm)	Sphéricité	Classe
Kapelga	4,26	1.53	0,76	2
	3,46			
	2,29			
Mewin	3,59	1.29	0,75	2
	2,69			
	2,04			
Kioédré	4,55	1.54	0,72	2
	3,32			
	2,3			
Pisnou	4,23	1.57	0,78	2
	3,64			
	2,35			
Gnossiconi	4,32	1.60	0,77	2
	3,44			
	2,49			
Fissouka	5,16	1.83	0,76	2
	4,35			
	2,66			
Zomoaha 1	3,85	1.61	0,86	1
	3,59			
	2,59			
Chabicouman PR	5,24	1.58	0,68	3
	4,12			
	2,11			
Zomoaha 2	5,02	1.65	0,71	2
	3,85			
	2,36			
Chassisoya	4,76	1.73	0,77	2
	4,1			
	2,53			
Agbanni	5,09	1.64	0,72	2
	4,48			
	2,2			
Soniya	4,9	1.81	0,79	2
	4,46			
	2,63			
Natisoya 1	4,98	1.56	0,7	2
	3,96			
	2,12			
Sotakaman	4,25	1.75	0,85	1
	4,01			
	2,76			
Chabicouman PN	4,96	1.74	0,76	2
	4,38			
	2,45			
Natisoya 2	4,14	1.53	0,78	2
	3,65			
	2,24			
Kapelaga	2,93	1.12	0,79	2
	2,22			
	1,89			
Banninga	4,08	1.45	0,75	2
	3,13			
	2,21			
Zoueloure	4,17	1.54	0,78	2
	3,48			
	2,33			
Vrac Cotonou	4,17	1.36	0,71	2
	3,33			
	1,9			

11.1.2 Caractéristiques physico-chimiques des grains

Les caractéristiques des grains utilisés dans cette étude sont regroupées dans le Tableau 20.

Les couleurs attribuées aux grains sont les couleurs données par la population d'origine. Les notes de vitrosité varient de 1,5 (Mewin), sorgho vitreux à grains de petite taille (poids de 1000 grains 17) à 4,5 (Pisnou, Zomoaha1 et Zoueloure). Toutes les variétés de sorgho caractérisées ont évidemment un poids de 1000 grains supérieur à celui du mil (17 à 48g pour le sorgho comparé à 9-11g pour le mil). Agbanni est la variété de sorgho qui a le poids de 1000 grains le plus élevé (48g).

Tableau 20: Caractéristiques physico-chimiques des grains

Variétés	Couleur	Vitrosité	Poids 1000 grains (g)	Cendres	Amylose	Saccharose	Glucose	Fructose	Acide citrique
				g/ 100g de MS					
SORGHOS									
Kapelga	Blanc	2,5	23	1,4	25	0,8	0,1	0,1	0,2
Mewin	Marron	1,5	17	1,4	21	0,8	0,2	0,1	0,2
Kioédré	Jaune orangé	2	23	1,8	23	1,3	0,4	0,3	0,3
Pisnou	Blanc sale	4,5	26	1,4	21	0,7	0,2	0,1	0,2
Gnossiconi	Blanc	4	29	1,7	21	1,0	0,3	0,3	0,2
Fissouka	Marron	3	45	1,6	23	0,9	0,1	0,1	0,2
Zomoaha 1	Jaune	4,5	30	1,6	21	1,4	0,6	0,6	0,2
Chabicouman PR ¹	Marron	2,5	42	1,6	22	1,5	0,4	0,4	0,3
Zomoaha 2	Marron	3	34	1,3	23	0,8	0,2	0,2	0,4
Chassisoya	Marron	3	38	1,5	24	1,1	0,3	0,2	0,3
Agbanni	Marron	2,5	48	1,7	23	0,9	0,2	0,1	0,2
Soniya	Marron	3,5	43	1,9	23	1,1	0,2	0,2	0,2
Natisoya1	Marron	3	38	1,7	23	1,1	0,2	0,2	0,2
Sotakaman	Jaune	3,5	35	1,6	22	1,0	0,3	0,2	0,2
Chabicouman PN ^{1'}	Marron	3	44	1,5	23	0,9	0,2	0,2	0,2
Natisoya 2	Marron	3,5	33	1,8	23	1,0	0,3	0,2	0,2
Banninga	Blanc	2,5	24	1,3	23	0,9	0,2	0,2	0,3
Zoueloure	Rouge	4,5	25	1,5	22	0,7	0,3	0,2	0,3
Vrac- Cotonou	Marron orangé	3	21	1,4	23	0,8	0,3	0,2	0,2
MILS									
Kapelaga	Jaune	3,5	11	1,3	23	1,0	0,3	0,2	0,2
Ka-sablga	Noir	Nd ²	9	1,4	22	0,9	0,4	0,3	0,2
Kasui-pelga G	Blanc	Nd	11	1,6	23	1,1	0,2	0,2	0,1
Kasui-pelga K	Blanc	Nd	11	1,4	22	1,0	0,4	0,3	0,2
Ecart-type		1	2,5	0,0	1	0,1	0,1	0,1	0,0
n= 2 pour toutes les analyses sauf la vitrosité (note obtenue à partir de 20 grains), le poids de 1000 grains (n=3); PR ¹ : Panicule rouge ; PN ^{1'} : Panicule noire ; Nd ² : non déterminé									

La composition biochimique varie avec les variétés pour le sorgho. Celle des 4 variétés de mil varie très peu. Les teneurs en cendres sont de 1,3-1,6 g/100g MS (mil) et de 1,3 -1,9 g/100g MS (sorgho).

Les teneurs en amylose varient de 21 à 25 g/100g MS pour le sorgho et 22-23 g/100g MS pour le mil.

La teneur en saccharose est plus élevée que celle du glucose et du fructose dans les variétés de mil et de sorgho étudiées (0,7-1,5 g/100g MS pour le saccharose comparé à 0,1-0,6 g/100g MS pour le glucose ou le fructose).

11.2 Dynamique d'absorption d'eau

Dans la littérature, les durées optimales de trempe sont très variées (8h-48h). Nous avons donc voulu évaluer la dynamique de l'absorption d'eau des différentes variétés avant le maltage. Ce suivi de l'absorption d'eau pendant la trempe a pour but de prédire la durée optimale de trempe en fonction des caractéristiques géométriques et physico-chimiques des grains.

11.2.1 Méthode de suivi de la trempe/cinétique d'absorption d'eau

Pour suivre l'absorption d'eau au cours de la trempe, nous avons mis au point une méthode basée sur la différence de poids des grains au temps t de trempe et au temps t_0 .

10 g de grains de mil ou de sorgho sont mis dans les paniers de trempe. Les paniers sont placés dans le bac de trempe (au même moment que les autres paniers contenant les grains à faire germer). Les paniers sont retirés du bac de trempe à des intervalles de temps prédéfinis puis les grains sont essorés avec une centrifugeuse ménagère pendant 10 s et pesés.

La durée réelle de trempe correspond à l'intervalle entre t_0 et le début de centrifugation.

La teneur en eau à temps t de trempe (ht) (g/100 g MH) est déterminée suivant la formule :

$$ht = 100 \times \frac{(A + hi)}{(100 + A)} \quad \text{où } A = 100 \times \frac{M_t - M_i}{M_i}$$

avec M_t = masse à temps (t) de trempe ;
 M_i = masse initiale au temps (t_0) ;
 A = quantité d'eau absorbée (g/100 g MH) ;
 hi = teneur en eau initiale (g/100 g MH).

11.2.2 Fiabilité de la méthode de suivi de la trempe

La fiabilité de la méthode mise au point pour le suivi de la trempe a été déterminée en faisant un suivi de trempe sur 20h en 4 essais avec prélèvement toutes les 3h, 6h et 20h. La moyenne et le coefficient de variation ont été calculés (Tableau 21). Les coefficients de variation ($CV = 100 \times \text{écart-type} / \text{moyenne}$) se situent autour de 1%.

Tableau 21: Reproductibilité de la méthode de suivi de la trempe

Durée de trempe (h)	Nombre d'essais	Teneur en eau (g/100 g MH)	Moyenne	Ecartype	CV (%)
0		12,3			
3	Essai 1	29,13	29,27	0,27	0,92
	Essai 2	28,96			
	Essai 3	29,54			
	Essai 4	29,43			
6	Essai 1	32,35	32,55	0,21	0,64
	Essai 2	32,46			
	Essai 3	32,83			
	Essai 4	32,57			
20	Essai 1	34,13	34,28	0,15	0,45
	Essai 2	34,18			
	Essai 3	34,39			
	Essai 4	34,44			

En conclusion la méthode utilisée a une fiabilité très satisfaisante. Les coefficients de variation de l'erreur de répétabilité sont de l'ordre de 1%. Cela nous permet de valider la méthode de prélèvement utilisée et donc de considérer que le temps de pesée est négligeable.

11.2.3 Détermination des temps de prélèvement des grains pendant la trempe

Les essais préliminaires nous ont permis de constater que les courbes d'évolution de la teneur en eau du grain au cours de la trempe se divisent en deux phases :

- ↪ Une première phase que nous avons qualifiée de phase d'imprégnation d'eau par diffusion à forte pente ; elle correspond environ aux 6 et 8 premières heures de trempe pour les grains farineux et vitreux respectivement ;
- ↪ La seconde phase a été considérée comme la phase de l'amorce de la germination pendant laquelle l'absorption d'eau est très faible et l'évolution du poids semble linéaire, sans toutefois atteindre un plateau.

Afin de vérifier ces hypothèses, une cinétique de trempe à 30°C sur 48h a été réalisée avec des intervalles de mesure courts pendant la phase de diffusion et plus longs pendant l'autre phase (12h, 24h, 32h et 48h). Les temps de mesure pour la phase de diffusion ont été déterminés sur la base d'une évolution logarithmique des phénomènes de diffusion (Tableau 22) selon la formule suivante :

$$t = t_{p-1} + \frac{E \times tf}{\sum(E)}$$

t = Temps théorique de mesure

E = Exponentiel échelle mesure

t_{p-1} = Temps théorique à pas -1

tf = Durée totale de cette phase (8h)

Tableau 22: Détermination du temps théorique de mesure de la cinétique d'absorption au cours de la trempe

Régénération de l'échelle de mesure (pas= 0,3)	Exponentiel échelle mesure	Temps théoriques de mesure
0	1,0	0:08:48
0,3	1,3	0:20:41
0,6	1,8	0:36:43
0,9	2,5	0:58:21
1,2	3,3	1:27:34
1,5	4,5	2:07:00
1,8	6,0	3:00:14
2,1	8,2	4:12:05
2,4	11,0	5:49:04
2,7	14,9	8:00:00

11.2.4 Dynamique d'absorption d'eau à 30°C

Les résultats de suivi d'absorption d'eau à 30°C d'une variété de mil (Kapelaga) et de dix sorgho (Figure 18) confirment les observations préliminaires.

Dans l'ensemble, les variétés farineuses ont une teneur en eau à 48h de trempe plus élevée que celle des variétés vitreuses. Par exemple, la teneur en eau initiale base sèche de Pisonou et Zoueloure passe 8,4 et 9,3 g/100 g à 70 et 69 g/100 g à 48h de trempe. Celles de Zomoaha 1 passe de 13,3 g/100 g (0h trempe) à 65 g/100 g (48h de trempe). Mewin, sorgho à petit grain vitreux du Burkina faso et Chabicouman à panicules noires, gros grain et semi vitreux du Bénin, sont les variétés qui ont la plus faible teneur en eau après 48h de trempe. Leur teneur en eau évolue de 9,1% à 49% et de 12,6% à 50% pour Mewin et Chabicouman respectivement.

Lorsqu'on compare les deux variétés farineuses Pisonou et Zoueloure provenant du Burkina Faso à la variété farineuse Zomoaha 1 du Bénin, on constate que le démarrage de l'absorption d'eau est moins rapide pour Zoueloure que pour Zomoaha 1. L'environnement hydro climatique du grain aurait une influence sur l'absorption d'eau pendant la trempe.

La forme générale fait penser à un phénomène diffusif mais aucune courbe ne semble avoir d'asymptote. Nous avons alors fait l'hypothèse que ces courbes étaient le résultat de deux phénomènes :

- * Une hydratation par diffusion qui commence dès la mise en contact grain / eau. Cette hydratation converge vers une teneur en eau à saturation, non directement visible et déterminable sur les courbes.
- * Une modification de la nature de certains composants du grain, liée au développement interne des organes de germination. Elle ne commence qu'à partir d'une teneur en eau proche de la saturation par diffusion. Ensuite, elle se développe d'une manière presque linéaire et se poursuit probablement pendant la germination, au-delà de 48h.

Dans les paragraphes suivants, on montre que la première partie des courbes peut effectivement être bien représentée par un modèle de type diffusif.

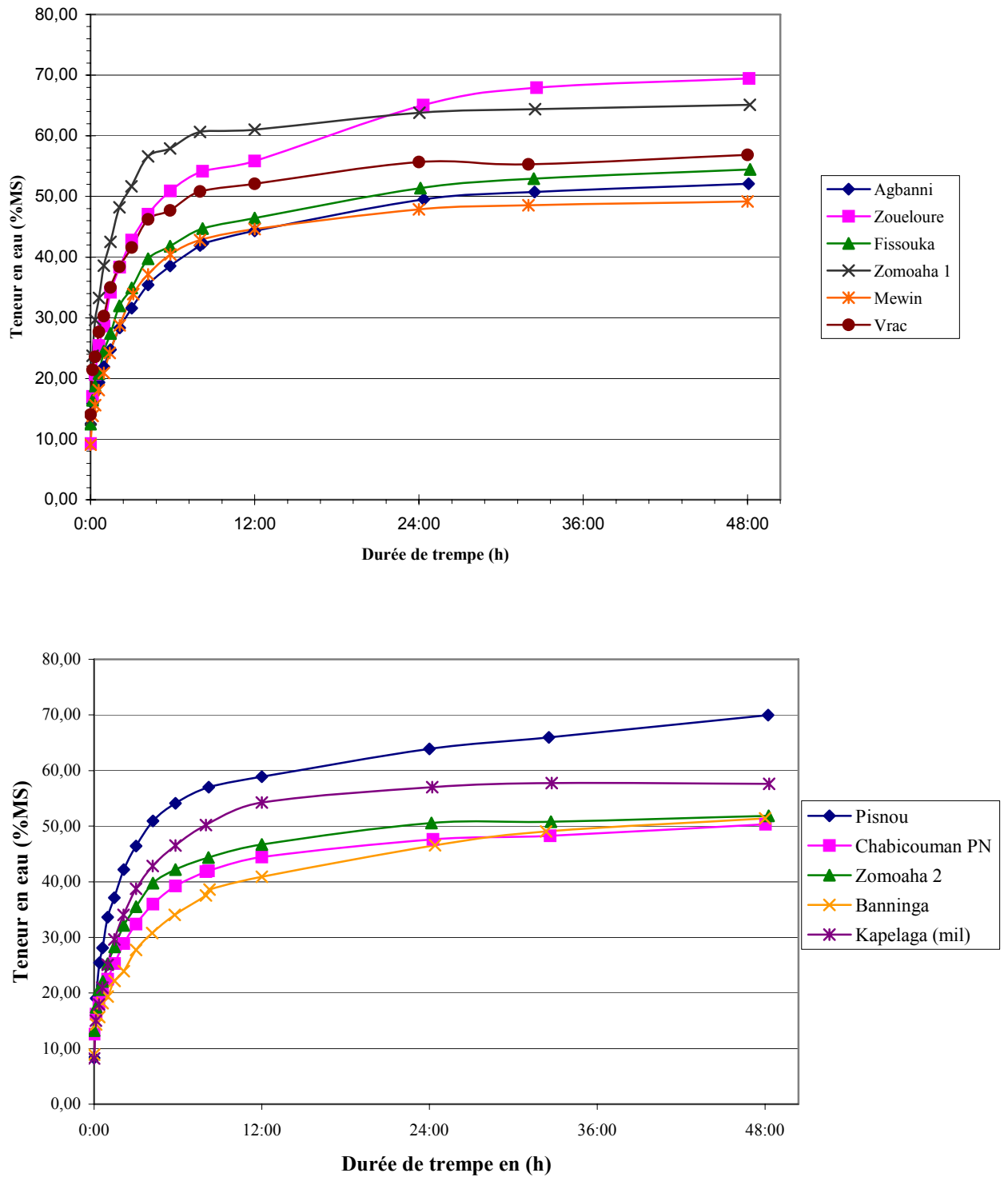


Figure 18 : Evolution de la teneur en eau du grain au cours de la trempé à 30°C

11.2.5 Vérification de la pertinence du modèle de type diffusif

Pour vérifier que la première partie des courbes de la Figure 18 peut être représentée par un modèle de type diffusif, la teneur en eau réduite (E) a été tracée en échelle logarithmique en fonction du temps (Figure 19) comme proposé par Geankoplis (1993). La teneur en eau réduite est définie comme suit :

$$E = \frac{hs_{\infty} - hs_t}{hs_{\infty} - hs_i} \quad \text{où} \quad hs_t = \frac{h_t \times 100}{100 - h_t}$$

avec :

hs_{∞} = teneur en eau de convergence (g/100 g MS), choisie comme la valeur de teneur en eau au dernier point avant 12h augmentée de 1% MS;

hs_i = teneur en eau initiale (g/100 g MS)

hs_t = teneur en eau à temps (t) de trempe (g/100 g MS)

Pour toutes les variétés, on obtient une droite.

