

UNIVERSITE MONTPELLIER 2
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Montpellier 2

Ecole doctorale : Sciences des Procédés-Sciences des Aliments

Discipline : Nutrition, Santé

Présentée et soutenue publiquement par

FATOUMATA HAMA épouse BA

Le

11 Mai 2012

Titre

**Rétention et biodisponibilité du fer et du zinc au cours des procédés de
préparation des plats traditionnels à base de céréales locales ou biofortifiées,
consommés par les jeunes enfants au Burkina Faso**

Thèse dirigée par Claire Mouquet-Rivier et co-dirigée par Jean-Pierre GUYOT

Jury :

M^{me} Valérie LULLIEN-PELLERIN , Directrice de Recherche, INRA Montpellier	Examineur
M^r Bréhima DIAWARA , Maître de Recherche, CNRST, Burkina Faso	Examineur
M^{me} Isabelle CHEVALLIER , Professeur, VetAgro Sup, Campus de Clermont	Rapporteur
M^r Jean-François GRONGNET , Professeur, Agrocampus Ouest, Rennes	Rapporteur
M^{me} Claire MOUQUET- RIVIER , Chargée de Recherche, IRD, Montpellier	Directrice de thèse

Dédicace

« Je remercie le Tout Puissant Allah, le Très haut le Miséricordieux, de me donner la santé, la force, le courage et la patience pendant ces longues années d'études. Gloire à toi mon créateur ! »

A tous les enfants malnutris de l'Afrique Subsaharienne et particulièrement à ceux du Burkina Faso

A mon père Abdoulaye HAMA NATAMA et à ma mère Fadima LY pour leur soutien permanent et inconditionnel, leur grande compréhension, leurs conseils dont ils ont fait preuve tout au long de mes études.

A mon mari BA Amidou Boubacar Yobi qui a toujours mis mes études en priorité.

A mes enfants Amadou et Leila pour leur grande affection et leur patience. Que ce travail soit pour vous un exemple à dépasser.

Remerciements

- Ce travail a été réalisé grâce à l'appui financier du projet INSTAPA. J'adresse mes vifs remerciements à la coordonnatrice du projet Inge BROUWER et à tous les participants du projet INSTAPA. Grand merci à Eva WELTZIEN de l'ICRISAT (WP2), pour l'intérêt porté à ce travail depuis le début. Ce travail n'aurait pas atteint son objectif sans votre bonne collaboration. Je remercie également toute votre équipe qui n'a ménagé aucun effort pour satisfaire la demande de variétés biofortifiées.
- Merci au Département de Soutien et de Formation de l'IRD pour m'avoir soutenue durant cette thèse, grâce à vous j'ai pu effectuer tranquillement mes voyages.
- Merci aux autorités de l'Ecole Doctorale Sciences des Procédés-Sciences des Aliments qui ont accepté mon inscription pour cette thèse.
- A Claire MOUQUET-RIVIER, Directrice de cette thèse j'exprime ma reconnaissance et ma profonde gratitude, pour m'avoir confié ce projet de thèse, initié à la recherche, pour sa disponibilité, son soutien inconditionnel, son engouement et la grande qualité de l'encadrement dont elle a su me faire bénéficier, ses conseils précieux. Claire merci également pour cette amitié sans faille tout au long de la thèse.
- J'adresse mes vifs et sincères remerciements à Christèle VERNIERE, encadreur de cette thèse, qui m'a formée à la rigueur scientifique, à l'amour du travail bien fait du laboratoire à la rédaction de cette thèse. Christèle les mots me manquent pour vous dire merci. Votre gentillesse, votre disponibilité, votre amitié et votre soutien n'ont jamais fait défaut depuis le début de cette thèse jusqu'à la fin. Ce travail est également le votre.
- A mon Chef de service Bréhima DIAWARA maintenant Directeur de l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologiques, à qui j'exprime mes sincères remerciements pour la confiance accordée. Chef, votre soutien inconditionnel et votre disponibilité n'ont jamais fait défaut. Je remercie également tout le personnel du DTA. Chacun ayant apporté sa contribution à ce travail.
- Mes sincères remerciements à Jean-Pierre GUYOT, Directeur du laboratoire de Nutrition de l'UMR 204 de Montpellier, qui a participé également à l'encadrement de ce travail. Un grand merci pour m'avoir accueillie au sein de votre équipe dynamique et formidable à Montpellier. A chacun de mes séjours j'ai été reçue chaleureusement, Mr GUYOT je ne finirai de vous dire merci. Vous avez toujours été disponible à tout ce qui concerne l'avancée de ce travail.
- A Jacques BERGER, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche 204 NUTRIPASS, pour son ouverture, sa disponibilité. Merci de m'avoir acceptée au sein des vôtres.
- Un grand merci à Catherine PHILIBERT-GAY pour sa gentillesse et sa disponibilité au cours de mes séjours à Montpellier.
- A WEREME ALHADI, Directeur de l'IRSAT au moment de mon engagement dans cette thèse, j'adresse mes sincères remerciements.
- Isabelle ROCHETTE, Christian PICQ, mes amis du laboratoire. Je vous remercie pour vos apports à ce travail et aussi pour ces agréables moments au laboratoire.

- Valérie GREFFEUILLE je te remercie pour ta gentillesse, tes conseils précieux et ta grande disponibilité. Sylvie AVALLONE, Christèle HUMBLLOT, merci infiniment pour les conseils et le soutien moral durant mes séjours.
- Un grand merci aux Directeurs de l'IRD de Ouagadougou de 2009 à 2011 pour m'avoir autorisée à utiliser les locaux afin de mener à bien mon travail. Merci à vous et à tout le personnel de l'IRD de Ouagadougou. Particulièrement à l'équipe de nutrition Yves KAMELI, Yves Martin PREVEL, merci pour la disponibilité.
- Merci à Laurencia OUATTARA, Charlotte KONKOBO et à Jacqueline KONATE collègues de service DTA/IRSAT pour leur contribution à l'étude. Je ne peux oublier Leguet GANOU et Boniface BOUGOUMA pour la bibliographie, merci.
- Mes remerciements s'adressent également à Gnilé TAMINI du Service de Certification des produits alimentaires qui a facilité le transport de mes échantillons de Ouagadougou à Montpellier.
- A l'INERA de Dori particulièrement au Directeur Mr OBILBIGA qui nous a ouvert ces locaux durant tous nos séjours à Dori, j'adresse mes vifs remerciements.
- Je remercie particulièrement les étudiants de master de l'IRD ayant travaillé dans le cadre du projet INSTAPA : Barbara BAILLE, Julien ROUGERIE, Fanny OLIVE et à Aboubacar DAO étudiant master du Burkina Faso dans le cadre du même projet.
- A Elodie BECQUEY, je dis grand merci pour sa disponibilité
- Aux délégués des villages, enquêteurs, productrices, dégustateurs, ménagères suivies et enfants enquêtés à Ouagadougou, à Bobo Dioulasso, à Dori, à Komsilga, à Kokorowé et à Bombofa je les remercie. Sans vous ce travail n'aurait pas atteint son but.
- A mon collègue, Waliou AMOUSSA les mots me manquent sincèrement !
- Kaleab BAYE, Williams TURPIN, Julie COURRAUD, Rebecca PRADEILLES, Fabien OGOU, Marisa Brnic je vous remercie infiniment.
- A mes aînés Aly SAWADOGO, Ismaël BASSOLET, El Hassane TOU, Tahirou TRAORE, Prosper SAWADOGO, merci pour les conseils et la grande disponibilité que vous m'avez toujours accordés
- A toute ma famille je dis merci infiniment. Par là mes parents ainsi que mes frères et sœurs, mon mari et mes enfants qui ont tous contribué à l'avancée de ce travail. Grand merci à ma sœur Maimouna HAMA NATAMA pour sa disponibilité. Je remercie ma famille à Lyon (Myriam et Yasmine HAMA) qui m'a chaleureusement accueillie en France.
- Aux membres de mes comités de thèse, Ines EGLI, Eva WELTZIEN j'adresse mes vifs remerciements. Merci à vous d'avoir accepté chaque année de juger mon travail et d'apporter vos suggestions et recommandations. Ce travail est également le votre.
- Aux membres du Jury qui ont bien voulu juger ce travail à sa juste valeur, j'adresse mes remerciements.

« Mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui auront contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de thèse ! »

SOMMAIRE

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Revue bibliographique.....	9
1.1. Le Burkina Faso.....	11
1.1.1. Situation géographique et démographique	11
1.1.2. Agriculture	12
1.1.3. Pratiques alimentaires.....	13
1.1.3.1. Alimentation du jeune enfant	14
1.1.4. Situation nutritionnelle	15
1.2. Céréales	17
1.2.1. Importance de la consommation du mil, sorgho et maïs en Afrique.....	17
1.2.2. Types de mils, sorgho et maïs	18
1.2.3. Caractéristiques morphologiques des grains de céréales.....	19
1.2.3.1. Structure du grain de mil.....	21
1.2.3.2. Structure du grain de sorgho.....	21
1.2.3.3. Structure du grain de maïs	22
1.2.4. Composition biochimique et répartition des nutriments dans les grains de mil, maïs et sorgho	24
1.2.4.1. Glucides	24
1.2.4.2. Protéines.....	25
1.2.4.3. Lipides.....	27
1.2.4.4. Micronutriments	27
1.2.4.5. Facteurs réduisant la biodisponibilité	29
1.2.5. Procédés de transformation des grains de céréale.....	33
1.2.5.1. Trempage.....	33
1.2.5.2. Décorticage.....	35
1.2.5.3. Mouture.....	39
1.2.5.4. Germination.....	42
1.2.5.5. Fermentation.....	44
1.2.5.6. Cuisson	45
1.2.6. Quelques plats à base des céréales mil, maïs et sorgho produits au Burkina Faso	47
1.2.6.1. Tô	47
1.2.6.2. Bouillies fermentées.....	48

1.2.6.3.	Galettes	49
1.3.	Fer et zinc dans l'alimentation du jeune enfant.....	51
1.3.1.	Structure et fonction du fer et du zinc	51
1.3.1.1.	Structure et fonction du fer.....	51
1.3.1.2.	Structure et fonction du zinc.....	52
1.3.2.	Métabolisme et régulation de l'homéostasie du fer et du zinc	53
1.3.2.1.	Métabolisme du fer	53
1.3.2.2.	Métabolisme du zinc	54
1.3.3.	Besoins en fer et zinc.....	55
1.3.3.1.	Besoins en fer	55
1.3.3.2.	Besoins en zinc	56
1.3.4.	Sources alimentaires du fer et du zinc	57
1.3.5.	Carences en fer et en zinc	58
1.4.	Biodisponibilité du fer et du zinc dans les plats à base de céréales.....	60
1.4.1.	Facteurs alimentaires	60
1.4.1.1.	Forme chimique.....	60
1.4.1.2.	Interactions entre composés.....	61
1.4.1.3.	Procédés technologiques	62
1.4.2.	Facteurs liés au sujet	63
1.4.3.	Méthodes d'estimation de la biodisponibilité	64
1.4.3.1.	Les méthodes <i>in vivo</i>	64
1.4.3.2.	Les méthodes <i>in vitro</i>	66
1.4.3.3.	Modèles <i>ex vivo</i>	67
1.4.3.4.	Méthodes d'estimation par calcul.....	68
1.5.	Les stratégies de lutte contre les carences en fer et zinc.....	70
1.5.1.	Supplémentation	70
1.5.2.	Diversification ou modification alimentaire	71
1.5.3.	Enrichissement	72
1.5.4.	Biofortification.....	75
1.5.5.	Amélioration de la biodisponibilité des minéraux à travers les procédés	77
Chapitre 2. Matériels et méthodes		79
2.1.	Matériels	81
2.1.1.	Variétés de mil.....	81
2.1.2.	Variétés de sorgho blanc.....	81

2.1.3. Variété de maïs.....	82
2.2. Protocoles d'études.....	82
2.2.1. Enquêtes de consommation alimentaire auprès des jeunes enfants au Burkina Faso.....	82
2.2.1.1. Description des zones d'étude	82
2.2.1.2. Echantillonnage	83
2.2.1.3. Critères d'éligibilité.....	84
2.2.1.4. Recueil de l'âge.....	84
2.2.1.5. Mesure des ingérés par pesées	84
2.2.1.6. Questionnaires	85
2.2.1.7. Déroulement des enquêtes	87
2.2.1.8. Traitements des données d'enquête	88
2.2.2. Suivi de la préparation des plats traditionnels à base de céréales	89
2.2.2.1. Matériels du suivi	90
2.2.2.2. Déroulement du suivi	90
2.2.3. Effet des décorticages traditionnels des grains sur les teneurs en micronutriments et en facteurs limitant la biodisponibilité des nutriments	90
2.2.3.1. Calcul des paramètres de décorticage	92
2.2.3.2. Mouture des grains décortiqués pour les analyses biochimiques	92
2.2.4. Effet de la mouture sur la teneur et la bioaccessibilité du fer et du zinc des farines de mil, sorgho et maïs et recherche des sources de contamination en fer	92
2.2.5. Etude de la biodisponibilité du fer et du zinc et de l'acceptabilité de plats traditionnels préparés avec des variétés biofortifiées de mil et de sorgho	96
2.2.5.1. Préparation des plats.....	96
2.2.5.2. Tests d'analyse sensorielle	97
2.2.5.3. Analyses biochimiques	97
2.3. Méthodes analytiques.....	99
2.3.1. Préparation des échantillons.....	99
2.3.2. Détermination de la teneur en matière sèche	99
2.3.3. Dosage des lipides	99
2.3.4. Dosage des protéines	99
2.3.5. Dosage de l'amidon total	99
2.3.6. Dosage des teneurs en fer et en zinc	99
2.3.7. Dosage fibres ADF	100
2.3.8. Dosage des phytates	100
2.3.9. Dosage des polyphénols.....	100

2.3.10.	Bioaccessibilité <i>in vitro</i> du fer et du zinc	100
2.3.10.1.	Détermination de l'acidité titrable et de la molarité du tampon PIPES.....	101
2.3.10.2.	Digestion <i>in vitro</i>	101
2.3.11.	Traitement statistique des données.....	104
Chapitre 3. Résultats		105
3.1. Caractéristiques de l'alimentation des jeunes enfants burkinabè et couverture des apports recommandés en énergie, protéines, fer et zinc		107
3.1.1. Principales caractéristiques de l'échantillon et état nutritionnel des jeunes enfants enquêtés		107
3.1.1.1.	Alimentation générale des jeunes enfants burkinabés enquêtés.....	111
3.1.2. Couverture des apports recommandés et apports en facteurs chélateurs		112
3.1.3. Consommation des aliments riches en fer		114
3.1.4. Consommation des céréales		116
3.1.4.1.	Principales formes de consommation	117
3.1.4.2.	Quantités moyennes ingérées.....	119
3.1.4.3.	Contribution des plats de céréales à la couverture des apports recommandés.....	121
3.2. Effets des procédés sur la rétention et la biodisponibilité du fer et du zinc dans les plats céréaliers		123
3.2.1. Variations des teneurs en macro et micronutriments du mil et du sorgho au cours de décorticages traditionnels, comparés à un décorticage témoin.....		125
3.2.2. Potentialités d'amélioration des teneurs et de la biodisponibilité du fer et du zinc de variétés de mil biofortifiées au cours du décorticage abrasif.....		135
3.2.3. Biodisponibilité du fer intrinsèque et du fer de contamination au cours des moutures traditionnelles et de la production du tô.		153
3.2.3.1.	Résumé du projet d'article sur la mouture	153
3.2.3.2.	Résultats complémentaires : Bioaccessibilité du fer de contamination dans les plats de tô à base de maïs.....	170
3.3. Rétention du fer et du zinc et acceptabilité des plats traditionnels du Burkina Faso préparés à partir de variétés biofortifiées de mil et de sorgho.		171
3.3.1. Acceptabilité des variétés de mil et de sorgho biofortifiées.....		171
3.3.1.1.	Point de vue des productrices sur l'aptitude à la transformation des grains des différentes variétés en plats.....	171
3.3.1.1.	Acceptabilité des plats par un jury de consommateurs	172
3.3.2. Rétention du fer et du zinc dans les plats à base de variétés locales et biofortifiées de mil et de sorgho.....		175
3.3.2.1.	Composition en fer, en zinc et en phytates des variétés biofortifiées.....	175

3.3.2.2.	Composition en fer, en zinc et en phytates des plats élaborés à partir des variétés locales et biofortifiées	177
3.3.3.	Bioaccessibilité du fer et du zinc dans les plats de tô des variétés locales et biofortifiées	178
3.3.3.1.	Rendements en fer en zinc obtenus au cours des expériences de DIV.....	178
3.3.3.2.	Bioaccessibilité du fer et du zinc dans les plats.....	179
3.3.4.	Conclusion partielle	180
Chapitre 4 :Discussion et Conclusion générale		182
Références bibliographiques		194
ANNEXES.....		230

TABLEAUX

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

Tableau 1-1 : Evolution du pourcentage d'enfants présentant une émaciation, un retard de croissance et une insuffisance pondérale au Burkina Faso

Tableau 1-2 : Prévalence de l'anémie chez les enfants de moins de 5ans au Burkina Faso

Tableau 1-3 : Quantités (en tonnes) de sorgho mil et de maïs produites en 2009 dans les régions du Burkina Faso

Tableau 1-4 : Proportion massique (%) des différentes parties du grain de céréales par rapport au grain entier.

Tableau 1-5 : Composition biochimique pour 100 g des grains entiers de mil, maïs et sorgho

Tableau 1-6 : Répartition des nutriments dans les différentes parties des grains de céréales mil et sorgho

Tableau 1-7 : Composition en quelques micronutriments des céréales maïs, mil et sorgho

Tableau 1-8 : Teneurs (mg/100 g de matière sèche) en fer, phytates et zinc avant et après le trempage des céréales

Tableau 1-9 : Aliments fermentés à base de céréales d'Afrique et d'Asie

Tableau 1-10 : Quelques plats à base de céréales produits au Burkina Faso

Tableau 1-11 : Apports recommandés en fer

Tableau 1-12: Besoins journaliers recommandés en zinc.

Tableau 1-13 : Teneurs en zinc de quelques groupes d'aliments

Tableau 1-14 : Teneurs en fer de groupes d'aliments

Tableau 1-15: Principales formes de fer utilisées en fortification

Tableau 1-16: Influence des procédés de ménage sur la biodisponibilité des nutriments des aliments d'origine végétale

Chapitre 3 : Résultats

Tableau 3.1.1 : Composition et principales caractéristiques de l'échantillon

Tableau 3.1.2 : Z-scores et prévalences de la malnutrition au Burkina Faso chez les jeunes enfants enquêtés

Tableau 3.1.3 : Couverture médiane des apports recommandés à partir des aliments de complément en fonction de l'âge et de l'allaitement sur l'ensemble des sites enquêtés (n=597)

Tableau 3.1.4 : Apports en fibres et phytates de l'ensemble des aliments de complément consommés par les jeunes enfants enquêtés

Tableau 3.1.5: Pourcentages d'enfants enquêtés ayant consommé le tô ou la bouillie

Tableau 3.1.6 : Teneurs en matière sèche (g/100 g brut) des galettes, des bouillies et du tô selon les sites.

Tableau 3.1.7 : Contribution des principaux plats de céréales à la couverture des apports journaliers recommandés en fer, zinc, protéines et énergie par repas chez les enfants enquêtés.

Tableau 3.2.1 Quantités et pourcentage du fer dialysable, du fer soluble et du fer insoluble dans le tô de maïs à niveau de contamination en fer élevée et faible.

Tableau 3.3.1: Résultats des tests hédoniques de notation et des tests de classement par ordre de préférence de plats préparés à partir des variétés de mil locale et biofortifiées.

Tableau 3.3.2 : Résultats des tests hédoniques de notation et des tests de classement par ordre de préférence de plats préparés à partir des variétés de sorgho locale et biofortifiée

Tableau 3.3.3 : Teneurs en fer et en zinc (pour 100 g de MS) des variétés locales et biofortifiées de mil et de sorgho blanc

Tableau 3.3.4 : Teneurs en fer, zinc et phytates (moyenne \pm ET) des plats

Tableau 3.3.5: Rendements en fer et zinc au cours des expériences de DIV (pourcentage de minéral retrouvé par rapport à la quantité de minéral initiale dans le plat) sur le tô

Tableau 3.3.6 : Effet de la biofortification sur la bioaccessibilité du fer et du zinc des plats de tô des différentes variétés de céréales

Chapitre 4 : Discussion générale

Teneurs en fer, zinc et phytates des variétés de céréales utilisées en fonction de l'année de récolte.

Tableau 4.2 : Estimation des quantités de fer et de zinc ingérées (mg) par repas de tô chez les jeunes enfants en fonction des variétés locales et biofortifiées de céréales utilisées, calculées à partir des valeurs mesurées dans les tô préparés dans les ménages de Ouagadougou.

Tableau 4.3 : Estimation des quantités de fer ingérées (mg) par repas chez les jeunes enfants en fonction des variétés locales et biofortifiées de céréales calculées à partir de teneurs mesurées sur des céréales moulues au laboratoire (sans prise en compte de la contamination en fer).

Tableau 4.4 : Pourcentage de couverture des apports recommandés en fer des plats de tô issus des différentes variétés de l'étude pour une biodisponibilité faible (5%) sans et avec contamination

Tableau 4.5 : Pourcentage de couverture des apports recommandés en zinc des plats de tô issus des différentes variétés de l'étude pour une biodisponibilité faible (15% correspondant à un ratio molaire phytate/zinc > 18

FIGURES

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

Figure 1-1 : Répartition des régions au Burkina Faso.

Figure 1-2 : Structure du grain de mil

Figure 1-3 : Structure du grain de sorgho

Figure 1-4 : Structure du grain de maïs

Figure 1-5 : Structure d'une molécule de phytate faisant apparaître des sites de complexation de cations divalents

Figure 1-6: un mortier

Figure 1-7: Un pilon

Figure 1-8 : une décortiqueuse mécanique de type Engelberg

Figure 1-9: Axe rotatif effectuant le décorticage des grains

Figure 1-10: Appareil TADD

Figure 1-11: moulin à corindon

Figure 1-12: meule en fer

Figure 1-13: meules en corindon

Figure 1-14: Diagramme général de préparation de farine de céréales germées à Ouagadougou

Figure 1-15 : plat de tô de sorgho blanc

Figure 1-16 : plat de tô de mil

Figure 1-17: Pâte fermentée prête pour la production des galettes

Figure 1-18: Poêle prête pour la friture des galettes

Figure 1-19: Friture des galettes

Figure 1-20: Galettes prêtes

Figure 1-21: Régulation du fer dans l'intestin

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Figure 2-1 : Carte du Burkina Faso

Figure 2.2 : Mesure de la quantité de bouillie ingérée par un enfant à Bombofa

Figure 2-3 : Protocole expérimental de l'étude du décorticage

Figure 2-4 : Protocole expérimental de l'étude de mouture

Figure 2-5: Diagramme de production du tô au laboratoire

Figure 2-6 : Protocole de l'étude d'analyse sensorielle

Figure 2-7: Schéma du protocole de digestion *in vitro*

Chapitre 3 : Résultats

Figure 3.1.1 : Nombre et nature des aliments de complément consommés par les jeunes enfants enquêtés

Figure 3.1.2: Pourcentage d'enfants ayant consommé au moins une fois l'aliment au cours de la semaine précédant l'enquête sur l'ensemble des sites enquêtés.

Figure 3.1.3 : Pourcentages d'enfants ayant consommé les différents types de céréales sur les 6 sites enquêtés

Figure 3.1.4 : Importance relative des différentes formes de consommation des céréales

chez l'ensemble des enfants enquêtés.

Figure 3.1.5: Quantités moyennes de tô ingérées par repas en fonction de la classe d'âge

Figure 3.1.6: Quantités moyennes de bouillie ingérées par repas en fonction de la classe d'âge

Figure 3.2.1: Diagramme de production du tô de mil

Sigles et abréviations

ABS: African Biofortified Sorghum

AHI: Abrasive Hardness Index

AJR: Apports Journaliers Recommandés

AC : Aliments de compléments

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CIAT International Center for Tropical Agriculture

CGIAR : Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale

DTA : Département de Technologie Alimentaire

DGPER : Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale

DAI : Disc Abrasive index

DMT : Divalent Metal Ion Transporter

EDS : Enquête Démographique et de Santé

EDSBF-MICS : Enquête Démographique et de Santé et à Indicateurs Multiples du Burkina Faso

EAR : Equivalent d'activité rétinol

ENIAM : Enquête Nationale sur l'Insécurité Alimentaire et la Malnutrition

FNB/IOM: United States Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine

HKI: Helen Keller International

IE_{AC}: Ingéré Energétique des Aliments de Complément

IELM : Ingéré Energétique du Lait Maternel

IE_{Total}: Ingéré Energétique Total

INSTAPA: Improved Nutrition through STAPle foods in Africa

INERA: Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agronomique

INSD : Institut National de Statistiques et de la Démographie

IRSAT: Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies

IRD: Institut de Recherche pour le Développement

IFPRI: Food Policy Research Institute

ICRISAT: International Crops Research Institute for the Semi Arids Tropics

IZiNCG : International Zinc Nutrition Consultative Group

JNV: Journées Nationales de Vaccination
KPB: Kamboinsè Précoce Blanc
kcal: Kilocalorie(s).
NCHS: National Center for Health Statistique
MI : Micronutrient Initiative
MPE : Malnutrition Protéino-énergétique
OMS/WHO : Organisation Mondiale pour la Santé
PED : Pays en Développement
PC: Poids Corporel
ReSAKSS: Regional Strategic Analysis and Knowledge Support System
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RNI : Recommended Nutrient Intake
TMS : Teneur en Matière Sèche
TADD: Tangential abrasive dehulling device
UAC: Université d'Abomey Calavi
UNICEF : Fonds des Nations Unies pour l'enfance
UMR : Unité Mixte de Recherche
WP4: Work Package 4

Introduction

Pour plusieurs populations du monde, les problèmes alimentaires sont plus complexes et plus généralisés que la simple sous-nutrition. L'accès à la nourriture ne suffit plus pour garantir la sécurité nutritionnelle dans les pays en développement, la malnutrition est surtout due à une alimentation non équilibrée ou inadaptée. Le régime alimentaire d'un grand nombre de personnes des pays en développement est constitué essentiellement d'une alimentation monotone à base de végétaux, principalement de céréales ou de tubercules et de légumineuses. Les céréales occupent une place importante dans l'alimentation des ménages en Afrique de l'ouest. La consommation moyenne de céréales en 2009 dans cette région de l'Afrique est de 220 kg/habitant/an et représente environ 2/3 des apports énergétiques (ReSAKSS, WA, 2009). Sur une production céréalière mondiale de près de 2,5 milliards de tonnes, l'Afrique de l'Ouest produit environ 6 millions de tonnes (Faostat, 2009). La part des céréales locales dans le volume total des céréales consommées dépasse souvent 60 % et peut atteindre 70 à 80 % dans certains pays. En effet les céréales locales -le mil et le sorgho- sont bien adaptées aux conditions climatiques et écologiques des pays sahéliens où les sols sont arides ou semi-arides (Obilana, 2003). En 2009, le Burkina Faso a été le 6^{ème} producteur de mil et le 10^{ème} producteur de sorgho dans le classement mondial et la consommation céréalière a été de 261 kg/habitant/an (DGPER, 2010).

Les céréales sont consommées par toutes les classes d'âge, sous forme de boissons, de plats de consistance plus ou moins solide, allant de la bouillie à une pâte très épaisse, le *tô*¹. Plus particulièrement en ce qui concerne les jeunes enfants, les aliments de complément à l'allaitement maternel sont essentiellement à base de céréales. Les principaux aliments de complément sont des bouillies de mil, de sorgho ou de maïs. Par la suite, lorsque le jeune enfant devient apte à mastiquer, il commence à consommer le plat familial qui lui aussi est principalement composé de céréales, et souvent accompagné de sauces à base de légumes, de légumes-feuilles et de condiments.

Un tel régime alimentaire entraîne un faible apport et une faible biodisponibilité des micronutriments, en particulier du fer et du zinc.

Selon la définition de l'UNICEF (1998), les micronutriments sont des nutriments dont l'organisme a besoin en petites quantités et qui jouent des rôles fondamentaux dans la production des enzymes, dans le développement et le fonctionnement des systèmes reproductif et immunitaire. Les carences en micronutriments, appelées « faim cachée », ont des conséquences dévastatrices sur le développement physique et mental des populations vulnérables. Plus de 2 milliards de personnes, essentiellement des femmes et des enfants, vivant dans les pays en développement souffrent de carences alimentaires provoquées par l'absence d'un ou plusieurs micronutriments. Les micronutriments les plus connus pour les problèmes de carence qu'ils posent, notamment dans les PED, sont la vitamine A, l'iode, le fer et le zinc. Chez le jeune enfant, les carences en ces micronutriments ralentissent la

¹ Le « tô » est un terme dioula qui correspond à un plat traditionnel à base de céréales très fréquemment consommé au BF (donner aussi le terme mooré).

croissance, affaiblissent le système immunitaire, accroissent la morbidité et la mortalité. Selon l'OMS, la carence en fer constitue l'un des plus sérieux problèmes de santé du monde moderne, entraînant près de 0,2 % de décès pendant l'enfance. Plus de 30 % de la population mondiale souffre d'anémie, la moitié de ces cas serait attribuable à une carence en fer notamment dans les pays en développement (WHO, 2008). L'anémie ferriprive se caractérise par une diminution du nombre de globules rouges dans le sang ou de leur teneur en hémoglobine. Elle nuit au développement mental de plus de 40 % des bébés des pays en développement et réduit leurs chances de fréquenter ou de terminer l'école primaire.

La carence en zinc est l'un des principaux facteurs du retard de croissance, mais des carences en d'autres micronutriments sont également impliquées. Environ 1/3 des enfants de moins de 5 ans dans le monde sont atteints de retard de croissance, et 26 % de ces enfants vivent en Afrique (de Onis et *al.*, 2010). Au Burkina Faso la prévalence du retard de croissance augmente rapidement à partir de la naissance : de 11 % chez les enfants de moins de 6 mois, elle atteint 49 % chez les enfants de 24-35 mois. Près de 88 % des enfants de moins de 5 ans sont anémiés. Les zones rurales sont les plus touchées avec une prévalence de l'anémie sévère de 12 % contre 5 % dans les zones urbaines (EDSBF-MICS IV, 2011).

Selon l'UNICEF (1997), ces prévalences élevées de retard de croissance liées à des carences en micronutriments sont dues d'une part à une alimentation inadéquate et d'autre part aux maladies. Deux raisons principales sont à l'origine d'apports alimentaires insuffisants : les micronutriments sont présents en trop petites quantités dans une alimentation insuffisamment diversifiée et leur biodisponibilité est faible.

Par définition, la biodisponibilité d'un nutriment est la proportion de ce nutriment réellement utilisée par les fonctions biologiques vitales de l'organisme (Fairweather-Tait et *al.*, 2007). La biodisponibilité dépend à la fois de facteurs liés à l'aliment et au sujet. Au niveau de l'aliment, celle du fer et du zinc est principalement influencée par deux facteurs : la forme chimique sous laquelle ils se trouvent et la présence de facteurs inhibiteurs (Gibson et *al.*, 2006). Le fer héminique est la forme chimique la mieux absorbée, son taux d'absorption pouvant aller de 15 à 35 %, (Hunt, 2002). Mais cette forme n'est retrouvée que dans les aliments d'origine animale tels que la viande, le poisson, les abats. Dans les aliments d'origine végétale, le fer se trouve sous forme non héminique. Son absorption est faible comparée à la forme héminique (< 15 %). L'absorption du fer non héminique peut être améliorée par l'ajout d'acide ascorbique ou d'un aliment d'origine animale dans l'alimentation. Dans les pays en développement, le coût élevé des aliments d'origine animale en fait des aliments de luxe, les rendant non accessibles à une grande partie de la population. Comme dans de nombreux autres pays en développement, au Burkina Faso, la consommation de produits animaux est limitée du fait du faible revenu des ménages, de problèmes d'approvisionnement dans certaines localités et également en raison de certaines pratiques religieuses et coutumières.

L'autre facteur influençant de manière importante la biodisponibilité des minéraux est la présence dans l'aliment de composés chélateurs tels que les phytates, les composés

phénoliques et les fibres (Hurrell et Egli, 2010 ; Hambidge et *al.*, 2010). Ces composés forment des complexes insolubles avec les minéraux réduisant ainsi leur absorption au niveau de l'intestin (Gibson et *al.*, 2006). Les phytates sont les principaux inhibiteurs de l'absorption du fer et du zinc. Or, l'acide phytique représente 50 à 80 % du phosphore total des grains de céréales (Reddy et *al.*, 1989 ; Fergusson et *al.*, 1993). La consommation de 2 à 10 mg de phytates par repas influence négativement l'absorption du fer (Hallberg et *al.*, 1989, Hurrell et *al.*, 1992).

La transformation des grains de céréales avant leur consommation nécessite la mise en œuvre d'une succession d'opérations unitaires telles que le décortilage, la mouture, la fermentation, la germination, le trempage ou la cuisson. Certaines de ces opérations telles que le trempage, la fermentation ou la germination, entraînant une réduction de la teneur en phytates dans les céréales, requièrent peu de technologie et sont bien adaptées à l'échelle du ménage (Egli et *al.*, 2002 ; Mouquet et *al.*, 2001 ; Lestienne et *al.*, 2007).

De nombreux programmes et projets de recherche se sont lancés dans la lutte contre les carences en micronutriments dans les pays en développement. Diverses stratégies de lutte existent : la supplémentation, l'enrichissement, la diversification alimentaire ou la modification des procédés et, plus récemment, la biofortification (White and Braodley, 2009). De 2001 à 2005, l'UNICEF s'est investi au Burkina Faso dans la lutte contre la malnutrition et les carences en micronutriments à travers la promotion, à l'échelle nationale, de l'allaitement maternel exclusif, de l'utilisation du sel iodé et la supplémentation en vitamine A des enfants de 6 mois à 59 mois par distribution bisannuelle de capsules de palmitate de rétinol. Des résultats appréciables ont été obtenus, le taux d'allaitement exclusif est passé de 5% en 1998 à 25% en 2011 (EDSBF-MICS IV, 2011). Le taux de couverture de la supplémentation en vitamine A a atteint 97 % en 2005. Selon l'EDS (2003) (INSD et ORC Macro, 2004) 45 % des ménages utilisent du sel iodé. En revanche, jusqu'à maintenant, aucune supplémentation en fer et en zinc n'a été effective en faveur des jeunes enfants. Les suppléments menés ont concerné les femmes enceintes avec la distribution de comprimés de fer-folate, stratégie débutée en août 1984. En 2009, dans plusieurs pays d'Afrique de l'ouest, l'UNICEF et Micronutrient Initiative (MI) ont mis en place des programmes d'enrichissement d'aliments de large consommation tels que la farine de blé pour le fer, le zinc et les vitamines B, l'huile, le bouillon-cube Jumbo™ et le sucre pour la vitamine A.

La mise en œuvre de ces approches n'est pas sans difficultés. Les obstacles rencontrés sont principalement le coût élevé des capsules de supplémentation et des aliments enrichis, la compliance, le faible revenu des ménages, les pratiques religieuses et sociales, et l'identification d'aliments vecteurs produits de manière centralisée et consommés par tous. La biofortification, une nouvelle approche de lutte contre les carences en micronutriments considérée comme prometteuse par de nombreux acteurs, fait ses pas lentement au Burkina Faso. C'est une stratégie qui a pour objectif d'accroître les teneurs en micronutriments dans

des aliments de base par sélection variétale ou par génie génétique. HarvestPlus, un programme mondial du Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale (CGIAR), composé d'instituts de recherche et d'organismes internationaux, fait de la biofortification son outil de combat contre les carences en micronutriments fer, zinc et vitamine A. En 2005, au Burkina Faso, HarvestPlus a lancé le projet African Biofortified Sorghum (ABS) en collaboration avec l'INERA. Ce projet œuvre pour le développement de variétés de sorgho sélectionnées pour leurs qualités nutritionnelles intéressantes. En 2006, l'Assemblée nationale adopte la loi N°005-2006 sur la pertinence d'un système de sécurité sur la biofortification au Burkina Faso. Un programme de promotion de la production et de la consommation de la patate douce à chair orange, riche en provitamines A, a été initié en 2001 à Fada n'Gourma dans l'est du Burkina Faso par Hellen Keller International (HKI). Ce programme est actuellement en pleine phase de promotion auprès des populations mais se heurte pour l'instant au fait que la patate douce ne fait pas partie des habitudes alimentaires des populations burkinabè.

Le projet INSTAPA intitulé "Novel staple food-based strategies for better health and development in Sub-Saharan Africa" est un projet de recherche qui comporte 7 « paquets » de travail ou Work Packages (WP) visant à tester différentes stratégies s'appuyant sur les aliments de base des populations préparés à partir de mil, de maïs, de sorgho et de manioc, dans un but d'amélioration du statut en micronutriments des jeunes enfants et des femmes en âge de procréer en Afrique Subsaharienne. Collaborent à ce projet des partenaires de différents pays du Sud (Burkina Faso, Bénin, Mali, Nigéria, Kenya, Afrique du Sud) et du Nord (France, Hollande, Suisse, Royaume Uni).

Le présent travail s'inscrit dans le Work Package 4 (WP4) « post-harvest processing » mettant en partenariat l'IRD (France), l'IRSAT/DTA (Burkina Faso) et l'UAC (Bénin). L'objectif du WP4 est d'améliorer les apports en fer, zinc et vitamine A chez les jeunes enfants par l'amélioration des procédés de transformation des aliments traditionnellement consommés. Les travaux présentés ici se sont plus particulièrement intéressés à l'étude des apports en fer et en zinc des aliments à base de mil, sorgho et maïs en vue de l'amélioration du statut en fer et zinc des jeunes enfants du Burkina Faso.

Aussi la démarche adoptée dans la présente étude a été (i) d'identifier les aliments à base de céréale les plus fréquemment consommés par les jeunes enfants, (ii) de déterminer les ingérés en fer et zinc à partir des aliments à base de mil, sorgho et maïs et (iii) d'étudier l'influence des procédés sur la rétention et la biodisponibilité du fer et du zinc dans ces aliments afin de proposer des améliorations. Les résultats obtenus pourront être utilisés pour contribuer à l'élaboration de stratégies de lutte contre les carences en fer et en zinc pour un bon développement et une meilleure croissance des enfants au Burkina Faso, et plus largement dans les pays où le mil, le sorgho et le maïs contribuent de manière importante aux apports énergétiques .

Ainsi les travaux ont cherché à répondre aux cinq questions suivantes :

- Quelle est la place des céréales dans l'alimentation de l'enfant âgé de 6 à 36 mois au Burkina Faso ?
- Quels sont les apports en fer et en zinc des plats lorsqu'ils sont consommés ?
- Quelle est l'influence des différentes opérations unitaires des procédés de transformation du mil, du sorgho et du maïs sur les teneurs en fer et zinc des plats à base de ces céréales consommés par les jeunes enfants?
- Quelles améliorations peut-on attendre de l'utilisation de variétés biofortifiées ?
- Quelle est l'acceptabilité des plats préparés à partir des variétés biofortifiées par la population ?

Afin de répondre à ces questions, ce mémoire de thèse comporte, à la suite de cette introduction, 4 chapitres :

Le Chapitre 1 présente une revue bibliographique. Il aborde successivement (a) une présentation succincte du Burkina Faso, sa géographie, l'état nutritionnel et les pratiques alimentaires de la population burkinabè; (b) les principales céréales cultivées localement, le mil, le sorgho et le maïs, en soulignant l'importance de leur consommation, la structure des grains et les procédés de production traditionnels ; (c) l'importance du fer et du zinc sur le plan nutritionnel, les conséquences de leurs carences, les méthodes d'estimation de leur biodisponibilité dans les aliments, et enfin (d) les stratégies possibles de lutte contre les carences en ces deux minéraux.

Le chapitre 2, méthodologique, présente les différents protocoles d'étude ainsi que les matériels et méthodes des analyses utilisées.

Le chapitre 3 présente l'ensemble des résultats obtenus, sous forme d'articles ou de projets d'articles. Chaque article comportera un résumé en français et le cas échéant, des résultats complémentaires.

La première partie du chapitre 3 est axé sur les résultats d'enquêtes de consommation alimentaire menées sur différents sites. Il met en évidence la part des céréales dans l'alimentation du jeune enfant au Burkina Faso, détermine les formes de consommation des plats à base de céréale, la valeur nutritionnelle de ces plats et leur contribution à la couverture des apports recommandés.

La seconde partie est constituée de 2 articles et un projet d'article. Les articles 1 (publié) et 2 (accepté) portent sur l'influence du décortilage sur la composition en macro et micronutriments et en facteurs réduisant la biodisponibilité des minéraux de différentes variétés de mil et de sorgho. L'article 2 présente l'impact de différents types de décortilage réalisés par les populations sur la valeur nutritionnelle de variétés locales de mil et de sorgho. L'article 2 porte sur l'effet du décortilage abrasif sur la rétention et la biodisponibilité du fer et du zinc de variétés biofortifiées de mil par comparaison à une

variété locale. Dans le projet d'article 3 sont présentés les effets de l'étape de mouture traditionnelle manuelle ou mécanique sur les teneurs en fer et sa bioaccessibilité des farines de mil ou de sorgho.

Dans la partie 3 du chapitre 3, nous avons cherché à caractériser la rétention et la bioaccessibilité du fer et du zinc et l'acceptabilité des principaux plats traditionnels préparés à partir des variétés de mil et de sorgho biofortifiées.

Enfin le chapitre 4 comporte une discussion générale de l'ensemble des résultats obtenus et une conclusion assortie de perspectives et recommandations.

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1.1. Le Burkina Faso

1.1.1. Situation géographique et démographique

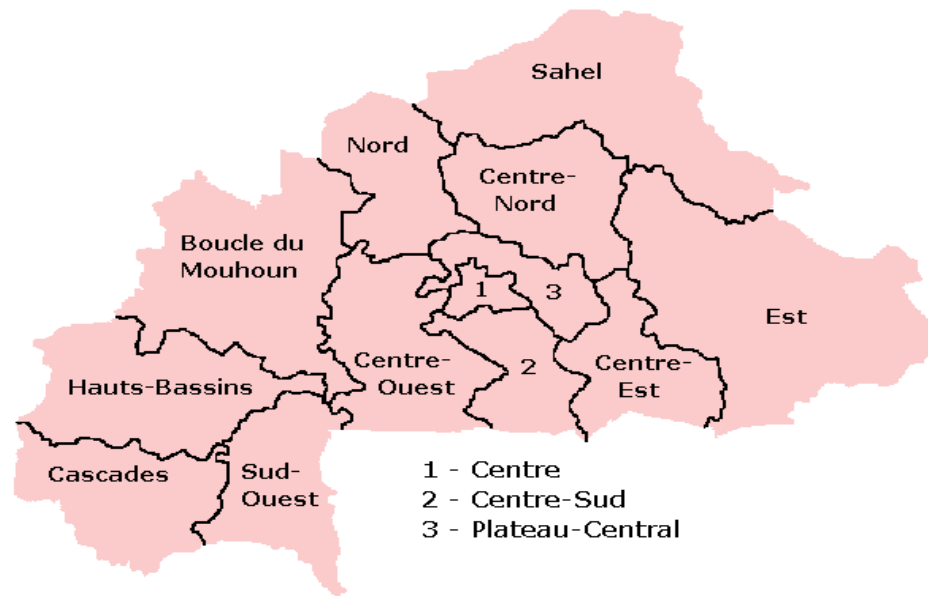
Le Burkina Faso est un pays d'Afrique occidentale enclavé entre le Mali (au Nord) le Niger (à l'est), le Benin, le Togo, le Ghana et la Côte D'Ivoire (au Sud). Sa superficie est de 274.200 km². Le nom « Burkina Faso » pris en 1984 veut dire « pays des hommes intègres ». Le Burkina Faso est constitué principalement d'un plateau d'une altitude moyenne de 250 m à 350 m qui s'effondre au sud ouest et s'abaisse dans le nord en direction de la vallée du Niger. Ce plateau est drainé à l'ouest par le *Comoé*, à l'ouest et au Sud par le *Mouhoun*, le *Nazinon* et le *Nakanbè*. A l'Est naissent de petits affluents du Niger dont le plus important est la *Pendjari*.

Le Burkina Faso possède un climat tropical de type soudano-sahélien caractérisé par des variations pluviométriques considérables allant d'une moyenne de 350 mm au Nord à plus de 1000 mm au sud ouest avec deux saisons : la saison des pluies avec des précipitations comprises entre 300 mm et 1200 mm et la saison sèche durant laquelle souffle l'harmattan un vent chaud et sec originaire du Sahara. La saison des pluies dure 4 mois de Mai-Juin à Septembre, cette durée est plus courte au nord. On peut donc distinguer trois grandes zones climatiques différenciées principalement par leur niveau annuel de précipitations.

- zone sahélienne au nord du pays : moins de 600 mm de pluviométrie par an et amplitudes thermiques élevées (15 à 45°C).
- zone soudano-sahélienne entre 11°3' et 13°5' de latitude Nord. C'est une zone intermédiaire pour les températures et les précipitations (entre 600 et 900 mm/an).
- zone soudano-guinéenne au sud du pays : plus de 900 mm de pluie par an et des températures moyennes relativement basses.

La population est de 14 017 262 habitants répartis dans environ 8000 villages ou localités (RGPH, 2006). La densité de population est de 51,8 habitants/km². Les projections de population donnent une répartition par sexe qui révèle une prédominance des femmes sur l'ensemble de la population (51,7 %). La structure de la pyramide par âge met en évidence l'extrême jeunesse de la population, puisque 49,89 % a moins de 15 ans. L'espérance de vie à la naissance au Burkina Faso est de 51 ans (INSD et ORC Macro, 2004) avec un taux de mortalité de 1,7 %. Selon l'UNICEF (2011), le taux de mortalité des moins de 5 ans s'élève à 166‰.

Sur le plan administratif, le Burkina Faso est constitué de 45 provinces réparties en 13 régions (figure 1-1).



Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Régions_du_Burkina_Faso

Figure 1-1 : Cartes des différentes régions du Burkina Faso.

1.1.2. Agriculture

Traditionnellement, l'agriculture est l'activité économique la plus importante du Burkina Faso car elle fait vivre plusieurs familles et occupe plus de 84,1 % de la population active. La superficie cultivable s'élève à 9 millions d'hectares, la superficie cultivée est de 4,4 millions d'hectares, soit un peu moins de la moitié. L'agriculture au Burkina Faso se consacre essentiellement aux cultures vivrières, avec pour objectif d'arriver rapidement à une complète autosuffisance alimentaire de ses populations. Ainsi, la majeure partie des terres cultivées est consacrée à la production de céréales : le sorgho ou gros mil dans les régions plus arrosées et le petit mil dans les régions sèches et sur les sols sableux. A elles deux, ces céréales fournissent plus de 67% de la production céréalière totale du Burkina Faso (Faostat, 2009). Parmi les cultures vivrières complémentaires figurent le maïs, le manioc, les ignames, le riz paddy, l'arachide, etc. La plupart d'entre elles comme le riz ou l'igname sont cultivées dans les régions les plus humides du Burkina Faso, au Sud-Ouest (pays Turka, Gouin, Sénoufo et Lobi). Par ailleurs, le Burkina Faso produit également 400 000 tonnes de canne à sucre par an, transformées en sucre par la SOSUCO à Banfora. Certaines cultures vivrières (le sésame et l'arachide) sont également des cultures d'exportation. La culture du coton s'est surtout développée à l'Ouest (pays Bobo), autour de Boromo, Dédougou, Houndé et Bobo-Dioulasso.

L'élevage est pratiqué par les nomades dans le nord, par l'association nomades/agriculteurs sédentaires dans la majeure partie du pays et par les seuls agriculteurs dans le sud, l'élevage selon les statistiques 2007 (www.countrysat.org) est constitué de 7,9 millions de bovins, 7,5 millions d'ovins et 11,2 millions de caprins.

Quant à la pêche (en eau douce) elle se pratique essentiellement dans les fleuves et rivières traversant le Burkina Faso (Mouhoun, Nakambé, Nazinon, Comoé, Sourou, etc.) dans les lacs, dans les marigots ainsi que dans les bassins de retenue des barrages édifiés par l'homme (comme le barrage de la Kompienga, dans le Gourma, au sud-est de la capitale).

Malgré les efforts importants réalisés dans les aménagements hydro-agricoles (14 % des terres irrigables sont désormais aménagées) et la floraison d'organisations paysannes, l'agriculture burkinabé reste fortement dépendante des précipitations, et les rendements, que ce soit pour les cultures vivrières ou de rentes, ne progressent quasiment pas. Les raisons sont multiples : dégradation des sols, faible niveau de formation technique et d'équipement des producteurs, forte fluctuation des prix. Ces limites, conjuguées à l'accroissement démographique, ne sécurisent pas la disponibilité alimentaire et les ressources environnementales du pays à long terme. Cette problématique se pose surtout en termes d'incapacité à accéder à une nourriture variée et en quantité suffisante. Cette difficulté d'accès est liée d'une part aux faibles revenus et une désorganisation des marchés aboutissant à une variabilité des prix des denrées de bases. Le taux de pauvreté est estimé à 43,9% et le pays occupe le 161^{ème} rang sur 169 pays selon l'Indice de Développement Humain 2010 publié par le PNUD.

1.1.3. Pratiques alimentaires

Au Burkina Faso les céréales sont au cœur de l'alimentation des populations. En milieu urbain le riz et le maïs sont les céréales les plus consommées par les populations. Tandis qu'en milieu rural, les céréales locales mil et sorgho sont les plus consommées. Ces céréales sont consommées sous diverses formes de consistances différentes. Les boissons et les bouillies sont à base de mil ou de sorgho, tandis que les plats de consistance épaisse comme le couscous ou le *tô* sont à base de maïs, mil, sorgho et riz. Le *tô* est consommé par 60 % de la population avec une fréquence de 3 à 7 fois par semaine (Konkobo et *al.*, 2002). Le *tô* est une pâte épaisse et compacte, résultant d'un malaxage et d'une cuisson de farine et d'eau. Il se consomme généralement accompagné de sauces, mais le *tô* peut être délayé dans de l'eau, de l'eau acidifiée, du lait. Les sauces sont à base de feuilles fraîches ou sèches et varient selon les saisons et le revenu des ménages. Elles sont liquides ou gluantes et sont composées de produits d'origines diverses permettant d'apporter une certaine variété aux repas. La viande est très peu consommée en milieu rural par les enfants. Le poisson séché pilé est utilisé dans les sauces et constitue un des seuls produits d'origine animale régulièrement consommé par la majorité de la population mais il est souvent présent en faible quantité (Greffeuille et *al.*, 2011).

Les fruits tels que les mangues sont généralement consommés entre les repas pendant la période de production et les fruits sauvages comme le *nére* sont consommés directement sur place, en brousse.

1.1.3.1. Alimentation du jeune enfant

Plusieurs facteurs affectent la croissance du jeune enfant telles que les altérations des conditions psychosociales du fœtus, la malnutrition de la mère, les infections, les mauvaises pratiques d'alimentation de l'enfant (Gibson et Hotz, 2001). Les pratiques d'alimentation sont des facteurs déterminants de l'état nutritionnel des enfants qui affecte, à son tour, leur morbidité et leur mortalité. La plupart des maladies nutritionnelles de l'enfant sont attribuées à l'impact des carences en micronutriments durant le jeune âge (Branca and Ferrari, 2002). Parmi ces pratiques, celles concernant l'allaitement revêtent une importance particulière. Plusieurs travaux scientifiques ont permis d'établir aujourd'hui que le lait maternel est l'aliment initial qui répond le mieux aux besoins du nourrisson aussi bien sur le plan nutritionnel que psychoaffectif. Il est de bonne qualité sanitaire et joue un rôle protecteur vis-à-vis des infections telles que diarrhées, infections respiratoires aiguës, et même affections allergiques souvent rapportées comme causes de mortalité infantile dans les pays en développement. Le lait maternel apporte de nombreux éléments nutritionnels sous une forme particulièrement assimilable et bien adaptée aux besoins de l'enfant. L'allaitement maternel exclusif garantit des conditions optimales de croissance, de santé et de développement durant les six premiers mois de vie avant l'introduction d'aliments de complément appropriés (Underwood and Hofvander, 1982; Wambach et al., 2005).

Au Burkina Faso, selon les données de l'EDSBF-MICS IV (2011), l'allaitement maternel est très répandu, et la durée moyenne de l'allaitement au sein est de 23,5 mois, mais elle peut être prolongée jusqu'à 3 ans. Cependant l'allaitement maternel exclusif est de 25% chez les enfants de 0 à 5 mois (EDSBF-MICS IV, 2011). En 2002, l'OMS et l'UNICEF ont recommandé l'allaitement maternel exclusif pour tous les enfants dès la naissance jusqu'à 6 mois, âge à partir duquel il devient nécessaire d'introduire des aliments de complément au lait maternel sûrs et adéquats du point de vue nutritionnel, tout en poursuivant l'allaitement jusqu'à 24 mois ou plus (WHO/UNICEF, 2002). Selon Black et al. (2008) l'allaitement non exclusif dans les 6 premiers mois de la vie entraîne près de 1,4 millions de décès et 10 % de maladie chez les enfants de moins de 5 ans dans le monde. Selon une étude menée dans la Gnagna (province du Burkina Faso), seulement 30 % des enfants de 6 à 8 mois reçoivent un aliment de complément (Sawadogo et al., 2003). Les aliments de complément sont de faible qualité nutritionnelle, 60 % des bouillies sont constituées uniquement d'eau et de céréale. Lors de la période d'alimentation complétée correspondant à la diversification de l'alimentation, les bouillies à base de céréales sont largement consommées ainsi que les plats familiaux. Ces aliments de complément à base de céréales ne couvrent généralement pas les besoins journaliers des jeunes enfants. De plus, l'âge d'introduction de ces aliments de complément est souvent trop tardif ou au contraire trop précoce. Près de 75 % des enfants âgés de 0 à 5 mois ont reçu un liquide autre que le lait maternel (EDSBF MICS IV, 2011). Ainsi, chez les enfants de moins de 1 mois, 49,9% avaient reçu un liquide en plus du lait maternel. A 4-5 mois, 7,4 % avaient reçu des aliments solides à base de céréales. Par contre, les poissons, volailles, viandes ou œufs sont introduits plus tardivement (5,1 % à partir de 6-8 mois). À 6-7 mois, seulement 5,9 % des enfants reçoivent des aliments riches en vitamine A. À 6-8 mois,

une proportion relativement faible d'enfants consomme des aliments solides ou semi-solides suffisamment variés, en plus du lait maternel, et riches en protéines et minéraux : 33 % consomment des céréales, 3 % des fruits et/ou légumes, 0,6 % des tubercules ou racines, et 5,1 % seulement de la viande, de la volaille, du poisson et 1,7 % des œufs. Comme on pouvait s'y attendre, au même âge, la proportion d'enfants non allaités qui consomment les différents types d'aliment est légèrement plus élevée que pour les enfants allaités.

1.1.4. Situation nutritionnelle

La situation nutritionnelle au Burkina Faso est caractérisée par la persistance de la sous alimentation et des prévalences élevées de malnutritions par carence, due à une alimentation non adaptée en quantité et en qualité. Plusieurs mécanismes, liés entre eux, sont à l'origine de la forte mortalité infanto-juvénile observée. Les multiples carences nutritionnelles, dont la malnutrition pluricarentielle (parfois appelée de manière obsolète malnutrition protéino-énergétique), atteignent plus d'un enfant sur deux au Burkina Faso et entraînent un déficit important de la fonction immunitaire. Elles favorisent l'installation d'infections qui à leurs tours viennent aggraver le degré de malnutrition. Le tableau 1-1 présente l'évolution de l'émaciation, du retard de croissance et de l'insuffisance pondérale de 1992 à 2003, puis les chiffres de 2011. Pour les trois premières enquêtes, les chiffres sont exprimés par rapport à l'ancienne référence de croissance NCHS (1977) et pour la quatrième et dernière enquête, la nouvelle référence de croissance de l'OMS (2006) a été utilisée. Pour cette raison, les chiffres ne sont pas comparables. La carence en zinc est un des facteurs impliqués dans le retard de croissance ou malnutrition chronique. Selon les résultats de la dernière enquête nutritionnelle nationale (EDSBF-MICS IV, 2011) conduite par le Ministère de la Santé en août/septembre 2010, la prévalence de la malnutrition aiguë déterminée par un z-score de l'indice poids/taille <-2 (référence OMS, 2006) se situe au niveau national à 10,7 % avec 1,5 % de forme sévère; une prévalence de l'insuffisance pondérale (indice poids/âge) qui est estimée au niveau national à 31,4 % avec 7,3 % de forme sévère enfin une malnutrition chronique (taille/âge) qui se situe à 28,6 % au niveau national avec 9,3 % de forme sévère. Malgré les efforts effectués par les acteurs de la santé, les prévalences d'émaciation, d'insuffisance pondérale et de retard de croissance ont stagné voire augmenté chez les enfants de moins de 5 ans de 1992 à 2003, et les chiffres de 2010 mettent en évidence une situation toujours alarmante.

Le pourcentage d'anémie chez les moins de 5 ans est de 87,8% avec 11,1% de forme sévère. Le pourcentage d'enfants anémiés est important en milieu urbain (77,6%) et plus encore en milieu rural (89,9%). La forme sévère est également plus présente en milieu rural avec 12,4% contre 4,9% en milieu urbain (EDSBF-MICS IV, 2011, Ouédraogo, 2008). Les prévalences les plus élevées sont observées chez les enfants de 6-24 mois avec 95,1 % d'enfants anémiés et 19 % de forme sévère (tableau 1.2).