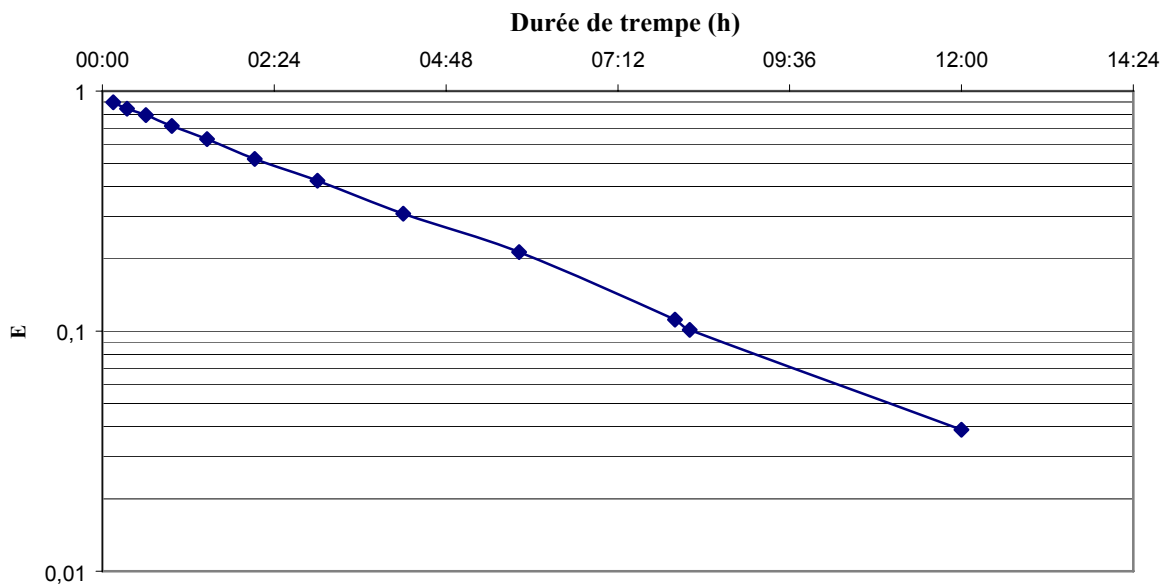


Figure 19: Exemple de teneur en eau réduite (E) à 30°C en fonction du temps (Agbanni)

11.2.6 Détermination du coefficient de diffusion.

En assimilant les grains à des sphères, il est possible d'essayer de déterminer le coefficient de diffusion apparente (D). Pour cela, on peut procéder par ajustement numérique en faisant coïncider les données expérimentales avec la courbe référence tirée de Geankoplis (1993).

$\ln(E) = f(X)$ où $X = \frac{D \times t}{R^2}$ où t = durée de trempe (s) et R le rayon du grain assimilé à une

sphère pris comme dimension caractéristique.

La démarche est alors la suivante :

↻ Détermination du rayon équivalent

A partir des mesures selon les trois dimensions, les volumes (V) et surfaces (S) des ovoïdes équivalents sont calculés par intégration numérique avec COMSOL. Le rayon équivalent est pris égal à $3V/S$, venant de l'expression du rayon d'une sphère en fonction de son volume et de sa surface.

☞ Une feuille de calcul est préparée. Elle ne contient que les données des temps inférieurs à 12h.

✱ Les données d'entrée sont les durées de trempes mesurées et exprimées en secondes (t), les teneurs en eau exprimées en g/100 g MS (h_{st} et h_{si}) et le rayon équivalent (R).

✱ Trois paramètres sont introduits : la diffusivité apparente en m^2/s (D), la teneur en eau à saturation ($h_{s\infty}$) et un « retard ». Celui-ci a été introduit suite au constat d'un décalage systématique entre les courbes expérimentales et la courbe théorique, explicable par un effet retard dû à l'enveloppe du grain. La valeur initiale de la diffusivité apparente est fixée à $10^{-12} m^2/s$. La teneur en eau de convergence est prise égale à celle déterminée empiriquement au paragraphe précédent. Enfin, le retard est initialisé à 100 s.

✱ A partir de ces données sont calculées :

▪ Les abscisses : $X = \frac{D \times (t - \text{retard})}{R^2}$

▪ Les ordonnées expérimentales : $E_{\text{exp}} = \frac{h_{s\infty} - h_{st}}{h_{s\infty} - h_{si}}$

▪ Les ordonnées « théoriques », notées E_{th} : c'est la valeur de E correspondant à X sur la courbe référence de la sphère telle que trouvée dans Geankoplis (1993).

▪ La somme du carré des écarts entre E_{th} et E_{exp} .

☞ Les trois paramètres (D, $h_{s\infty}$ et le retard) sont identifiés à l'aide de l'outil « solveur » de Excel, en minimisant la somme des carrés des écarts entre le modèle et l'expérimental.

Cette démarche a été testée puis appliquée à 10 sorghos et 1 mil. Pour tous les essais, la qualité de la représentation des données expérimentales par le modèle est à l'image de la Figure 20.

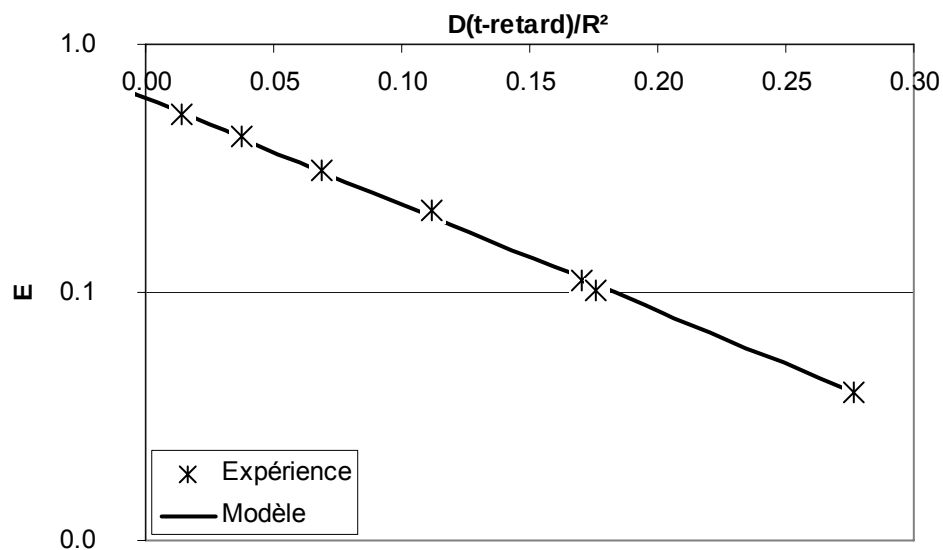


Figure 20 : Exemple de comparaison expérience – modèle en représentation semi-logarithmique de la teneur en eau réduite (E) en fonction de $D(t-\text{retard})/R^2$; variété Agbanni à 30°C

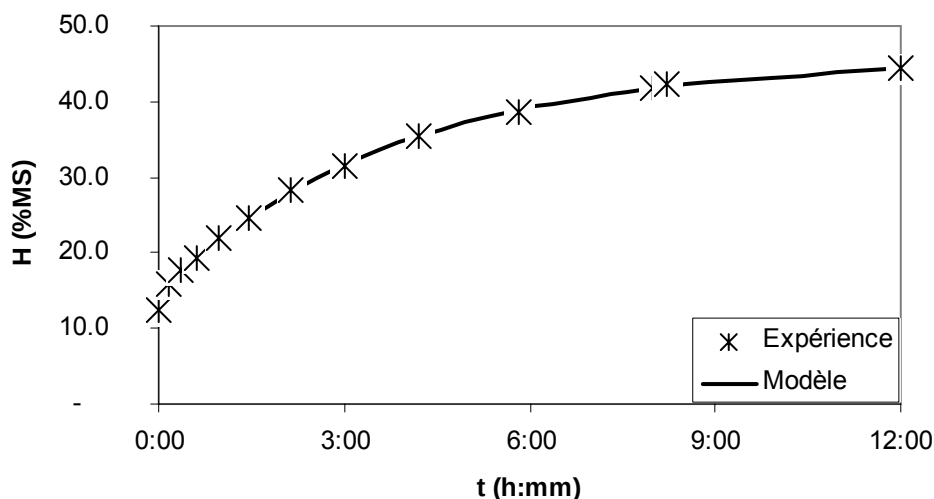


Figure 21: Exemple de comparaison expérience – modèle en représentation de la teneur en eau en fonction du temps ; variété Agbanni à 30°C

On constate que les points expérimentaux sont très bien représentés par le modèle. Les valeurs de coefficient de diffusion D en m^2/s , identifiées avec le « solveur » de Excel en ajustant la courbe expérimentale de teneur en eau réduite avec la courbe théorique (Figure 20), sont regroupées dans le Tableau 23.

11.2.7 Diffusion à différentes températures pour différents grains

Cinq variétés de grains de sorgho parmi les dix trempées à 30°C ont été également trempées à 25°C et 35°C pendant 8h. La Figure 22 représente un exemple des courbes obtenues. Les données complètes sont présentées en Annexe 9.

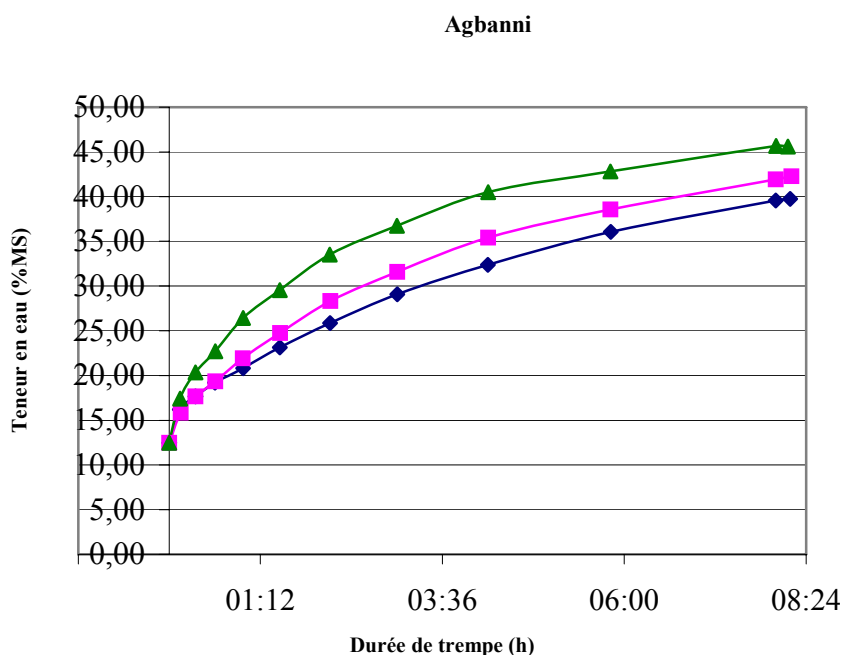


Figure 22 : Effet de la température sur l'absorption d'eau au cours de la trempé ; cas de Agbanni.

Les résultats montrent que, quelle que soit la variété, la vitesse d'absorption d'eau augmente avec la température. Ce sens de variation est celui connu pour la majorité des matériaux.

Les coefficients de diffusion (D) à différentes températures de trempe pour les 10 variétés de sorgho et la variété de mil, sont présentés dans le Tableau 23. Le coefficient de diffusion permet de prédire l'absorption d'eau indépendamment des caractéristiques géométriques.

Variétés	Indice de vitrosité	T °C	Coefficient de diffusion D (m ² /s)
Mewin	1,5	25	1,4E-11
		30	1,6E-11
		35	2,3E-11
Fissouka	3	25	2,3E-11
		30	3,2E-11
		35	4,4E-11
Zomoaha 1	4,5	25	3,4E-11
		30	4,0E-11
		35	4,2E-11
Agbanni	2,5	25	1,5E-11
		30	2,0E-11
		35	3,3E-11
Zoueloure	4,5	25	2,7E-11
		30	2,7E-11
		35	3,1E-11
Pisnou	4,5	30	3,0E-11
Zomoaha 2	3	30	2,7E-11
Chabicouman PN	3	30	2,4E-11
Banninga	2,5	30	1,2E-11
Vrac Cotonou	3	30	2,5E-11
Kapelaga (mil)	3,5	30	1,3E-11

Tableau 23 : Diffusivité apparente à différentes températures pour différentes variétés

A 30°C, les ordres de grandeur pour le coefficient de diffusion sont en moyenne de $3 \cdot 10^{-11}$ m²/s pour les variétés de sorgho plus farineuses et de $1,8 \cdot 10^{-11}$ m²/s pour les variétés plus vitreuses. Ces ordres de grandeur peuvent être suffisants pour avoir une idée de l'absorption d'eau au cours de la trempe à 30°C d'une nouvelle variété.

Lorsqu'on impose des températures différentes afin d'évaluer l'évolution du coefficient de diffusion de l'eau dans les grains en fonction de la température de trempe (Figure 23), on voit deux types de trajectoires :

- ✎ Une assez plate pour les deux variétés farineuses de sorgho (Zoueloure et Zomoaha1) ;
- ✎ Une qui monte assez fortement qui correspond aux variétés vitreuses et semi vitreuses.

Les analyses de corrélation entre le coefficient de diffusion et les caractéristiques intrinsèques des grains (vitrosité, teneur en amylose et en sucres simples) ont révélé que le coefficient de diffusion dépend significativement ($P < 0,05$) et uniquement de la vitrosité du grain ; le coefficient de corrélation entre ces deux variables étant de 0,63. Lorsqu'on exclut le mil, le

coefficient de corrélation passe à 0,75. De plus on constate que le coefficient de diffusion dépend aussi de la teneur en fructose (0,64). Les tableaux de corrélation sont présentés en Annexe 11.

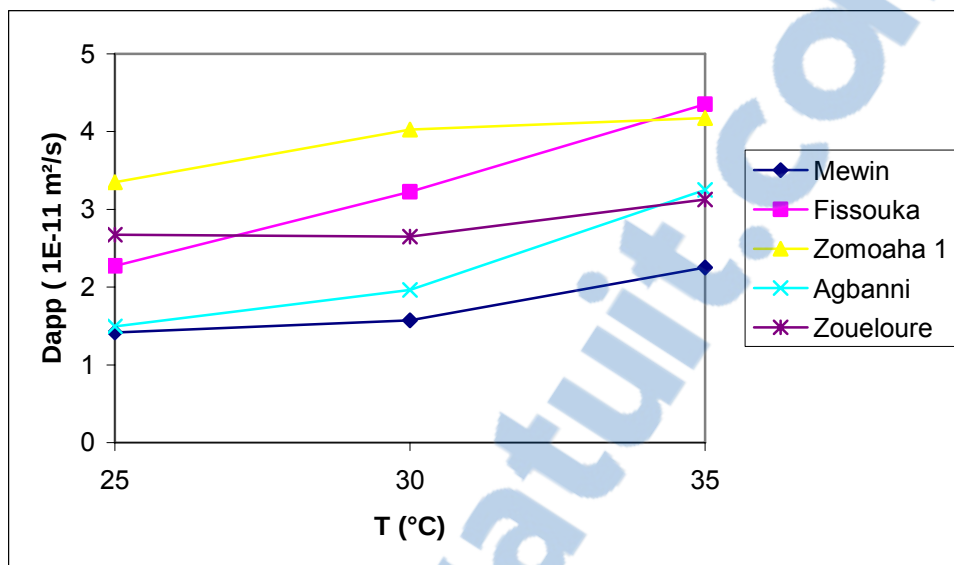


Figure 23 : Evolution du coefficient de diffusion en fonction de la température

11.3 Vers la définition d'une teneur en eau optimale en fin de trempage ?

Pour tester l'idée que la trempage est la combinaison d'une hydratation de type diffusif avec un autre phénomène qui pourrait être la germination, nous avons suivi sur 48h et sur 72h l'évolution de la teneur en eau pendant la trempage et pendant la germination respectivement (Figure 24).

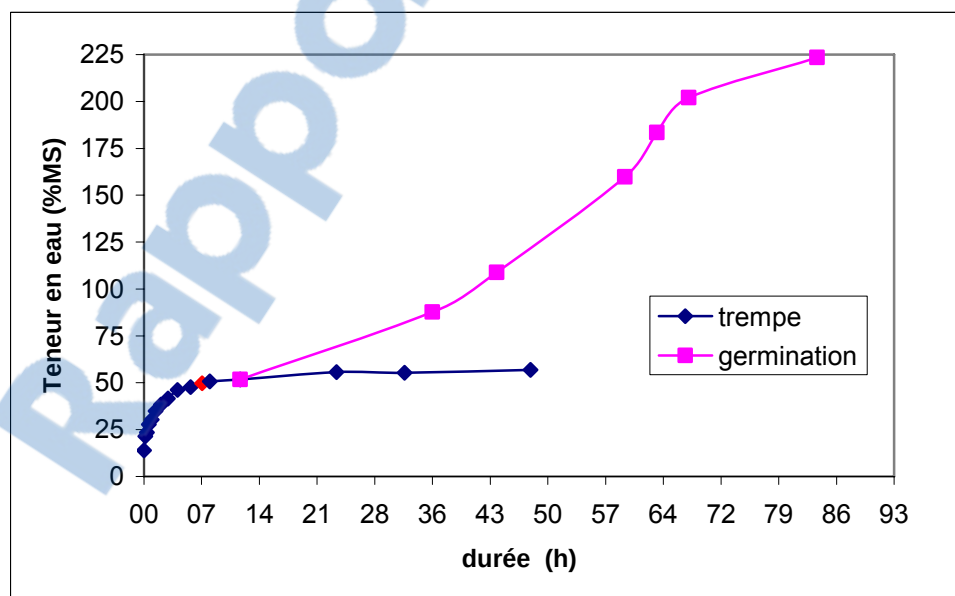


Figure 24 : Evolution de la teneur en eau au cours de la trempage et de la germination (sorgho vrac à 30°C)
Cette représentation montre bien qu'après la phase d'absorption d'eau par diffusion (point initial au point rouge sur la courbe de trempage) l'augmentation de la durée de trempage ne

favorise pas une augmentation considérable de la teneur en eau du grain. La teneur en eau des grains trempés 12h et germés 72h (courbe germination) montre une évolution linéaire. En superposant les deux courbes on peut considérer, pour cette variété, qu'à partir de 7h de trempage la germination pourrait déjà commencer si le milieu lui était favorable. L'excès d'eau constitue un frein (peu d'oxygène) pour les réactions et les modifications biochimiques qui accompagnent la germination. Cette durée de trempage correspond à la teneur en eau d'équilibre de diffusion et est considérée comme teneur en eau optimale pour la trempage. Elle est déterminée à partir de la courbe de trempage (au point de rupture des 2 pentes) pour chacune des variétés. Par cette même méthode, la durée optimale de trempage à différentes températures a aussi été déterminée pour toutes les variétés. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Estimation des teneurs en eau à l'équilibre diffusif et des durées optimales de trempage pour différentes variétés et à différentes températures

Variétés	Indice de vitrosité	Température (°C)	Teneur en eau à l'équilibre diffusif (%MS)	Temps optimal (h : min)
Mewin	1,5	25	44,3	10:58
		30	45,3	10:32
		35	45,1	7:12
Fissouka	3	25	47,2	14:09
		30	46,6	9:59
		35	46,9	7:20
Zomoaha 1	4,5	25	58,5	7:22
		30	59,1	6:14
		35	60,4	5:55
Agbanni	2,5	25	45,6	17:08
		30	45,6	13:01
		35	45,0	7:56
Zoueloure	4,5	25	50,0	8:56
		30	54,8	8:59
		35	56,7	7:27
Pisnou	4,5	30	57,0	7:57
Zomoaha 2	3	30	46,0	9:29
Chabicouman PN	3	30	45,1	12:00
Banninga	2,5	30	43,3	16:07
Vrac Cotonou	3	50	49,8	7:16
Kapelaga (mil)	3,5	30	51,6	10:00

A 30°C, on constate que la durée optimale de trempage prédite se situe entre 6 à 16 h. Par ailleurs, on constate que l'augmentation de la température de l'eau de trempage de 25 à 35°C permet dans tous les cas de réduire la durée de trempage. Cet effet peut être très important comme pour les variétés Agbanni et Fissouka, avec une réduction de la durée de moitié. Cela correspond avec un presque doublement de la diffusivité apparente de l'eau.

A partir de ces résultats, on peut se demander s'il n'est pas possible de définir un temps optimal de trempage. Un trempage plus court conduirait à une teneur en eau trop faible pour une bonne germination alors qu'un prolongement ralentirait la germination. Des travaux complémentaires seraient nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

Banninga est la variété au temps optimal de trempé le plus élevé (16h à 30°C). Les autres grains ont un temps de trempé prédit compris entre 6 et 9h pour les farineux et 10 à 13h pour les vitreux.

11.3.1.1 *Bilan*

En conclusion pour cette partie qui a pour but de prédire la durée de trempé en fonction des caractéristiques du grain, on peut dire :

- ↪ La méthode mise en place pour cette étude est répétable ;
- ↪ L'absorption d'eau pendant la trempé dépend de la vitrosité du grain, de sa géométrie et de la température ;
- ↪ Il est possible de prédire la durée optimale de trempé. Pour 11 variétés dont la dynamique d'absorption d'eau à 30°C a été étudiée, on peut les regrouper en trois familles :
 - ✱ La famille des grains farineux avec une durée de trempé comprise entre 6 et 9h ;
 - ✱ La famille des grains vitreux avec une durée de trempé comprise entre 10 et 13h ;
 - ✱ La famille des grains semi vitreux, à durée de trempé intermédiaire entre les deux premiers groupes.

Compte tenu de l'augmentation du volume du grain au cours de la trempé et de la forme ovoïde des grains, il serait intéressant de faire une identification par la méthode inverse afin d'intégrer correctement ces deux paramètres qui interviennent dans la détermination du coefficient de diffusion.

11.3.2 **Choix des conditions de maltage**

Les conditions de maltage ont été choisies en tenant compte de la synthèse bibliographique, des conditions de maltage traditionnelles, des résultats de la dynamique d'absorption d'eau et des contraintes pratiques.

Nous avons opté pour une trempé et une germination à 30°C parce que c'est la température optimale rencontrée dans la littérature.

Les essais de cinétique de trempé ont montré que la durée maximale de trempé varie entre 6 et 16h. Elle a été fixée à 12h, considérée comme une valeur moyenne et pour faciliter l'organisation du travail.

La durée de germination a été fixée à 3 jours parce que les essais préliminaires ont montré la présence des premières feuilles après 3 jours, ce qui entraînerait beaucoup de pertes de matières dans les radicules et tigelles. L'arrosage des grains pendant la germination est une pratique traditionnelle et nous avons choisi un arrosage toutes les 4h pendant 6min. Cette périodicité correspond à la moyenne des valeurs connues.

La température de séchage a été fixée à 45°C en simulant les conditions de séchage solaire et, la durée à 24h pour des raisons pratiques.

11.3.3 **Caractérisation des malts**

La teneur en eau à la fin de la trempé et de la germination, les activités amylasiques, les teneurs en cendres, amylose et sucres simples du malt ainsi que les pertes de matières pendant le maltage sont présentées dans le Tableau 25.

Tableau 25: Caractéristiques des malts

hs trempe : teneur en eau à 12h de trempe (g/100g MS) ; hh germination : teneur en eau à la fin de la germination (g/100gMH) ; PD : pouvoir diastasique (milli équivalent maltose/g malt sec/min, UPD) α -amylase : activité α -amylasique (Unité Ceralpha/g de malt sec); β -amylase : activité β -amylasique (Unité Bétamyl/g de malt sec ; Pertes (g/100g de grains sec													
Variétés	hsTrempe	hh germination	PD	α -amylase	β -amylase	α/β amylase	Amylose	Cendres	Saccharose	Glucose	Fructose	A.lactique	Pertes
g/ 100g M S													
SORGHOS													
Agbanni	44	62	143	128	67,7	1,9	13	1,3	4,38	2,93	0,46	0,0	19
Natisoya 2	54	75	133	41,2	67,3	0,6	15	1,4	3,04	2,54	0,4	0,0	21
Chabicouman PR	48	75	140	157,5	79,1	2	7	1,2	3,61	3,29	0,63	0,0	24
Natisoya 1	52	73	151	105,1	81,5	1,3	20	1,5	4,49	2,94	0,35	0,0	24
Chabicouman PN	44	70	128	114,3	68,9	1,7	8	1	3,73	2,6	0,18	0,0	18
Soniya	48	70	136	147,1	50,9	2,9	8	1,5	4,29	3,05	0,48	0,0	23
Zomoaha 2	47	68	144	123,2	96,4	1,3	13	0,9	3,45	2,86	0,48	0,0	21
Fissouka	46	64	133	117,9	68,2	1,7	2	1,2	3,53	2,9	0,3	0,0	19
Zomoaha 1	61	69	63	22,2	34,1	0,5	18	1,1	1,15	1,26	0,47	0,1	19
Zoueloure	56	64	134	130,8	62,5	2,1	7	1	2,77	3,11	0,79	0,0	20
Chassisoya	49	68	152	157,6	74,9	2,1	10	1	4,33	3,58	0,6	0,0	24
Banninga	41	71	121	76,9	64,1	1,2	21	0,9	3,6	2,61	0,38	0,0	21
Pisnou	59	66	115	79,3	27	2,9	12	1	2,98	3,39	0,86	0,0	21
Kapelga	42	64	144	146	66,3	2,2	11	1,1	3,51	3,04	0,54	0,0	23
Vrac Cotonou	52	nd	118	57,3	39,1	1,5	20	1,1	2,4	1,8	0,26	0,0	21
Sotakaman	54	nd	148	92,8	82	1,1	14	1,2	2,95	2,65	0,84	0,0	nd
Kioédré	47	nd	164	220,2	81	2,7	8	1,4	4,38	3,23	0,81	0,0	nd
Gnossiconi	55	nd	139	94,5	68,5	1,4	13	1,3	2,62	1,88	0,43	0,0	nd
Mewin	45	58	157	177,3	71,9	2,5	4	1,2	2,74	3,32	0,87	0,0	14
MILS													
Kapelaga	54	62	125	77,7	34,3	2,3	10	0,8	4,97	4,93	1,61	0,0	26
Ka-sablga	53	61	138	130,8	41,2	3,2	6	0,8	3,97	6,44	2,23	0,0	21
Kasui-pelga G	55	61	123	85,7	31,6	2,7	8	1	5	5,04	1,78	0,0	19
Kasui-pelga K	52	59	120	85,1	32,8	2,6	6	0,9	4,19	4,34	1,5	0,0	17
Ecart-type	0,5	3	2	1	1		1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	

n= 2 pour toutes les analyses. Les pertes pendant le maltage correspondent seulement à une production par variété

11.3.3.1 Teneur en eau à la fin de la trempe et de la germination.

Les teneurs en eau à la fin de la trempe (hs trempe) sont comprises entre 41 (Banninga) et 61% base sèche (Zomoaha 1), ce qui correspond à des teneurs en eau base humide de 29 et 38%. Contrairement au sorgho dont les hs trempe varient avec les variétés, les 4 mils étudiés ont tous presque les mêmes hs trempe (52-55%), soit 34-35% base humide. Ces résultats sont comparables à 28-35% base humide rapportés par Ogu et *al.* (2004) pour le sorgho et à 33% obtenu par Shambe et *al.* (1989).

Les teneurs en eau à la fin de la germination (hh germination) suivent la même logique que celles de la trempe. Elles varient de 58 (Mewin) à 75 % base humide (Natisoya 2 et Chabicouman) pour les variétés de sorgho et de 59 (Kasui-pelga K) à 62 % (Kapelaga) pour celles de mil. Pelembe et *al.* (2004) ont aussi obtenu 60% pour deux variétés de mil germées avec humidification des grains par immersion (3 fois/jour, 10min). Mewin, sorgho à petits grains a presque la même teneur en eau à la fin de la trempe que les mils. Les autres 22 variétés étudiées ont toutes une teneur en eau supérieure à 62 %. Cette différence pourrait s'expliquer par la différence de taille et de composition des grains de mil et de sorgho.

11.3.3.2 Activités amylasiques

Cette partie du travail a pour but de distinguer les variétés à pouvoir diastasique important et une activité β -amylasique la plus élevée possible pour la bière (dolo, tchoukoutou) et les variétés à faible activité β -amylase et à activité α -amylasique la plus élevée possible pour les farines infantiles.

Les pouvoirs diastases des variétés de sorgho varient de 63 (Zomoaha 1) à 164 U PD (Kioedre). Les activités β -amylasiques sont comprises entre 27 (Pisnou) et 96 U/g (Zomoaha 2) ; celles de l' α -amylase varie de 22 U/g (Zomoaha 1 du Bénin) à 220 U/g (Kioédré du Burkin Faso).

Les variétés de sorgho Zomoaha 1 et Kioédré sont les variétés aux potentiels germinatifs les plus faible et élevé respectivement.

Toutes les 4 variétés de mil maltées ont une faible activité β -amylasique (32-41 U/g) comparée à 350 U/g rapportées par Pelembe et *al.* (2004) pour 3 jours de germination.

Les activités β -amylasiques des sorghos étudiés excepté Zomoaha 1, Pisnou, le vrac Cotonou (27-39 U/g) et Zomoaha 2 (96 U/g) sont comprises entre 50 et 82 U/g comparées aux 120 U/g obtenues par Agu et Palmer (1997b) pour des sorghos germés trois jours.

Les rapports des activités α/β - amylasiques sont de 2,3-3,2 (mil) et de 0,6-2,9 (sorgho). Beta et *al.* (1995) ont rapporté des rapports β/α - amylasiques de 0,12-0,41 (correspondant à des rapports α/β - amylasiques de 2,44-8,33) pour le sorgho. Ces résultats confirment l'importance du choix variétal pour la malterie.

Les variétés de sorgho et de mil étudiées peuvent être réparties en 4 groupes en tenant compte de leur pouvoir diastasique et leurs activités α et β - amylasiques :

- ☞ Le groupe 1 à pouvoir diastasique et activité β -amylasique élevés. Ce groupe est excellent pour la bière (dolo, tchoukoutou). Il est constitué Sotakaman, Zomoaha 2, Natisoya 1, Kioédré, Chabicouman à panicule rouge, Chassisoya, Mewin ;

- ✧ Le groupe 2 caractérisé par un pouvoir diastasique et une activité α -amylasique élevés, intéressant pour les farines infantiles. Toutes les variétés de mil étudiées appartiennent à cette classe ainsi que Soniya, Kapelga.
- ✧ Le groupe 3, à activités amylasiques moyennes. Il est formé du reste des variétés de sorgho excepté Zomoaha 1. Ce groupe est bon pour la bière ;
- ✧ Le groupe 4 à activités amylasiques très faibles. Zomoaha 1, n'est bon pour la fabrication d'aucun des deux produits.

11.3.3.3 *Cendres*

Le maltage entraîne une perte de la matière minérale du grain. La teneur en matières minérales des grains passe de 1,3-1,9 % MS à 0,9-1,5 % MS chez les sorghos et de 1,3-1,6 % MS à 0,8-1 % MS chez les mils. La perte est en général plus importante pour le mil (33% (Kasui-pelga de Gampela) à 39 % (Kasui-pelga de Kaïbo) comparée à celle du sorgho (14% (Natisoya1 à 34% (Zomoaha 2))). Ces pertes seraient dues à la diffusion des minéraux dans l'eau de trempage ou à un lessivage par l'eau d'arrosage des grains pendant la germination.

11.3.3.4 *Amylose et sucres simples*

Une diminution de la teneur en amylose et une augmentation de la teneur en sucres simples sont observées pour tous les malts comparés aux grains quelque soit la variété (mil ou sorgho). Le sorgho Banninga présente la teneur en amylose la plus élevée après maltage. Sa teneur initiale de 23% passe seulement à 20% MS après maltage. A l'opposé la teneur en amylose du sorgho Fissouka et celle du sorgho Mewin chutent d'une manière drastique après maltage de 23 à 2 % MS et de 21% à 4% MS respectivement.

11.3.3.5 *Acides organiques*

L'acide lactique est présent seulement dans le malt de Zomoaha1 (0,1%). Cette présence d'acide s'expliquerait par la durée de trempage trop longue pour cette variété. Sa durée de trempage prédite pour une absorption d'eau optimale est de 6h alors qu'elle a subi un trempage de 12h. Cette trempage très longue et sans aération crée les conditions de fermentation. Aucune variété ne produit de l'acide acétique dans nos conditions de maltage.

11.3.3.6 *Pertes pendant le maltage*

Les pertes de matières pendant le maltage sont de 14-24% pour les variétés de sorgho et 17-26% pour les variétés de mil. Ces résultats sont supérieurs à 8% (sorgho) et 16% (mil) obtenus par Malleshi et Desikachar (1986) pour une germination de 4 jours. Par contre, ils sont comparables à 19-28% (sorgho) rapportés par Subramanian et *al.* (1995) pour une germination de 4 jours. Sans négliger l'effet des conditions de maltage nous pensons que ces différences seraient dues à une différence variétale.

Pour déterminer les liaisons possibles entre les caractéristiques du malt entre elles, les caractéristiques du grain qui influent sur celles du malt, les analyses de corrélation simple ainsi que l'analyse en composante principale (ACP) ont été réalisées. L'ACP a été également utilisée pour positionner les 23 malts variétaux par rapport aux malts produits au Burkina Faso.