Tableau 1-1 : Evolution du pourcentage d'enfants présentant une émaciation, un retard de croissance et une insuffisance pondérale au Burkina Faso

	EDSBF 1993 (Sept-Déc 92)	EDS-BF 1999 (Nov 98-Mars 99)	EDS-BF 2004 (Juin-Nov 03)	EDS-BF 2011 Aout 2010
Référence de croissance		NCHS/OMS, 1977		OMS,2006
Emaciation Poids/taille	13,3	13,2	18,6	15,5
Retard de croissance Taille/âge	29,4	36,8	38,7	34,6
Insuffisance pondérale Poids/âge	29,5	34,3	37,7	25,7

Source : EDS 1993, EDS 1999, EDS 2004, EDS 2011

Tableau 1-2 : Prévalence de l'anémie chez les enfants de moins de 5ans au Burkina Faso

Age	Anémie modérée (hémoglobine <11 g/dl)	Anémie sévère (hémoglobine < 7 g/l)
6 – 8 mois	93,1	11
9-11 mois	93,4	22,5
12-17 mois	94,3	19,2
18-23 mois	95,1	19,2
24-35 mois	90,8	12,7
Milieu urbain (<5ans)	77,6	4,9
Milieu rural (<5ans)	89,9	12,4
Total (<5ans)	87,8	11,1

Source EDSBF-MICS IV, 2011

1.2. Céréales

1.2.1. Importance de la consommation du mil, sorgho et maïs en Afrique

Selon les estimations de la FAO, la production céréalière mondiale en 2009 s'élève à 2,489 milliards de tonnes. Dans les zones semi-arides du monde, les principales céréales produites et consommées sont le mil et le sorgho. Ces céréales sont bien adaptées aux sols semi-arides et au climat sub-tropical, leurs rendements de production sont relativement bons par rapport aux autres céréales sur des sols pauvres et dans des zones où les précipitations sont rares et irrégulières (Obilana, 2003). Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) et le mil (*Pennisetum glaucum*) constituent l'alimentation de base de millions de personnes dans les régions semi-arides de l'Afrique de l'ouest (Hounhouigan, 2004). Au cours de ces dernières années, le mil et le sorgho ont fourni plus de la moitié de la consommation au Niger (52 %). Les pays africains tels que le Nigéria, le Niger, le Mali occupent respectivement les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} places mondiales dans la production du mil en 2009. De même au niveau du sorgho le Nigéria occupe la 3^{ème} place mondiale. En 2009, le Burkina Faso a été le 6^{ème} producteur de mil avec 970 927 tonnes et le 10^{ème} producteur de sorgho (1 521 468 tonnes) dans le monde.

Tableau 1-3 : Quantités (en tonnes) de sorgho, de mil et de maïs produites en 2009 dans les régions du Burkina Faso (www.faostat.org)

	Sorgho	Mil	Maïs
Boucle du Mouhoun	261 008	219 367	154 835
Centre-ouest	189 179	68 179	82 957
Est	164 566	88 899	59 001
Hauts-bassins	159 129	48 312	296 260
Centre-nord	136 617	58 130	8 744
Nord	134 176	115 763	4 086
Sud-ouest	105 265	71 104	70 354
Centre-est	96 585	64 766	48 741
Plateau Central	90 905	33 132	13 843
Centre-sud	64 668	55 058	36 794
Sahel	54 815	117 657	945
Cascades	35 969	12 944	111 833
Centre	28 587	17 618	6 163
Total	1521470	970927	894558

La consommation moyenne annuelle du sorgho monte à 200 kg au Burkina Faso (Campagne agricole 2000/2001). En plus de ces céréales ancestrales en Afrique, de nouvelles variétés de maïs et de riz, résistantes aux conditions agro-écologiques difficiles qui prévalent au Burkina Faso sont de plus en plus cultivées et par conséquent consommées.

La répartition de la production céréalière dans les différentes régions du pays en 2009 est donnée dans le tableau 1-3. Le mil et le sorgho sont représentés dans l'ensemble du plateau mosi et dans l'ouest du Burkina Faso tandis que le maïs règne au sud-ouest. La culture du maïs s'est développée de manière importante dans le sud-ouest du pays au cours des 50 dernières années. La région des Hauts-Bassins situés au sud-ouest du Burkina Faso produit à elle seule en 2009 plus de 30 % soit 296 260 tonnes de maïs. Tandis que le mil se retrouve dans la région du Sahel (117 657 tonnes) en 2^{ème} position après la Boucle du Mouhoun, en 3^{ème} position vient la région du Nord. La production du sorgho est répartie dans tout le territoire.

Sur une production céréalière totale en 2009 de 3 680 982 tonnes, la consommation humaine au Burkina Faso s'élève à 2 364 153 tonnes, soit environ 152 kg par habitant et par an (Ministère de l'Agriculture).

1.2.2. Types de mils, sorgho et maïs

Le mil, le maïs et le sorgho sont des céréales de la famille des *Poacées* (graminées). Il existe neuf espèces de mils : le mil pénicillaire (*Pennisetum glaucum*, *P. typhoides*, *P. typhideum*, *P. americanum*), l'Eleusine (*Eleusine coracana*), le millet commun (*Panicum miliaceum*), le millet des oiseaux (*Setaria italica*), le teff (*Eragrostis tef*), le fonio (*Digitaria exilis*, *Digitaria iburua*, *Brachiaria deflexa*), le panic pied de coq (*Echinochloa crusgalli*, *E. colona*), millet indien (*Panicum sumatrense*), l'herbe à épée (*Paspalum scrobiculatum*), Coix (*Coix lachryma-jobi*).

L'espèce *Pennisetum glaucum* -ou mil pénicillaire- de la sous-famille des *Panicoideae* est la plus cultivée en Afrique occidentale, au Sahel, en Afrique centrale, orientale et australe. Elle est connue sous plusieurs noms : mil, petit mil (au Burkina Faso), mil à chandelle, mil perlé, *babala*, *bajra*, *cumbu*, *dukhn*, *gero*, *sajje*, *sanio* et *souna*.

Le mil est une graminée de 3 à 4 m de haut. Le mil chandelle a le potentiel de rendement le plus élevé de toutes les espèces de mil en conditions de sécheresse et de températures élevées.

Le sorgho est arrivé d'Ethiopie en Afrique orientale aux environs de 200 ans après JC ou même avant. Il a été adopté et transporté dans les pays de savane de l'Afrique orientale et australe par les Bantous. Le sorgho appartient à la tribu des *Andropogonae*. En 1961, Clayton a proposé le nom de *Sorghum bicolor* (L.) Moench pour le sorgho cultivé, et c'est ce nom qui est actuellement utilisé. Harlan et de Wet (1972) ont classifié le sorgho cultivé en 5 espèces principales suivant les caractéristiques de la panicule et de l'épillet :

- L'espèce *bicolor* rencontrée en Afrique et en Asie, le grain est petit et enveloppé de glumes.

- L'espèce *guinea* sorgho typique de l'Afrique de l'ouest mais rencontrée aussi en Afrique australe. Le grain est petit et vitreux.
- L'espèce *caudatum* cultivée en Afrique de l'est et du centre
- L'espèce *kafir* est répandue en Afrique centrale, grain de petite taille.
- L'espèce *durra* rencontrée en Afrique de l'est, au Moyen orient et en Inde.

Le sorgho, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, est connu sous divers noms: grand mil ou gros mil et herbe de Guinée en Afrique de l'Ouest, *blé kafir* en Afrique du Sud, *durra* au Soudan, *mtama* en Afrique orientale, *jowar* en Inde et *kaoliang* en Chine (Purseglove, 1972). Au Burkina Faso, l'appellation gros mil ou mil correspond au sorgho blanc. Les variétés de sorgho cultivées sont généralement des variétés locales, très peu de variétés sélectionnées sont cultivées par les populations. Cependant plusieurs mélanges de variétés liées surtout à la couleur sont rencontrés, par exemple des mélanges de sorgho rouge et blanc.

Le maïs est de la tribu des *Maydeae*. Cette plante originaire du Mexique constituait l'aliment de base des Amérindiens. Dans leur langue le mot maïs signifie : « ce qui maintient en vie ». Elle est introduite en Europe vers le XVI^{ème} siècle et est aujourd'hui la première céréale cultivée au monde. En Afrique, le maïs a été introduit d'une part en Egypte vers 1540, par la Turquie et la Syrie, d'autre part dans la région du golfe de Guinée par les Portugais vers 1550. Le nom *maïs* vient de l'espagnol *maiz*, le *maïs* a plusieurs noms vernaculaires comme blé de l'inde, blé de Turquie, blé de Barbarie. Son nom scientifique est *Zea mays*. Cette plante a été beaucoup étudiée par de nombreux scientifiques entraînant de grands progrès génétiques. Ainsi le maïs a vu son rendement augmenter fortement comparé aux autres céréales comme le blé et les céréales secondaires mil et sorgho. De nos jours le nombre de variétés de *maïs* a considérablement augmenté à la suite de divers croisements.

1.2.3. Caractéristiques morphologiques des grains de céréales

Les grains de céréales sont des caryopses, ils se composent d'un grain unique contenant à la fois le tégument séminal et la semence. La taille, la forme et la masse sont les caractéristiques d'identification des grains de céréales. Le poids de 1000 grains, indicateur de la taille des grains, varie entre 0,14 g pour le teff à 600 g pour le maïs (Kent & Evers, 1994). Deux paramètres sont utilisés pour caractériser la dureté du grain : l'indice de dureté AHI (Abrasive Hardness Index), qui est le temps requis pour éliminer par abrasion 1 % du poids initial du grain, et l'indice abrasif du disque qui correspond au pourcentage de matière éliminée par minute (Mwasaru et al., 1988 ; Lawton & Faubion, 1989).

La composition structurale des grains et la proportion des différentes couches diffèrent d'une espèce à l'autre, cependant la structure générale est constituée de trois principales parties: le péricarpe, le germe et l'albumen (Mac Masters et al., 1978, Munck, 1981a). Le tableau 1-4 présente les proportions des différentes parties du grain de céréale par rapport au grain entier.

Le péricarpe est divisé en trois couches qui sont l'épicarpe, le mésocarpe et l'endocarpe. L'épaisseur du péricarpe dans le grain varie selon la céréale. Le péricarpe des grains de maïs,

de sorgho et de mil ne représente que 6 à 8 % du grain entier contre 15 % pour le grain de blé. L'épicarpe est composé de l'épiderme constitué de cellules épaisses, allongées et rectangulaires et de l'hypoderme. Le mésocarpe est la partie intermédiaire du péricarpe et son épaisseur varie suivant les génotypes. L'endocarpe se compose de cellules transversales et d'une couche de cellules tubulaires. Il joue un rôle important dans le transport de l'humidité dans le grain.

Le décortiquage des grains de céréales est un procédé qui permet de séparer les enveloppes de l'albumen. La partie éliminée au décortiquage est appelée le son. Le son est constitué du péricarpe et de la couche aleurone. Abdelrahman et *al.* (1984) ont rapporté que la proportion de son de variétés américaines de mil était de 8,4 % du poids du grain. La durée du décortiquage est liée à l'épaisseur du mésocarpe.

En dessous du péricarpe se trouve la testa. La testa est pigmentée et riche en tannins. La présence du pigment et l'épaisseur de la testa sont des caractères génétiques. Elle est épaisse et constituée de deux couches chez certains grains de céréale (seigle), chez d'autres, elle est constituée d'une seule couche (orge, avoine, riz). Dans le grain de maïs la testa est sous forme de cuticule. La couche de testa du grain de mil est fine et parfois pigmentée. Dans le grain de sorgho c'est la coloration de la testa qui détermine le type de grain.

L'albumen est la partie la plus volumineuse du grain. Il représente 60 % dans les grains de mil et 82 à 83 % dans les grains de maïs et de sorgho. Il est constitué de la couche aleurone et de la zone corneuse ou farineuse. La couche aleurone est située juste sous la testa. Elle est riche en sels minéraux, en vitamines, en protéines et en enzymes hydrolytiques. Dans les grains de mils et de sorgho la couche à aleurone est constituée d'une seule couche de cellules. La zone cornée ou farineuse de l'albumen est formée à la périphérie de couches de cellules rectangulaires qui contiennent des granules d'amidon et des corps protéiques. Les granules d'amidon sont polyédriques dans l'albumen corné tandis que dans l'albumen farineux ces granules sont sphériques. Les proportions d'albumen corné et farineux déterminent la texture du grain. Dans les grains à texture tendre la zone farineuse de l'albumen est plus importante que la zone cornée.

Le germe est constitué de deux parties : l'embryon et le scutellum, un tissu de réserve riche en lipides, en protéines, et en sels minéraux.

Tableau 1-4 : Proportion massique (%) des différentes parties du grain de céréales par rapport au grain entier

	Blé	Sorgho	Maïs	Riz	Mil
Albumen	82	82	83	90	60
Germe + scutellum	3	10	11	4	
Enveloppes + couche à aleurone	15	8	6	6	40

D'après Miche, 1980

1.2.3.1. Structure du grain de mil

La figure 1-2 présente la structure du grain de mil. Le grain de mil est de forme ovoïde, hexagonale. Les grains de mil sont de plusieurs couleurs. Ils peuvent être gris, pourpres, bruns, blancs, jaunes. La taille des grains de mil peut atteindre 3 à 4 mm de diamètre, et le poids de 1000 grains varie de 3 à 14 g avec une moyenne de 6 g (Hulse et *al.*, 1980). La répartition des différentes parties selon le poids du grain est de 8,4 % pour le péricarpe, 75 % pour l'albumen, et 16,5 % pour le germe (Abdelrahman et *al.*, 1984).

L'épaisseur du mésocarpe du grain de mil varie selon les génotypes. Le mésocarpe est caractérisé par l'absence de granules d'amidon. La testa est fine et peut être pigmentée ou non. Elle est constituée d'une seule couche de cellule de 0,4 µm d'épaisseur (FAO, 1995). Les variétés de mil à couleur rouge ou grise sont plus riches en tannins et en phénols que les variétés blanches (Ramachandra et *al.*, 1977). Les corps protéiques de l'albumen des grains de mil sont plus nombreux dans la zone farineuse que dans la zone cornée. Au niveau de la zone farineuse, les granules d'amidon sont sphériques et de grande taille et plus facilement digérés par les enzymes. Les proportions d'albumen corné et d'albumen farineux déterminent la texture du grain de mil. Le grain est tendre lorsqu'il y a plus d'albumen farineux que d'albumen corné et dur dans la situation inverse. La texture des grains de mil varie énormément d'un albumen farineux tendre à un albumen corné dur.

La proportion du germe dans le grain par rapport à celle de l'albumen est plus importante pour le mil chandelle que pour le sorgho et les autres mils. Dans le mil le rapport albumen/germe est de 4,5/1 (FAO, 1995).

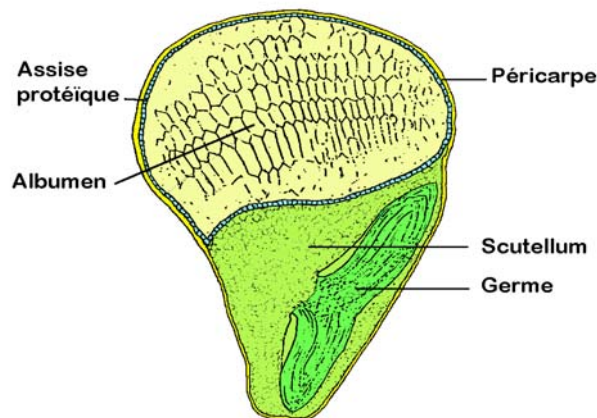


Figure 1-2 : Structure du grain de mil (source: Miche (1980), adapté par JF Cruz, CIRAD)

1.2.3.2. Structure du grain de sorgho

Les grains de sorgho sont arrondis, en moyenne 4 à 8 mm de diamètre, de dimensions et de formes variables. Leur poids de 1000 grains varie de 8 à 50 g (Evers et *al.*, 1999).

Le péricarpe représente 6 % de la masse du grain, l'albumen 84 % et le germe 10 % (Hubbard et *al.*, 1950). La figure 1-3 présente les différentes parties de la graine de sorgho.

Le mésocarpe du sorgho est la partie la plus épaisse du péricarpe. La résistance du sorgho aux moisissures est fonction de la finesse du mésocarpe. L'épaisseur du mésocarpe varie en

fonction des génotypes. Les différences de l'épaisseur du mésocarpe, et par conséquent du péricarpe sont liées à la quantité de granules d'amidon présents dans le mésocarpe (Earp and Rooney, 1981; Earp et *al.*, 2004b). Les variétés de sorgho à péricarpe épais contiennent des teneurs élevées de polyphénols (Beta et *al.*, 1991).

La testa est plus ou moins pigmentée selon les variétés de sorgho. La couleur du péricarpe et son intensité ne déterminent pas le type et la teneur en tannins du grain de céréale (Boren and Waniska, 1992). C'est la pigmentation de la testa qui détermine la présence ou non de tannins. On distingue les types I, II et III. Le type I ne possède pas de tannins, les types II et III possèdent des tannins. Selon les travaux de Earp et *al.*, (2004a), les tannins de type II et III n'ont pas la même localisation dans le grain de sorgho. Dans le type II, les tannins se trouvent dans des vésicules au niveau de la testa tandis que dans le type III, ils sont répartis au niveau de la paroi de la testa ou souvent même dans le péricarpe.

Dans l'albumen du sorgho, le nombre de corps protéiques diminue à l'inverse du contenu de l'amidon de la périphérie vers l'intérieur. Le rapport albumen/germe dans le grain de sorgho est de 8,4/1 (FAO, 1995).

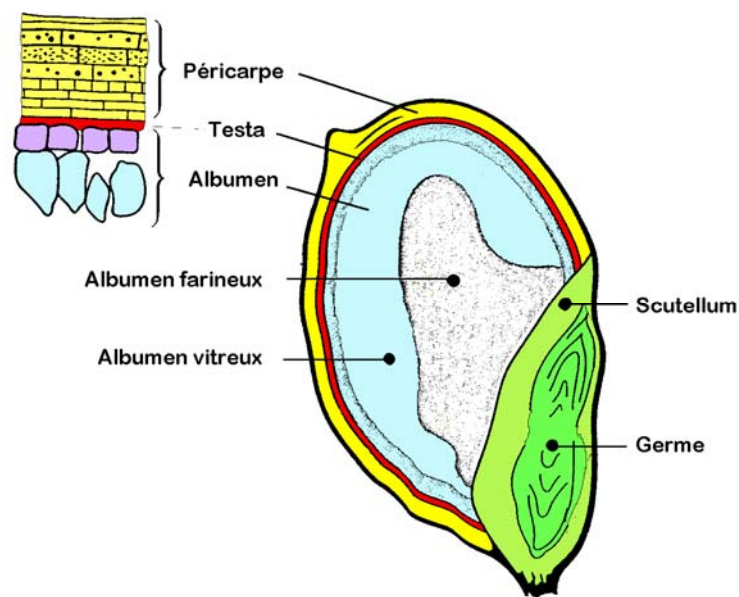


Figure 1-3 : Structure du grain de sorgho (source: Miche (1980), adapté par JF Cruz, CIRAD)

1.2.3.3. Structure du grain de maïs

Le grain de maïs est constitué de 4 parties : le péricarpe, l'albumen, le germe et la coiffe. La figure 1-4 présente les différentes parties du grain de maïs. L'albumen est la partie la plus importante avec 82,6 % du poids du grain, le germe représente en moyenne 10,9 % et le péricarpe 5 % (Weber, 1978). Le poids de 1000 grains est très variable, de 190 g à 400 g (FAO, 1993).

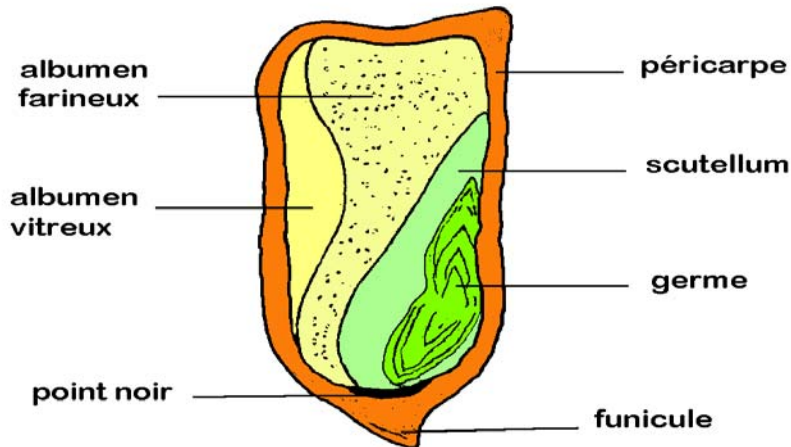


Figure 1-4 : Structure du grain de maïs (source: Miche (1980), adapté par JF Cruz, CIRAD)

Le mésocarpe et l'endocarpe sont très différents et d'importance variable selon les types de fruits. L'albumen est constitué de deux parties, l'albumen corné (environ 50 % du grain) situé sur les cotés du grain, et l'albumen farineux (environ 25 % du grain). Le germe comprend l'embryon et le cotylédon qui l'entoure. L'embryon est riche en protéines, le cotylédon est riche en lipides.

Tableau 1-5 : Composition biochimique pour 100 g de grains entiers de mil, maïs et sorgho

Paramètres	Mil	Sorgho	Maïs
Humidité (g)	11,8	11,0	13,8
Protéines (g)	9,5	11,0	8,9
Lipides (g)	2,9	3,3	3,9
Glucides (g)	72,9	73,0	72,2
Fibres (g)	3,2	1,7	2
Cendres (g)	2,5	1,7	1,2
Calcium (mg)	20	28	22
Phosphore (mg)	311	287	268
Fer (mg)	68,0*	4,4	2,1
Thiamine (mg)	0,7	0,4	0,37
Riboflavine (mg)	0,4	0,15	0,12
Niacine (mg)	2,3	3,9	2,2

Source : Severson, 1998

*La valeur en gras est vraisemblablement erronée et pourrait être due à une erreur de report de la donnée dans le tableau ou à des échantillons très contaminés en fer. Des valeurs moins importantes ont été publiées par plusieurs auteurs dont Jambunathan et *al.*, (1980) qui a trouvé des teneurs en fer du mil comprises entre 2,6 et 9,6 mg/100g et Kayodé et *al.*, (2006) a aussi trouvé des valeurs de 3 à 11,3 mg/100 g.

1.2.4. Composition biochimique et répartition des nutriments dans les grains de mil, maïs et sorgho

Les grains de céréales sont riches en macronutriments (lipides, protéines, glucides) et en certains micronutriments. Ils contiennent également d'autres molécules qui peuvent se lier aux macronutriments et micronutriments réduisant leur digestibilité et leur biodisponibilité dans l'organisme humain. Ce sont les fibres, les phytates, les polyphénols. Les teneurs en ces éléments sont très variables d'une espèce à une autre ou d'une variété à l'autre. Les tableaux 1-5 et 1-6 présentent respectivement la composition biochimique des grains de mil, maïs et sorgho et la répartition des nutriments dans les différentes parties de ces grains.

Tableau 1-6 : Répartition des nutriments dans les différentes parties des grains de céréales mil et sorgho

		% du poids grain	Protéines (%)	Cendres (%)	Lipides (%)	Fibres totales (%)	Phytates (%)
Mil	Péricarpe	7,5 ^b	17,1 ^b	13,9 ^b	5,9 ^b		25 ^c
	Germe	17,4 ^b	24,5 ^b	72,2 ^b	87,8 ^b		67 ^c
	Albumen	75,1 ^b	10,9 ^b	13,9 ^b	6,3 ^b		8 ^c
Sorgho	Péricarpe	4,9 ^d -8 ^e	6,7	7,1 ^d -15,7 ^e	5,7 ^d -14,6 ^e	53,4 ^d	
	Germe	6,9 ^d -10 ^e	18,9	68,2 ^d -1,4 ^e	76,9 ^d -83,6 ^d	16,4 ^d	
	Albumen	88,2 ^d - 82 ^e	12,3	24,7 ^d -2,9 ^e	17,5 ^d -1,8 ^e	30,2 ^d	
Maïs	Péricarpe	6,1					
	Germe	10,9			35,5		
	Albumen	82,6			1		

^bAdelrahman et *al.*, 1984

^cSimwemba et *al.*, 1984

^dReichert et Youngs, 1977 : résultats exprimés par rapport à la matière sèche

^eFavier, 1989

1.2.4.1. Glucides

Les glucides constituent la plus importante fraction des grains de céréales, de 77 à 87 % de la matière sèche. Ils constituent une source importante d'énergie. Les glucides se situent en grande partie dans l'albumen. Les glucides des céréales sont constitués de 3 groupes : les oses simples, les oligosides et les polysides.

Les oses simples, fraction soluble des glucides, sont principalement le glucose et le fructose. Ils représentent 1 à 4 % des glucides des grains de céréales. La teneur moyenne en glucose du sorgho est de 2,25 g/100 g et celle du mil est de 2,56 g/100 g de matière sèche (FAO, 1995).

Les oligosides, de degré de polymérisation variant de 2 à 10, sont principalement représentés par les α -galactosides. Les α -galactosides ne sont pas digérés par les enzymes du tube digestif humain et sont parfois considérés comme des facteurs antinutritionnels car ils sont fermentés par les bactéries au niveau du colon et entraînent des flatulences. Ils

regroupent le stachyose, le verbascose, le raffinose. La teneur moyenne en stachyose du sorgho est de 0,10 g/100 g de matière sèche et celle du mil est de 0,09 g/100 g (Jambunathan et Subramanian, 1988). Les polysides, glucides majoritaires des grains de céréales sont constitués de l'amidon et des polysides non amyliques. L'amidon est la principale forme de stockage des glucides dans les céréales. C'est un polymère de glucose, constitué d'amylopectine, polymère à chaîne ramifiée et d'amylose, polymère à chaîne linéaire. Les teneurs en amylopectine et en amylose varient d'une céréale à une autre. La teneur en amidon du sorgho est en moyenne de 69,5 % de la matière sèche du grain, constituée de 70 à 80 % d'amylopectine et de 20 à 30 % d'amylose. Celle du grain de mil varie entre 62,8 % et 70,5 % du grain de mil, avec 25,6 % d'amylose (Jambunathan et Subramanian, 1988). L'amidon est logé dans des granules dont la taille varie entre 1 et 50 μm (Cornell et al., 1994).

Selon Colonna et al. (1992) la digestibilité de l'amidon dépend de sa structure, de sa capacité d'hydrolyse, du degré d'inhibition des α -amylases. L'amidon résistant est la fraction de l'amidon qui échappe à la digestion dans l'intestin grêle et qui peut être digéré dans le colon (Englyst, Kingman & Cummings, 1992). L'amidon résistant est classé en 4 catégories suivant sa résistance à l'attaque des amylases : RS1, RS2, RS3 et RS4 (Brown et al., 1995). La forme RS1 retrouvée dans les grains entiers (non broyés) de céréales ou de légumineuses, est physiquement inaccessible à la digestion car piégée dans une matrice non digestible. La forme RS2 est naturellement sous forme de granules d'amidon. On le retrouve par exemple dans les pommes de terre crues, les bananes pas mûres, l'amidon de maïs à forte teneur en amylose. La forme RS3 est constituée d'amidon rétrogradé, qui se forme lors du refroidissement d'amidon gélatinisé. Le type RS4 correspond à l'amidon modifié chimiquement. Plusieurs études ont montré une corrélation négative entre le ratio amylose/amylopectine et la digestibilité de l'amidon (Bornet et al., 1990 ; Saito et al., 2001). La digestibilité de l'amidon est plus élevée dans le sorgho à faible teneur en amylose comparée à celle du sorgho normal, du maïs et du mil (Hibberd et al., 1982). Les grains de céréales ayant des granules d'amidon de petite taille comme celles du riz ont une digestibilité élevée comparée aux céréales à granules d'amidon de grande taille comme celles du maïs et du blé (Manelius & Bertoft, 1996; Bednar et al., 2001). L'amidon de sorgho à albumen farineux est plus digestible que celui du sorgho à albumen corné.

Les propriétés physico-chimiques de l'amidon influencent la texture des plats à base de céréales. La température de gélatinisation du mil est de 61°C - 68,5°C (Serna-Saldivar and Rooney, 1995). Ces températures de gélatinisation du sorgho et du mil sont plus élevées que celle de l'orge qui est autour de 51-60°C.

1.2.4.2. Protéines

Les protéines constituent une composante essentielle des grains de céréales. La fonction essentielle d'une protéine alimentaire est de satisfaire les besoins de l'organisme en azote et en acides aminés essentiels. Les protéines des grains de céréale sont classées en quatre grandes fractions selon leur solubilité (Landry and Moureaux, 1970) : les albumines

(solubles dans l'eau), les globulines (solubles dans une solution de sel dilué), les prolamines (solubles dans l'alcool à 70%), les glutélines (solubles dans les acides ou bases faibles). Les prolamines et les glutélines sont les protéines de stockage du grain.

Les protéines sont localisées en grande partie dans le germe et l'albumen. Dans les grains de maïs et de sorgho, 60 à 70 % des protéines totales du grain sont dans l'albumen (Paulis and Wall, 1979; Lending et al., 1988). Certains acides aminés essentiels sont retrouvés dans la couche aleurone et le germe des grains de céréales (Jensen and Martens, 1983).

A cause des différences de production et du niveau de fertilisation des sols, les teneurs en protéines des céréales varient énormément. Ces variations sont surtout liées aux facteurs environnementaux (Buerkert et al., 1998). Elles varient en moyenne de 8 à 13 % de la matière sèche (Serna-Saldivar, McDonough et Rooney, 1991).

Sur le plan nutritionnel, les prolamines de toutes les céréales ont la particularité d'être pauvres en acides aminés essentiels tels que la lysine et le tryptophane. Le profil d'acides aminés essentiels montre que la lysine, la thréonine, la méthionine et la cystéine sont plus abondantes dans les protéines du mil chandelle que dans celles du sorgho et des autres mils. Les protéines du mil et du sorgho sont à peu près de même nature avec une prépondérance de prolamines et de glutélines. Les teneurs en albumines et globulines du mil sont toutefois relativement importantes par rapport aux autres céréales. Dans les céréales, l'acide aminé limitant est la lysine. Dans le maïs, le tryptophane est également en quantité limitante. Il en résulte que la valeur biologique des protéines de céréales est faible.

La concentration des acides aminés soufrés dans les céréales est plus élevée que dans les légumineuses, d'où l'intérêt de l'association des céréales et des légumineuses qui se complètent.

La digestibilité des protéines de céréales est variable (Elyas et al. 2002, Ali et al., 2003). Des études réalisées *in vivo* (Kurien et al., 1960 ; Maclean et al., 1981) et *in vitro* (Hamaker et al., 1986 ; Axtell et al., 1981) ont noté une réduction de la digestibilité des protéines du sorgho à la cuisson. Cette réduction n'a pas été observée au niveau des protéines du maïs (Maclean et al., 1981 ; Hamaker et al., 1987). Des études comparatives réalisées sur la digestibilité des protéines du sorgho et du maïs non cuit ont révélé de fortes variations de la digestibilité des protéines du sorgho, 88,6 à 92,9 % (Axtell et al., 1981) dues à la présence des tannins. Les principaux facteurs responsables de la faible digestibilité des protéines dans le sorgho sont les tannins, et les interactions entre les composants protéiques et d'autres composants. Les prolamines du sorgho (kafirines) et du maïs (zéines) forment des polymères par des ponts disulfures intermoléculaires. Ces polymères résistent à la cuisson (Oria et al., 1995 ; Batterman-Azcona and Hamaker, 1998). Cependant d'autres travaux ont également montré l'influence négative des polyosides non amylacés, des polyphénols, de l'amidon sur la digestibilité des protéines (Duodu et al., 2002).

La teneur en prolamines pourrait déterminer la dureté du grain. Les grains durs ont des teneurs importantes en prolamines (Sunitha et al., 1992). Des quantités importantes de kafirines ont été retrouvées dans l'albumen des grains durs de sorgho (Shull, 1990).

1.2.4.3. Lipides

Les lipides constituent d'importantes sources d'énergie. Les lipides des céréales sont peu abondants et leur composition est très variable. Selon Jellun et Powell (1971) la variabilité de la composition en acides gras est fonction de facteurs génétiques et aussi des méthodes d'extraction des lipides. Les teneurs moyennes en lipides du mil, du maïs et du sorgho sont respectivement de 3,3, 3,9 et 2,9 mg/100 g de grains entiers. Le mil et le maïs ont des teneurs en lipides plus importantes que le sorgho. Le mil chandelle a une teneur en lipides élevée comparée aux autres variétés de mil.

Les grains de céréales sont pauvres en acides gras saturés et riches en acides gras polyinsaturés. Les acides gras saturés ont un rôle essentiellement énergétique mais aussi ils jouent un rôle structural dans les membranes cellulaires et constituent des lipides de réserve. Ils peuvent être synthétisés par l'organisme. Cependant leur consommation constitue un facteur de risque cardiovasculaire. Les acides gras saturés du mil représentent 17,9 % à 21,6 % contre 70 à 82 % pour les acides gras insaturés (FAO, 1995). L'organisme ne peut synthétiser les acides gras polyinsaturés de la famille des Oméga 6 (acide linoléique) et Oméga 3 (acide linoléique) qui sont des composants essentiels au système nerveux. La composition en lipides des céréales est de ce fait très intéressante sur le plan nutritionnel. La composition en acides gras du mil n'est pas différente de celle du sorgho, les principaux acides gras sont l'acide linoléique, l'acide oléique, l'acide palmitique (FAO, 1995). Le grain de maïs contient 11 % d'acide palmitique, 2 % d'acide stéarique, 24 % d'acide linoléique (FAO, 1993).

Les lipides sont localisés dans le germe et la couche aleurone des grains de céréales (Abdelrahman et *al.*, 1984). Le germe à lui seul contient près de 80 % de la matière grasse du grain (Rooney et Serna-Saldivar, 1991). Selon les travaux de Earle et *al.* (1946) sur 11 variétés de maïs, 81 à 87 % des lipides du maïs se retrouvent dans le germe. Selon Jahn-Deesbach et *al.* (1975), la composition des lipides du germe est différente de celle de l'albumen. Weber (1978) rapporte que les triglycérides sont les principaux lipides présents dans le germe du maïs : environ 93,3 % des lipides totaux contre 52,4 % dans l'albumen. Les acides gras libres représentent près de 36,5 % des lipides totaux de l'albumen du grain de maïs contre 0,6 % dans le germe. Certains travaux ont noté une corrélation entre la teneur en amylose et celle des lipides dans le maïs. La teneur en lipides du maïs augmente avec celle de l'amylose (Morrison, 1977 ; Becker, 1976).

Cependant malgré la faible teneur en matière grasse dans l'albumen des grains, les lipides de cette partie du grain jouent un rôle important dans la qualité et la conservation des farines. En présence d'oxygène, les acides gras libres s'oxydent ce qui conduit au rancissement des farines de céréales au cours de la conservation.

1.2.4.4. Micronutriments

Selon la définition de l'UNICEF (1998) les micronutriments sont des nutriments dont l'organisme a besoin en petites quantités et qui jouent un rôle important dans la production des enzymes, des hormones, dans les activités de croissance, de développement et de

fonctionnement des systèmes immunitaires et reproductifs. On regroupe sous le nom de micronutriments, les vitamines et les oligoéléments. Les céréales mil, maïs et sorgho contiennent des teneurs élevées en minéraux et oligoéléments mais leur biodisponibilité est faible du fait de la présence de facteurs qui les chélatent et forment des complexes non digestibles. Le tableau 1-7 présente les teneurs en quelques micronutriments du mil, du sorgho et du maïs.

La composition et la teneur en micronutriments des grains de céréales varie d'un pays à un autre ou d'une région à l'autre (Barikmo et al., 2004a). Elle est plus influencée par le lieu, les facteurs écologiques que par les facteurs génétiques (Greenfield and Southgate, 2003). Une étude réalisée sur les teneurs en micronutriments des céréales cultivées dans différentes zones du Mali a montré des variations à des degrés différents sur les teneurs en fer, zinc, thiamine, riboflavine et niacine (Barikmo et al., 2007). Jambunathan et al., (1980) ont rapporté au cours de leurs études sur 100 variétés de sorgho une variation de la teneur en fer allant de 2,6 mg à 9,6 mg/ 100 g. Kayodé et al. (2006) ont observé une variation similaire des teneurs en fer des variétés de sorgho du Bénin allant de 3 mg à 11,3 mg/100 g. Les variations en zinc sont moins fortes, Kayodé et al., (2006) rapportent des teneurs en zinc du sorgho de 1,1 à 4,4 mg/100g. Afifi et al. (2011) notent des valeurs en zinc du sorgho variant entre 3,9 et 5,02mg/100g.

Les micronutriments sont inégalement répartis dans les grains des céréales. Ils sont principalement retrouvés dans le son et le germe. La teneur en cendres est de 72,2 % dans le germe du mil (Abdelrahman et al., 1984) et 81,4 % dans celui du sorgho (Favier, 1989). Le fer est principalement retrouvé dans les parties périphériques du grain de céréale (son et germe). Selon les travaux de Lestienne et al., (2007), 1/3 du fer et 15 % du zinc sont localisés dans les enveloppes du grain de mil. Selon Hemery et al., (2007) le zinc du grain de blé est distribué en majorité dans la couche aleurone et dans le germe. Dans le grain de maïs, 68 % du zinc se trouve dans le germe (O'Dell, 1972). D'importantes quantités de zinc sont localisées dans l'albumen lié aux protéines et aux enzymes (Cakmak, 2000). Des travaux réalisés par Krishnan et al. (2003) sur le riz et Ozturk et al. (2006) sur le blé ont montré de fortes concentrations de fer et de zinc dans la couche aleurone et le germe des grains.

Le fer est stocké dans les grains sous forme de phytoferritine ou de phytates de fer.

Concernant les vitamines, des quantités détectables de vitamines solubles D, E, K sont retrouvées dans le grain de sorgho. L'albumen jaune de certaines variétés de sorgho, contient du β -carotène qui peut être transformé en vitamine A par l'organisme. Cependant d'importantes variations de la teneur en β -carotène ont été observées dans les variétés de sorgho allant de 0 à 97 μ g/100 g de l'échantillon de grains (Suryanarayana et al., 1968). L'importance de la présence des carotènes dans le sorgho est douteuse du fait de leur caractère photosensible et des importantes variations dues aux facteurs environnementaux. Les teneurs en thiamine et riboflavine des grains de sorgho, mil et maïs sont peu différentes. Le sorgho a des teneurs en niacine plus élevées que le mil et le maïs. Cependant dans les grains de céréale la niacine existe sous forme liée. Ghosh, Sarkar et Guha (1963) ont montré que 80 à 90% de la niacine du sorgho était présente sous forme liée et donc non utilisable

par l'organisme. D'autres auteurs comme Adrian, Murias de Queroz et Frangne (1970) ont cependant trouvé que 20 à 28% de la niacine du sorgho était biologiquement disponible à l'homme contre 45% de la niacine du maïs et 30 à 40% de la niacine du mil. Grams et *al.* (1970) ont retrouvé dans le germe de grains de maïs 70% de tocophérol et 27% dans l'albumen. Les vitamines du groupe B ont une grande importance dans la synthèse des neurotransmetteurs (Kretchmer et *al.*, 1996 ; Guesry, 1998).

Cependant la biodisponibilité des micronutriments dans les céréales est faible. Elle est influencée par des facteurs tels que les phytates, les polyphénols, les fibres (Camara and Amaro, 2003; Gillooly et *al.*, 1984; Hurrell and Egli, 2010). Ces aspects sont détaillés au paragraphe 1.2.4.5 ci-dessous.

Tableau 1-7 : Composition en quelques micronutriments des céréales maïs, mil et sorgho

		Sorgho	Mil	Maïs
Minéraux (mg/100 g)	Fer	4,2 ^b	8 ^b	2,7 ^a
	Zinc	2,5 ^b	3,1 ^b	
	Mg	171 ^b	137 ^b	
(mg/100g)	Calcium	15 ^b	46 ^b	26 ^a
	Cuivre	0,44 ^b	1,06 ^b	
	Thiamine	0,38 ^a	0,38 ^a	0,38 ^a
	Riboflavine	0,15 ^a	0,21 ^a	0,20 ^a
	Niacine	4,3 ^a	2,8 ^a	3,6 ^a

Sources: b : Sankara Rao et Deosthale. 1980 : mg/ 100 g de matière sèche

a: Hulse Laing et Pearson. 1980: United States National Research Council/National Academy of Sciences. 1982: USDA HNIS 1984. : 100 g de matière comestible

1.2.4.5. Facteurs réduisant la biodisponibilité

Les céréales et les légumes sont riches en facteurs qui réduisent la biodisponibilité des minéraux (Frölich, 1995). La biodisponibilité d'un nutriment est la proportion de ce nutriment dans l'aliment utilisée par les fonctions biologiques de l'organisme. La biodisponibilité des micronutriments dans les aliments à base de céréales sont affectés par des facteurs tels que les phytates, les fibres et les polyphénols (Gillooly et *al.*, 1984, Hurrell, 1997 ; Egli et *al.*, 2004).

1.2.4.5.1. Fibres

Selon la définition de Trowell (1976), les fibres alimentaires sont la somme de la lignine et des polysides qui ne sont pas hydrolysés par les enzymes endogènes au niveau de l'intestin grêle de l'homme et parviennent donc au niveau du colon. Les céréales sont d'importantes sources de fibres, 10 à 15 % des composants non digestibles du grain. Les fibres les plus abondantes dans les céréales sont la cellulose, les hémicelluloses, la lignine, les pectines et les gommes. La teneur en fibres du sorgho varie entre 2,5 % et 9 % de la matière sèche. Celle du maïs entre 3,9 % et 9,3 %. La teneur en fibres alimentaires totales est plus élevée dans le mil que dans le sorgho.

Les fibres sont retrouvées dans le péricarpe et dans l'albumen des grains de céréales. Le péricarpe du grain de sorgho contient près de 53,4 % des fibres totales.

Les fibres jouent un rôle physiologique très important en favorisant la progression du bol alimentaire dans le tube digestif et le métabolisme de certains composés (cholestérol, triglycérides). Ces glucides non digestibles sont fermentés par la flore intestinale dans le colon, entraînant la production d'acides gras à chaînes courtes (acétate, propionate, butyrate). Ces acides gras ont des effets bénéfiques pour la santé et constituent une source d'énergie importante. Ils créent un milieu acide dans le colon améliorant ainsi la solubilité du calcium et de là, son absorption (Demigne et *al.*, 1995). Ils auraient également un effet positif sur l'absorption du fer au niveau du colon (Yeug et *al.*, 2005). Selon plusieurs études réalisées *in vivo*, une absorption du fer serait possible au niveau de la muqueuse du colon. Ohkawara et *al.* (1963) ont rapporté une absorption dans le colon de près de 30 % du fer total absorbé chez des humains après une infusion du fer ferreux. L'absorption du fer dans le colon augmente selon plusieurs mécanismes : la baisse du pH dans le colon, la formation de complexes solubles, la réduction du fer ferrique en fer ferreux par la microflore et l'augmentation des protéines de l'absorption du fer telles que le « Divalent Metal Ion Transporter » (DMT), la ferritine, la ferroportine (Yeug et *al.*, 2005). Des études sur le rat et le pigeon ont montré un effet positif sur les carences en fer de l'administration de pectine (Kim et *al.*, 1992) et d'inuline (Ohta et *al.*, 1995). Cependant des études réalisées à partir des méthodes entrées et sorties (Coudray et *al.*, 1997) et d'isotopes n'ont pas noté une influence majeure des fibres sur l'absorption des minéraux (Heaney and Weaver, 1995). Selon Navert et *al.*, (1985) les fibres en elles-mêmes n'ont pas d'effet sur l'absorption du zinc. Knudsen et *al.*, (1996) ont rapporté que l'effet négatif des fibres sur l'absorption du zinc serait dû à la présence de phytates dans l'alimentation. D'autres travaux qui ont consisté à isoler certains composants des fibres tels que l' α -cellulose n'ont pas montré un effet significatif des fibres sur l'absorption du zinc (Turnlund et *al.*, 1982). Une étude réalisée sur 12 volontaires (Van den Heuvel et *al.*, 1999) ayant consommé 15 g d'oligofructose par jour a montré au bout d'une semaine un effet positif sur l'absorption du calcium (+ 25%, $P < 0,05$). L'effet des fibres sur l'absorption des vitamines hydrosolubles est très faible (Kasper, 1993). Cependant des teneurs élevées en pectine et en lignine dans l'alimentation peuvent réduire l'absorption des vitamines liposolubles et des caroténoïdes.

1.2.4.5.2. Polyphénols

Les polyphénols constituent une famille de molécules organiques largement présente dans le règne végétal. Ils sont caractérisés comme l'indique leur nom par la présence de plusieurs groupements phénoliques associés en structures plus ou moins complexes généralement de haut poids moléculaire. Ils sont retrouvés en grande quantité dans les végétaux (Harborne, 1993). Ils regroupent les acides phénoliques, les lignines, les anthocyanines, les flavonoïdes, les tannins condensés (Serna-Saldivar and Rooney, 1995).

L'acide férulique est le principal acide phénolique retrouvé dans les grains de céréales. Les teneurs en tannins du sorgho varient de 10 à 68 mg/g de MS et celles du mil varient entre 3,6 et 13,1 mg/g de MS (Jambubathan and Mertz 1973 ; Awika 2000). Dans les variétés de sorgho de type II et III la teneur en tannins varie entre 0,02 et 0,19 et entre 0,4 et 3,5 g eq catéchine/100g respectivement (Earp et al., 1981).

Dans les grains de mil et de sorgho, les acides phénoliques sont localisés dans le péricarpe, la testa, la couche aleurone et l'albumen (Hahn et al., 1984; McDonough et al., 1986). Ils ont des fonctions importantes dans la plante. Ils contribuent au maintien de la structure vasculaire de la plante et la protègent contre les attaques extérieures (Dixon et al., 1994). Les tannins jouent un rôle important dans la lutte contre les intempéries et les oiseaux (Woodhead et al., 1980, Harris et al., 1970).

Les facteurs génétiques et environnementaux, le stockage, le temps de maturation et certains procédés influencent la teneur en polyphénols des aliments d'origine végétale. La lumière et le stockage affectent considérablement les polyphénols qui s'oxydent facilement.

Les polyphénols forment des complexes insolubles avec les cations tels que le fer non hémérique, le zinc, le cuivre réduisant ainsi leur absorption dans l'intestin (Disler et al., 1975b, Brune et al., 1989). Ils ne se lient pas au calcium et au manganèse (Jansman et al., 1993). Le fer se lie aux groupements hydroxyles adjacents des groupements galloyls et catéchols formant des complexes insolubles à pH neutre (Kennedy and Powell, 1985). Les tannins et l'acide gallique sont les principaux composés chélateurs. Selon Brune et al., (1989), l'effet inhibiteur des tannins sur l'absorption du fer est dose-dépendant. D'autres auteurs (Narasinga et Prabhavathi, 1982 ; Anand and Subadra, 1995) ont rapporté au cours d'études *in vitro* que l'ajout de tannins dans l'alimentation entraînait une inhibition de l'absorption du fer. Certains polyphénols comme l'acide cafféique ou l'acide chlorogénique, réduisent l'absorption de la thiamine en oxydant la fonction thiazole en disulfure. D'autres polyphénols réduisent la digestibilité des macronutriments (Duodu et al., 2002) en se liant aux enzymes salivaires et digestives (Scalbert et al., 2000). Les polyphénols peuvent réduire la digestion de l'amidon, des protéines et des lipides (Jansman et al., 1994). L'effet des polyphénols sur la biodisponibilité des minéraux est indépendant de celui des phytates (Hurrell et al., 2003).

Plusieurs traitements tels que le décorticage, la fermentation, le maltage, entraînent une réduction de la teneur en polyphénols des grains améliorant la digestibilité des micronutriments, réduisant l'astringence (Taylor & Dewar, 2001 ; Hassan & El Tinay, 1995; Bvochora et al., 1999). La chaleur ne dénature pas les polyphénols (Bravo et al., 1998). Cet aspect sera développé dans le paragraphe 1.2.5.

Les tannins du sorgho ont un pouvoir antioxydant élevé (Gu et al., 2004, Dykes and Rooney, 2006).

1.2.4.5.3. Phytates

Les phytates sont des sels d'acide phytique. Ce sont des formes de stockage du phosphore dans les grains de céréales ou de légumineuses

Lestienne et *al.* (2007) ont observé une élimination de seulement 4 % des phytates pour un taux d'extraction de 88% (perte de MS de 12%) du mil Gampèla (variété de mil locale du Burkina Faso), indiquant ainsi que la majorité des phytates se trouve dans le germe et dans l'albumen. Simwemba et *al.* (1984) ont rapporté pour le mil une teneur en phytates de 752 mg/100 g dans le germe, 86 à 278 mg/100 dans l'albumen et le son. Dans le grain de maïs, les phytates sont concentrés dans le germe et les tissus périphériques (Jacobs and Walker, 1977). Près de 90 % des phytates du grain de maïs sont localisés dans le germe (Ravindra et *al.*, 1995).

Les phytates sont des puissants chélateurs de cations divalents tels que le calcium, le fer, le zinc, formant des complexes (Egli et *al.*, 2004) (figure 1-5) qui ne peuvent pas être digérés par l'organisme humain du fait de l'absence de phytases intestinales (Iqbal et *al.*, 1994). Les phytates chélatent d'autres minéraux tels que le cuivre et le manganèse (Wise, 1983). Ils se lient aussi aux protéines réduisant ainsi la biodisponibilité des minéraux et la digestibilité des protéines (Weaver et kannan, 2002 ; Hurrell, 2003; Egli et *al.* 2004; Hurrell et *al.* 2004). Le myoinositol hexaphosphate (IP6) et l'inositol pentakisphosphate (IP5) sont les principales molécules qui forment des complexes insolubles avec les cations (Sandström and Sandberg, 1992 ; Sandberg et *al.*, 1999). Des études *in vivo* ont montré qu'une réduction des phytates dans les aliments à base de céréales consommés par les enfants et les adultes améliore la biodisponibilité du fer, du zinc et du calcium (Hambidge et *al.*, 2005 ; Davidson et *al.*, 2004). L'effet des phytates sur certains minéraux comme le zinc est dose-dépendant (Hallberg et *al.*, 1989, Hurrell et *al.*, 1992). Aussi l'estimation de la biodisponibilité du fer et du zinc nécessite la détermination de la teneur en phytates. Ce paragraphe sera développé dans la partie 1.4.3 portant sur les méthodes d'estimation de la biodisponibilité du fer et du zinc.

Les autres formes IP1 à IP4 n'ont pas d'effet négatif sur l'absorption du zinc. En présence de quantités importantes de calcium, les phytates forment des complexes calcium-phytate-zinc qui sont moins solubles que les complexes phytates-zinc. Certains procédés pratiqués dans les ménages tels que le décorticage, la germination, le trempage, la fermentation réduisent la teneur en phytates. Ceci sera développé dans le paragraphe amélioration de la biodisponibilité par les procédés.

Quoi que les phytates soient considérés comme étant des facteurs qui réduisent la biodisponibilité des minéraux, plusieurs travaux ont rapporté des effets anti-cancérogènes et antioxydants des phytates (Febles et *al.*, 2002 ; Ko & Gold, 1990).

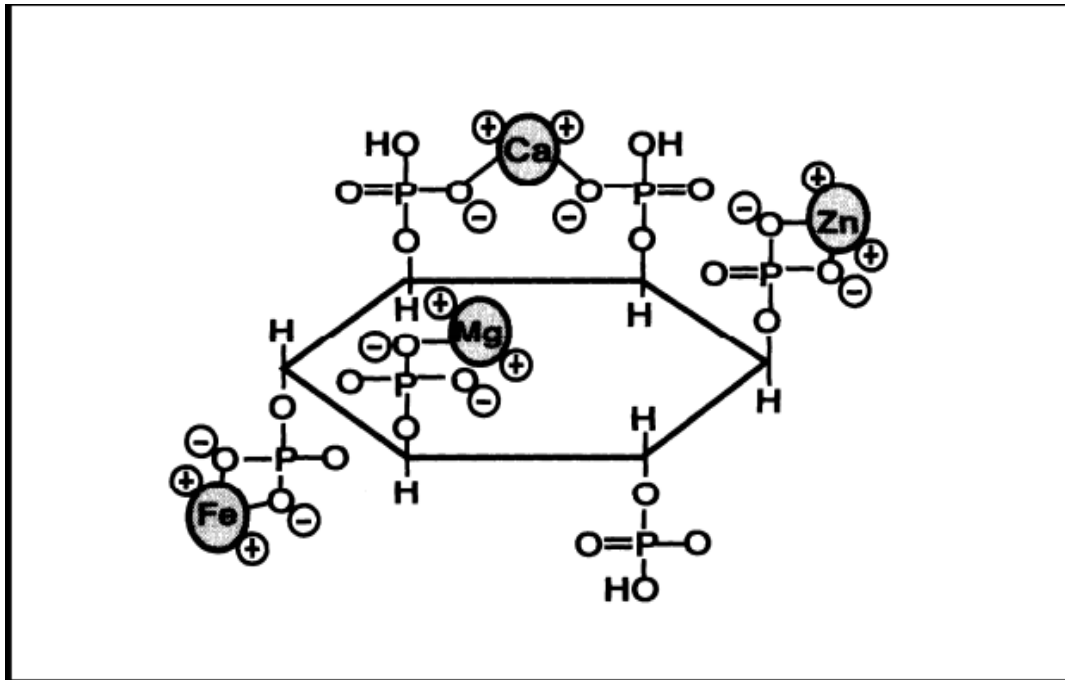


Figure 1-5 : Structure d'une molécule de phytate faisant apparaître des sites de complexation de cations divalents (Leeson and Summers, 1998)

1.2.5. Procédés de transformation des grains de céréale

Après les récoltes, les céréales subissent différentes transformations avant d'être consommées. L'objectif de ces transformations est de fournir un plat plus digestible et acceptable sur le plan organoleptique. Ces transformations peuvent changer la composition, la viscosité, le goût des aliments de façon considérable améliorant l'acceptabilité auprès des consommateurs. Les transformations des grains les plus réalisées dans les ménages sont le trempage, le décorticage, la mouture, le maltage, la fermentation et la cuisson. Ces transformations améliorent généralement la digestibilité des protéines et de l'amidon ainsi que la biodisponibilité des minéraux en réduisant certains facteurs tels que les phytates, les polyphénols et les fibres (Lestienne et *al.*, 2005, Mitchikpe et *al.*, 2008; Proulx and Reddy, 2007; Towo et *al.*, 2006).

1.2.5.1. Trempage

Le trempage est une technique simple souvent utilisée dans le prétraitement des grains ou dans la transformation des farines dans les ménages en Afrique de l'ouest. Il ramollit le grain et facilite sa mouture. Il est effectué préalablement à une mouture, une germination, une fermentation, ou une cuisson. Généralement le milieu de trempage est l'eau mais il peut être alcalinisé ou salé (Muliman, 1994). Au cours du trempage, il y a une diffusion passive des ions solubles du grain vers le milieu de trempage (De Boland et *al.*, 1975 ; Chang et *al.*, 1977). L'intensité de cette diffusion dépend de l'espèce de céréale, du pH, de la teneur en humidité, de la température, de la solubilité des phytates, de la présence de certains inhibiteurs et des conditions de trempage (Gibson, 2007).

Une réduction importante des teneurs en fer et en zinc, a été observée au cours du trempage des grains de céréale (tableau 1-8). Kayodé et *al.* (2006) ont rapporté une réduction de la teneur en fer de 61 % par rapport à la teneur initiale au cours du trempage des grains de sorgho. Afifi et *al.* (2011) et Lestienne et *al.* (2005) ont noté des pertes en fer de l'ordre de 40 % au cours du trempage des grains de sorgho. En revanche, les pertes en zinc sont moins importantes et n'excèdent pas 30 % (Lestienne et *al.*, 2005, Eyzaguirre et *al.*, 2006). En effet le fer est plus important dans les parties périphériques du grain, tandis que le zinc est localisé dans l'albumen où il est lié à des enzymes et des protéines et joue d'importantes fonctions (Lestienne et *al.*, 2005). Le trempage entraîne également une diminution de la quantité de phosphore inorganique des grains. La teneur en phosphore inorganique des grains de sorgho diminue de 335 mg/100 g à 276 mg/100 g de MS (Afifi et *al.*, 2011). Au cours du trempage il y a une dégradation des molécules de phytates IP6 (myoinositol hexakisphosphate) en molécules de myoinositol IP5, IP4, IP3, IP2 et une augmentation de groupement hydroxyles due à une dégradation enzymatique des complexes de polyphénols entraînant ainsi une augmentation de la teneur en fer soluble (Eyzaguirre et *al.*, 2006). Des études ont rapporté des réductions importantes des molécules de phytates IP5 et IP6 après le trempage des farines de riz blanc et de maïs allant de 57 % pour la farine de maïs (Hortz & Gibson 2001) et plus de 90 % pour celle du riz (Temple et *al.*, 2002). Afifi et *al.* (2011) observent une diminution des teneurs en phytates des grains de sorgho de 23,6 % à 32,4 % au cours du trempage. Une étude sur le mil a montré que le trempage de la farine entraîne moins de pertes de phytates comparé à celui des grains (Lestienne et *al.*, 2005). Cette réduction des phytates s'expliquerait par la solubilisation des phytates dans l'eau et aussi par l'activation des phytases endogènes des grains à pH bas qui hydrolysent les phytates. Selon certains travaux réalisés *in vitro*, la biodisponibilité du fer et du zinc augmente au cours du trempage (Henriksen et *al.*, 1985, Afifi et *al.*, 2011). Le trempage accroît le ratio phytates/fer et décroît celui phytates/zinc des grains de céréales (Kayodé et *al.*, 2006, Lestienne et *al.*, 2005). Lestienne et *al.* (2005) ont rapporté des valeurs de ratio phytates/fer des grains de sorgho avant et après trempage de 24 h respectivement de 22,8 et 35,2. Les ratios phytates/zinc des mêmes grains de sorgho avant et après trempage pendant 24 h sont respectivement de 62,8 et 58,5. Ceci s'expliquerait par une élimination plus importante du fer comparée à celle du zinc.

La température et le pH influencent fortement l'activité phytasique au cours du trempage. L'activité phytasique des grains de céréales est maximale à pH entre 5 et 5,5 (Konietzny and Greiner, 2002). Lestienne et *al.* (2005) rapportent qu'au cours du trempage l'hydrolyse des phytates par les phytases s'effectuerait à l'intérieur des grains ou dans l'eau de trempage car aucune molécule de myoinositol hexaphosphate n'a été retrouvée dans l'eau de trempage.

Une réduction des teneurs en glycosides, oligosides et polyphénols a également été observée au cours du trempage (Chang et *al.*, 1977). La teneur en tannins a diminué de 24 à 48% de la teneur initiale. Cependant les polyphénols totaux diminuent peu, de 5 à 21%. Les tannins ont une plus grande solubilité comparés aux autres polyphénols.

Le trempage entraîne également des pertes en vitamines. Hotz et Gibson (2001) ont rapporté d'importantes pertes de niacine et de riboflavine au cours du trempage des grains de maïs.