11.3.4 *Analyses de corrélation*

L'analyse de corrélation entre les différentes variables de qualité des 23 malts (Tableau 26) montre les corrélations au seuil 5% significatives (en rouge) :

Tableau 26: Tableau de corrélations des caractéristiques des malts

Variable	Corrélations significatives marquées à $p < ,05000$ entre les caractéristiques du malt N=23								
	PD	Alpha-amylase	Béta-amylase	TE trempé	Amylose	Cendres	Saccharose	Glucose	Fructose
TE trempé	-0,49	-0,53	-0,53	1,00	0,14	-0,10	-0,30	0,07	0,35
PD	1,00	0,77	0,68	-0,49	-0,33	0,31	0,48	0,24	-0,01
Alpha-amylase	0,77	1,00	0,52	-0,53	-0,59	0,21	0,39	0,25	0,03
Béta-amylase	0,68	0,52	1,00	-0,53	0,02	0,35	0,03	-0,34	-0,52
Amylose	-0,33	-0,59	0,02	0,14	1,00	0,15	-0,31	-0,52	-0,40
Cendres	0,31	0,21	0,35	-0,10	0,15	1,00	0,00	-0,44	-0,49
Saccharose	0,48	0,39	0,03	-0,30	-0,31	0,00	1,00	0,66	0,40
Glucose	0,24	0,25	-0,34	0,07	-0,52	-0,44	0,66	1,00	0,90
Fructose	-0,01	0,03	-0,52	0,35	-0,40	-0,49	0,40	0,90	1,00

Tableau 27: Tableau de corrélations des caractéristiques des grains avec ceux des malts

Variable	Corrélations significatives marquées à $p < ,05000$ entre les caractéristiques du grain (colonne) et les caractéristiques du malt (ligne) N=23						
	Poids 1000 grains BS	Amylose	Cendres	Saccharose	Glucose	Fructose	A. citrique
TE trempé	-0,29	-0,55	0,10	0,17	0,55	0,57	-0,11
PD	0,15	0,26	0,20	-0,14	-0,47	-0,52	0,06
Alpha-amylase	0,14	0,12	0,17	0,08	-0,20	-0,29	0,21
Béta-amylase	0,57	0,22	0,25	0,08	-0,29	-0,21	0,47
Amylose	0,09	0,05	0,01	-0,00	0,10	0,17	0,15
Cendres	0,51	-0,13	0,90	0,34	-0,12	-0,09	-0,22
Saccharose	-0,07	0,52	0,11	0,09	-0,30	-0,36	-0,19
Glucose	-0,56	0,13	-0,28	-0,07	0,03	-0,07	-0,30
Fructose	-0,76	-0,12	-0,32	0,00	0,28	0,19	-0,38

- ✧ Une corrélation négative entre la teneur en eau à la fin de la trempe et les activités amylasiques avec de faibles coefficients. R est de -0,49 pour le pouvoir diastasique et -0,53 pour les activités bêta et alpha amylasiques ;
- ✧ Le pouvoir diastasique est corrélé positivement avec l'activité α -amylasique (0,77), l'activité β -amylasique (0,68) et la teneur en saccharose (0,48) ;
- ✧ L'activité α -amylasique est corrélée aussi négativement avec la teneur en amylose (-0,59) ; de même l'activité β -amylasique corrélée négativement avec la teneur en fructose (-0,52).
- ✧ Les autres corrélations plus élevées ($R \geq 0,60$) sont entre le saccharose et glucose (0,66), le glucose et le fructose (0,90).

D'après ces corrélations, la trempe constitue une étape critique à maîtriser si on veut avoir des activités amylasiques optimales. Les grains seraient très sensibles à un surtrempage. L'excès d'eau entraînerait une asphyxie du germe et une réduction de la synthèse enzymatique au cours de la germination. On peut également penser à un manque d'oxygène sachant que les grains ont été trempés en continu, sans renouvellement d'air ou aération pendant 12h. Loreti et al. (2002) ont montré que l'anaérobiose entraîne une répression de la synthèse de l' α -amylase.

Il ressort de l'analyse de corrélation (Tableau 27) entre les caractéristiques du malt et celles du grain des corrélations significatives au seuil de 5%.

- ✧ La teneur en eau à la fin de la trempe est corrélée négativement avec la teneur en amylose (-0,55) et positivement avec les teneurs en glucose (0,55) et fructose (0,57) du grain. Les sucres simples étant hygroscopiques, ils permettraient aux grains d'absorber plus d'eau. En plus, il existe une corrélation entre la teneur en eau à la fin de la trempe et la vitrosité du grain (0,63);
- ✧ Le pouvoir diastasique est corrélé négativement avec la teneur en glucose (-0,47) et en fructose (-0,52). Ceci rejoint encore la teneur en eau en fin de la trempe qui influe négativement sur les activités amylasiques si elle est très élevée.
- ✧ Aucune corrélation n'est apparue entre caractéristiques du grain et l'activité α -amylasique du malt ; Young et al. (1997) ont rapporté qu'il existe une forte corrélation entre la teneur en sucres du grain de maïs et la synthèse de l' α -amylase. De même Lu et al. (2002) ont montré que la synthèse de la α -amylase pendant la germination est induite par la carence en glucose dans le grain. Les travaux de Yu et al. (1996) sur le riz, Loreti et al. (2002) sur l'orge vont dans le même sens. L'absence de corrélation observée entre les teneurs en sucres simples des grains et leur activité α -amylasique de nos échantillons pourrait s'expliquer par la différence entre la composition et la physiologie de l'orge et du riz et celle du sorgho et mil.
- ✧ L'activité β -amylasique est corrélée positivement avec le poids de 1000 grains (0,57) et la teneur en acide citrique du grain (0,47). La teneur en acide citrique du grain jouerait un rôle important pour la synthèse de l'activité bêta amylasique. Il est connu que les réactions de synthèses qui se produisent dans le grain pendant la germination, ne sont possibles que si elles sont couplées à une réaction de production d'énergie. L'acide citrique étant un intermédiaire clé du cycle de Krebs, interviendrait à ce niveau.
- ✧ Les autres corrélations observées sont entre, la teneur en cendres du malt et le poids de 1000 grains (0,51), le saccharose du malt et l'amylose du grain (0,52), le glucose du malt et poids de 1000 grains (-0,56); le fructose du malt et le poids de 1000 grains (0,76).

11.3.5 Analyse en composantes principales (ACP)

11.3.5.1 Visualisation dans l'espace bidimensionnel des 23 malts

23 individus (variétés) sont utilisés. Toutes les caractéristiques des malts (9) sont les variables actives et ceux des grains sont pris comme des variables supplémentaires. Les trois premiers axes contiennent 36,57, 33,76 et 9,40% d'information respectivement. Seul le plan généré par l'axe 1 et l'axe 2, qui explique 70,33% des informations totales a été retenu. L'axe 1 est expliqué par principalement le pouvoir diastasique et l'activité α -amylasique et l'axe 2 par la teneur en glucose, fructose. La β -amylase est entre l'axe 1 et l'axe 2 (Figure 25).

La projection des individus sur ce plan montre que les malts des mils (en bas de la Figure 26) sont essentiellement caractérisés par le glucose, fructose et une faible activité β -amylasique. Le sorgho Zomoaha 1 (10) placé sur l'axe 1 à l'opposé du pouvoir diastasique et de l'activité α -amylasique a une activité amylasique médiocre. La variété de sorgho Kioédre (18) se démarque par son pouvoir diastasique, ses activités α et β -amylasique élevés et Pisonou (14) par sa faible activité β -amylasique. Les autres variétés forment un groupe assez homogène au centre du graphique, c'est-à-dire avec des caractéristiques moyennes.

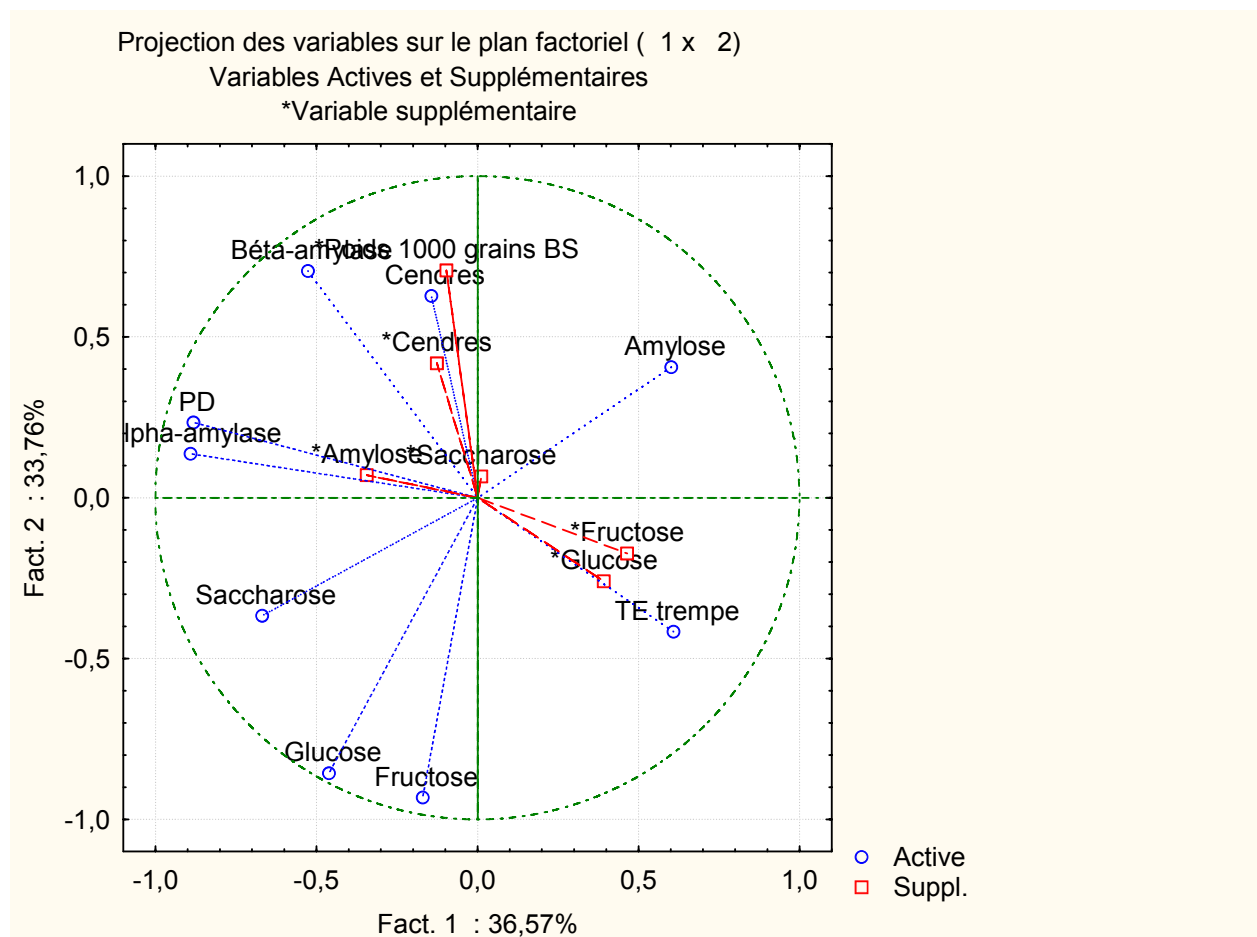


Figure 25 : Projection des caractéristiques des malts sur un plan à deux axes

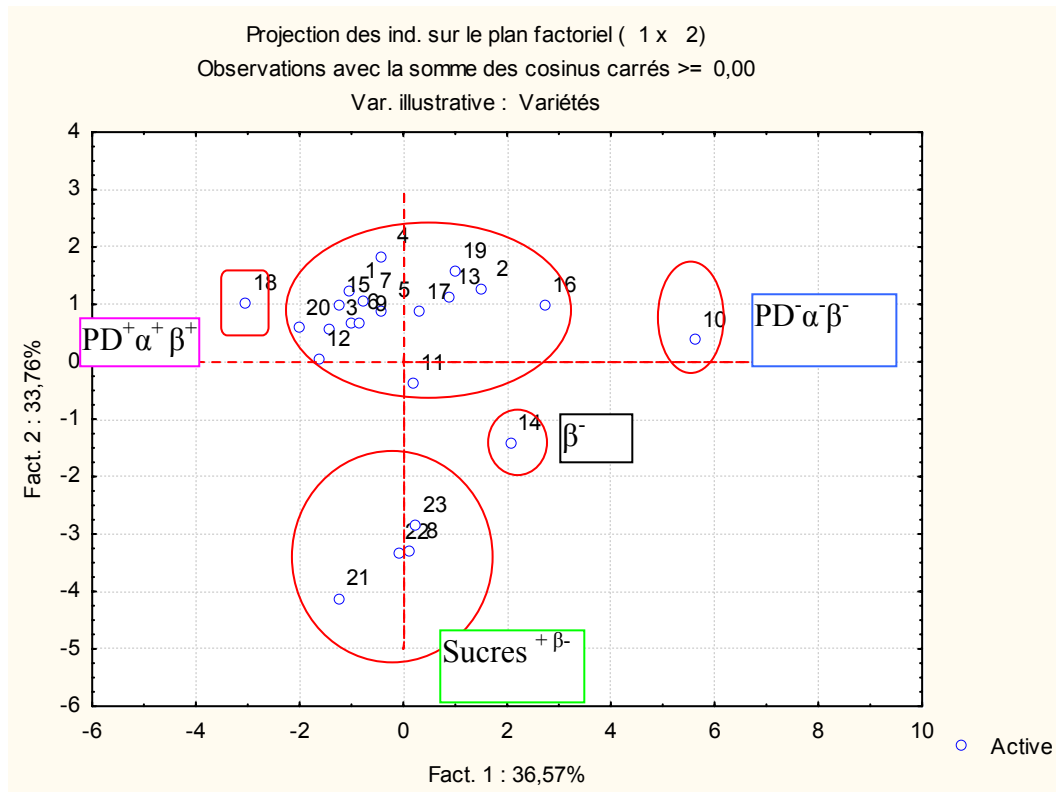


Figure 26 : Représentation des 23 variétés sur le 1er plan principal de l'ACP identifié par le pouvoir diastasique et l'activité alpha amylasique (axe1) et la teneur en glucose, fructose (axe 2)

11.3.5.2 Visualisation spatiale relative des 23 malts variétaux et des 10 malts traditionnels et semi industriels du Burkina Faso

Trente trois individus (malts) sont utilisés et 7 caractéristiques des malts (pouvoir diastasique, activités alpha et bêta amylasiques, saccharose, glucose, fructose, acide citrique) constituent les variables actives. Les acides lactique et acétique ont été éliminés des analyses parce que seulement 3 malts en contiennent. Les trois premiers axes apportent 89% des informations totales mais seul le plan (1 x 2) qui apporte 82% des informations est retenu.

L'axe 1 est construit principalement par les activités amylasiques et l'axe 2 par les sucres (Figure 27).

La projection des individus, sur ce plan (Figure 28), permet de retrouver la famille des mils précédemment identifiée à laquelle se joint le malt produit par l'IRD du Burkina-Faso (en bas de la Figure 28). Les malts de l'atelier n°2 et un malt de l'atelier n°1 forment un groupe caractérisé par une teneur en sucres élevée et une faible activité β -amylasique (étiquette contour vert brillant). Misola, Pissou, l'un des malts de Faso Ribo et de l'atelier n°1 forment une classe à faibles activités amylasiques. Cette classe est positionnée à l'opposé de la majorité des 23 malts variétaux à activités amylasiques importantes (étiquette contour rose). Le dernier groupe qui est pauvre en sucres et en activités amylasiques est constitué de Zomoaha 1 et de l'un des malts de Faso Ribo (étiquette contour jaune).

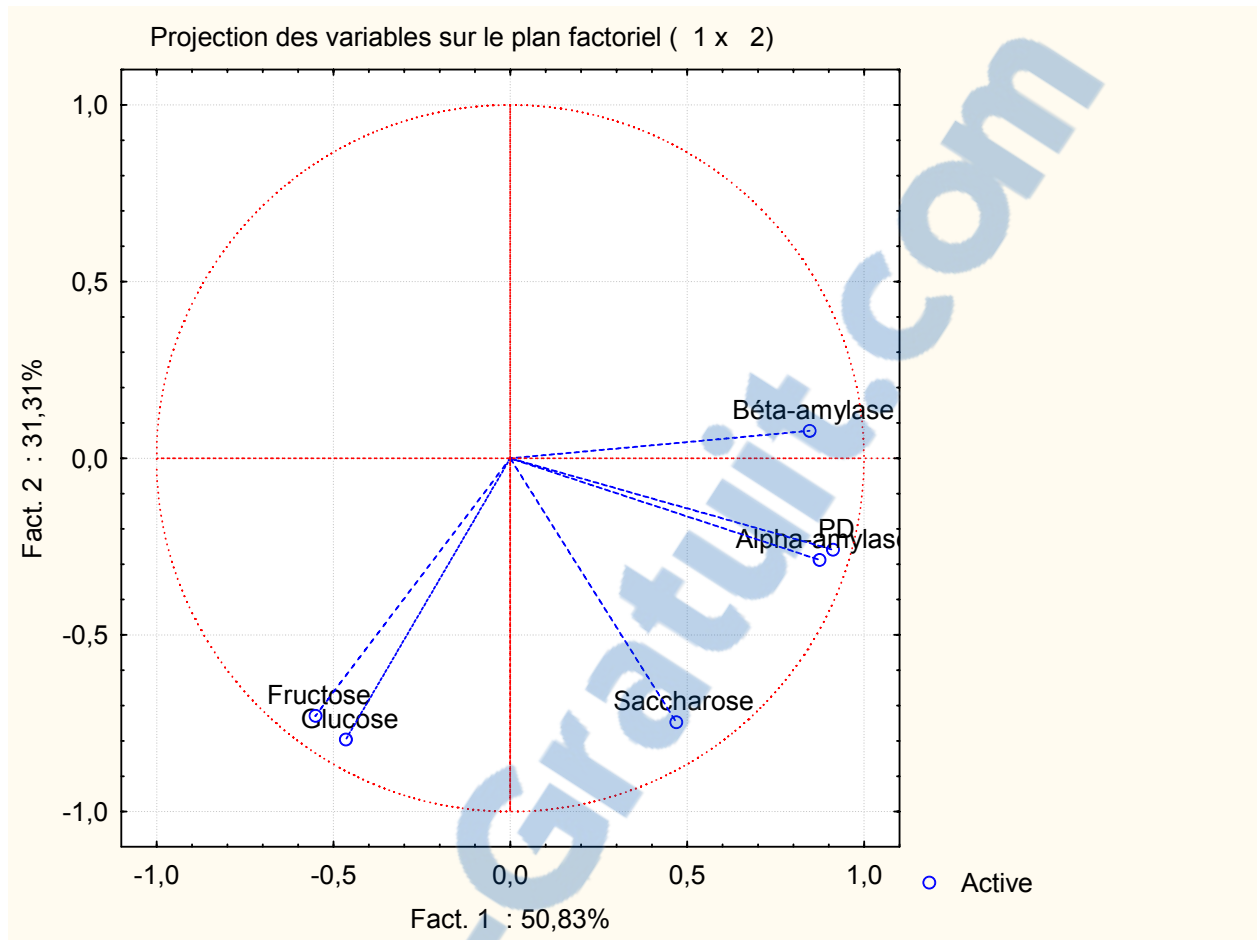


Figure 27: Projection des caractéristiques des malts sur le plan factoriel (1 x 2)