Tableau 1-8 : Teneurs (mg/100 g de MS) en fer, phytates et zinc avant et après le trempage des céréales

Variétés	Traitement	Teneur en fer	Teneur en zinc	Teneur en phytates
Mil	Non traité	11,1 ± 0,68 ^a	3,66±0,08 ^a	762 ± 66
	Trempage	7,33 ± 0,34 ^b	3,39 ± 0,09 ^b	550 ± 18
Maïs	Non traité	1,97 ± 0,12 ^a	1,93 ± 0,04 ^a	908 ± 97
	Trempage	1,85 ± 0,10 ^a	1,72 ± 0,11 ^b	721 ± 16
Sorgho	Non traité	3,73 ± 0,09 ^a	1,57 ± 0,04 ^a	925 ± 81
	trempage	2,22 ± 0,09 ^b	1,55 ± 0,07a	882 ± 44
Riz	Non traité	1,66 ± 0,38	2,94 ± 0,11	1084 ± 12
	trempage	0,67 ± 0,06	2,07 ± 0,25	904 ± 81

Source : Lestienne et *al.*, 2005. a et b indiquent les valeurs significativement différentes selon le test statistique de Duncan

1.2.5.2. Décortilage

Le décortilage a pour objectif de séparer le son constitué des enveloppes peu digestibles de l'albumen amylicé. Le poids, la taille du grain ainsi que l'épaisseur du péricarpe influencent l'indice de dureté qui correspond au temps requis pour éliminer 1 % du grain au décortilage par abrasion (Mwasaru et *al.*, 1988). Une étude réalisée sur le décortilage par abrasion de 16 variétés de sorgho françaises a montré une corrélation positive hautement significative entre l'indice de dureté et le taux de brisure au décortilage des grains (Oomah et *al.*, 1981). L'épaisseur du péricarpe est un facteur important au cours du décortilage des grains de sorgho (Scheuring et *al.*, 1983). Les grains à mésocarpe épais sont plus faciles à décortiquer comparé aux grains à mésocarpe fin qui ont une durée de décortilage 1,5 à 2 fois plus importante. Selon Scheuring et *al.* (1983), la proportion élevée de grains de sorgho cassés lors du décortilage manuel comparée à celle des grains de mil s'expliquerait par la différence de dureté de l'albumen des deux types de grains et aussi de l'épaisseur des péricarpes. Des travaux réalisés sur 28 variétés de sorgho australiens ont noté un meilleur rendement au décortilage lorsque les grains de taille uniforme étaient regroupés avant d'être décortiqués (Wills & Ali, 1983). Les grains de petite taille entraînent une élimination de matière au décortilage trois fois plus importante que les grains de grande taille (Lee et *al.*, 2002).

Le taux d'extraction qui est la proportion du poids de grains décortiqués par rapport au poids de grains initiaux (Yetneberk et *al.*, 2005) est un paramètre d'évaluation de l'intensité du décortilage. En fonction des auteurs il est calculé différemment, sur la base de la matière sèche ou non, dans ce cas il correspond au rendement de décortilage. Les auteurs tels que

Serna-Saldivar et *al.* (1994) et Lestienne et *al.* (2007) se sont basés sur la matière sèche pour le calcul du taux d'extraction.

Les effets du décortilage sur la valeur nutritionnelle des grains diffèrent selon la répartition des nutriments dans le grain et les différences morphologiques des grains. Abdelrahman et *al.* (1984) ont rapporté une élimination importante de son lors du décortilage de grains de mil. Le ratio ADF fibres/poids de 1000 grains du mil est de 2 fois supérieur à celui sorgho. Le décortilage du sorgho ainsi que celui du blé entraîne une élimination plus importante des lipides et du zinc par rapport au mil du fait de leur répartition différente dans le grain (Hemery et *al.*, 2007 ; Abdelrahman et *al.*, 2004). Selon les travaux de Serna-Saldivar et *al.* (1994), un taux d'extraction de 83 % entraîne une réduction de 3 à 6 % de la teneur en fibres insolubles des grains de mil. El Hag et *al.* (2002) ont observé sur des variétés de mil du Soudan une diminution de 22,4 à 26,4% des teneurs en polyphénols après le décortilage, cependant le taux d'extraction n'a pas été précisé. Lestienne et *al.* (2007) ont rapporté près de 51% de pertes en fibres du mil à 88% d'extraction.

Le décortilage, en éliminant partiellement ou totalement la couche à aleurone et le germe, élimine une partie des minéraux et réduit ainsi la valeur nutritionnelle du grain décortiqué (Sheuring et *al.*, 1983 ; Favier et *al.*, 1989). Pedersen et Eggum (1983) ont montré dans le cas du sorgho qu'il y a une diminution importante des teneurs en phosphore, fer, cuivre, zinc lorsqu'on diminue le rendement de décortilage du sorgho. Les grains à albumen farineux se cassent plus facilement que les grains à albumen corné qui ont un rendement meilleur au décortilage (Murty and Kumar, 1995).

Traditionnellement deux techniques de décortilage sont employées dans les ménages en Afrique de l'Ouest : le décortilage manuel à l'aide d'un mortier et d'un pilon et le décortilage mécanique.

1.2.5.2.1. Décortilage au mortier et au pilon

Le décortilage au mortier et au pilon est un procédé manuel d'élimination du son des grains de céréales. Il est généralement réalisé par les femmes, seules ou à plusieurs. Le mortier et le pilon sont en bois. Le poids moyen des pilons est de 3 kg, tandis que le mortier peut avoir une capacité de 12 litres (Scheuring et *al.*, 1983). Les figures 1-6 et 1-7 présentent le type de mortier et de pilon utilisé pour le décortilage et la mouture manuels des grains de céréales.

Le principe consiste en des frictions entre les grains et aussi entre le mortier et les grains générant des forces interactives qui détachent les enveloppes du grain (Yetneberk et *al.*, 2005). Avant et pendant le décortilage, de petites quantités d'eau sont ajoutées dans le mortier pour faciliter l'élimination du péricarpe en fonction du savoir-faire de l'opérateur. Les quantités d'eau utilisées ne sont pas connues. Il n'y a pas d'humidification de l'albumen des grains, seuls le péricarpe et le germe sont humidifiés. Le son déjà éliminé absorbe une partie de l'eau ajoutée et en adhérant aux grains agit comme abrasif et contribue au décortilage (Scheuring et *al.*, 1983). Il n'y a pas d'élimination du son au cours du décortilage manuel. C'est après le décortilage que la séparation du son et des grains décortiqués est

effectuée, le plus souvent par vannage. Cependant cette technique est facultative, le son est également éliminé au cours du lavage des grains décortiqués.

La durée du décortilage manuel est liée à l'épaisseur du péricarpe des grains. Le temps est réduit pour des péricarpes épais et le rendement de décortilage est plus élevé (Scheuring et al., 1983). Selon Reichert et al. (1977) le décortilage manuel du sorgho élimine moins les lipides et les cendres comparé au décortilage mécanique. Le germe du grain de sorgho étant bien enchâssé dans l'albumen il n'est pas facilement attaqué au cours du décortilage au mortier et au pilon.



Figure 1-6 : Un mortier
(Ouagadougou, 2011)



Figure 1-7: Un pilon
(Ouagadougou, 2011)

1.2.5.2.2. Décortilage mécanique réalisé dans les unités de quartier

Le décortilage mécanique se fait dans des petites unités utilisant des décortiqueuses de type Engelberg. L'instrument comprend un axe rotatif constitué de lamelles (figure 1-8 et 1-9). Le niveau de décortilage dépend de l'espace entre l'axe rotatif et le couteau qui peut être ajusté et du débit de passage des grains. Il se produit des mouvements de friction des grains entre eux et avec l'axe rotatif entraînant le détachement des couches périphériques des grains. Avant de procéder au décortilage mécanique, les grains de céréales sont humidifiés avec une petite quantité d'eau. Selon les travaux de Scheuring et al. (1983) sur des variétés de sorgho lorsque la durée de décortilage est constante, la quantité de son obtenue augmente avec l'épaisseur du péricarpe.



Figure 1-8: Une décortiqueuse mécanique de type Engelberg (Ouagadougou, 2010)



Figure 1-9: Axe rotatif effectuant le décortilage des grains (Ouagadougou, 2010)

1.2.5.2.3. Décortilage au laboratoire

Les décortilages réalisés au laboratoire sont de type abrasif. Les décortilages abrasifs ont permis de mieux connaître le grain, la répartition des différents nutriments et l'impact du décortilage sur la composition des grains tels que ceux de Lestienne et *al.* (2007). L'un des décortilleurs par abrasion mis au point par Oomah et *al.* (1981) (figure 1-10: Tangential abrasive dehulling device (TADD), Venables Machine Works Ltd, Saskatoon, Saskatchewan, Canada), a été utilisé dans les travaux d'amélioration de la qualité de l'*injera* de sorgho (Yetneberk et *al.*, 2005), pour l'optimisation de la couleur et du rendement du sorgho (Aboubakar et *al.*, 2006), ou dans l'étude de fractionnement des grains de sorgho (Lotche-Watson et *al.*, 2000). Lawton et Faubion (1989) au cours d'études de modélisation ont conclu que les pertes en matières sèche observées au cours du décortilage des grains n'étaient pas linéaires, ce qui constitue une autre indication de l'inégale répartition des nutriments au niveau de la graine. C'est un appareil constitué de 8 puits, d'un aspirateur et d'une voie de sortie du son. Lee et *al.* (2002) ont observé au cours du décortilage de 6 variétés de sorgho une élimination de matières moins importante lorsque la taille des graines était grande.

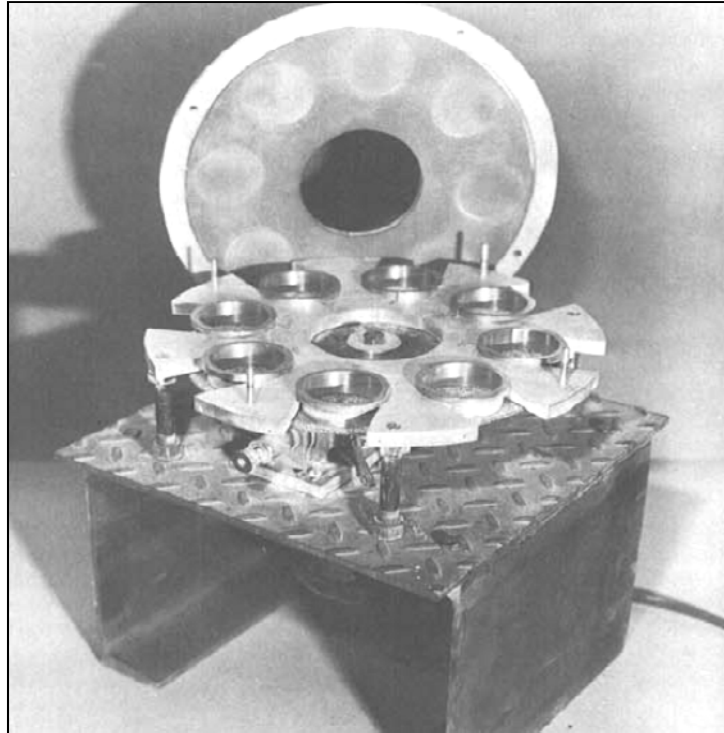


Figure 1-10: Appareil TADD (Oomah et *al.*, 1981)

1.2.5.3. Mouture

La mouture est un procédé de broyage des grains en farine. au Burkina Faso, comme dans la plupart des pays d'Afrique de l'ouest, la mouture se fait encore à petite échelle, de façon manuelle ou mécanique. Selon le plat traditionnellement désiré, on pratique trois sortes de mouture : la mouture sèche, la mouture humide et la mouture semi-humide. La mouture sèche consiste à faire sécher ou égoutter les grains décortiqués avant de les broyer. Ce type de mouture est pratiqué pour la préparation de plats comme le *tô*. La mouture humide consiste à faire tremper les grains dans de l'eau avant de les broyer, en général toute une nuit et parfois plus longtemps. C'est le cas dans la fabrication des bouillies fermentées *ben-saalga* et *ben-kida*. Dans ce type de mouture, le rendement d'amidon est plus élevé avec les génotypes à albumen tendre (farineux), tandis qu'avec une mouture sèche, le rendement de farine est plus élevé avec les albumens de type corné. La mouture semi-humide a été signalée pour la première fois par Abdelrahman et *al.* (1984) sur le mil avec 10 % d'humidification pendant 4 h. L'humidification attendrit le grain et sa mouture demande moins d'énergie mais pour des risques de contaminations microbiologiques, l'humidification n'est pas trop conseillée pour les transformations à petite échelle.

La taille des grains, l'épaisseur du péricarpe des grains influencent la mouture et donc la qualité de la farine produite. Scheuring et *al.* (1983) ont montré que le rendement de mouture était faible pour des grains à péricarpe épais lorsque la durée de mouture était maintenue constante. Lee et *al.* (2002) ont rapporté que la mouture des grains de grande taille avait un rendement élevé en farine, une farine à absorption d'eau plus élevée et de couleur plus blanche par rapport à la farine issue de la mouture des grains plus petits.

La mouture peut être fine ou grossière. Aboubacar et Hamaker (1999) ont rapporté que la farine issue de grains durs de sorgho contient une proportion élevée de grosses particules avec de faibles teneurs en cendres, elle est surtout adaptée à la fabrication de couscous. Certains auteurs ont également montré l'influence de la taille des grains sur l'aspect collant de la farine. Aboubacar et Hamaker (1999) et Akingbala et Rooney (1987) ont rapporté une relation entre la teneur en amylose et la viscosité des farines issues des grains de sorgho.

La mouture joue un rôle très important dans la valeur nutritionnelle finale du plat. La mouture expose l'albumen à l'attaque enzymatique. La teneur en lipides des grains influence également la qualité de la farine. La présence d'acides gras libres en quantités importantes dans la farine peut entraîner son rancissement rapide. Dans le maïs près de 62 % des lipides de l'albumen sont des acides gras libres (Weber et al., 1978).

Plusieurs travaux ont rapporté une augmentation de la teneur en fer au cours de la mouture (Abebe et al., 2007 ; Greffeuille et al., 2011).

Après la mouture, la farine obtenue est tamisée. Le tamisage a pour objectif de donner à la farine la granulométrie nécessaire à la préparation du plat. Ces particules peuvent contenir des fractions du germe qui sont riches en micronutriments. Proulx et al. (2007) et Greffeuille et al. (2011) ont observé une diminution de la teneur en fibres, en lipides, en phytates et en zinc après tamisage. Contrairement à Proulx et al. (2007), Greffeuille et al. (2011) ont observé une augmentation de la teneur en fer. Cette augmentation s'expliquerait par du fer de contamination qui peut provenir du tamis qui est généralement en fer ou d'autres ustensiles utilisés.

1.2.5.3.1. Mouture mécanique

La mouture mécanique est de type motorisé, et consiste à la transformation des grains en farine plus ou moins fine. Elle est réalisée dans de petites unités de quartier. Les grains peuvent être décortiqués ou non. Les grains sont écrasés en particules fines par un système constitué de meules. La figure 1-11 présente un moulin à meules en corindon. Au Burkina Faso, 2 types de meules sont utilisées pour la mouture mécanique des grains : les meules en corindon et les meules en fer. Le corindon est une espèce minérale qui entre dans la composition de la roche émeri, très utilisée comme abrasif en raison de sa dureté (figure 1-13). L'avantage de cette technique de mouture est sa rapidité et sa fine granulométrie. La mouture mécanique entraîne une augmentation de la teneur en fer initiale des grains de 2 à 3 fois (Greffeuille et al., 2011). Selon les auteurs, l'importance de la contamination en fer est liée à l'intensité de la mouture. Elle observe 43 % d'augmentation de la teneur en fer en cas de mouture grossière, 78 % à 89 % pour la mouture fine et plus de 199 % en cas de mouture humide.

1.2.5.3.2. Mouture manuelle

Elle consiste en l'utilisation du mortier et du pilon pour broyer les grains et obtenir de la farine. Ce type de broyage est suivi d'un tamisage. Il arrive que les refus de tamis soient assez importants et dans ce cas d'importantes pertes en matières donc en nutriments sont

notées. Ceci peut influencer la qualité nutritionnelle du produit final. Mais le plus souvent, par souci d'économie, les résidus de tamisage sont remis dans le mortier et broyés jusqu'à l'obtention de la granulométrie désirée.



Figure 1-11: Moulin à corindon
(Ouagadougou, 2009)



Figure 1-12: Meule en fer
(Ouagadougou, 2009)



Figure 1-13: Meules en corindon
(Ouagadougou, 2009)

1.2.5.4. Germination

La germination encore appelée maltage est un procédé traditionnellement utilisé dans plusieurs pays d'Afrique pour la production de boissons alcoolisées de type bière (Taylor & Dewar, 2001 ; Kayodé *et al.*, 2005). C'est une technique facile à réaliser dans les ménages car elle ne nécessite pas de matériel sophistiqué (Trèche, 1999), mais elle est assez fastidieuse et consommatrice de temps. Elle consiste à faire germer les grains jusqu'à l'apparition d'une pousse. Au Burkina Faso, le dolo, une boisson traditionnelle alcoolisée généralement à base de sorgho rouge est obtenue par maltage puis fermentation (Traoré *et al.*, 2004). La figure 1-14 présente les différentes étapes de production des farines maltées au Burkina Faso. Elle est constituée des étapes essentielles suivantes: le trempage des grains, la germination, la maturation, le séchage et la mouture.

Au cours de la germination, il se produit une importante activation de nombreuses enzymes, dépendant du type de céréale, de la durée de germination, du pH et de la température du milieu (Cheryan, 1980; Egli *et al.* 2002). Traoré *et al.* (2004) ont observé une forte activité α -amylasique dans les grains de sorgho rouge comparée à celle observée dans les grains de mil et de maïs. Cette propriété de la germination est beaucoup utilisée dans la production des bières et des farines infantiles où de la farine maltée de céréale est ajoutée dans l'objectif d'accroître la densité énergétique (Onyeka & Dibia, 2002). L'ajout de farine maltée dans les bouillies entraîne une réduction de la viscosité, et permet ainsi d'augmenter la densité énergétique et d'améliorer les ingérés énergétiques en bouillie des jeunes enfants (Trèche, 1995). Une amélioration de l'absorption du fer a été rapportée dans certains cas de traitement des céréales par l' α -amylase (Hurrell *et al.*, 2002).

La germination entraîne une réduction importante des phytates (Greiner, 2002 ; Kayodé *et al.*, 2007a), ceci est probablement dû à l'activation des phytases endogènes qui dégradent les phytates libérant ainsi les minéraux (Raboy, 1990). Le mil, le maïs et le sorgho ont une faible activité phytasique endogène comparé au blé et à l'orge (Egli *et al.*, 2002). Traoré *et al.* (2004) ont observé des réductions de 53 %, 67 % et 23 % de la teneur en phytates au cours du maltage du sorgho rouge, du mil et du maïs respectivement. Afifi *et al.* (2011) ont rapporté une baisse de la teneur en phytates allant de 24,9 à 35,3% au cours de la germination de grains de sorgho

Le maltage entraîne une augmentation de 11 %, 7 % et 2 % respectivement de la teneur en protéines du sorgho rouge, du mil et du maïs (Traoré *et al.*, 2004), une baisse de la teneur en lipides (Elmaki *et al.*, 1999) et une augmentation de la teneur en cendres des grains de céréales. La germination entraîne une augmentation de la teneur en glucose, fructose (Nimala *et al.*, 2000). La germination des céréales améliore les teneurs en lysine et en tryptophane des grains de céréales (Dalby and Tsai, 1976). Les pousses et radicules formées au cours de la germination des grains de céréales (sorgho, mil, maïs) contiennent des composés cyanogènes qui après hydrolyse donne de l'acide cyanhydrique hautement toxique. Les grains entiers de céréales contiennent initialement de faibles quantités de composés cyanogènes. Traoré *et al.* (2004) ont rapporté des teneurs de 38, 46, 34 ppm respectivement dans le sorgho rouge, le mil et le maïs. A la fin de la germination les teneurs

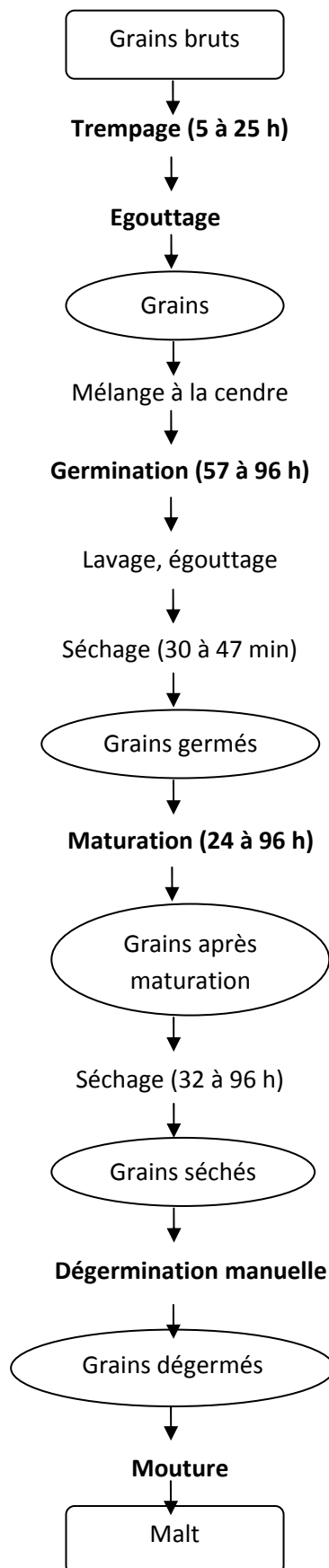


Figure 1-14: Diagramme général de préparation de farine de céréales germées à Ouagadougou (Traoré et *al.*, 2004)

en composés cyanogènes s'élèvent et sont respectivement pour le sorgho rouge, le mil et le maïs de 324, 168, 108 ppm. Selon Traoré et *al.*, (2004) la dégermination traditionnelle qui consiste à éliminer les pousses et les radicules avant de passer à la mouture des grains, diminue la teneur en composés cyanogènes mais ne la supprime pas complètement.

1.2.5.5. Fermentation

La fermentation est une technique ancienne utilisée en Afrique dans l'objectif d'améliorer la flaveur, la saveur, la qualité sanitaire et la digestibilité des aliments (Nout, 1994 ; Nout et Sarkar, 1999). On distingue différentes catégories de plats fermentés en Afrique et en Asie (tableau 1-9), de consistance liquide, semi liquide, solide. Les aliments fermentés à base de céréales tels que l'*ogi* et le *mawè* au Bénin (pâte fermentée non cuite de maïs), le *kenkey* au Ghana (pain fermenté cuit de maïs), l'*injera* en Ethiopie (galette de teff ou de sorgho fermentée cuite), le *poto poto* (bouillie fermentée de maïs) au Congo, le *ben-saalga* et le *ben-kida* (bouillie fermentée de mil au Burkina Faso), l'*ugi* (boisson non alcoolisée de sorgho) et le *kisra* (pain fermenté) du Soudan, sont bien acceptés et consommés en grande majorité dans les pays africains (Blandino et *al.*, 2003 ; Oyewole, 1997). A Ouagadougou (Burkina Faso) selon une étude réalisée en 2003, près de 66 % des ménages consomment les bouillies fermentées de mil, et 53 % des enfants de moins de 5 ans en consomment comme aliment de complément (Mouquet-Rivier et *al.*, 2008). La fermentation naturelle est due principalement aux bactéries lactiques, aux levures et aux moisissures (Nout, 2009). S'agissant de céréales et à l'exclusion de préparations alcoolisées comme les bières traditionnelles, la fermentation est de type lactique (Blandino et *al.*, 2003 ; Tou et *al.*, 2006). La fermentation lactique assure la qualité sanitaire de l'aliment par une baisse progressive du pH, inhibant le développement de certains pathogènes tels que *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, *Campylobacter jejuni*, *Shigella flexneria*. La fermentation, qu'elle soit naturelle ou provoquée (pied de cuve, souches starters) améliore la qualité nutritionnelle des plats à base de céréales en améliorant la digestibilité de l'amidon, en réduisant la teneur en facteurs antinutritionnels tels que les phytates, les fibres et les polyphénols et donc elle améliore la biodisponibilité des minéraux. La dégradation des phytates va dépendre de l'origine et des caractéristiques des microorganismes présents, de l'espèce, de la variété et de la durée de fermentation. Les acides organiques baissent le pH du milieu activant ainsi l'activité des phytases (Teucher et *al.*, 2004). La fermentation entraîne une activation des phytases endogènes des grains de céréales entraînant une hydrolyse des phytates (IP6) (Egli et *al.*, 2003 ; Songré-Ouattara et *al.*, 2008 ; Greffeuille et *al.*, 2011). Dans le *ben-saalga*, une fermentation de 2 à 16 h de la pâte de mil a entraîné des réductions des teneurs en phytates de 37 à 97 % (Mouquet et *al.*, 2001). Des études réalisées *in vivo* par la méthode des isotopes ont montré une amélioration de l'absorption des minéraux tels que le calcium, le fer, le zinc au cours de la fermentation (Hambidge et *al.*, 2004 ; Hambidge et *al.*, 2005). L'acide lactique est le principal produit de la fermentation de la pâte de mil pour la production des bouillies fermentées (Tou et *al.*, 2006).

Tableau 1-9 : Aliments fermentés à base de céréales d’Afrique et d’Asie (Nout, 2009)

Céréales	Aliments fermentés	Origine	Forme de consommation	Micro-organismes	Impact de la fermentation	Références
Maize (<i>Zea Mays</i>)	Mawè	Benin	Bouillie, pâte, pain	Bactéries lactiques levures	Goût, flaveur, acidité, digestibilité	Hounhouigan et <i>al.</i> , 1993b, 1999
	Kenkey	Ghana		Bactéries lactiques levures	Goût, flaveur, digestibilité	Amoa et <i>al.</i> , 2007 Annan et <i>al.</i> , 2003
Sorgho (<i>Sorghum bicolor</i> , <i>Sorghum vulgare</i>)	Tchoukout ou	Benin	Boisson alcoolisée	Levures bactéries lactiques	Alcool, flaveur, goût acide, digestibilité	Kayodé et <i>al.</i> , 2007a, 2007b
	Uji	Kenya, Tanzanie	Bouillie épaisse,	Bactéries lactiques	Goût flaveur, digestibilité	Mbugua & Nienga, 1992 Onyango et <i>al.</i> , 2004
	jiu	Chine	Boisson alcoolisée	Moisissure, bactéries diverses levures	Flaveur, goût, importance culturelle et sociale	Wang et <i>al.</i> , 2008b Zhang et <i>al.</i> , 2007
Petit mil (<i>Pennisetum glaucum</i>)	Ben-saalga	Burkina Faso	Bouillie	Bactérie lactique	Gout, flaveur, digestibilité	Mouquet-Rivier et <i>al.</i> , 2008, Songré Ouattara et <i>al.</i> , 2008
Finger millet (<i>Eleusine coracana</i>)	jnard	Nord Inde, Népal	Boisson alcoolisée	Moisissure, bactéries, levures	Flaveur, goût, digestibilité	Aidoo et <i>al.</i> , 2006, Tamang et <i>al.</i> , 1988
Rice (<i>Oryza sativa</i>)	Idli	Sud Inde, Sri Lanka		Bactéries lactiques levures	Goût, texture, digestible	Koh and Singh, 2009
	Mifen	Chine du Sud		Bactéries lactiques	Texture, digestibilité	Lu et <i>al.</i> , 2008a, 2008b

1.2.5.6. Cuisson

La cuisson est généralement l'étape finale de préparation des plats à base de céréales. Les différents types de cuisson des plats de céréales sont : la vapeur, l'ébullition, la friture. La cuisson à la vapeur est appliquée pour des plats comme le couscous. La cuisson par ébullition se fait dans l'eau, c'est le cas du *tô*, la cuisson par friture se fait dans l'huile, c'est le cas du *klèklè* (plat béninois à base de maïs).

La durée de la cuisson est variable selon la céréale et le plat désiré. Les effets de la cuisson sur la valeur nutritionnelle varient selon le type de céréale, le pH du milieu, la température et la durée de la cuisson. La déstructuration de l'amidon lors de la cuisson facilite l'accès à d'autres enzymes comme la pepsine améliorant la digestibilité des protéines. Des travaux réalisés *in vitro* (Kurien et al., 1960 ; Maclean et al., 1981) et *in vivo* (Hamaker et al., 1986) ont rapporté une réduction de la digestibilité des protéines au cours de la cuisson des grains entiers de sorgho. Selon Hamaker et al. (1986) au cours de la cuisson des grains entiers de sorgho, les kafirines, prolamines du sorgho, forment des polymères complexes reliés par des ponts disulfures qui réduisent la digestibilité des protéines dans le sorgho. Greffeuille et al. (2011) ont observé une augmentation de la teneur en fibres au cours de la cuisson par ébullition dans l'eau. Hurrell et al. (2003) ont rapporté sur des études réalisées *in vivo* que la cuisson effectuée pour la production des bouillies à base de céréale en industrie et celle réalisée par les ménages pour la production des galettes n'a pas d'effet sur l'absorption du fer. La cuisson peut améliorer la biodisponibilité de certaines vitamines telles que la thiamine, la riboflavine, la vitamine B6, la niacine.

Cependant la cuisson par friture ou la cuisson-extrusion peut entraîner une réduction de la valeur biologique des protéines, par la formation de réactions de Maillard, la destruction de certains acides aminés essentiels tels que la lysine, la méthionine, l'arginine et l'oxydation des acides aminés sulfurés. Au cours de la cuisson des pertes en vitamines thermolabiles et hydrosolubles (vitamine C, thiamine, riboflavine) sont observées. Ces pertes sont fonction de la température appliquée, de la présence d'oxygène, du pH, de la lumière et de la quantité d'eau utilisée (Erdman et al., 1994). La cuisson-extrusion entraîne une gélatinisation de l'amidon le rendant facilement accessible à la digestion enzymatique. Selon certains auteurs la cuisson-extrusion inactive les phytases, inhibant ainsi la dégradation des phytates (Sandberg, 1991, Williams et al., 1999). D'autres auteurs comme Watzke (1998) ne confirment pas ce résultat.

1.2.6. Quelques plats à base des céréales mil, maïs et sorgho produits au Burkina Faso

Les plats céréaliers consommés au Burkina Faso ont fait l'objet d'un livret de recettes (Greffeuille et *al.*, 2010). Dans cette partie, seuls les plats *tô*, bouillie et galettes sont décrits. Le tableau 1-10 présente quelques plats céréaliers du Burkina Faso, leur nature et leur origine céréalière.

Tableau 1-10: Quelques plats à base de céréales produits au Burkina Faso

Plats	Nature	Céréales
<i>Tô</i>	Plat semi solide	Mil, sorgho, maïs
<i>bensaalga, benkida</i>	Bouillies fermentées	Mil
<i>Galettes</i>	Friture solide	Mil, riz maïs
<i>couscous</i>	Plat solide	Mil, maïs, sorgho
<i>Zom-koom</i>	Boisson	Mil
<i>Dolo</i>	Boisson alcoolisée	Sorgho, mil
<i>Rannoodo</i>	Boisson non alcoolisée	Sorgho
<i>Gapal</i>	Boisson fermentée	Mil

Source : Livret INSTAPA (Greffeuille et *al.*, 2010)

1.2.6.1. Tô

Le *tô* est une pâte semi solide à base de céréales mil (figure 1-16), maïs ou sorgho (figure 1-15). C'est un plat consommé un peu partout en Afrique de l'ouest, *Dibou* au Benin, *oka-baba* au Nigeria, *tô* au Burkina Faso. Au Burkina Faso selon les résultats d'une étude sur la consommation alimentaire réalisée en 2009, le *tô* représente 80,45 % des plats consommés dans les ménages (Rapport ENIAM, 2009). Il est appelé « pâte » dans certaines régions. Le mot *tô* vient d'une langue locale du Burkina Faso, le bambara. Le *tô* est généralement consommé accompagné de sauces à base de légumes-feuilles, frais ou séchés. Le *tô* peut également être délayé dans de l'eau ou du lait donnant du « *tô* délayé ». Son diagramme de fabrication (Annexe 1-1) est généralement constitué de trois étapes-clés qui sont le décorticage (mécanique ou manuel), la mouture et la cuisson mais il comporte des variantes liées à la céréale et aux habitudes de consommation du ménage.

Certains ménages ajoutent un jus acide comme le jus de citron, de tamarin. Selon les études de Eyzaguirre et *al.* (2006) l'acidification par seulement la baisse du pH aurait un effet positif sur la dégradation des molécules de phytates IP6 et IP5. D'autres ménages ajoutent de la potasse au cours de la préparation du *tô*. Selon Towo et *al.* (2003), Eyzaguirre et *al.* (2006) l'alcalinisation pourrait occasionner une polymérisation oxydante des tannins condensés et donc influencer positivement sur l'absorption du fer et du zinc.



Figure 1-15 : plat de tô de sorgho blanc
(Ouagadougou, 2011)



Figure 1-16 : plat de tô de mil
(Ouagadougou, 2011)

1.2.6.2. Bouillies fermentées

Au Burkina Faso les bouillies fermentées à base de mil les plus consommées sont appelées en langue mooré *ben-saalga* pour la bouillie sans grumeaux et *ben-kida* pour la bouillie avec grumeaux. Elles sont commercialisées quotidiennement dans des ateliers tenus par des femmes au sein des concessions (Mouquet-Rivier et *al.*, 2008). Comme mentionné précédemment, ces bouillies sont très largement consommées à Ouagadougou (§1.2.5.5). Les bouillies fermentées sont appréciées pour leur goût, leur texture mais aussi pour leur bonne conservation. Le pH étant bas, ces bouillies fermentées sont moins susceptibles au développement de microorganismes pathogènes. Le procédé de production des bouillies fermentées a été décrit dans le livret INSTAPA (Greffeuille et *al.*, 2010). Le diagramme est présenté en annexe 1-2. Les grains entiers sont lavés et mis à tremper pendant 16 h en moyenne. Les grains trempés sont finement broyés. Souvent les grains sont broyés avec des ingrédients aromatisants tels que les épices, le gingembre. De l'eau est ajoutée à la farine obtenue, le tout est bien malaxé et filtré. L'objectif de cette filtration est d'éliminer les drèches. Le filtrat est laissé à décanter durant 11 h en moyenne. Au cours de cette deuxième étape de fermentation, les bactéries lactiques représentent la microflore dominante bien que des levures aient été dénombrées mais en proportion beaucoup plus basse (Tou et *al.*, 2007a). L'acide lactique est le produit final majeur obtenu en fin de décantation. Le mélange est ensuite séparé en deux phases, un surnageant et une pâte. La bouillie *ben-saalga* est obtenue après ajout de la pâte fermentée au surnageant auparavant cuit pendant 40 min à ébullition. La bouillie *ben-kida* est obtenue en ajoutant des grumeaux obtenus à partir d'une portion de la farine issue du trempage.

La valeur nutritionnelle des bouillies fermentées est liée aux caractéristiques nutritionnelles intrinsèques de la céréale (McKevith 2004), aux différentes étapes de production et à la fermentation (Chavan and Kadam 1989). La fermentation lactique a lieu durant la phase de décantation. Au cours de cette étape il se produit une baisse du pH jusqu'à une valeur de 3,7

et une augmentation de l'acidité titrable qui donne un goût acide à la bouillie. L'acidification assure la qualité sanitaire du produit en inhibant la croissance des bactéries pathogènes (Nout et *al.*, 1989 ; Odunfa et *al.*, 1985). Cette caractéristique facilite la conservation de ces bouillies qui sont produites et consommées dans des zones à température élevée favorable au développement des microorganismes. Au cours de la fermentation lactique c'est-à-dire au cours de la décantation, il se produit une dégradation des phytates (IP6). Mouquet-Rivier et *al.*, (2008) ont observé dans les bouillies *ben-saalga* une dégradation importante des phytates, allant d'une teneur de 0,46 g à 0,22 g/100 g de matière sèche soit plus de 50 % des phytates initiaux dans le grain de mil. De même El Hag et *al.* (2002) ont observé une réduction de 50 et 66% respectivement des phytates et des polyphénols après 12 h de fermentation. La réduction des teneurs en α -galactosides tels que le raffinose, le stachyose a été observée au cours de l'étape de trempage due au phénomène de diffusion et à l'activité des α -galactosidases. Ceci permet de réduire les problèmes de flatulence causés par ces glucides indigestibles. La teneur en matière sèche de ce type de bouillie est faible, selon Tou et *al.* (2007) elle est de 8 -10 g/100 ml, (correspondant à 30 kcal/ 100 g de bouillie sans ajout de sucre), les bouillies *ben-saalga* sont pauvres en énergie et en nutriments. Tou et *al.* (2006) ont rapporté une viscosité élevée des bouillies avec une valeur moyenne d'écoulement Bostwick de 137 mm/30s. De même une perte importante de protéines a été observée dont la teneur diminue de 10,2 g/100 g MS dans les grains à 6 g/100 g MS dans la bouillie. Ces pertes en matières et en nutriments sont en partie liées à l'étape de filtration. Cette étape entraîne l'élimination de drèches, le germe des graines pourrait faire partie de ces drèches qui seront données aux animaux.

1.2.6.3. Galettes

Les galettes sont des fritures de pâte fermentée, à base de mil, maïs, sorgho ou riz ou encore de la combinaison de ces céréales. Le mil est la céréale la plus utilisée pour la production des galettes. Au Burkina Faso, les galettes sont appelées « *massa* » en langue locale *mooré, fulfuldé, dioula* (figure 1-20). Tout comme les bouillies fermentées *ben-saalga* et *ben-kida*, la production des galettes est une activité commercialisée par des femmes. La production se fait au niveau du ménage. Le diagramme de production (annexe 1-3) des galettes est assez semblable à celui des bouillies fermentées. Les grains décortiqués sont lavés et trempés pendant une nuit (de 18 h le soir à 5 h le matin). Puis ils sont égouttés avant d'être broyés finement. La farine obtenue est divisée en 3 fractions égales. La première sert à la production d'une bouillie épaisse appelée ici « petit *tô* » dans le diagramme. La 2^{ème} fraction de farine est ajoutée à la bouillie, certaines productrices la diluent dans de l'eau avant de l'ajouter. L'ensemble est bien cuit formant une bouillie très épaisse. La 3^{ème} fraction de farine diluée dans de l'eau chez certaines productrices est bien mélangée à la bouillie épaisse et l'ensemble est laissé au repos pour fermentation pendant une nuit. Du sucre peut être ajouté à la pâte fermentée avant friture (figure 1-17). La friture des galettes est réalisée dans des poêles en terre cuite, constituées de 20 à 30 puits (figure 1-18). Dans chaque puits est introduit une petite quantité d'huile qu'on laisse chauffer d'abord avant

d'introduire une louchée de pâte fermentée qui donnera la galette en fin de cuisson (figure 1-19). Le diagramme de production des galettes est constitué de plusieurs variantes dues surtout aux caractéristiques organoleptiques désirées par les consommateurs. Les variantes notées au niveau du procédé de production des galettes sont surtout observées à l'étape de fermentation après l'étape mouture. Chez certaines productrices c'est de la bouillie de riz qui est utilisée, à laquelle est ajoutée la farine issue de la mouture des grains trempés.



Figure 1-17: pâte fermentée prête pour la production des galettes (Ouagadougou, 2011)



Figure 1-18: Poêle prête pour la friture des galettes (Ouagadougou, 2011)



Figure 1-19: Friture des galettes (Ouagadougou, 2011)



Figure 1-20: Galettes prêtes (Ouagadougou, 2011)

1.3. Fer et zinc dans l'alimentation du jeune enfant

Le fer et le zinc ont une importance capitale pour l'organisme humain. La déficience en ces micronutriments a des conséquences néfastes sur la croissance et le développement des jeunes enfants, et donc indirectement sur le développement des nations. Dans cette partie seront présentés les points suivants : les fonctions et le métabolisme du fer et du zinc dans l'organisme, les sources alimentaires de fer et de zinc, la biodisponibilité de ces minéraux ainsi que les différentes stratégies de lutte contre les carences en fer et en zinc.

1.3.1. Structure et fonction du fer et du zinc

1.3.1.1. Structure et fonction du fer

Le fer de symbole chimique Fe, 26^{ème} élément du tableau périodique a une masse molaire de 55,85 g. Le fer possède la propriété de gagner ou de perdre facilement un électron, passant de la forme ferreuse (Fe^{2+}) à la forme ferrique (Fe^{3+}). L'importance du fer dans l'organisme est connue depuis l'antiquité mais c'est au XVIII^{ème} siècle que la relation entre le fer et la santé a été établie par la découverte de traces de fer dans les cendres de sang. En 1832, les travaux de Blaud montrent une augmentation de la concentration de l'hémoglobine dans le sang par l'administration de sel de fer. Le fer se présente sous deux formes : le fer héminique retrouvé dans les aliments d'origine animale et le fer non héminique présent dans les aliments d'origine animale et végétale. Le pool de fer de l'organisme est d'environ 4 g chez l'homme adulte et de 2,5 g chez la femme. Le fer non héminique représente environ 30 % du fer total et entre dans la composition de la ferritine et de l'hémosidérine qui sont des formes de stockage du fer. Le fer héminique a un rôle fonctionnel, il représente 68 à 70 % du fer total de l'organisme. Il intervient dans la synthèse des protéines de transport de l'oxygène, l'hémoglobine et la myoglobine (Bothwell et *al.*, 1979). L'hémoglobine transporte l'oxygène des poumons vers les tissus. C'est une molécule à 4 sous-unités protéiques (deux chaînes α , deux chaînes β) liées à l'hème, noyau tétrapyrrolique contenant un ion ferreux. Le fer intervient également dans le transport de l'oxygène par la myoglobine dans les muscles. Le fer a un rôle important dans la production d'énergie notamment dans les réactions d'oxydation-réduction. Il est nécessaire pour la production et la fonction de plusieurs enzymes (cytochrome P450) qui interviennent dans la synthèse des hormones et des acides biliaires. Le fer intervient également dans le métabolisme oxydatif de la cellule, dans la synthèse des hormones stéroïdes et des acides biliaires, dans la détoxification du foie et dans la transmission du signal au niveau des neurotransmetteurs dans le cerveau. Il est impliqué dans la synthèse de l'ADN et intervient dans le système immunitaire. C'est un élément important pour le développement et le fonctionnement du système cérébral (dopamine). Il est impliqué dans la synthèse des neurotransmetteurs et du collagène.

1.3.1.2. Structure et fonction du zinc

Le zinc est le 30^{ème} élément du tableau périodique des éléments. Il a une masse molaire de 65,37 g. Ses propriétés chimiques lui confèrent une grande importance en biologie. Il a 5 isotopes stables, ⁶⁴Zn, ⁶⁶Zn, ⁶⁷Zn, ⁶⁸Zn, ⁷⁰Zn. Le zinc est un ion stable à cause de ses liaisons de cation divalent. Il n'est ni réducteur ni oxydant et forme des sels inorganiques et des complexes avec les acides et d'autres composés chargés négativement (Chesters, 1989). Son lien avec la santé a débuté avec la découverte de son importance chez la souris avec Gabriel Bertrand en 1934. Plusieurs autres découvertes ont porté sur l'effet de la carence en zinc sur l'activité de certaines enzymes. Depuis lors les travaux sur le zinc se sont multipliés, notamment son importance dans la santé humaine, sa structure, son métabolisme (Ross et *al.*, 1958 ; Foster et *al.*, 1979, Lowé et *al.*, 1993), ses interactions avec les autres composés (Hotz & Brown., 2001) et sa biodisponibilité. Le zinc est retrouvé en quantité importante dans le foie, les os, les reins, le pancréas, les muscles, les yeux, la prostate, les cheveux. La teneur totale en zinc chez un adulte est de 1,5 à 2,5 g. Une grande partie du zinc (83 %) est localisée dans les os et les muscles. Près de 30 mg de zinc/kg de tissu se trouvent dans la masse grasse. Le restant du zinc est réparti dans les autres organes, les tissus et les sécrétions. Le zinc est impliqué dans les fonctions biochimiques et immunologiques (Hortz and Brown, 2004). Le zinc est essentiel dans le métabolisme et la structure des acides nucléiques. Il participe à la synthèse et à la dégradation des lipides, protéines et des glucides. Le zinc stabilise la structure moléculaire des composés cellulaires et membranaires. Il joue un rôle important dans la transcription et dans l'expression des gènes (Sandström, 1997). Toutes ces fonctions biochimiques assurent au zinc son importance dans la croissance et le développement des individus.

1.3.2. Métabolisme et régulation de l'homéostasie du fer et du zinc

1.3.2.1. Métabolisme du fer

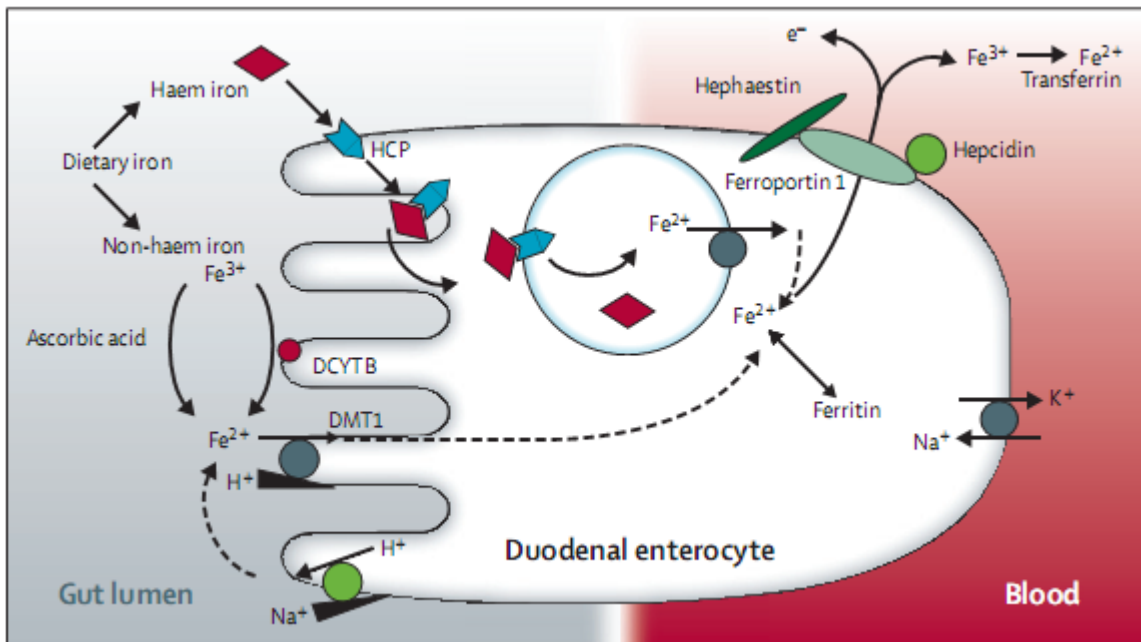


Figure 1-21: Régulation du fer dans l'intestin (Zimmermann, 2007)

La figure 1-21 présente le mécanisme de régulation du fer dans l'intestin. Un nombre important de protéines coordonnent le transfert du fer dans l'entérocyte et dans le système circulatoire. Selon que le fer soit hémique ou non, le mécanisme d'absorption est différent. Dans le cas du fer hémique, la molécule d'hème est endocytée et le fer est libéré par l'action d'une enzyme hème-oxygénase. Le fer non hémique, généralement sous forme Fe³⁺ est réduit en Fe²⁺ par une réductase ferrique associée à la membrane apicale (Latunde-Dada et al., 2002). Le fer ferreux résultant est transporté par un transporteur divalent DMT1 (Gunshin et al., 2005) dans l'entérocyte. Ce fer peut être stocké sous forme de ferritine dans l'entérocyte ou être utilisé pour le métabolisme cellulaire interne. Il peut également rejoindre le compartiment plasmatique et la circulation générale. Dans ce cas deux protéines sont impliquées : la ferroportine et l'héphaestine. La ferroportine assure le transfert du fer ferreux de l'intérieur de la cellule vers la circulation générale. L'héphaestine permet l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique qui sera pris en charge par la transferrine. La transferrine synthétisée par le foie, est la principale protéine de transport plasmatique du fer dans les différents organes et les cellules erythropoïétiques. L'absorption du fer est régulée par l'hépcidine, une hormone sécrétée par le foie. L'hépcidine inhibe l'absorption et le relargage du fer des cellules. Elle se lie à la ferritine au niveau de la membrane basolatérale. Le récepteur 1 de la transferrine (RTF1) favorise l'utilisation du fer lié à la transferrine dans les organes. Une fois dans la cellule, le fer est dirigé vers le pool fonctionnel ou le pool de réserve. Le pool fonctionnel est constitué de la quantité de fer nécessaire et suffisante pour assurer la survie de la cellule (protéines hémiques,

cytochromes, cofacteurs) ou ses fonctions respiratoires (hémoglobine pour les cellules érythropoïétiques). Le pool de réserve est dans sa grande majorité représenté par le fer lié à la ferritine dans les macrophages et les hépatocytes. La ferritine est la forme de réserve de fer et de ce fait est utilisé comme indicateur du stock du fer dans l'organisme. Trois mécanismes permettent à l'organisme d'assurer l'homéostasie du fer. Le premier consiste en une réutilisation du fer après destruction des érythrocytes évitant la présence de fer libre ou la formation de radicaux dans le sang. Le second mécanisme facilite l'accès à la réserve de fer de l'organisme (ferritine) en cas de besoin. Le 3^{ième} mécanisme régularise l'équilibre au niveau de l'absorption du fer dans l'intestin.

Le métabolisme du fer est différent de celui des autres métaux car il n'y a pas de mécanisme physiologique d'excrétion du fer dans l'organisme et près de 90 % des besoins quotidiens en fer sont assurés de façon endogène. L'organisme est économe de son fer. Les pertes en fer sont très faibles, de l'ordre de 1 à 2 mg /jour, soit de 1/1000 à 1/4000 du fer total. Les pertes en fer se font par la peau ou les surfaces intérieures du corps : intestins, tractus urinaires, voies respiratoires. Le fer retrouvé dans les selles provient des cellules muqueuses de l'intestin qui ont desquamé et du fer non absorbé. Green et *al.* (1968) ont estimé la perte quotidienne en fer à 14 µg/kg poids corporel chez un homme de statut en fer normal. Les variations individuelles sont exprimées à ±15 %. Les pertes en fer varient selon l'appartenance ethnique, l'âge, le sexe, le statut en fer du sujet (Bothwell et *al.*, 1979)

1.3.2.2. Métabolisme du zinc

L'homéostasie du zinc est régulée entre les ingérés alimentaires et les sécrétions endogènes au niveau de l'intestin grêle. Dans les conditions physiologiques normales, il n'y a pas de saturation en zinc. Lorsqu'il y a une diminution de l'apport en zinc, ce manque n'est pas réparti de façon uniforme dans les différents organes. Dans le squelette, la peau, le cœur la teneur en zinc ne varie pas alors que dans le foie, les os, le plasma, la teneur en zinc varie. Il n'y a pas de réserve en zinc qui puisse répondre rapidement à un besoin en zinc de l'organisme. Cependant des études ont montré une forme de réserve passive au niveau des os. Le niveau de zinc dans le sang et les activités des enzymes contenant du zinc peuvent être maintenus pendant plusieurs mois chez des individus à régime faible en zinc (2,6 à 3 mg/j) (Lukaski et *al.*, 1984). Environ 90 % du zinc de l'organisme intervient dans un système de rétrocontrôle et ne sont pas disponibles pour le métabolisme. Les 10 % de zinc restants sont utilisés dans les besoins urgents de zinc. Ce pool est très important pour le maintien des fonctions de l'organisme « zinc dépendantes ». Ce zinc circule à l'intérieur ou en dehors du plasma pendant 3 jours. Moins de 0,2 % du zinc circule dans le plasma qui a une concentration en zinc de 15 µmol/l. Le zinc est transporté dans le plasma par l'albumine, l'α2-macroglobuline et des oligopeptides. La concentration en zinc dans les muscles et le foie est 50 fois plus importante que celle du plasma. La concentration en zinc du plasma n'indique pas la teneur en zinc disponible dans l'organisme.

Les pertes en zinc se font à travers les urines, la peau, les intestins et sont de l'ordre de 1,5 à 3 mg de pertes par jour. L'excès de zinc entraîne une élimination du zinc au niveau fécal par des diarrhées.

1.3.3. Besoins en fer et zinc

1.3.3.1. Besoins en fer

Chez le nourrisson à la naissance, le pool de fer est de 250 à 300 mg soit 75 mg/kg de poids corporel. Il couvre les besoins de l'enfant jusqu'aux 4 à 6 premiers mois de sa vie. L'érythropoïèse s'arrête à la naissance, entraînant une chute du taux d'hémoglobine au cours des premiers mois (Kling et *al.*, 1996). Cette hémoglobine diminue de moins de 1 % tous les 10 mois (Maier-Redelsperger et *al.*, 1994). Au cours de cette période appelée « anémie physiologique », les demandes en fer dues à la croissance du nouveau-né sont satisfaites par l'érythropoïétine du rein. En effet, la teneur en fer du lait maternel est très faible 0,3 mg de fer par litre (OMS, 1998) et contribue très peu aux apports. Chez les enfants en bas âge, la supplémentation en fer entraîne une augmentation de la concentration en hémoglobine indépendamment du statut en fer, montrant que la commande érythropoïétique du rein joue un rôle important. Après cet âge, les besoins en fer augmentent et atteignent 0,7 à 0,9 mg/jour avant la fin de la première année de l'enfant. A partir de 6 mois, l'absorption du fer est dépendante des prises de fer et du statut en fer (Domellöf et *al.*, 2002). Une étude réalisée au Pérou a montré que l'absorption du fer chez des enfants de 6 à 9 mois est similaire pour les enfants anémiés et non anémiés (Hicks et *al.*, 2006). A 9 mois, l'absorption du fer est corrélée à la prise de fer alimentaire mais pas au statut en fer (O'Neil-Cutting & Crosby, 1987). Au cours de la première année de l'enfant, les besoins en fer doublent et ceux de l'énergie triplent pour assurer sa bonne croissance. Ces

Un système de classification de l'alimentation basée sur la biodisponibilité du fer dans les plats a été proposé par FAO/WHO (1988) : les régimes alimentaires sont classés en 3 catégories : régime de biodisponibilité faible avec une absorption de 5 % de fer, régime de biodisponibilité intermédiaire avec une absorption de 10 % de fer et régime de biodisponibilité élevée avec 15 % d'absorption du fer. Dans les pays en développement, l'OMS propose l'utilisation de 2 catégories 5 % et 10 % car l'alimentation y est essentiellement constituée d'aliments d'origine végétale. Le tableau 1-11 présente les prises recommandées en fonction de chaque catégorie et de chaque classe d'âge.

Tableau 1-11 : Apports journaliers recommandés en fer (en mg) (FAO/WHO, 2004a)

biodisponibilité du fer %	Enfant de 1 à 3 ans	Enfant De 4 à 6 ans	Femmes 19 à 50 ans	Femmes enceintes	Femmes allaitantes	Hommes de 19 à 50 ans
15 %	3,9	4,2	19,6	>50	10	9,1
10 %	5,8	6,3	29,4	>50	15	13,7
5 %	11,6	12,6	58,8	>50	30	27,4

1.3.3.2. Besoins en zinc

Les besoins en zinc au cours des 3 premiers mois de l'enfant sont estimés à 120 et 140 µg/kg de PC/jour chez la fille et le garçon respectivement. Cette valeur décroît à 33 µg/kg de PC /j à partir de 6 à 12 mois. De 1 à 10 ans, les besoins en zinc sont de 30 µg/kg de PC/j.

Les besoins physiologiques en zinc augmentent pendant les périodes de croissance. Les hommes ont des besoins en zinc plus importants que les femmes à cause de leur importante musculature (Hotz & Brown, 2004). Les besoins en zinc augmentent pendant la grossesse et l'allaitement. Pendant la grossesse, la synthèse de nouveaux tissus pour le fœtus et la mère entraîne une augmentation des besoins en zinc. Le groupe International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG) estime ces besoins à 0,7 mg /jour durant toute la grossesse. Chez la femme allaitante, les pertes en zinc dues à l'allaitement doivent être ajoutées aux besoins physiologiques. Cette quantité est calculée en multipliant le volume moyen de lait donné à l'enfant par la concentration en zinc du lait maternel à différentes périodes post-partum. Le comité « United States Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine » (FNB/IOM) évalue à 1,35 mg/j le besoin de zinc pour combler les pertes en zinc due à la lactation. Ces résultats ont porté sur des femmes américaines (Etats Unis), dans les pays en développement la durée de l'allaitement est plus importante et la quantité de lait délivrée varie en fonction de l'âge de l'enfant. Le groupe IZiNCG estime que l'allaitement exclusif jusqu'à 6 mois couvre les besoins en zinc de l'enfant. Pourtant, la teneur en zinc du lait maternel est peu élevée, de l'ordre de 1,2 mg/litre (OMS, 1998). Peu d'information sont disponibles concernant les besoins en zinc de l'enfant de moins de 6 mois. Ces enfants puisent leur besoins en zinc dans le pool de zinc hépatique accumulé pendant la grossesse (Zlotkin & Cherian, 1988). Pour les enfants de 6 mois à 18 mois, les besoins physiologiques en zinc ont été calculés à partir des pertes endogènes (sueur, urine, fèces) et des besoins de croissance. Les pertes endogènes sont estimées à 0,014 mg/kg de PC/jour et les pertes fécales à 0,05 mg/kg de PC/jour chez les enfants de 6 à 11 mois et 0,034 mg/kg de PC/jour chez les enfants de plus de 11 mois. Les besoins de croissance sont estimés à 0,020 mg/kg de PC/jour. L'OMS (WHO, 1996) propose les limites de prises de zinc quotidiennes à 13 mg pour les enfants âgés de 6 mois à 1 an et 23 mg pour les enfants de 1 an à 6 ans. A forte dose le zinc pourrait avoir des interactions sur le métabolisme de certains minéraux tel que le cuivre

(Fischer et *al.*, 1984). Le tableau 1-12 présente les besoins journaliers en zinc selon la biodisponibilité du zinc dans l'alimentation et en fonction de l'âge.