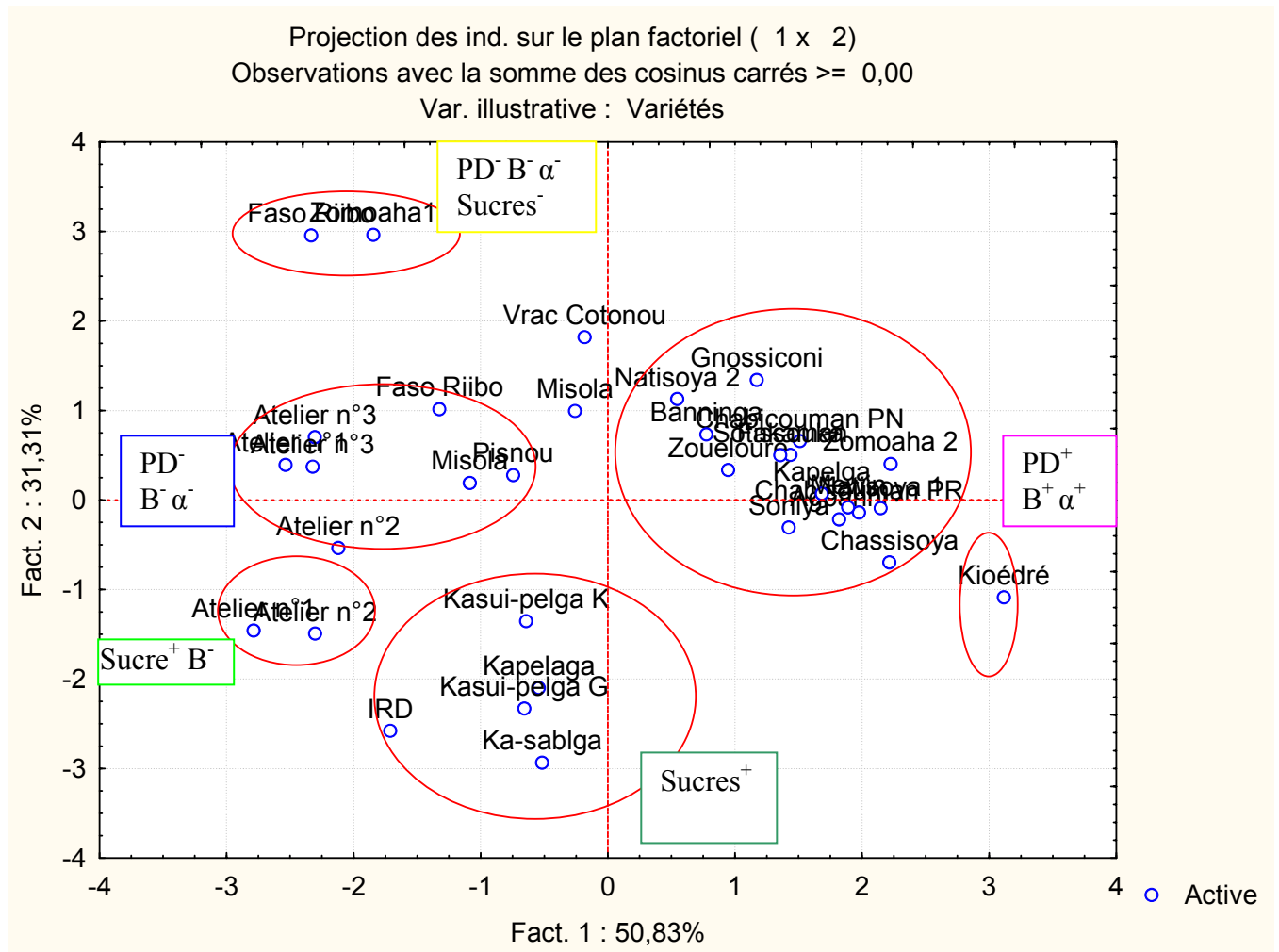


Figure 28: Projection des variétés sur le plan factoriel (1 x 2)

11.3.6 Bilan

Quatre « variétés » de mil et 19 « variétés » de sorgho ont été maltées dans les mêmes conditions. Les malts ont été caractérisés afin de choisir les variétés appropriées pour la fabrication de la bière ou les farines pour enfants d'une part et de les comparer aux malts produits au Burkina Faso. Dans nos conditions de maltage il ressort que :

- ☞ Les mils ont une activité α -amylasique plus importante que l'activité β -amylasique ce qui est intéressant pour la production de farines infantiles. Ces malts se caractérisent aussi par des teneurs élevées en sucres simples par rapport aux malts de sorgho. L'ACP montre que ce résultat est expliqué par la différence entre la composition en sucres de ces grains.
- ☞ Les sorghos se répartissent en trois groupes :
 - ✱ Les sorghos à pouvoir diastasique et activité β -amylasique élevés, excellents pour la bière (dolo, tchoukoutou) : Sotakaman, Zomoaha 2, Natisoya 1, Kioédre, Mewin, Chassisoya, Chabicom à panicule rouge ;
 - ✱ Les sorghos à activités amylasiques moyennes, la majorité des sorghos étudiés ; ils sont également bons pour la bière

- ✱ Zomoaha 1, sorgho à pouvoir amylasique très faible, qui n'est bon pour la fabrication d'aucun des deux produits ;
- ↪ Les 23 malts faits à partir de variétés pures, excepté Zomoaha1 ont une activité plus élevée que celles des malts traditionnels et semi industriels ;
- ↪ Les malts traditionnels et semi industriels provenant d'un même producteur ont des activités amylasiques différentes.

Conclusion et perspectives

Ce travail avait les objectifs suivants :

- ↬ Evaluer la qualité technologique des malts produits dans quelques ateliers de maltage du Burkina Faso ;
- ↬ Mettre au point le pilote de maltage du CIRAD ;
- ↬ Etudier la dynamique d'absorption d'eau pendant la trempe afin d'identifier les indicateurs qui permettent de déterminer une durée de trempe suffisante pour une variété donnée ;
- ↬ Déterminer l'intérêt pour la fabrication de la bière locale ou pour les farines infantiles de 4 variétés de mil et 19 de sorgho provenant du Bénin et/ou du Burkina Faso.

Il ressort de la caractérisation des malts provenant du Burkina Faso :

- ↬ Une grande variabilité aussi bien au niveau des activités amylasiques qu'au niveau composition en sucres simples et en acides organiques. Les malts produits par un même atelier avec le même mil ou sorgho ont des caractéristiques différentes ;
- ↬ Tous ces malts ont une faible activité amylasique par rapport à ceux produits au niveau pilote ;
- ↬ Ils ont une teneur importante en sucres simples particulièrement en glucose ;
- ↬ Les acides lactique et acétique sont présents dans certains malts, conséquence possible d'une fermentation hétérolactique pendant le maltage ou la conservation.

Les malts produits au niveau pilote du CIRAD lors des études antérieures ont été caractérisés en même temps que ces malts traditionnels en vue de savoir les effets de l'aération et d'une germination à température élevée sur les activités amylasiques. On peut dire que :

- ↬ Il n'existe pas de différence entre les malts issus d'une trempe alternée et une trempe en continu dans les conditions étudiées.
- ↬ La germination à haute température (50°C) n'est pas favorable pour un bon développement des activités amylasiques.

En ce qui concerne la mise au point du pilote de maltage, des modifications ont été réalisées puis les performances ont été validées par une étude de reproductibilité. Au bilan, le seuil de détection d'une différence avec un risque de 5% entre deux variétés est de 5 unités amylasiques pour l'ensemble (maltage + dosages). Ces travaux permettent également de fabriquer 8 lots de malts en une seule production.

Par ailleurs, l'allure des cinétiques de germination montre que les activités amylasiques ont un maximum puis baissent, indiquant ainsi l'importance d'une approche cinétique dans la recherche des durées optimales de germination.

Lors de l'étude de la reproductibilité du pilote de maltage, un effet important de séchage sur les activités amylasiques a été observé. Trois modes de stabilisation ont été évalués : la congélation (- 18°C), la lyophilisation et enfin le séchage (45°C) du malt vert. En prenant pour référence les pouvoirs amylasiques des malts verts, tous les modes de stabilisation entraînent une perte des activités amylasiques. Le séchage a un effet négatif plus important que les autres modes de stabilisation.

L'étude de la dynamique d'absorption d'eau pendant la trempe montre que la trempe peut être représentée par un modèle diffusif, considérant que sa fonction principale est l'hydratation des grains pour assurer les transports et les réactions biochimiques qui initient la germination.

Les coefficients de diffusion apparente sont de l'ordre de $3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les variétés farineuses et de $1.5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les variétés vitreuses. On pourrait dans la même logique déterminer la durée optimale de trempe des variétés de grains à une température donnée. Cette durée pourrait correspondre au temps où l'équilibre de diffusion d'eau est atteint. Les valeurs qui ont été identifiées sont comprises entre 6h et 9h pour les variétés farineuses et entre 10h et 13h pour les variétés vitreuses. La durée optimale de trempe pour les variétés semi vitreuses est intermédiaire entre celle des variétés farineuses et vitreuses.

Les conclusions suivantes ressortent du maltage des 23 variétés de grains en vue de choisir les variétés appropriées pour la fabrication de la bière ou des farines pour enfants d'une part et de les comparer aux malts traditionnels ou semi industriels du Burkina-Faso d'autre part.

- ↪ Les mils ont une activité α -amylasique élevée, supérieure à leur activité β -amylasique. Ils sont intéressants pour les farines infantiles. Ces malts se caractérisent aussi par des teneurs élevées en sucres simples par rapport aux malts de sorgho.
- ↪ Les sorghos se répartissent en trois groupes :
 - * Sept sorghos à pouvoir diastasique et activité β -amylasique élevés, excellents pour la bière (dolo, tchoukoutou) : Sotakaman, Zomoaha 2, Natisoya 1, Kioédéré, Mewin, Chassisoya, Chabicoman à panicule rouge ;
 - * Onze sorghos ont des activités amylasiques moyennes; ils peuvent convenir pour la bière aussi ;
 - * Un sorgho, Zomoaha 1, présente des activités amylasiques très faibles. Son utilisation comme malt est peu intéressante.

L'analyse de ces résultats montre qu'il est important de maîtriser les conditions de trempe et de séchage pour permettre une bonne synthèse des amylases pendant la germination et pour limiter leur dégradation pendant le séchage.

Ce travail, combinant la mise au point d'outils et de méthodes avec une production de résultats fait ressortir la nécessité de démarches complexes pour évaluer correctement l'aptitude au maltage des variétés de sorgho et de mil. Pour le mener à son terme, les priorités nous semblent être les suivantes :

- ↪ Malter les variétés en respectant leur durée de trempe et de germination par une approche cinétique ;
- ↪ Poursuivre le test de l'influence des conditions de stabilisation des malts frais sur les activités amylasiques.

Ces deux points devraient être pris en considération pour la suite de ce travail qui est l'optimisation au niveau pilote des conditions de maltage.

Références bibliographiques

- Adrian J, Potus J, Poiffait A, Dauvillier P (1998). Introduction à l'analyse nutritionnelle des denrées alimentaires, Ed Lavoisier, Paris 254 p.
- Agu RC (1995). Comparative study of experimental beers brewed from millet, sorghum and barley malts. *Process Biochemistry* **30**: 311-315.
- Agu RC, Palmer GH (1996). Enzymic breakdown of endosperm proteins of sorghum at different malting temperatures. *J-Inst-Brew* **102**: 415-418.
- Agu RC, Palmer GH (1997a). Effect of mashing procedures on some sorghum varieties germinated at different temperatures. *Process Biochemistry* **32**: 147-158.
- Agu RC, Palmer GH (1997b). The effect of temperature on the modification of sorghum and barley during malting. *Process Biochemistry* **32**: 501-507.
- Agu RC, Palmer GH (1998). A reassessment of sorghum for lager-beer brewing. *Bioresource Technology* **66**: 253-261.
- Agu RC, Palmer GH (1999). Comparative development of soluble nitrogen in the malts of barley and sorghum. *Process Biochemistry* **35**: 497-502.
- Aisien AO (1982). Enzymatic modification of sorghum endosperm during seedling growth and malting. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **33**: 754-759.
- Aisien AO, Ghosh BP (1978). Preliminary studies of the germination behaviour of guinea corn (*Sorghum vulgare*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* **20**: 850-852.
- Allosio N, Boivin P, Bertrand D, Courcoux P (1997). Characterisation of barley transformation into malt by three-way factor analysis of near infrared spectra. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **5**: 157-166.
- Anatharaman K, Finot PA (1993). Nutritional aspects of food proteins in relation to technology. *Food Reviews International* **9**: 629-655.
- Aniche GN (1990). Studies on the effects of germination and drying conditions on the cyanide content of sorghum sprouts. *Journal of Food Science and Technology* **27**: 202-204.
- Aviara NA, Ajibola OO, Aregbesola OA, Adedeji MA (2005). Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50°C. *Journal of Stored Products Research* **42**: 290-301.
- Badau MH, Nkama I, Jideani IA (2005). Phytic acid content and hydrochloric acid extractability of minerals in pearl millet as affected by germination time and cultivar. *Food Chemistry* **92**: 425-435.
- Bennett VA, Morales E, Gonzalez J, Peerson JM, de Romana GL, Brown KH (1999). Effects of dietary viscosity and energy density on total daily energy consumption by young Peruvian children. *American Journal of Clinical Nutrition* **70**: 285-291.
- Bernfeld P (1955). Amylases methods in enzymology. Academic Press, New York **14**: 149-150.
- Beta T, Rooney LW, Marovatsanga LT, Taylor JRN (2000). Effect of Chemical Treatments on Polyphenols and Malt Quality in Sorghum. *Journal of Cereal Science* **31**: 295-302.
- Beta T, Rooney LW, Waniska RD (1995). Malting characteristics of sorghum cultivars. *Cereal Chemistry* **72**: 533-538.
- Bhise VJ, Chavan JK, Kadam SS (1988). Effects of malting on proximate composition and in vitro protein and starch digestibilities of grain sorghum. *Journal of Food Science and Technology* **25**: 327-329.
- Botes BDP, Joubert FJ, Novellie L (1967). Kaffircorn malting and brewing studies: Purification and properties of sorghum malt alpha-amylase. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **18**: 409-4115.
- Broutin C, Totté A, Tine E, François M, Carlier R, Badini Z (2003). Transformer les céréales pour les nouveaux marchés urbains : opportunités pour des petites entreprises en Afrique. GRET, Paris: 296p.

- Cahagnier B (2001). Céréales et mycotoxines. Généralités, présence, dosage. *Industries des Céréales* **122**: 22-29.
- Capanzana MV, Buckle KA (1997). Optimisation of Germination Conditions by Response Surface Methodology of a High Amylose Rice (*Oryza sativa*) Cultivar. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* **30**: 155-163.
- Chantereau J, Nicou R (1994). Sorghum. Macmillan, London: 320p.
- Chavan JK, Kadam SS, Salunkhe DK (1981). Changes in tannin, free amino acids, reducing sugars, and starch during seed germination of low and high tannin cultivars of sorghum. *Journal of Food Science* **46**: 638-639.
- Comolet R (1997) Mécanique expérimentale des fluides, Vol 1. Masson, Paris: 242p.
- Cox D, Jones DM, Marder RC, Wood J (1997). Processing and utilization of sorghum: selected bibliographical references (with abstracts) from 1990 to 1996. University of Greenwich, Chatham : 98p.
- Delpeuch F, Martin-Prével Y, Fouéré T, Traissac P, Mbemba A, Ly C, Sy A, Trèche S, Maire B (1996). L'alimentation de complément du jeune enfant après la dévaluation du franc CFA: deux études de cas en milieu urbain, au Congo et au Sénégal. *Bulletin de l'Organisation Mondiale de la Santé* **74**: 1-120.
- Demuyakor B, Ohta Y (1992). Malt characteristics of *Sorghum vulgare* varieties from Ghana. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **59**: 457-462.
- Dendy DAV (1995). Sorghum and millets: chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists, Saint-Paul: 406p.
- Dewar J, Taylor JRN, Berjak P (1997). Effect of germination conditions, with optimised steeping, on sorghum malt quality with particular reference to free amino nitrogen. *Journal of the Institute of Brewing* **103**: 171-175.
- Dicko MH, Gruppen H, Traoré AS, Voragen AGJ, van Berkel WJH (2006). Sorghum grain as human food in Africa : relevance of content of starch and amylase activities. *African Journal of Biotechnology* **5**: 384-395.
- Dillon JC (1989). Les produits céréaliers dans l'alimentation de sevrage du jeune enfant en Afrique. In Céréales en régions chaudes. AUPELF-UREF, Eds John Libbey Eurotext, Paris, pp 299-307.
- Dufour JP, Melotte L (1992). Sorghum malts for the production of a lager beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists* **50**: 110-119.
- Eglinton JK, Langridge P, Evans DE (1998). Thermostability variation in alleles of barley beta-amylase. *Journal of Cereal Science* **28**: 301-309.
- Elkhalil EAI, El Tinay AH, Mohamed BE, Elsheikh EAE (2001). Effect of malt pretreatment on phytic acid and in vitro protein digestibility of sorghum flour. *Food Chemistry* **72**: 29-32.
- Elmaki HB, Babiker EE, El Tinay AH (1999). Changes in chemical composition, grain malting, starch and tannin contents and protein digestibility during germination of sorghum cultivars. *Food Chemistry* **64**: 331-336.
- Eneje LO, Ogu EO, Aloh CU, Odibo FJC, Agu RC, Palmer GH (2004). Effect of steeping and germination time on malting performance of Nigerian white and yellow maize varieties. *Process Biochemistry* **39**: 1013-1016
- EtokAkpan OU (2004). Changes in sorghum malt during storage. *Journal of the Institute of Brewing* **110**: 189-192.
- Evans DE, MacLeod LC, Eglinton JK, Gibson CE, Zhang X, Wallace W, Skerritt JH, Lance RCM (1997). Measurement of Beta-amylase in Malting Barley (*Hordeum vulgare*L.): Development of a Quantitative ELISA for Beta-amylase. *Journal of Cereal Science* **26**: 229-239.

- Evers AB, A.B. O'Brien, L. (1999). Cereal structure and composition. *Australian. Journal of Agricultural Research* **50**: 629-650.
- Ezeogu LI, Okolo BN (1994). Effect of final warm water steep and air rest cycles on malt properties of three improved Nigerian sorghum cultivars. *Journal of the Institute of Brewing* **100**: 335-338.
- Ezeogu LI, Okolo BN (1995). Effect of air rest periods on malting sorghum response to final warm water steep. *Journal of the Institute of Brewing* **101**: 39-45.
- FAO (1995). Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. Rome, FAO. (16/11/05) <http://www.fao.org/docrep/T0818F/T0818F00.htm>
- FAO (2005). Agricultural data: FAOSTAT. (16/11/05). <http://www.faostat.fao.org/faost/default.jsp>
- Fliedel G, Marti A, Thiébaud S (1996). Caractérisation et valorisation du sorgho. CIRAD-CA, Montpellier: 404 p.
- Gadaga TH, Mutukumira AN, Narvhus JA, Feresu S.B. (1999). A review of traditional fermented foods and beverages of Zimbabwe. *International Journal of Food Microbiology* **53**: 1-11.
- Geankoplis CJ (1993). Transport processes and unit operations. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New jersey: 921p.
- Giamarchi P (1992). Dosage de l'activité alpha et bêta-amylasique. In *Methodes d'analyse. ORSTOM, laboratoire de Nutrition, Brazaville-Congo*: pp 1-8.
- Goode DL, Arendt EK (2003). Pilot scale production of a lager beer from a grist containing 50% unmalted sorghum. *Journal of the Institute of Brewing* **109**: 208-217.
- Halkier BA, Moller BL (1989). Biosynthesis of the cyanogenic glucoside dhurrin in seedlings of *Sorghum bicolor* (L.) Moench and partial purification of the enzyme system involved. *Plant Physiology* **90**: 1552-1559.
- Harlan JR, De Wet JM (1971). A simplified classification of cultivated sorghum. *Crop Science* **12** : 172-176.
- Igyor MA, Ogbonna AC, Palmer GH (2001). Effect of malting temperature and mashing methods on sorghum wort composition and beer flavour. *Process Biochemistry* **36**: 1039-1044.
- Ikedioji CO, Olugboji O, Okoh PN (1988). Cyanide profile of component parts of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) sprouts. *Food Chemistry* **27**: 167-175.
- Ilori MO, Fessehatzion B, Olajuyigbe OA, Babalola GO, Ogundiwin JO (1991). Effect of malting and brewing processes on the microorganisms associated with sorghum grains and malt. *MBAA Technical Quaterly* **28**: 45-49.
- Iwuoha CI, Aina JO (1997). Effects of steeping condition and germination time on the alpha-amylase activity, phenolics content and malting loss of Nigerian local red and hybrid short Kaura sorghum malts. *Food Chemistry* **58**: 289-295.
- Kayode APP, Adegbedi A, Hounhouigan JD, Linnemann AR, Nout MJR (2005). Quality of farmers' varieties of sorghum and derived foods as perceived by consumers in Benin. *Ecology of Food and Nutrition* **44**: 271-294.
- Lasekan OO (1991). A preliminary study of the comparative mating qualities of *Sorghum bicolor* and *Sorghum guineensis*. *Food Chemistry* **39**: 241-247.
- Lasekan OO, Lasekan WO (2000). Moisture sorption and the degree of starch polymer degradation on flours of popped and malted sorghum (*Sorghum bicolor*). *Journal of Cereal Science* **31**: 55-61.
- Laurière C, Doyen C, Thévenot C, Daussant J (1992). Beta-amylase in cereal: A study of the maize beta-amylase system. *Plant Physiology* **100**: 887-893.

- Leloup VC, P. Buléon, A. (1994). Les transformations enzymatiques des glucides. In B Godon, ed, Bioconversion of cereal products, New York:VCH: pp 79-128.
- Loreti E, Matsukura C, Gubler F, Alpi A, Yamaguchi J, Perata P (2000). Glucose repression of alpha-amylase in barley embryos is independent of GAMYB transcription. *Plant Molecular Biology* **44**: 85-90.
- Loreti E, Vernieri P, Alpi A, Perata P (2002). Repression of alpha-amylase activity by anoxia in grains of barley is independent of ethanol toxicity or action of abscisic acid. *Plant biology* **4**: 266-272.
- Lu CA, Ho THD, Ho SL, Yu SM (2002). Three novel MYB proteins with one DNA binding repeat mediate sugar and hormone regulation of alpha-amylase gene expression. *Plant cell* **14**: 1963-1980.
- Mahgoub SEO, Elhag SA (1998). Effect of milling, soaking, malting, heat-treatment and fermentation on phytate level of four Sudanese sorghum cultivars. *Food Chemistry* **61**: 77-80.
- Malleshi NG, Desikachar HSR (1986). Studies on comparative malting characteristics of some tropical cereals and millets. *Journal of the Institute of Brewing* **92**: 174-176.
- Malleshi NG, Daodu MA, Chandrasekhar A (1989). Development of weaning food formulation based on malting and roller drying of sorghum and cowpea. *International Journal of Food Science and Technology* **24**: 511-519.
- Malleshi NG, Desikachar HSR (1988). Reducing the paste viscosity (dietary bulk) of roller dried weaning foods by incorporating malt flour or fungal amylases. *Journal of Food Science and Technology of India* **25**: 1-3.
- Mbithi-Mwikya S, van Camp J, Yiru Y, Huyghebaert A (2000). Nutrient and antinutrient changes in finger millet (*Eleusine Coracana*) during sprouting. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* **33**: 9-14.
- Mbofung CM, Fombang EN (2003). Improving the digestibility and availability of nutrients from sorghum flour through improved malting techniques. In 2ème Atelier international/ 2nd International workshop: Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles/ Food-based approaches for a healthy nutrition. Ouagadougou, 23-28/11/2003 : pp 489-502.
- McFarlane JA, John AE, Marder RC (1995). Storage of sorghum and millets : Including drying for storage, with particular reference to tropical areas and the mycotoxin problem. In Dendy, ed, Sorghum and millets : Chemistry and Technology. American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA. p. 169-183.
- Mestres C, Matencio F, Pons B, Yajid M, Flidel G, 1996. A rapid method for the determination of amylose content by using differential-scanning calorimetry. *Starch/Staerke*, **48**: 2-6.
- Michodjèhoun L (2000). Système technique et caractérisation du gowé, une pâte fermentée à base de céréales. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université nationale du Bénin, Bénin : 75p.
- Michodjèhoun-Mestres L, Hounhouigan DJ, Dossou J, Mestres C (2005). Physical, chemical and microbiological changes during natural fermentation of "gowé", a sprouted or non sprouted sorghum beverage from West-Africa. *African Journal of Biotechnology* **4**: 487-496.
- Muralikrishna G, Nirmala M (2005). Cereal alpha-amylases-an overview. *Carbohydrate Polymers* **60**: 163-173.
- Nirmala M, Muralikrishna G (2003a). In vitro digestibility studies of cereal flours and starches using purified finger millet (*Eleusine coracana*, ragi, Indaf-15) amylases. *Carbohydrate Polymers* **52**: 275-283.

- Nirmala M, Muralikrishna G (2003b). Properties of three purified alpha-amylases from malted finger millet (Ragi, *Eleusine coracana*, Indaf-15). *Carbohydrate Polymers* **54**: 43-50
- Nirmala M, Muralikrishna G (2003c). Three alpha-amylases from malted finger millet (Ragi, *Eleusine coracana*, Indaf-15)-purification and partial characterization. *Phytochemistry* **62**: 21-30.
- Nirmala M, Subba Rao MVSST, Muralikrishna G (2000). Carbohydrates and their degrading enzymes from native and malted finger millet (Ragi, *Eleusine coracana*, Indaf-15). *Food Chemistry* **69**: 175-180.
- Odibo FJC, Nwankwo LN, Agu RC (2002). Production of malt extract and beer from Nigerian sorghum varieties. *Process Biochemistry* **37**: 851-855.
- Ogbonna AC, Obi SKC, Okolo BN (2004) Optimization of proteolytic activities in malting sorghum. *Process Biochemistry* **39**: 711-716.
- Ogu EO, Odibo FJC, Agu RC, Palmer GH (2004). Malting studies of some selected brewing sorghum varieties. *MBAA Technical Quarterly* **41**: 386-389.
- Oi Y, Kitabatake N (2003). Chemical composition of an East African traditional beverage, *Togwa*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **51**: 7024-7028.
- Okolo BN, Ezeogu LI (1995). Duration of final warm water steep as a factor influencing some carbohydrate related properties of sorghum malt. *Journal of the Institute of Brewing* **101**: 267-274.
- Okolo BN, Ezeogu LI (1996). Promoting sorghum reserve protein mobilisation by steeping in alkaline liquor. *Journal of the Institute of Brewing* **102**: 277-284.
- Okon EU, Uwaifo OA (1984). Partial purification and properties of beta-amylase isolated from *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **32**: 11-14.
- Okungbowa J, Obeta JAN, Ezeogu LI (2002). Sorghum beta-amylase production: relationship with grain cultivar, steep regime, steep liquor composition and kilning temperature. *Journal of the Institute of Brewing* **108**: 362-370.
- Olatunji O, Jibogun AC, Anibaba TS, Oliyide VO, Ozumba AU, Oniwinde AB, Koleoso O (1993). Effect of different mashing procedures on the quality of sorghum beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists* **51**: 67-70.
- Onofiok NO, Nnanyelugo, D.O. (1998). Weaning foods in West Africa: Nutritional problems and possible solutions. *Food and Nutrition Bulletin* **19**: 27-33.
- Onyeka U, Dibia I (2002). Malted weaning food made from maize, soybean, groundnut and cooking banana. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **82**: 513-516.
- Owuama CI, Asheno I (1994). Studies on malting conditions for sorghum. *Food Chemistry* **49**: 257-260.
- Pathirana RA, Sivayogasundaram K, Jayatissa PM (1983). Optimisation of conditions for malting of sorghum. *Journal of Food Science and Technology* **20**: 108-111.
- Pelembe LAM, Dewar J, Taylor JRN (2002). Effect of malting conditions on pearl millet malt quality. *Journal of the Institute of Brewing* **108**: 7-12.
- Pelembe LAM, Dewar J, Taylor JRN (2004). Effect of germination moisture and time on pearl millet malt quality - With respect to its opaque and lager beer brewing potential. *Journal of the Institute of Brewing* **110**: 320-325.
- Pomeranz Y, Czchajowska Z, Lai FS (1986). Gross composition of coarse and fine fractions of small corn samples ground on the stenvert hardness tester. *Cereal Chemistry* **63**: 22-26.
- Ratnavathi CV, Sashidhar RB (2000). Changes in enzyme activities and aflatoxin elaboration in sorghum genotypes following *Aspergillus parasiticus* infestation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **80**: 1713-1721.

- Renan M (2001). Etude des conditions de maltage du sorgho: Mise au point de méthodes d'analyse de la qualité des malts et mise en évidence de l'effet de certains facteurs. Rapport de stage de fin d'études. Institut National Supérieur de Formation Agro-Alimentaire (INSFA), Rennes : 91p.
- Serna-Saldivar S, Rooney LW (1995). Structure and Chemistry of sorghum and millets. In DAV Dendy, ed, Sorghum and millets: Chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA: 406p.
- Shambe T, Vancir N, Gambo E (1989). Enzyme and acid hydrolysis of malted millet (*Pennisetum typhoides*) and sorghum (*Sorghum bicolor*). *Journal of the Institute of Brewing* **95**: 13-16
- Singh M, Krikorian AD (1982). Inhibition of trypsin activity in vitro by phytate. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* **30**: 235-242.
- Sripriya G, Antony U, Chandra TS (1997). Changes in carbohydrate, free amino acids, organic acids, phytate and HCl extractability of minerals during germination and fermentation of finger millet (*Eleusine coracana*). *Food Chemistry* **58**: 345-350.
- Subbarao KV, Datta R, Sharma R (1998). Amylases synthesis in scutellum and aleurone layer of maize seeds. *Phytochemistry* **49**: 657-666.
- Subramanian V, Sambasiva Rao N, Jambunathan R, Murty DS, Reddy BVS (1995). The Effect of malting on the extractability of proteins and its relationship to diastatic activity in sorghum. *Journal of Cereal Science* **21**: 283-289.
- Taylor JRN (1983). Effect of malting on the protein and free amino nitrogen composition of sorghum. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **34**: 885-892.
- Taylor JRN (1992). Mashing with malted grain sorghum. *Journal of the American Society of Brewing Chemists* **50**: 13-18.
- Taylor JRN, Boyd HK (1986). Free alpha-amino nitrogen production in sorghum beer mashing. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **37**: 1109-1117.
- Taylor JRN, Boyd HK, Pickerell ATW (1985). The role of free alpha-amino nitrogen (FAN) in the brewing of sorghum beer. *Food Review* **21**: 82-83.
- Taylor JRN, Dewar J (2001). Developments in sorghum food technologies. *Advances in Food and Nutrition Research* **43**: 217-264.
- Taylor JRN, Orovan E, Dewar J (1994). Changes in beta-glucan during sorghum malting and sorghum beer brewing. *The South African Journal of Food Science and Nutrition* **6**: 99-102.
- Tou EH, Mouquet C, Guyot JP, Traore AS, Trèche S (2003). Essai de modification du procédé traditionnel de fabrication des bouillies de mil fermenté *ben-saalga* en vue d'augmenter leur densité énergétique. In 2ème Atelier international / 2nd International workshop : Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles / Food-based approaches for a healthy nutrition. Ouagadougou, 23-28 / 11 / 2003 : pp 517-524.
- Towo EE, Svanberg U, Ndossi GD (2003). Effect of grain pre-treatment on different extractable phenolic groups in cereals and legumes commonly consumed in Tanzania. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **83**: 980-986.
- Traoré T, Mouquet C, Icard-Vernière C, Traoré AS, Trèche S (2004). Changes in nutrient composition, phytate and cyanide contents and alpha-amylase activity during cereal malting in small production units in Ouagadougou (Burkina Faso). *Food Chemistry* **88**: 105-114.
- Trèche S, Pezennec S, Giamarchi P (1993). Comment améliorer les bouillies de sevrage préparées dans les ménages congolais. Fonds documentaire ORSTOM : 10p.
- Trèche S (1995). Techniques pour augmenter la densité énergétique des bouillies. In S Trèche, B de-Benoist, D Benbouzid, A Verster, F Delpuech, eds, L'alimentation de complément du jeune enfant. ORSTOM éditions, Paris : pp 123-146.

- Trinder DW (1988). A survey of aflatoxins in industrially brewed South African sorghum beer and beer trainings. *Journal of the Institute of Brewing* **95**: 307-309.
- Uriyo M, Eigel WE (1999). Duration of kilning treatment on alpha-amylase, beta-amylase and endo-(1,3)(1,4)-beta-D-glucanase activity of malted sorghum (*Sorghum bicolor*). *Process Biochemistry* **35**: 433-436.
- Uvere PO, Adenuga OD, Mordi C (2000). The effect of germination and kilning on the cyanogenic potential, amylase and alcohol levels of sorghum malts used for burukutu production. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **80**: 352-358.
- Verbruggen MA, Beldman G, Voragen AGJ (1995). The selective extraction of glucuronoarabinoxylans from sorghum endosperm cell walls using barium and potassium hydroxide solutions. *Journal of Cereal Science* **21**: 271-282.
- Wang YYD, Fields ML (1978). Enrichment of home-prepared tortillas made from germinated corn. *Journal of Food Science* **43**: 1630-1631.
- Young TE, Juvik JA, DeMason DA (1997). Changes in carbohydrate composition and alpha-amylase expression during germination and seedling growth of starch-deficient endosperm mutants of maize. *Plant Science* **129**: 175-189.
- Yu SM, Lee YC, Fang SC, Chan MT, Hwa SF, Liu LF (1996). Sugars act as signal molecules and osmotica to regulate the expression of alpha-amylase genes and metabolic activities in germinating cereal grains. *Plant Molecular Biology* **30**: 1277-1289.
- Ziegler P (1999). Cereal beta-amylases. *Journal of Cereal Science* **29**: 195-204.