Tableau 1-12: Apports journaliers recommandés en zinc (en mg). (FAO/WHO 2004b)

Zinc disponibles	Enfants de 1 à 3 ans	Enfant de 4 à 6 ans	Femmes de 19 à 50 ans	Femme enceinte 2 nd trimestre	Femmes allaitantes (6-12 mois)	Homme (19 à 50 ans)
50%	2,4	2,9	3	4,2	4,3	4,2
30 %	4,1	4,8	4,9	7,0	7,2	7,0
15 %	8,3	9,6	9,8	14,0	14,4	14,0

1.3.4. Sources alimentaires du fer et du zinc

Le fer et le zinc sont présents dans différents aliments mais les aliments d'origine animale tels que le bœuf, le porc, la volaille, le poisson, les mollusques, les crustacés sont les meilleures sources. Les teneurs en zinc sont relativement élevées dans les noix, les graines entières, les légumineuses mais elles sont faibles dans les tubercules, les fruits, les céréales raffinées, les légumes, les fruits. Les tableaux 1-13 et 1-14 présentent respectivement les teneurs en zinc et en fer de quelques groupes d'aliments.

Tableau 1-13: Teneurs en zinc de quelques groupes d'aliments

Catégories de zinc (mg/1000kcal)	Aliments
Très pauvres (0-2)	Huile, graisse, crème, fromage, chocolat, conserves, boissons alcoolisées
Pauvres (1-5)	Poisson, céréales décortiqués, biscuits, tubercules, bananes plantains
Riches (4-12)	Grains entiers, porc, lait, œufs, yaourt, noix ;
Très riches	Feuilles et racines, crustacées, rognons de bœuf, foie, cœur, mollusques.

Sources : Solomons et *al.*, 1983.

Tableau 1-14: Teneurs en fer de groupes d'aliments

Groupe d'aliments	Aliments	Teneur en fer mg/100 g
Céréales	Bajra (mil indien, <i>Pennisetum typhoideum</i>)	8,0
	Samai (mil, <i>Panicum miliare</i>)	9,3
	Son de riz	35
	Germe de blé	6,0
Légumineuses	Soja	10,4
	Pois chiche	9,5
	Dolique de chine	8,6
	Lentilles	7,6
	Petits pois séchés	7,1
Feuilles vertes	Amarante, épinards, chou-fleur, menthe, persil, radis, navet	15,6-40
Autres feuilles		6,3-60,6
Noix et graines oléagineuses		7,9-100
Fruits secs		7,3-8,5
Condiments et épices		12-67,8

Source: Gopalan et *al.*, 1989.

1.3.5. Carences en fer et en zinc

Les carences en fer surviennent lorsque l'organisme n'arrive pas à satisfaire les besoins en fer. Les personnes à risque sont les jeunes enfants, les adolescents, les femmes en âge de procréer et les femmes enceintes. Dans les pays en développement où l'alimentation est essentiellement d'origine végétale, les carences en fer chez les enfants de moins de 4 ans atteignent 50 % (WHO, 2001). Les parasites gastro-intestinaux tels que *Trichuris trichiura*, *Necator americanus* sont également des causes de carence en fer, entraînant des pertes de fer dans les selles (Larocque et *al.*, 2005). Les infections parasitaires affectent près de 700 millions de personnes dans les régions tropicales et subtropicales. Dans ces régions, 35% des carences en fer et 73% des anémies sévères sont dues aux infections parasitaires (Bungiro et *al.*, 2004). Les carences en fer sont aussi causées par une mauvaise absorption du fer des aliments. L'acidité gastrique permet de maintenir le fer ferrique en solution, une achlorhydrie peut être une cause de carence en fer, entraînant une gastrite atrophique notamment chez les personnes âgées. Les pertes au cours des menstruations sont des causes importantes d'anémie chez les femmes. Une perte de 1 ml de sang correspond à 0,5 mg de pertes en fer. Les pertes de sang atteignent 80 ml/mois chez 10 % des femmes, soit environ 40 mg de fer, ce qui accroît les risques de carence (Institute of Medicine, 2001). Pendant la grossesse, les besoins en fer sont multipliés par 3 et atteignent environ 50 mg au cours des 2 derniers trimestres de la grossesse (Yip et *al.*, 1987).

Les carences en zinc sont dues généralement à l'insuffisance des apports en zinc, à la mauvaise absorption du zinc, à sa faible biodisponibilité dans l'aliment, à l'accroissement des pertes en zinc et la mauvaise utilisation du zinc absorbée (Solomons and Cousins, 1984). La malabsorption du zinc peut être causée par une maladie génétique rare appelée acrodermite, ou d'autres maladies comme le syndrome de malabsorption ou certaines infections.

1.4. Biodisponibilité du fer et du zinc dans les plats à base de céréales

Par définition la biodisponibilité est la proportion de nutriment ingéré utilisée par les fonctions biologiques vitales de l'organisme (Hurrell, 2002; Fairweather-Tait et *al.*, 2007). La biodisponibilité dépend à la fois de l'alimentation et de l'état du sujet.

1.4.1. Facteurs alimentaires

Plusieurs facteurs de l'alimentation influencent la biodisponibilité des minéraux (Gibson et *al.*, 2006), notamment :

- la forme chimique du minéral dans l'aliment et la nature de la matrice alimentaire,
- les interactions entre le nutriment et les autres composants organiques présents dans l'aliment
- les procédés et les traitements technologiques effectués pour la préparation de l'aliment.

1.4.1.1. Forme chimique

L'absorption ou l'utilisation d'un micronutriment est liée à sa forme. L'absorption du fer se fait selon deux pools distincts en fonction de la forme alimentaire du fer. Dans les aliments d'origine animale, seules sources de fer héminique, seulement 40 % du fer est sous cette forme (Monsen et *al.*, 1978). Mais la totalité de ce fer rejoint le pool de fer héminique et environ 25 % est absorbé. Dans la viande où près de 30 à 70 % du fer est sous forme héminique, environ 15 à 30 % sont absorbés (Hurrell, 2002). L'absorption du fer héminique se fait indépendamment des autres constituants de l'alimentation.

Le fer non héminique a plusieurs sources : il peut être intrinsèque à l'aliment ou extrinsèque. Lorsqu'il est intrinsèque à l'aliment, il peut être d'origine animale ou végétale. Le fer non héminique provenant des plantes, d'origine intrinsèque au végétal est absorbé à des taux allant de 1 à 15 % (Roughhead & Hunt, 2000). Le pourcentage d'absorption du fer non héminique d'origine animale, qui rejoint le pool de fer héminique n'est pas connu.

Le fer extrinsèque à l'aliment peut provenir de la contamination par le sol, l'eau, le métal à partir des instruments utilisés au cours des procédés de transformation, le stockage ou la cuisson, la pratique de géophagie, le fer de fortification ou de supplémentation. Le fer de contamination a une place importante dans les ingérés alimentaires des populations des pays en développement. Selon les résultats de Hallberg and Bjorn-Rasmussen (1981), la teneur en fer de la farine de riz est de 30 mg/100 g tandis que le riz poli a une teneur en fer de 1,4 mg/100 g, de même le *teff* a une teneur en fer de 39,7 mg/100 g tandis que le *teff* lavé avec de l'acide chlorhydrique a une teneur en fer de 3,5 mg/100 g. Une étude comparative sur le matériel de cuisson des aliments effectuée en Ethiopie a montré une importante teneur en fer dans les aliments cuits dans des pots en fer, deux fois plus élevée que le fer contenu dans la viande par rapport à ceux cuits dans du matériel en aluminium ou en argile (Adish et *al.*, 1999). L'absorption de ce type de fer de contamination varie selon sa solubilité au pH de l'intestin et ses interactions avec les autres composants (Bothwell, 1995).

La biodisponibilité des minéraux apportés par la fortification ou la supplémentation dépend de leur forme chimique. Hurrell et *al.* (1997) exprime la biodisponibilité des fortifiants en valeur relative (RBV), par rapport à celle du sulfate ferreux qui est de 100%. L'absorption du fer est élevée pour les fortifiants solubles dans l'eau ou dans des solutions acides (sulfate ferreux, fumarate ferreux, saccharate ferrique). Les fortifiants les plus utilisés sont ceux qui réagissent moins avec les composés alimentaires. Pour le zinc, la forme organique du zinc (forme où l'ion zinc est lié à une molécule contenant de l'azote) est moins affectée par les facteurs inhibiteurs par rapport à la forme inorganique (ZnO, ZnSO₄) (Solomons et *al.*, 1979).

1.4.1.2. Interactions entre composés

Les interactions entre le minéral et les autres composants de l'aliment constituent un facteur très important pour l'absorption. Ces interactions sont de 2 types : des interactions non compétitives entre les minéraux et les composants organiques formant des complexes insolubles et solubles, et des interactions compétitives entre 2 minéraux ayant les mêmes récepteurs (Gibson et *al.*, 2007).

La biodisponibilité des fortifiants et des suppléments de minéraux dans un repas est affectée par les mêmes facteurs que ceux présents dans l'alimentation (Sandström, 1997).

1.4.1.2.1. Inhibiteurs de l'absorption du fer et du zinc

Les inhibiteurs de l'absorption du fer et du zinc sont les phytates, les polyphénols, le calcium et certaines protéines. Il se forme des complexes fer-phytates et zinc-phytates (IP6) dans l'intestin (Lönnerdal, 2000). L'effet de l'inhibition des phytates a été confirmée par les études *in vivo* où la fraction absorbée de fer, de zinc et de calcium est faible dans les aliments à forte teneur en phytates et vice-versa (Egli et *al.*, 2004, Hambidge et *al.*, 2005). Cette inhibition des phytates sur le fer et le zinc est plus élevée dans les plats mixtes que dans les plats simples (Cook et *al.*, 1991 ; Hambidge et *al.*, 2010). Les complexes minéral-phytate sont insolubles au pH de l'intestin empêchant ainsi l'absorption de ces minéraux. L'effet négatif des phytates sur l'absorption du fer dépend de la dose et a été observé à des doses faibles de 2 à 10 mg/repas (Hallberg, 1989 ; Hurrell et *al.*, 1992). Le ratio molaire phytate/minéral permet de prédire la proportion du minéral alimentaire absorbé.

1.4.1.2.2. Activateurs de l'absorption du fer et du zinc

Les principaux activateurs de l'absorption du fer sont l'acide ascorbique, les acides organiques, le tissu musculaire. L'acide ascorbique est un puissant activateur de l'absorption du fer non hémique lorsqu'il est pris dans le même plat que celui-ci. Il réduit le fer ferrique en fer ferreux à pH bas et chélate également le fer (Conrad et *al.*, 1968). Dans l'estomac où le milieu est acide, l'acide ascorbique se lie au fer formant un complexe fer-ascorbate. Ceci évite la formation des complexes inhibiteurs-fer (Teucher et *al.*, 2004). La formation des complexes fer-ascorbate est fonction de la quantité d'acide ascorbique, de sa composition et de ses propriétés dans le plat ingéré. Cet effet est plus important dans les plats contenant

des concentrations importantes d'inhibiteurs de l'absorption du fer (Gibson et *al.*, 2007). Ainsi donc, l'acide ascorbique a un effet sur tous les inhibiteurs de l'absorption du fer à savoir les phytates, les polyphénols, le calcium, certaines protéines du lait et accroît également l'absorption des minéraux qu'ils soient ajoutés par fortification ou naturellement présents dans l'aliment (Cook and Monsen, 1977). L'effet de l'acide ascorbique sur l'amélioration de l'absorption du fer est plus important que celui du tissu musculaire (Cook and Monsen, 1977, Hallberg et *al.*, 1986). L'acide ascorbique peut être détruit par les procédés tels que la cuisson, les procédés industriels, ou cours du stockage (Teucher et *al.*, 2004). Certains travaux (Teucher et *al.*, 2004 ; Pizarro et *al.*, 2006) n'ont noté aucun effet activateur du palmitate d'ascorbyle utilisé comme additif dans les pains après cuisson. L'effet activateur des acides organiques tels que l'acide citrique sur l'absorption du fer non héminique a également été démontré par plusieurs travaux (Gillooly et *al.*, 1983, Teucher et *al.*, 2004). Des études réalisées avec des radioisotopes ont montré l'effet activateur des protéines de la viande, du poisson dans les plats d'origine végétale (Lynch et *al.*, 1989). 30 g de tissu musculaire dans un repas ont une activité équivalente à celle de 25 mg d'acide ascorbique (Monsen et *al.*, 1978).

L'ajout de protéine dans l'alimentation entraîne une activation de l'absorption du zinc, cette activation est meilleure lorsque la protéine est d'origine animale (Sandström, 1992). Les acides organiques forment également des complexes solubles avec le zinc facilitant son absorption.

1.4.1.3. Procédés technologiques

Certains procédés technologiques influencent énormément la biodisponibilité des micronutriments présents dans le plat consommé. Ce sont divers traitements thermiques, le décorticage, le trempage, la fermentation, la germination et le maltage. Le fer de contamination introduit au cours des procédés aurait également une influence sur la biodisponibilité des micronutriments. L'influence des procédés dépendra de l'espèce de la plante, du pH et de la température (Yadav et Sehgal, 2002). Les procédés mécaniques tels que le décorticage réduisent les teneurs en phytates (O'Dell et *al.*, 1972). La fermentation, la germination sont des méthodes qui réduisent les teneurs en phytates. La fermentation entraîne une production de phytases microbiennes qui hydrolysent les phytates (IP6) en molécules plus petites (IP4 à IP3). Les phytates ayant moins de 5 groupements phosphates n'ont pas d'effet négatif sur l'absorption du zinc (Lønnerdal et *al.*, 1989) et ceux ayant moins de 3 n'ont pas d'effet négatif sur l'absorption du fer non héminique (Hurrell, 2004). La germination entraîne une augmentation de l'activité des phytases endogènes. L'intensité de l'hydrolyse des phytates au cours de la germination est fonction du type de céréale, du stade de germination, du pH, de l'humidité, de la température, de la solubilité des phytates et de la présence de certains facteurs inhibiteurs (Egli et *al.*, 2002). Le trempage entraîne une amélioration de la biodisponibilité du fer et du calcium en diminuant respectivement les teneurs en polyphénols et en oxalate (Erdman et *al.*, 1994).

Les contaminants liés au sol peuvent avoir un effet inhibiteur sur l'absorption des micronutriments. Au Moyen Orient, des études ont rapporté des cas de carence en fer et en zinc liés à la pratique de la géophagie (Prasad *et al.*, 1961 ; Prasad *et al.*, 1991). Les auteurs Geerligts (2003); Hallberg & Bjorn-Rasmussen (1981); Kumari (2004) ont rapporté des contaminations en fer provenant de la poussière du sol, ou des ustensiles de cuisine dans l'alimentation des populations. La biodisponibilité de ce fer dépend de l'origine de la contamination (Adish *et al.*, 1999; Hallberg *et al.*, 1981). Par exemple, de faibles taux d'anémie ont été rapportés en Ethiopie chez les enfants consommant des aliments cuits dans les pots de terre comparés à ceux observés chez les enfants consommant des aliments cuits dans des pots en aluminium (Adish *et al.*, 1999), ce qui suggère que le fer provenant des pots en terre serait hautement biodisponible.

1.4.2. Facteurs liés au sujet

Le statut en fer du sujet, son état nutritionnel, son état de santé et les maladies génétiques sont autant de facteurs qui jouent un rôle sur l'absorption du fer et du zinc.

Le statut en fer du sujet influence énormément l'absorption du fer non héminique. Il existe une corrélation inverse entre le statut en fer du sujet et l'absorption du fer selon une étude utilisant la ferritine comme indicateur du statut en fer (Cook *et al.*, 1991, Bezwoda *et al.*, 1979).

Les carences nutritionnelles ont un impact négatif sur l'absorption du fer. Des études ont montré qu'une carence en vitamine A et en riboflavine influence négativement le métabolisme et l'absorption du fer (Fairweather-Tait *et al.*, 1992).

Une réduction de la sécrétion de l'acidité au niveau de l'estomac influence l'absorption du fer, du calcium et même du zinc, par exemple en cas de mauvais fonctionnement des cellules pariétales de l'estomac (Carmel *et al.*, 1996) ou encore dans les cas d'infections par *Helicobacter pylori*. L'acidité gastrique affecte la solubilisation de ces minéraux (Russell *et al.*, 2001). Certaines infections telles que celles de *Giardia lamblia*, *Ascaris lumbricoides*, rotavirus, *Salmonella*, affectent la muqueuse intestinale augmentant la perméabilité de l'intestin et réduisant l'absorption des nutriments (Bjarnson *et al.*, 1995). Par exemple des pertes importantes de zinc endogène dans les fèces observés chez des enfants de 2 à 5 ans du Malawi seraient causées par une perméabilité anormale de leur intestin (Manary *et al.*, 2002a). L'inflammation chronique et l'obésité entraînent une sécrétion de l'hepcidine par le foie, ce qui pourrait entraîner une carence en fer. Zimmermann *et al.* (2008) ont rapporté au cours de leurs études auprès de femmes obèses une relation entre l'obésité et une diminution de l'absorption du fer et une croissance de l'inflammation indépendamment du statut en fer. Aussi d'autres travaux ont montré des maladies génétiques dues à une mauvaise régulation du fer, telles que l'hémochromatose avec accumulation de fer est rencontrée chez les individus de l'Europe du Nord, la thalassémie et les hémoglobinopathies sont rencontrées en Asie du Sud, du Sud Est et du Centre Est et en Méditerranée.

1.4.3. Méthodes d'estimation de la biodisponibilité

Les méthodes utilisées pour estimer la biodisponibilité des micronutriments sont réparties en 3 groupes : les méthodes *in vivo*, les méthodes *in vitro* et les méthodes *ex vivo*.

1.4.3.1. Les méthodes *in vivo*

Ces méthodes réunissent deux modèles : le modèle isotopique réalisé sur l'homme et le modèle réalisé sur des animaux.

Avant les techniques utilisant les radioisotopes ou plus tard, les isotopes stables, la méthode des « balances » (différence entre apports en fer et excrétion dans les urines et les fèces) et celle de la mesure du fer plasmatique étaient utilisées pour évaluer la biodisponibilité du fer. Les méthodes de « balance » sont laborieuses et imprécises du fait de la faible absorption du fer. Isaksson et *al.* (1967) confirment que cette méthode est source de nombreuses erreurs. Ces méthodes de balance ne sont pas bien adaptées non plus à l'étude de l'absorption du zinc du fait de l'excrétion importante du zinc dans l'intestin (Sandström, 1997). La méthode basée sur la mesure du fer plasmatique est surtout utilisée pour le dosage du fer en pharmacologie, cependant le fer alimentaire influence le niveau de fer plasmatique (Hurrell et *al.*, 1997). Le niveau de zinc du repas n'influence pas la concentration plasmatique du zinc (Sandström et *al.*, 1997).

De grands progrès dans la compréhension de la biodisponibilité chez l'homme ont été observés avec l'utilisation des isotopes. Deux groupes d'isotopes sont concernés : les radioisotopes qui sont les premiers à être mis au point dans les années 1940 et les isotopes stables autour des années 1960. La technique des isotopes consiste en un marquage externe (dans l'aliment) ou interne (dans la structure intrinsèque du végétal) des isotopes et quelques temps après l'ingestion à les quantifier dans les fèces (Payton et *al.*, 1982) ou dans le sang pour estimer la biodisponibilité du minéral concerné. Les isotopes ^{59}Fe et ^{55}Fe ont été utilisés pour comprendre la biodisponibilité du fer non héminique dans les plats (Reddy et *al.*, 2000). L'isotope ^{65}Zn a été utilisé pour quantifier l'absorption du zinc (Sandström & Cederblad 1980). Cependant des problèmes d'éthique se posent quant à l'utilisation des radioisotopes chez des enfants et des femmes enceintes au regard des essais réalisés dans les années 1940 et 1950 (Green et *al.*, 1997). En plus du coût élevé, des difficultés d'élimination des radioisotopes ont été observées (Minihane et *al.*, 1998). Plusieurs chercheurs préfèrent de ce fait l'utilisation des isotopes stables.

L'utilisation des isotopes stables a commencé dans les années 1960 avec les isotopes stables du calcium. Les isotopes stables ont permis de mieux connaître le métabolisme des minéraux dans la croissance et le développement, les interactions des minéraux avec les composants alimentaires, l'effet des minéraux sur les maladies chroniques, l'allaitement, etc. L'utilisation des isotopes multiples a permis de mieux connaître les conséquences de la supplémentation de plusieurs minéraux sur la biodisponibilité du minéral (Minihane et *al.*, 1998 ; Hallberg, 1998). Les isotopes stables ont également permis de comprendre les carences en zinc dans les cas de diarrhées et de mauvaise absorption du zinc (Krebs et *al.*, 1995). Des isotopes stables ont été mis au point pour mieux étudier la biodisponibilité dans

les plats simples (Kastenmayer et al., 1994). Elles sont encore utilisées par l'équipe de Hurrell en Suisse : l'influence des protéines du lait sur l'absorption du fer (Hurrell et al., 1989), l'influence des phytates sur l'absorption du fer dans les bouillies (Hurrell et al., 2003). Les méthodes isotopiques ont surtout été utilisées pour comprendre la biodisponibilité des nutriments dans des plats simples (composant unique), ce qui diffère des plats complexes dans lesquels les interactions sont plus importantes et où il est préférable d'utiliser des méthodes *in vitro* (Cook et al., 1991 ; Tidehag et al., 1996).

Les isotopes stables du fer les plus utilisés dans la recherche sont ^{58}Fe and ^{57}Fe .

Cependant l'utilisation des isotopes stables n'est pas sans difficulté. La dose nécessaire d'isotopes stables à administrer dépend du pool de fer du sujet et augmente proportionnellement au poids et à la concentration en hémoglobine du sujet (Abrams et al., 1994 ; Abrams et al., 1996). Des risques d'allergie sont également observés par administration intraveineuse à de faibles doses d'isotopes stables (<0,5 mg) (McDonald et al., 1998 ; Friel et al., 1995).

Le modèle humain a permis de mieux comprendre l'effet de la phytase (naturelle ou ajoutée) dans une alimentation riche en phytates sur la biodisponibilité des minéraux (Brune et al., 1992; Sandström and Sandberg 1992). Ce modèle ne permet pas cependant de déterminer la solubilité du minéral dans l'intestin, l'effet des sécrétions gastriques, pancréatiques et intestinales.

Les isotopes stables sont chers et la méthode requiert une grande quantité d'isotopes. De plus, la quantification des isotopes stables nécessite l'utilisation de la spectrométrie de masse. Les isotopes stables sont peu utilisés pour mesurer l'absorption du fer chez l'adulte mais ils sont utilisés chez les jeunes enfants pour évaluer l'influence de l'acide phytique et de l'acide ascorbique sur l'absorption du fer de fortification dans l'alimentation de l'enfant (Davidsson et al., 1994b).

Le deuxième modèle amplement utilisé dans les années 1970 et 1980 dans les études de la biodisponibilité du fer utilise les animaux. Les animaux utilisés sont le rat, les poussins et souvent les porcs. Elle se base sur la technique des isotopes ou celle de réplétion de l'hémoglobine (Pia and Fritz, 1971). Le rat a été initialement le plus utilisé du fait du rapprochement de certaines réactions du rat à celles de l'homme (Mahoney & Hendricks, 1984). Malgré cela, ce modèle est mal adapté car l'absorption du fer est plus importante chez le rat que chez l'homme et les effets activateurs et inhibiteurs notés chez l'homme sont très faibles chez le rat (Reddy et Cook, 1991). Le rat possède une phytase intestinale ayant une activité 30 fois supérieure à celle de l'homme (Iqbal et al., 1994). L'utilisation de ce modèle a longtemps fait croire à la bonne absorption du fer dans les protéines du soja à cause de l'absorption importante du fer chez des rats anémiés (Rotruck and Luhrsén, 1979). Les méthodes *in vivo* ont permis de comprendre beaucoup sur les facteurs inhibiteurs et activateurs de l'absorption des minéraux (Reddy et al., 1991; Siegenberg et al., 1991).

Il est vrai que ces méthodes *in vivo* ont l'avantage de tenir compte des facteurs inhibiteurs et activateurs de l'alimentation et du statut du sujet mais elles ont le désavantage d'être coûteuses en matériel et nécessitent un nombre important d'animaux ou de personnes.

Pour les méthodes réalisées chez les animaux, l'extrapolation à l'homme rend l'interprétation difficile et pas très fiable.

1.4.3.2. Les méthodes *in vitro*

Au regard des difficultés liées à l'interprétation et à la faisabilité des méthodes d'estimation *in vivo* de la biodisponibilité des minéraux chez l'homme, des méthodes *in vitro* plus simples, moins chères, basées sur la reproduction *in vitro* des étapes de digestion gastrique et intestinale ont été mises au point. Les méthodes *in vitro* d'estimation de la biodisponibilité des minéraux permettent d'effectuer des criblages avant de passer aux études humaines *in vivo*. Selon Fairweather-Tait et al. (2005), les méthodes *in vitro* ont eu un grand succès du fait qu'elles satisfont au besoin continu de prédire la biodisponibilité du fer et du zinc, réduisant les dépenses occasionnées par les essais *in vivo*.

1.4.3.2.1. Extractabilité à l'acide chlorhydrique

Elle consiste en une simple hydrolyse des aliments par de l'acide chlorhydrique 0,03 N à 37°C suivie d'une filtration. Elle a été utilisée pour évaluer l'effet de certains procédés sur la biodisponibilité des minéraux (Khetarpaul et Chauhan, 1989 ; Sharma et al., 1997 ; Duhan et al., 2002). Cependant les résultats obtenus par cette technique ne sont pas bien corrélés à ceux fournis par les autres méthodes à cause des variations du pH au cours de la digestion dont elle ne tient pas compte.

1.4.3.2.2. Digestibilité *in vitro*

En 1936, Schakleton et al., créent une méthode *in vitro* d'estimation de la biodisponibilité du fer par extraction du fer ionisable dans les aliments avec une solution chélatrice d' α - α' -dipyridyl. Cette méthode a été jugée insuffisante car ne prend pas en compte les conditions de l'organisme. Jacobs and Greenman (1969) et Ranhotra et al. (1971) mettent au point une autre technique d'estimation de la biodisponibilité du fer qui consiste à ajouter aux aliments une solution de pepsine-HCl. Cependant cette technique ne tient pas compte de l'intestin qui est le lieu d'absorption du fer. Narasinga et al. (1978) mettent au point une méthode qui prend en compte les 2 techniques à pH 1,35 et à pH 7 simulant les conditions gastriques et intestinales. A pH acide c'est-à-dire dans l'estomac, le fer est soluble, une fois dans l'intestin où le milieu est à pH 7, le fer se lie à d'autres composés et forment des complexes insolubles.

Miller et al. (1981) se basent sur les mêmes principes que Narasinga et al. (1978) et mettent au point la méthode de digestibilité *in vitro* par la technique de dialyse. Ces auteurs procèdent par variation graduelle du pH mais aussi par la mise en place d'une membrane de dialyse pour mimer le passage des ions solubles au niveau de l'intestin. La méthode de dialyse reprend les deux étapes d'incubation de la digestion : la première d'une durée de 1 h, en présence de pepsine acide correspond à la phase gastrique ; la seconde d'une durée de 2h30 avec la pancréatine-bile et à pH 7 à la phase intestinale. On procède ensuite à un dosage du fer dialysable. Plusieurs travaux ont montré une corrélation entre les résultats de

la méthode de Miller et *al.* (1981) et ceux obtenus *in vivo* Schricker et *al.* (1981); Hazell & Johnson (1987b); Hurrell et *al.* (1988); Forbes et *al.* (1989). Parmi les différentes méthodes *in vitro* mises au point, la méthode de dialysabilité est la plus utilisée pour prédire la biodisponibilité des minéraux (Glahn, 1998; Miller et *al.*, 1981).

La méthode de Miller et *al.* (1981) a connu des évolutions. Wolters et *al.* (1993) ajoute après l'étape de dialyse un système de fibre creuse afin de mieux représenter l'idée de continuité des minéraux absorbés. Wolfgor et *al.* (2002) proposent l'utilisation d'un système tampon pour un pH plus stable et des résultats plus répétables. Par la suite, la dialyse a été remplacée par une centrifugation (Bermejo et *al.*, 2002). La digestibilité *in vitro* a permis de mieux comprendre la biodisponibilité des minéraux dans les plats consommés, dans les aliments fortifiés (Wolfgor et *al.*, 2002) et dans les céréales biofortifiées ainsi que l'effet des facteurs qui réduisent la biodisponibilité tels que les phytates et les polyphénols (Narasinga et *al.*, 1982 ; Anand et *al.*, 1995).