Annexes

Annexe 1: Caractéristiques structurelles des grains de sorgho et de certains mils

		Sorgho	Mil à chandelle	Eleusine	Millet commun	Millet des oiseaux
Graine	Type	Caryopse	Caryopse	Utricule	Utricule	Utricule
	Forme	Sphérique	Ovoïde, hexagonale, globuleuse	Globuleuse	/	/
	Couleur	Blanc, jaune, rouge, brun	Gris, blanc, jaune, brun, pourpre	Jaune, blanc, rouge, violet	/	/
	Poids de 1000 graines (g)	25-30	2,5 -14	2,6	4, 7 – 7,2	1,86
	Enveloppe	1 couche ; parfois pigmentée ; Epaisseur (µm) : 0,4	1 couche ; parfois pigmentée ; Epaisseur (µm) : 0,4	5 couches ; pigmentées ; Epaisseur (µm) : 10,8 – 24,2	1 couche ; non pigmentée ; Epaisseur (µm) : 0,2 – 0,4	/
	Aleurone	1 couche ; cellule de 1630 x 5 -15 µm	1 couche ; cellule de 18 x 7,6 µm	1 couche, cellule de 12 x 6 µm	1 couche	1 couche
	Granules d'amidon	Ø (µm) : 20 – 30 ; Type simple	Ø (µm) : 10 – 12 ; Type simple ; zones (µm) périphérique (6,4), cornée (6,4), farineuse (7,6)	Ø (µm) : 3 – 21 ; Type simple/composé ; zones (µm) périphérique (8 - 16,5), cornée (3 - 19), farineuse (11 - 21)	Ø (µm) : 2 – 10 ; Type simple ; zones (µm) périphérique (3,9), cornée (4,1), farineuse (4,1)	/
	Corps protéiques	Dimension (µm) : 0,3- 3 ; localisation dans toutes les zones	Dimension (µm) : 0,6- 0,7 ; localisation dans toutes les zones	Dimension (µm) 2,0 ; localisation dans les zones périphérique / cornée	Dimension (µm) : 0,5- 1,7 ; localisation dans la zone périphérique	/
	Germe	Dimension (µm) : Rapport endosperme/germe : 8,4 :1	Dimension (µm) : 1420 x 620 Rapport endosperme/germe : 4,5 :1	Dimension (µm) :980 x 270 ; Rapport endosperme/germe : 11 :1	Dimension (µm) :1100 x 310 ; Rapport endosperme/germe : 12 :1	Rapport endosperme/germe : 12 :1

Ø = diamètre ; Adapté selon FAO (1995)

Annexe 2: Photos des grains utilisés dans l'étude

LES SORGHOS





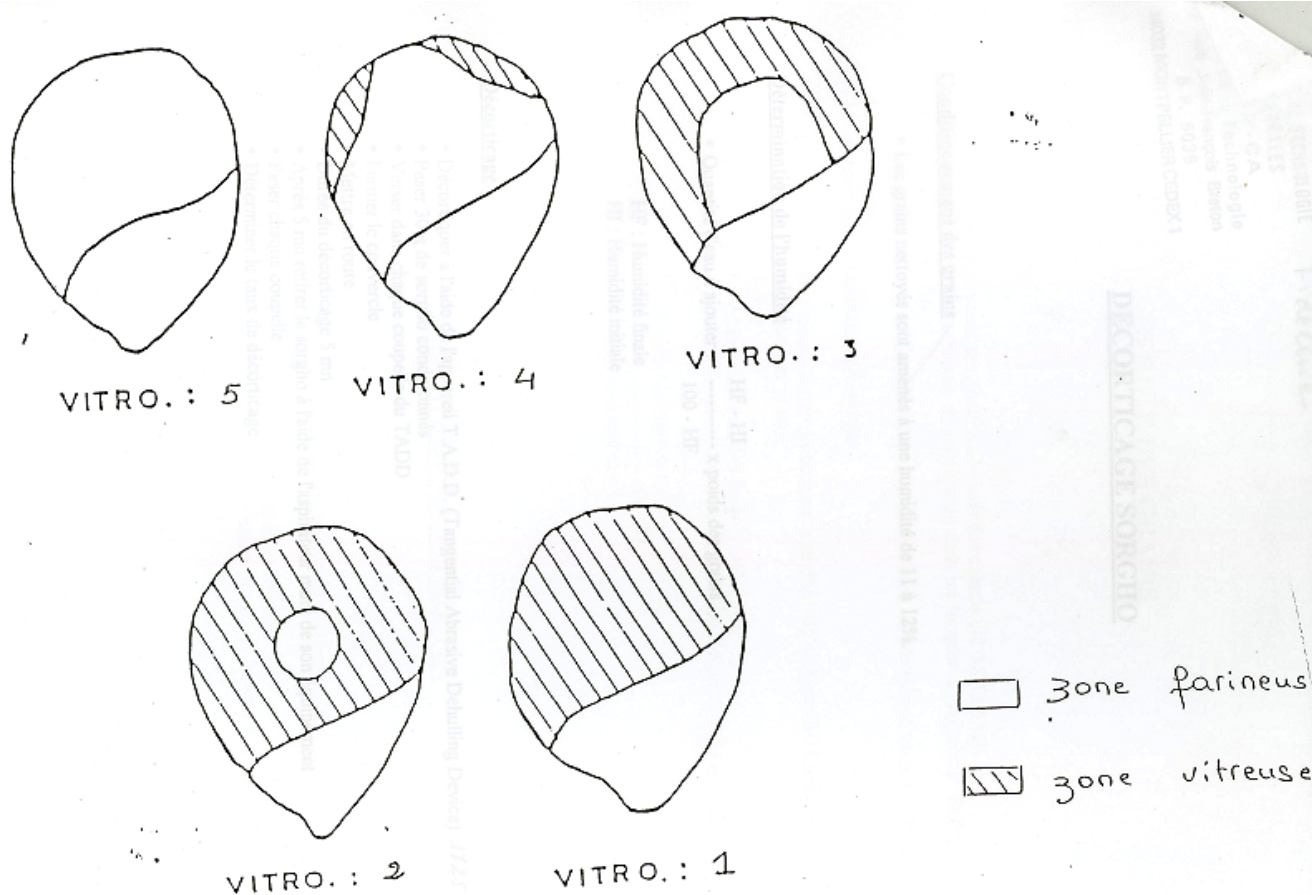
LES MILS



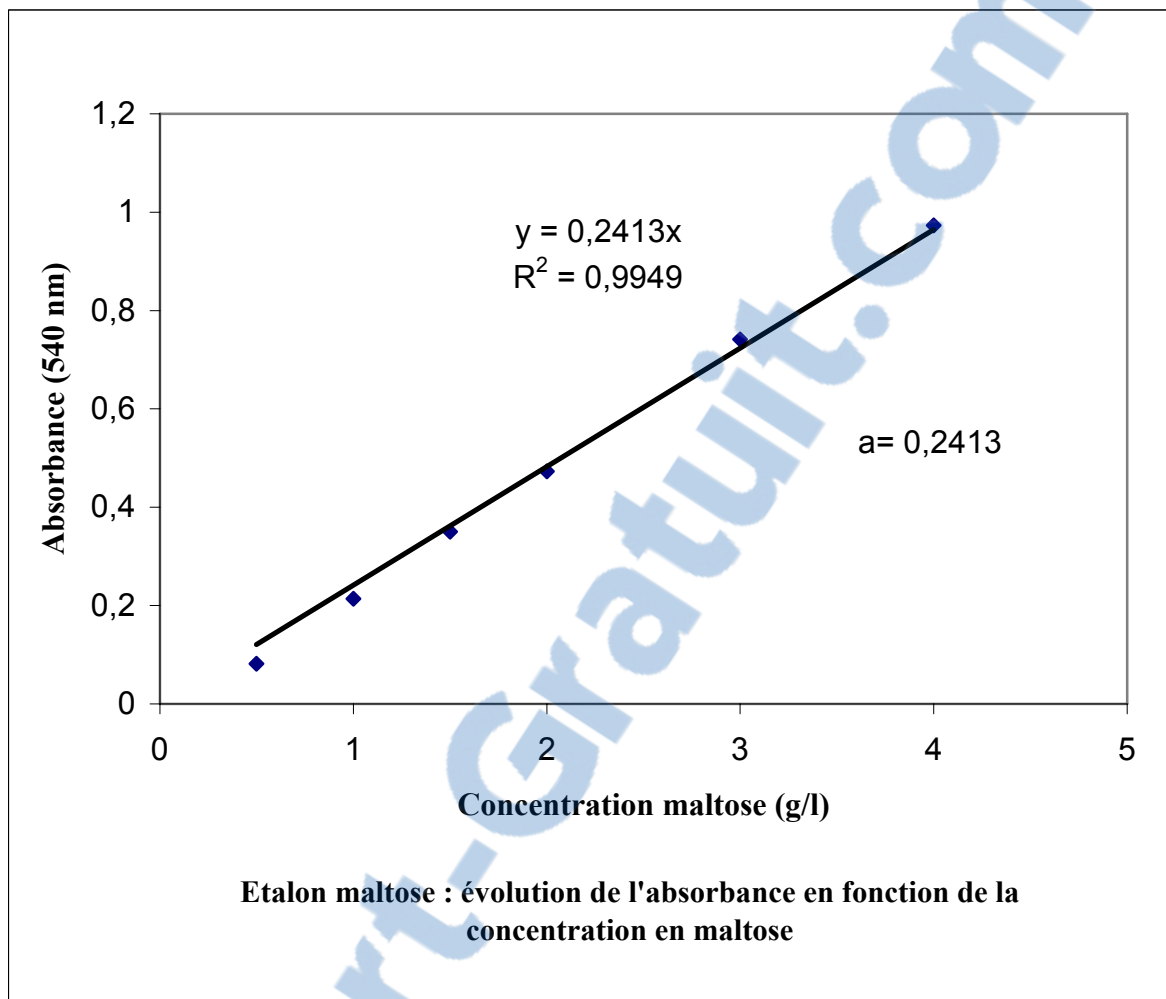
Annexe 3: Mycotoxines et moisissures responsables de leur production

Mycotoxines, moisissures responsables de leurs producteurs et concentrations maximales autorisées (adapté de Cahagnier (2001) et McFarlane et al. (1995))					
Mycotoxines	Moisissures	Denrées alimentaires	Réglementation ou recommandation pour alimentation humaine		
			CEE	France	USA
Aflatoxines	<i>Aspergillus flavus</i> et <i>Apergillus parasiticus</i>	sorgho, mil, maïs, arachide	2 ppb (seul l'aflatoxine B1 est concerné)	2 ppb (seul l'aflatoxine B1 est concerné)	20 ppb (seul l'aflatoxine B1 est concerné)
Ochratoxines	<i>Apergillus ochraceus</i> et <i>Penicillium viridicatum</i>	maïs, orge	Pas de réglementation spécifique	5 ppb pour les céréales	Pas de réglementation spécifique
Citrinine	<i>Penicillium citinum</i>	orge, seigle, avoine, maïs	/	/	/
Patuline	<i>Penicillium expansum</i>	sorgho mil, blé, maïs, paille, pomme	/	/	/
Zéaralénone	<i>Fusarium</i>	sorgho mil, maïs, blé	Pas de réglementation spécifique		Pas de réglementation spécifique
Trichothécènes	<i>Fusarium</i>	maïs, orge, blé, avoine	Pas de réglementation spécifique	Pas de réglementation spécifique	100ppb (Canada)
Fumonisines	<i>Fusarium</i>	maïs	Pas de réglementation spécifique	5 ppm	Existe seulement pour alimentation animale
Stérinegma-tocystine	<i>Apergillus versicolor</i>	blé	/	/	/

Annexe 4: Photos de référence pour notation visuelle de la vitrosité des grains



Annexe 5: Exemple de courbe de la gamme étalon maltose



Annexe 6: Abaque de variation de la pression en fonction du débit d'air (A.E.I.B, 1995)

VENTILATEURS CENTRIFUGES SIMPLE OUÏE SÉRIE ; HCASI - HGAEXI

TYPE	MOTEUR	KW	dB (a)
------	--------	----	--------

2800 tr/min

HCASI 320	63K2	0.18	66
HCASI 420	63K2	0.18	68
HCASI 520	71K2	0.37	72
HCASI 620	71Q2	0.55	76
HCASI 720	80Q2	1.10	80
HGAEXI 920	80L2	2.20	86

1500 tr/min

HCASI 340	63Q4	0.10	50
HCASI 440	63Q4	0.10	60
HCASI 540	63Q4	0.18	64
HCASI 640	63Q4	0.18	66
HCASI 740	71Q4	0.25	72
HCASI 940	80K4	0.65	75
HCASI 1040	90S4	1.10	79

1000 tr/min

HCASI 760	71Q6	0.25	64
HCASI 960	80K6	0.37	67
HCASI 1060	80K6	0.37	75

DEBIT m³/h

P
R
E
S
S
I
O
N

S
T
A
T
I
Q
U
E

(Pa)

0	70	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	2000	2500	3000	3500
-	-	-	-	260	220	170	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	420	300	300	200	130	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	630	500	550	470	400	300	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	900	990	820	700	700	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1400	1100	800	450	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1600	1400	1200	600
-	-	62	58	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	110	82	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	170	150	140	72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	230	210	170	140	70	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	340	330	300	270	220	190	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	450	430	400	300	130	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	580	500	410	300	-
-	-	-	-	-	140	130	120	90	60	40	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	180	170	160	150	130	110	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240	230	170	80	-	-	-

A.E.I.B. VENTILATEURS SPECIAUX

Z.I. 131 RUE DES VIVANTS 33100 BORDEAUX (FRANCE)

Tel : 57.80.79.79 Fax : 56.40.92.20 Tlx : 571 520



A.E.I.B. VENTILATEURS SPECIAUX

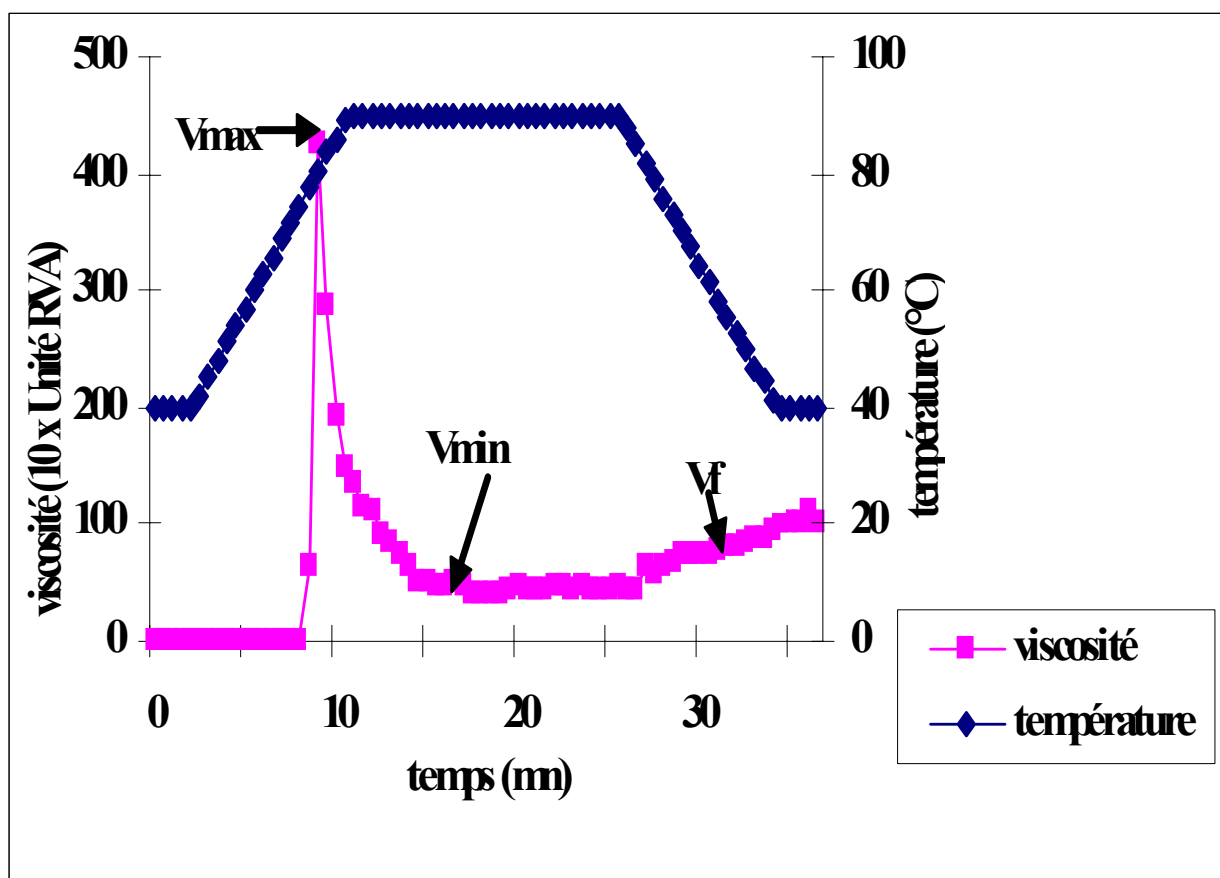
 Z.I. 131 RUE DES VIVANTS 33100 BORDEAUX (FRANCE)
 Tel : 57.80.79.79 Fax : 56.40.92.20 Tlx : 671 520


Annexe 7: Tableau de corrélations entre les paramètres de contrôle de la qualité du malt

Variables	PD Eau	PD CaCl2	AA	BA	% AA	Amylose	Protéines	Saccharose	Glucose	Fructose	A. Citrique	A. lactique	A. acétique	MEC	NEC	IK	Vmax	V minim	V finale	TE	Couleur	pH	Turbidité	Durée filtration
PD Eau	1,00																							
PD CaCl2	0,99	1,00																						
AA	0,99	1,00	1,00																					
BA	0,91	0,94	0,91	1,00																				
% AA	0,59	0,56	0,62	0,25	1,00																			
Amylose	-0,89	-0,87	-0,89	-0,74	-0,73	1,00																		
Protéines	-0,36	-0,34	-0,34	-0,32	-0,10	0,01	1,00																	
Saccharose	0,83	0,84	0,82	0,83	0,33	-0,63	-0,67	1,00																
Glucose	0,75	0,74	0,74	0,71	0,36	-0,60	-0,68	0,97	1,00															
Fructose	0,55	0,56	0,54	0,64	0,13	-0,57	-0,14	0,70	0,72	1,00														
A. citrique	0,53	0,56	0,51	0,72	-0,17	-0,26	-0,54	0,72	0,62	0,65	1,00													
A. lactique	-0,47	-0,44	-0,48	-0,24	-0,59	0,34	0,25	-0,14	-0,07	0,17	-0,06	1,00												
A. acétique	-0,53	-0,47	-0,46	-0,45	-0,16	0,25	0,77	-0,56	-0,53	-0,11	-0,55	0,43	1,00											
MEC	0,71	0,69	0,69	0,64	0,34	-0,43	-0,88	0,88	0,86	0,39	0,66	-0,35	-0,78	1,00										
NEC	0,35	0,36	0,36	0,35	0,26	-0,63	0,69	0,00	-0,06	0,34	-0,02	0,03	0,34	-0,29	1,00									
IK	0,91	0,89	0,89	0,83	0,52	-0,82	-0,46	0,84	0,79	0,54	0,59	-0,33	-0,56	0,80	0,29	1,00								
Vmax	-0,94	-0,94	-0,94	-0,88	-0,48	0,84	0,26	-0,73	-0,64	-0,43	-0,45	0,47	0,44	-0,63	-0,43	-0,87	1,00							
Vminim	-0,72	-0,71	-0,67	-0,80	0,01	0,57	0,24	-0,68	-0,60	-0,53	-0,58	0,07	0,41	-0,56	-0,37	-0,72	0,79	1,00						
V finale	-0,77	-0,75	-0,71	-0,84	-0,04	0,61	0,30	-0,72	-0,64	-0,54	-0,63	0,09	0,50	-0,62	-0,35	-0,78	0,81	0,99	1,00					
TE	0,13	0,15	0,15	0,14	0,24	-0,48	0,62	0,02	0,04	0,52	-0,14	0,36	0,59	-0,38	0,72	0,11	-0,09	-0,04	-0,03	1,00				
Couleur	0,44	0,43	0,45	0,32	0,55	-0,72	0,46	0,17	0,19	0,55	0,03	-0,11	0,22	-0,08	0,81	0,34	-0,35	-0,23	-0,23	0,70	1,00			
pH	0,22	0,23	0,22	0,22	-0,03	0,13	-0,61	0,26	0,17	-0,21	0,30	-0,59	-0,57	0,44	-0,55	0,14	-0,27	-0,06	-0,09	-0,64	-0,60	1,00		
Turbidité	0,18	0,22	0,21	0,22	0,23	-0,37	0,43	0,03	0,04	0,56	0,18	-0,04	0,36	-0,19	0,54	0,07	-0,07	-0,03	0,00	0,56	0,79	-0,51	1,00	
Durée filtration	-0,62	-0,59	-0,57	-0,62	-0,12	0,46	0,31	-0,55	-0,44	-0,13	-0,26	0,06	0,48	-0,47	-0,15	-0,61	0,64	0,68	0,74	0,03	0,06	-0,25	0,47	1,00

AA = Activité alpha amylasique ; AB = activité bêta amylasique

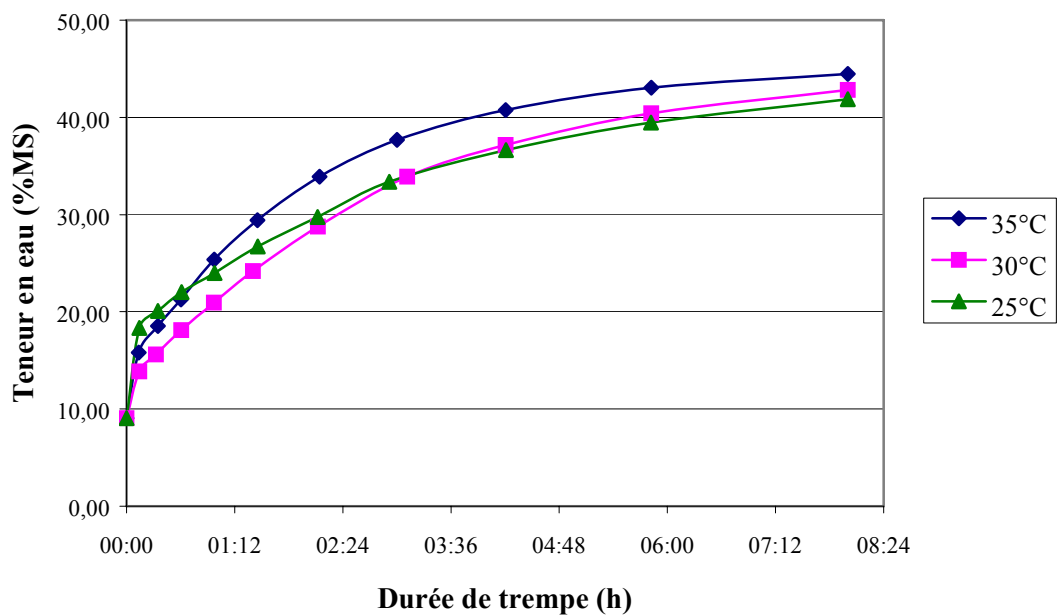
Annexe 8 : Viscosité du culot au cours de la phase de gélatinisation de l'amidon lors du brassage au RVA



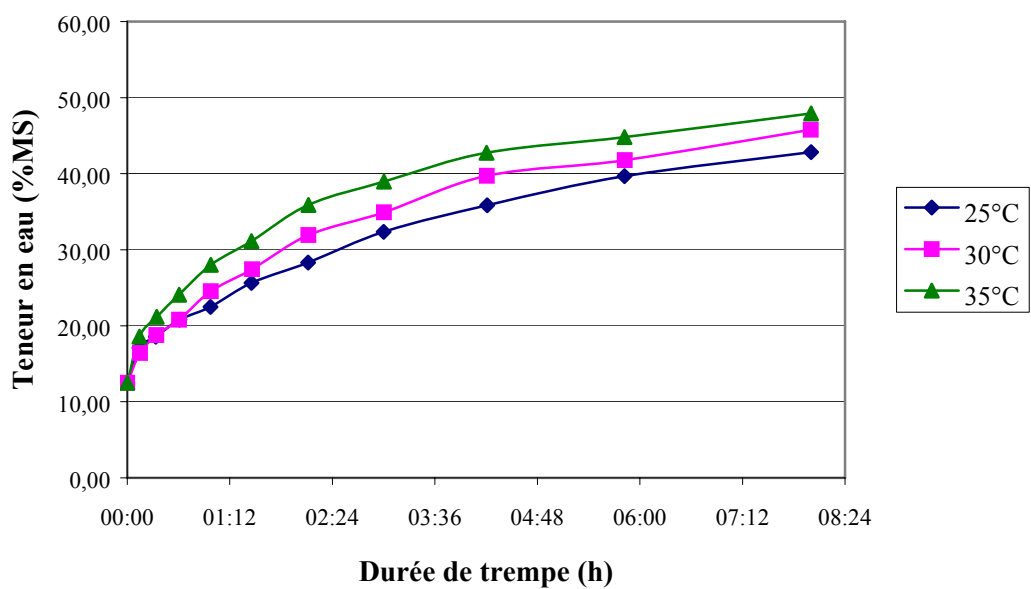
Viscosité du culot au cours de la phase de gélatinisation de l'amidon

Annexe 9: Effet de la température sur l'absorption d'eau au cours de la trempe

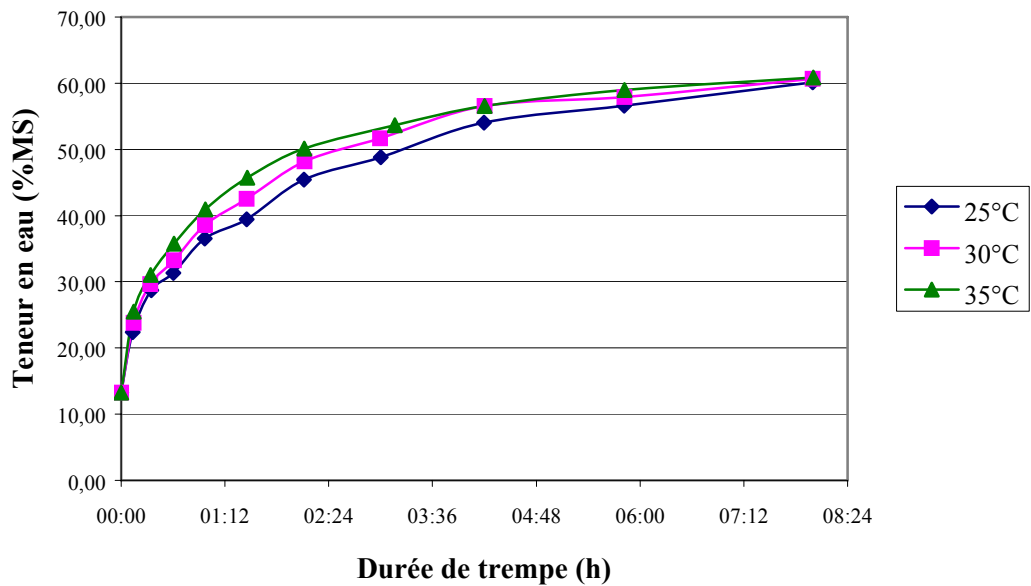
Mewin



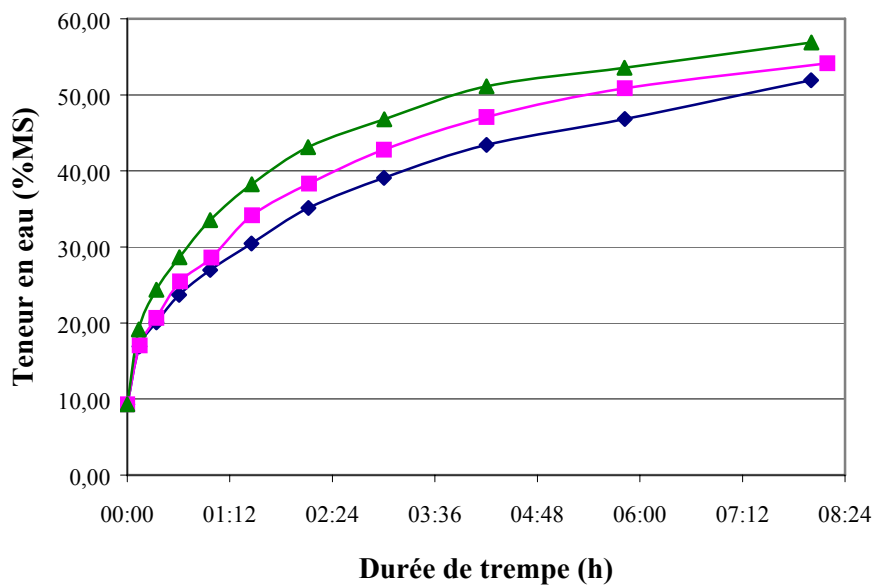
Fissouka



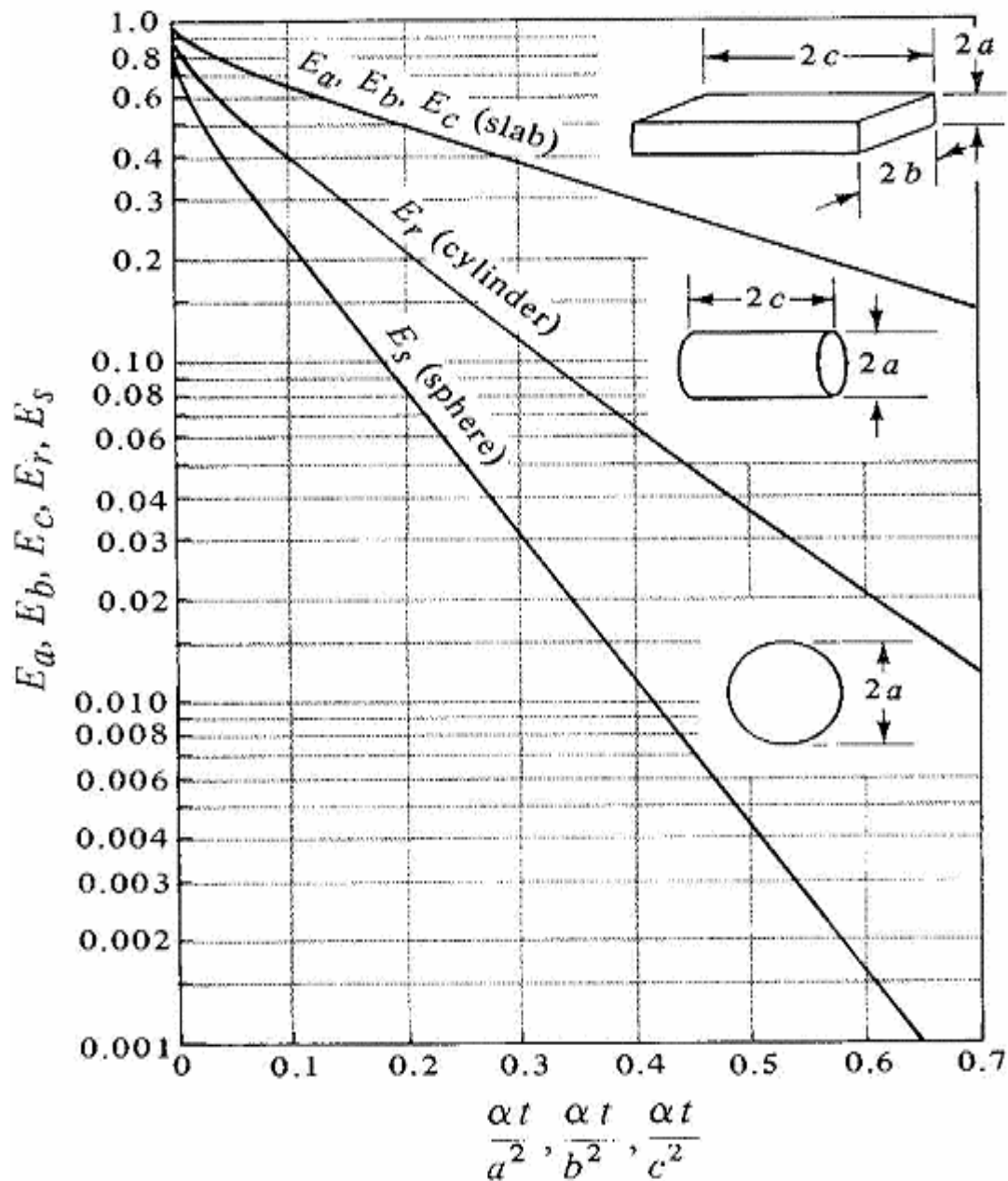
Zomoaha 1



Zoueloure



Annexe 10: Courbe référence de $\ln(E)$ en fonction de $\frac{D \times t}{R^2}$ (Geankoplis, 1993)



La dimension caractéristique (a) de la sphère correspond à R qui représente la dimension caractéristique du grain (m)

Annexe 11: Tableau de corrélations entre le coefficient de diffusion et les autres caractéristiques du grain

Tableau de corrélations pour 10 sorghos et 1 mil (coefficient de diffusion apparent à 30°C)

Variable	Corrélations significatives marquées à $p < ,05000$ 11 Observations						
	Vitrosité	Cendres (% MS)	Amylose (% MS)	saccharose (% MS)	Glucose (% MS)	Fructose (% MS)	D
Vitrosité	1,00	0,07	-0,31	0,20	0,62	0,59	0,63
Cendres (% MS)	0,07	1,00	-0,26	0,36	0,15	0,15	0,45
Amylose (% MS)	-0,31	-0,26	1,00	-0,24	-0,43	-0,38	-0,37
saccharose (% MS)	0,20	0,36	-0,24	1,00	0,75	0,82	0,41
Glucose (% MS)	0,62	0,15	-0,43	0,75	1,00	0,98	0,47
Fructose (% MS)	0,59	0,15	-0,38	0,82	0,98	1,00	0,53
D	0,63	0,45	-0,37	0,41	0,47	0,53	1,00

Tableau de corrélations pour 10 sorghos (coefficient de diffusion apparent à 30°C)

Variable	Corrélations significatives marquées à $p < ,05000$ 10 observations						
	Vitrosité	Cendres (% MS)	Amylose (% MS)	saccharose (% MS)	Glucose (% MS)	Fructose (% MS)	D
Vitrosité	1,00	0,11	-0,34	0,19	0,61	0,59	0,75
Cendres (% MS)	0,11	1,00	-0,20	0,42	0,20	0,20	0,36
Amylose (% MS)	-0,34	-0,20	1,00	-0,27	-0,47	-0,41	-0,32
saccharose (% MS)	0,19	0,42	-0,27	1,00	0,75	0,82	0,52
Glucose (% MS)	0,61	0,20	-0,47	0,75	1,00	0,98	0,59
Fructose (% MS)	0,59	0,20	-0,41	0,82	0,98	1,00	0,64
D	0,75	0,36	-0,32	0,52	0,59	0,64	1,00