1.4.3.3. Modèles *ex vivo*

1.4.3.3.1. Modèle cellulaire Caco-2

La méthode a été mise au point par Gangloff et *al.* (1996). La lignée de cellules Caco2 est utilisée pour déterminer la quantité de fer absorbée au niveau de l'intestin humain (Han et *al.*, 1994 et 1995). Les cellules Caco-2 sont des cellules d'origine humaine (carcinome colique) qui possèdent de nombreuses caractéristiques des cellules de l'épithélium intestinal et capables d'absorber les minéraux selon les mêmes modalités que les entérocytes (Engle et *al.*, 1998). Le modèle Caco2 couplé aux techniques de digestion *in vitro* forment un système unique réunissant la digestion gastrique suivie de la digestion intestinale en présence d'une couche monocellulaire de cellules Caco2. Cette méthode a principalement été appliquée à l'évaluation de l'absorption du fer, et non du zinc. Le modèle Caco2 couplé à la méthode de digestion *in vitro* en utilisant une membrane de dialyse qui protège les cellules de l'action des enzymes peut être un bon indicateur de l'absorption du fer (Glahn et *al.*, 1998). La méthode utilisant le modèle Caco2 est plus pratique et plus facile à réaliser comparé au modèle *in vivo*. L'absorption du fer est évaluée par une quantification de la ferritine au bout de 3 à 4 heures (Fairweather-Tait et *al.*, 2005). Glahn et *al.* (1998) ont conclu à une bonne sensibilité et exactitude de cette méthode. Le modèle Caco2 permet de prédire l'effet de l'acide ascorbique et des polyphénols sur la biodisponibilité du fer (Yun et *al.*, 2004). Oikeh et *al.* (2003) ont utilisé également ce modèle couplé à la digestion *in vitro* pour évaluer l'absorption en fer de 20 variétés de maïs résistant à la sécheresse, aux maladies et ayant un bon rendement agricole. Cette méthode a permis d'évaluer la biodisponibilité des minéraux dans diverses matrices alimentaires (Sharp, 2005). Huh et *al.* (2004) ont mis en évidence l'influence des peptides sur l'absorption du fer. Proulx et *al.* (2007) ont également utilisé ce modèle cellulaire pour montrer l'influence des procédés sur l'absorption des minéraux.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne prend pas en compte la régulation du fer par l'hépcidine.

1.4.3.4. Méthodes d'estimation par calcul

1.4.3.4.1. Rapports molaires phytates minéraux

Du fait du principal rôle inhibiteur des phytates dans l'absorption des minéraux, les ratios molaires phytate/minéral sont utilisés pour évaluer l'absorption du minéral dans l'organisme. Ces rapports ont été utilisés pour la première fois par Davies et Olpin en 1979 à partir de leurs expériences sur le rat montrant l'inhibition des phytates sur le zinc. Les travaux de Saha et *al.* (1994) sur les rats ont montré une diminution de l'absorption du zinc et du fer respectivement pour des rapports phytates/zinc supérieurs à 15 et phytates/fer supérieur à 14. Chez l'homme cependant, selon Hurrell et Egli (2010), le rapport molaire phytate/fer doit être inférieur à 1 ou de préférence à 0,4 pour que l'absorption du fer optimale à partir de plats à base de céréales ou de légumineuses sans ajout d'activateur. Dans les plats mixtes, en présence d'un activateur comme l'acide ascorbique ou la viande, un rapport molaire phytate/fer < 6 peut également correspondre à une absorption (Tuntawiroon et *al.*, 1990 ; Hurrell, 2004). Hotz and Brown (2004) ont rapporté une absorption en zinc optimale pour des rapports phytates/zinc inférieurs à 18. Cette méthode a été très utilisée pour déterminer l'effet des procédés tels que le décorticage, le trempage, la fermentation, la germination (Hurrell, 2004 ; Egli et *al.*, 2002).

Cependant une attention est nécessaire car les expérimentations ont été menées sur le rat qui a une forte activité phytasique intestinale. Certains auteurs comme Weaver et Kannan (2002) soutiennent qu'il n'y a pas de stœchiométrie fixe entre l'acide phytique et un minéral à cause de l'impact d'autres facteurs comme les sécrétions digestives.

1.4.3.4.2. Estimation de la biodisponibilité par les algorithmes

Les algorithmes sont des modèles mathématiques qui permettent d'évaluer la biodisponibilité d'un minéral, en prenant en compte la quantité et la forme du minéral, la présence de facteurs inhibiteurs et activateurs et le statut du sujet.

Pour le fer, plusieurs modèles ont été développés. Le premier modèle a été proposé par Monsen et *al.*, (1978). Ce modèle considère l'absorption du fer héminique à 25 %. Le fer des aliments d'origine animale est supposé composé d'environ 40 % de fer héminique. Ce modèle ne s'applique qu'aux aliments d'origine animale ou ceux dont la teneur en fer est connue. Ce modèle a été amélioré par Monsen et *al.* (1982). Il s'est étendu au fer non héminique et considère l'absorption du fer héminique à 23 %. L'inconvénient de ce 2^{ème} modèle est qu'il ne tient pas compte des facteurs inhibiteurs et activateurs présents dans l'aliment et des interactions possibles.

Murphy et *al.* (1992) se basent sur le modèle de Monsen et *al.* (1978) et sur la classification semi-quantitative (FAO, 1988) pour évaluer la biodisponibilité du fer dans les pays en

développement. Selon ce système les aliments sont repartis en 3 catégories : faible biodisponibilité (5% d'absorption du fer), biodisponibilité intermédiaire (10% d'absorption du fer) et biodisponibilité élevée (15% d'absorption du fer). Ce modèle prend en compte les facteurs activateurs tels que l'acide ascorbique ou les protéines animales, ainsi que l'effet inhibiteur du thé mais ne tient pas compte des phytates.

Plusieurs modèles d'algorithmes pour évaluer la biodisponibilité du fer ont été développés, chacun prenant en compte un nombre d'activateurs ou d'inhibiteurs différents. Les deux plus importants sont ceux de Hallberg et Hulthen (2000) et de Reddy et *al* (2000). Ces algorithmes sont basés sur la modélisation de l'absorption du fer mesuré *in vivo*, généralement par méthode isotopique en fonction des différents facteurs : teneurs en phytate, en calcium, en polyphénols, en acide ascorbique, en protéines, etc. Du et *al*. (2000) ont réalisé une étude comparative de ces modèles en évaluant la biodisponibilité du fer dans des plats chinois.

Pour le zinc, 3 modèles ont été développés. Le premier (WHO, 1996) prend en compte un activateur (protéine animale) et 2 inhibiteurs (phytate, calcium). Ce modèle correspond à 3 catégories de biodisponibilité du zinc dans l'alimentation : faible (15% d'absorption), modérée (30 % à 35 % d'absorption), élevée (50 à 55 % d'absorption).

Le second modèle basé sur le premier, développé par Murphy et *al*. (1992), prend en compte les protéines animales et les teneurs en phytates et en calcium. La biodisponibilité est donnée en fonction du ratio molaire phytate/zinc. Si les ratio molaires sont respectivement de 0 à 5, de 5 à 15, de 15 à 30, la biodisponibilité est >30%, 55%, 35%, 15% et 10%.

Le 3^{ème} modèle, du groupe IZiNcG est basé sur les mesures de l'absorption du zinc en utilisant seulement les travaux réalisés sur le zinc dans les aliments. Selon IZiNcG, la biodisponibilité du zinc est de 26 % chez l'homme et 34% chez la femme pour des aliments dont le ratio molaire phytate/zinc est compris entre 4 et 18. Elle est de 25% chez la femme qui a une alimentation dont le ratio molaire phytate/zinc est supérieur à 18.

1.5. Les stratégies de lutte contre les carences en fer et zinc

De nos jours de nombreuses stratégies de lutte contre les carences en micronutriments sont mises en œuvre dans les pays cibles : la diversification alimentaire, la supplémentation, l'enrichissement, la biofortification. Selon la FAO, les approches fondées sur l'amélioration de la qualité nutritionnelle de l'alimentation permettent de répondre durablement aux besoins nutritionnels propres à chaque groupe de population (Kennedy et *al.*, 2003). En 2002, une rencontre de représentants de 7 pays d'Afrique de l'ouest (Burkina Faso, Mali, Côte d'Ivoire, Ghana, Niger, Nigéria, Sénégal) s'est tenue au Ghana en vue de mettre en place des stratégies de lutte contre les carences en micronutriments dans ces Etats. Parmi les actions recommandées figurent la supplémentation, la diversification alimentaire, la promotion de l'allaitement maternel, les mesures de santé publique et l'enrichissement des aliments les plus consommés et les plus largement accessibles. Au Burkina Faso, de nombreuses actions portent sur la lutte contre la carence en vitamine A auprès des jeunes enfants : la supplémentation en vitamine A débutée en 1987 s'est renforcée avec les campagnes de Journées Nationales de Vaccination (JNV) durant lesquelles, depuis 1998 jusqu'à nos jours, des capsules de vitamine A sont données aux jeunes enfants. Certains programmes ont également porté sur la promotion de la consommation de l'huile de palme rouge (Zagré et *al.*, 2003). Peu d'actions portent sur la lutte contre les carences en fer et en zinc auprès des jeunes enfants.

1.5.1. Supplémentation

La supplémentation est une stratégie de lutte contre les carences en micronutriments de court terme, généralement destinée aux groupes à risque tels que les enfants et les femmes enceintes (Hotz & Brown, 2004). La supplémentation en fer et en acide folique une fois par semaine chez des femmes en âge de procréer en Asie du Sud a réduit la carence en fer et amélioré le statut en fer des sujets (Cavalli-Sforza et *al.*, 2005). Dans les pays en développement où les femmes ont de faibles réserves en fer, la supplémentation en fer est conseillée au cours de la grossesse (WHO, 2001). Chez les jeunes enfants des pays en développement, la supplémentation en fer demande une attention particulière. Dans les zones où sévit le paludisme, une supplémentation en fer et en acide folique non ciblée chez des enfants augmenterait le risque d'infections (Oppenheimer, 2001). En Tanzanie, la supplémentation en fer (12,5 mg /jour) et en acide folique chez les enfants d'âge préscolaire a augmenté le risque de morbidité et de mortalité (Sazawal et *al.*, 2006). Dorénavant pour toute supplémentation en fer et en acide folique orientée sur les enfants, l'OMS recommande une supplémentation ciblée vers des enfants anémiés et en risque de carence en fer. Aucune supplémentation de routine en zinc n'existe pour le moment, mais l'OMS et l'UNICEF (2004) recommandent de donner des suppléments de zinc avec les sels de réhydratation orale administrés aux enfants pour lutter contre les diarrhées aiguës.

Au Burkina Faso, la supplémentation a été utilisée pour lutter contre les carences en vitamine A chez les jeunes enfants et contre les carences en fer auprès des femmes enceintes. Il n'y a pas pour le moment de supplémentation en fer ou en zinc ciblée sur les jeunes enfants. Cependant une étude menée dans la province de la Nouna a montré une réduction des cas de diarrhée après l'administration quotidienne de 12,5 mg de sulfate de zinc à 685 enfants âgés de 6 à 30 mois pendant 6 mois (Garenne et *al.*, 2007).

Le choix du supplément est lié à son coût, à sa biodisponibilité, à sa solubilité, à son goût, et aux effets secondaires occasionnés par son administration. La biodisponibilité des suppléments de fer et de zinc dépend du type de supplément et de ces interactions avec les composants de l'organisme. Les sels de sulfate de fer sont généralement les plus utilisés comme suppléments oraux du fait de leur biodisponibilité élevée et de leur moindre coût.

Il existe plusieurs sortes de suppléments de zinc : le sulfate de zinc, l'acétate de zinc, le gluconate de zinc. L'absorption du zinc est meilleure avec les sels de sulfate de zinc et ceux d'acétate de zinc comparés aux sels de carbonate de zinc (Oelshlegel and Brewer, 1977). Les suppléments de zinc ont des solubilités différentes dans les solutions aqueuses. Le sulfate de zinc est très soluble comparé à l'acétate de zinc qui est moins soluble et au carbonate de zinc et oxyde de zinc qui sont pratiquement insolubles (Budavari et *al.*, 1989). Prasad et *al.* (1993) ont rapporté une absorption meilleure des sels de sulfate et d'acétate de zinc et une faible absorption pour les sels d'oxyde de zinc.

Cette approche n'est pas sans difficultés liées aux problèmes de logistique et de compliance. Allen (1998) a rapporté un goût inacceptable après l'administration de plus de 3 mg de zinc sous forme de citrate de zinc.

Plusieurs études *in vivo* sur des animaux (Sreedhar et *al.* ; 2004 ; Bodiga et *al.*, 2007) et *in vitro* (Zago et *al.*, 2000 ; Zago et *al.*, 2001) ont rapporté une compétition entre le zinc et le fer de supplémentation. Le zinc entre en compétition avec le fer au niveau des membranes des cellules ou dans les liaisons avec les protéines (Powell, 2000 ; Prasad, 2004). D'autres études réalisées sur des enfants ont également rapporté une inhibition de l'absorption du zinc après une supplémentation en fer (Lind et *al.*, 2003 ; Dijkhuizen et *al.*, 2001).

Une supplémentation en calcium aurait également un effet inhibiteur de l'absorption du fer. Cependant cet effet n'est pas certain, il a été observé sur des plats simples et lors d'une supplémentation de courte durée (Gleerup et *al.*, 1995).

1.5.2. Diversification ou modification alimentaire

La diversification alimentaire réunit toutes les interventions visant à accroître la teneur en micronutriments dans l'alimentation et à améliorer la biodisponibilité des micronutriments à l'échelle du ménage. Cette stratégie a l'avantage d'être mieux acceptée sur le plan culturel et économique comparée aux autres stratégies. Des travaux réalisés par Ruel & Harimond (2003) ont montré un lien entre une importante diversification alimentaire et un meilleur état nutritionnel des enfants de 6 à 23 mois dans plusieurs pays d'Afrique. Aussi la promotion de la consommation des aliments à teneur élevée en micronutriments et la réduction des facteurs inhibiteurs de l'absorption des micronutriments sont les stratégies

utilisées. La consommation des aliments à teneur élevée en micronutriments consiste à promouvoir l'allaitement exclusif pour les moins de 6 mois et la consommation d'aliments d'origine animale pour les autres groupes de populations. Les aliments d'origine animale ont des teneurs importantes en micronutriments biodisponibles. L'incorporation de certains aliments d'origine animale tels que la viande ou le poisson séchés ou des aliments activateurs de l'absorption comme l'acide ascorbique (Allen *et al.*, 1997) pourrait également être utilisée. Par exemple, l'ajout de poudre d'arêtes de poissons séchés ajouté aux farines infantiles est un bon moyen de lutte contre les carences en zinc car ne demande pas de conditions de conservation particulières et peut être consommé dans les régions où il y a des interdictions religieuses ou culturelles sur la consommation de la viande (Temple *et al.* 2002).

La réduction des facteurs inhibiteurs de l'absorption des micronutriments dans les aliments d'origine végétale à travers différents procédés est détaillée dans le paragraphe 1.5.5. L'ajout de phytases exogènes dans l'alimentation a également montré son efficacité dans l'amélioration de l'absorption des micronutriments (Egli *et al.*, 2002). La réduction des facteurs inhibiteurs peut aussi être obtenue par la sélection variétale ou le génie génétique. L'outil-clé de cette approche de lutte contre les carences en micronutriments est l'éducation et la communication. Des connaissances sur l'alimentation, les procédés de production, les attitudes sont nécessaires auprès des populations concernées. Au Burkina Faso, de nombreuses campagnes de sensibilisation ainsi que des séances d'éducation nutritionnelle ont été réalisées par le projet « huile de Palme rouge » dans le cadre de l'amélioration du statut en vitamine A à travers la consommation de l'huile de palme rouge. Ce projet pilote conduit de 1999 à 2001 a été un exemple réussi de lutte contre la carence en vitamine A dans le Sud-Ouest du Burkina Faso où son efficacité a été mise en évidence. La consommation de vitamine A a augmenté de 235 ± 23 à 655 ± 144 μg équivalents d'activité rétinol (EAR) pour les mères (41 à 120 % du niveau de consommation sans danger), et de 164 ± 14 à 514 ± 77 μg EAR pour les enfants (36 à 97 %) (Zagré *et al.*, 2003).

Cependant la mise en œuvre de cette approche de lutte est difficile pour plusieurs raisons : le faible revenu des ménages ne permet pas d'acheter des aliments d'origine animale comme la viande et le poisson qui sont chers, les habitudes alimentaires, les croyances et les tabous des populations ainsi que les disponibilités saisonnières.

1.5.3. Enrichissement

L'enrichissement est défini comme l'addition à un aliment d'un ou plusieurs nutriments essentiels, normalement contenus ou non dans l'aliment, avec pour objectif de prévenir ou de corriger une carence en un ou plusieurs nutriments, au sein d'une population ou de groupes de population spécifiquement vulnérables (FAO/WHO, 1994). C'est une stratégie à long terme. Elle a été utilisée depuis longtemps dans les pays industrialisés pour lutter contre les carences en vitamine B (riboflavine, thiamine, niacine) en iode et en fer. L'iodation du sel a été adoptée au début des années 1920 en Suisse (Burgi *et al.*, 1990) et aux États-Unis d'Amérique (Marine *et al.*, 1920). Au début des années 1940, l'enrichissement

des produits céréaliers a été une pratique courante. Elle est difficilement mise en œuvre au niveau des pays en développement. Ces dernières années au vu des bons résultats obtenus dans les programmes d'enrichissement du sucre en vitamine A en Amérique centrale, l'enrichissement est devenu une option intéressante dans les pays les moins industrialisés pour lutter contre les carences en micronutriments. L'enrichissement se base sur des aliments vecteurs couramment utilisés par les populations tels que le lait, l'huile, le sucre, la farine, le bouillon cube.

De 2003 à 2008, des programmes d'enrichissement du fer dans la farine se sont déroulés en Afrique du Sud, au Nigéria, au Ghana. Au Burkina Faso et dans d'autres pays de l'Afrique de l'Ouest, les programmes de fortification à large échelle, ont démarré en 2009. MI (Micronutrient Initiative), HKI (Hellen Keller International) et l'UNICEF développent depuis plusieurs années un programme de fortification en vitamine A des huiles, en fer, zinc et folates des farines de céréales. Mais pour des raisons pratiques et pour un meilleur contrôle, l'enrichissement se fait généralement dans les farines de céréales produites de manière centralisée, dans des unités de production industrielle. Ainsi, au Burkina Faso, c'est la farine de blé qui est fortifiée. On peut s'interroger sur l'efficacité de ce type de stratégie sachant que les produits à base de blé (le pain principalement) sont consommés surtout en milieu urbain et sont peu accessibles aux ménages les plus vulnérables.

Le NaFeEDTA a été utilisé comme fortifiant dans du sucre au Guatemala (Viteri et al., 1978), dans la poudre de curry en Afrique du Sud (Ballot et al., 1989), dans de la sauce de poisson au Vietnam (Huo et al., 2002), dans de la sauce de soja en Chine et dans la farine de maïs au Kenya (Andang'o, et al., 2007). Au niveau des aliments de complément, des suppléments en poudres à disperser (sprinkles) ont prouvé leur efficacité au niveau de population cibles principalement pour le fer (Gibson & Hotz 2000; Davidsson 2003). L'utilisation de poudres contenant du fer et d'autres micronutriments essentiels au Bangladesh, Cambodge, Ghana, Haïti a donné de bons résultats sur la réduction de l'anémie au niveau des enfants et à augmenté les niveaux d'hémoglobine (Zlotkin et al. 2001, 2003a, 2005). Les fortifiants utilisés pour l'enrichissement du zinc sont généralement l'oxyde de zinc et le sulfate de zinc. Plusieurs facteurs entravent l'efficacité des programmes d'enrichissement dans les pays en développement: le faible pouvoir d'achat des populations, le coût élevé des matières premières, la consommation limitée de ces produits enrichis au niveau de la population. Des difficultés existent également sur le choix de l'aliment vecteur et du type de supplément à utiliser. La principale difficulté de l'enrichissement dans les pays en développement est liée aux choix de l'aliment vecteur notamment un aliment produit à l'échelle industrielle, tout se fait au niveau des ménages.

L'enrichissement des aliments en fer est plus difficile comparé à celui de l'iode dans le sel ou de celui de la vitamine A dans l'huile. En effet la plupart des composés de fer sont solubles dans l'eau ou dans l'acide (tableau 1-15) et réagissent avec des composants de l'aliment entraînant ainsi des modifications de la couleur, de la flaveur ou une oxydation des lipides (Hurrell, 2002). Le choix du composé ferrique et du type de fortification est fonction de l'aliment vecteur, des besoins en fer de la population ciblée et de la biodisponibilité du fer

dans l'aliment. Pour une fortification en fer de masse, la farine des céréales est généralement utilisée comme aliment vecteur, bien que l'absorption du fer soit faible dans les farines de céréales à cause de la présence de phytates et d'autres facteurs inhibiteurs (Hurrell et *al.*, 2002 ; Hurrell et *al.*, 2004). Selon leur biodisponibilité, les fortifiants ferreux recommandés par l'OMS (WHO, 2006) sont le sulfate ou le fumarate ferreux, ou le pyrophosphate ferrique. Les fortifiants ferreux ont une faible biodisponibilité, seulement 15 % du fer est absorbé (Hallberg and Rossander-Hulthén, 1991).

L'enrichissement d'un même aliment à la fois en fer et en zinc pourrait entraîner une compétition entre les minéraux. Solomons et *al.*, (1981) ont observé une inhibition de l'absorption du zinc, un ratio molaire fer/zinc égal à 1 inhibe l'absorption et la circulation sanguine du zinc. D'autres auteurs comme Lonnerdal et *al.* (2000) soutiennent qu'il n'y a pas d'effet négatif du fer sur l'absorption du zinc s'ils sont apportés en quantités égales. De faibles risques d'interactions ont été rapportés en cas de fortification de micronutriments dans les aliments d'origine végétale.

Selon Berger (2003), le succès d'un programme d'enrichissement requiert une volonté politique affirmée et la collaboration du secteur privé, des scientifiques, des consommateurs, des agences internationales et des ONG.

Tableau 1-15 : Principales formes de fer utilisées en fortification (Hurrell et *al.*, 2002)

Composés en fer	Quantités de fer (%)	Biodisponibilité (%)	Aliments communément enrichis
Solubles dans l'eau			
Sulfate ferreux-7H ₂ O	20	100	Aliments pour nourrissons, pain, pâtes
Gluconate ferreux	12	89	
Lactate ferreux	19	100	
Citrate d'ammonium ferrique	18		
Sulfate d'ammonium ferreux	14		
Peu solubles dans l'eau/soluble dans l'acide dilué			
Fumarate ferreux	33	100	céréales pour enfants Poudres chocolatées
Succinate ferreux	35	92	
Saccharate ferrique	10	74	
Glycerophosphate ferrique	15		
Citrate ferreux	24	74	
Tartrate ferreux	22	62	
Insoluble dans l'eau/peu soluble dans l'acide dilué			
Pyrophosphate ferrique	25	21-74	Céréales pour enfants Poudres chocolatées Farine de blé, céréales
Orthophosphate ferrique	28	25-32	
Fer électrolytique	97	75	

1.5.4. Biofortification

La supplémentation, l'enrichissement, la diversification alimentaire ont permis de réduire la morbidité et la mortalité dues aux carences en micronutriments. Cependant l'efficacité de ces stratégies reste insuffisante pour des raisons liées au coût, à la compliance, au problème de logistique, etc.. En Inde, un programme de lutte contre l'anémie mis en place depuis 1970 n'a pas eu un réel impact sur les populations du fait de problèmes de management, de logistique, de compliance (Vijayaraghavan, 2002). Plusieurs des interventions ont été bloquées pour des questions d'argent.

La biofortification est une approche alternative à long terme qui consiste à améliorer les teneurs en micronutriments biodisponibles des aliments de base. Elle se fait par sélection variétale classique, par modifications génétiques (OGM) ou par des pratiques agricoles telles que la fertilisation du sol en un minéral donné (Hotz, 2009). La sélection variétale a permis d'augmenter les teneurs en zinc des grains de haricot (*Phaseolus vulgaris L.*), de riz, du blé, du maïs (Welch & Graham, 2004) sans baisse de rendement des grains. Cependant

l'effet des procédés sur la rétention et la biodisponibilité de ce zinc ne sont pas encore évalués.

Les techniques de marquages moléculaires ont rendu possible l'identification chez certains végétaux du matériel génétique contrôlant les teneurs en nutriments et anti-nutriments, de sorte qu'il est aujourd'hui possible d'effectuer des sélections variétales en fonction de ces critères (Kennedy et *al.*, 2003). Briat et *al.* (2010) ont rapporté une augmentation de la teneur en fer en augmentant la teneur en phytoferritine dans une variété de riz. Raboy (2000) a observé une réduction de la teneur en phytates de 2 à 3 fois dans des variétés génotypiques de maïs, d'orge et de riz comparée à la teneur en phytates des variétés sauvages. Dans les plats constitués uniquement de céréales, l'augmentation de l'absorption du fer nécessiterait une réduction de près de 90 % de la teneur en phytates (Hallberg et *al.*, 1989). Des études réalisées *in vivo* à partir d'isotopes stables ont montré une augmentation de l'absorption du zinc chez des adultes ayant consommé de la polenta ou des tortillas faits à partir de variétés hybrides de maïs à faibles teneurs en phytates comparées aux teneurs en phytates des variétés sauvages ou normales (Hambidge et *al.*, 2004).

Des essais ont été pratiqués en Turquie sur l'optimisation de la teneur en zinc dans les aliments de base des populations tels que le maïs, le blé, le sorgho par la fertilisation du sol en zinc (Yilmaz et *al.*, 1997). Lucca et *al.* (2001) ont diminué les teneurs en phytates du riz en introduisant un gène codant pour une phytase de *Aspergillus fumigatus*.

Dans les pays en développement où les céréales sont le plus souvent décortiquées avant d'être consommées entraînant une élimination importante du fer, il semble difficile d'améliorer les teneurs en fer biodisponibles par la seule sélection variétale. La modification génétique pourrait être une voie plus efficace pour augmenter les teneurs en fer (Zimmermann et *al.*, 2002, Lonnerdal, 2003)

Aussi de grands programmes de recherche comme Harvest Plus menés par des organismes internationaux (CGIAR, CIAT et IFPRI, ICRISAT) ont pour objectif la mise au point de variétés biofortifiées pour lutter contre les carences en micronutriments. Ils se concentrent sur trois micronutriments d'importance cruciale, et reconnus par l'OMS comme étant les plus limitants dans les régimes alimentaires des populations pauvres : la vitamine A, le fer et le zinc. Cette stratégie a permis la mise au point de différentes variétés telles que le maïs riche en protéine, le manioc et la patate douce riche en carotène, le riz riche en fer, le riz riche en vitamine A (IFPRI, 2002). Présentement au Burkina Faso, des fortes campagnes de sensibilisation sur la consommation de la patate douce enrichie en vitamine A à chair orange sont en cours dans tout le pays. La patate douce à chair orange est un exemple d'amélioration du statut en vitamine A à travers la biofortification. Cependant, la patate douce à chair orange est traditionnellement peu consommée par les populations, et son adoption rencontre des difficultés.

1.5.5. Amélioration de la biodisponibilité des minéraux à travers les procédés

Dans les pays en développement où les carences en micronutriments sont fréquentes du fait d'une alimentation essentiellement d'origine végétale, avec une consommation d'aliments d'origine animale faible pour des raisons économiques, culturelles, religieuses. Au cours de la transformation des céréales dans les ménages, plusieurs procédés peuvent améliorer la biodisponibilité des micronutriments du plat final à base de céréales tels que le décortilage, la germination, la fermentation, le trempage (Hurrell et *al.*, 2004 ; Egli et *al.*, 2002). L'influence de ces différents procédés sur l'absorption du fer et du zinc a été décrite dans la partie « procédés de transformation ». Le tableau 1-16 décrit les effets et conséquences nutritionnelles de quelques procédés utilisés dans les ménages sur les micronutriments. Pour la plupart ces procédés améliorent la biodisponibilité du fer du zinc, du calcium et vitamines. Cet effet peut être dû à une réduction de la teneur en phytates ou en oxalate tel qu'observé au décortilage et au cours de la cuisson ébullition, ou à une dégradation des phytates sous l'action des phytases tel qu'observé au cours de la fermentation ou de la germination (Mouquet et *al.*, 2001 ; Traoré et *al.*, 2004 ; Afifi et *al.*, 2011). Les inconvénients sont essentiellement l'inactivation de certaines vitamines essentielles sensibles à la chaleur tel qu'observé au cours des procédés thermiques, et la réduction importante de certains micronutriments et notamment du fer et du zinc au cours du décortilage et du trempage.

Tableau 1-16: Influence des procédés utilisés au niveau des ménages sur la biodisponibilité des nutriments des aliments d'origine végétale (Gibson *et al.*, 2006)

Procédés	Influences majeures	Conséquences nutritionnelles
Procédé thermique	Libère les vitamines liées à des complexes à faible digestibilité Inactive les facteurs sensibles à la chaleur Dégrade les phytates mais en fonction de la température Gélatinise l'amidon	Améliore : - biodisponibilité de la vitamine B6, niacine, folate, caroténoïdes, thiamine, iode, zinc, fer, calcium - digestibilité des protéines et de l'amidon
Friture	Induit des réactions de Maillard dans les aliments contenant du sucre.	Détruit les acides aminés essentiels : lysine, arginine, méthionine, réduit la digestibilité et la qualité des protéines.
Cuisson ébullition	Réduit les teneurs en oxalate	Augmente l'absorption du calcium
Germination	Augmente : activité phytasique par l'activation de phytases, activité α -amylasique des céréales, réduit les teneurs en polyphénols des légumes	Induit l'hydrolyse des phytates et augmente l'absorption du fer, du zinc et du magnésium, facilite la digestion de l'amidon
Décorticage	Réduit les teneurs en phytates selon leur localisation	Augmente la biodisponibilité du zinc, du calcium et du fer bien qu'il ait aussi diminution des teneurs en ces minéraux.
Fermentation microbienne	Induit l'hydrolyse des phytates par les phytases Augmente les teneurs en acides organiques Détruit les inhibiteurs des protéines	Augmente la biodisponibilité du zinc, du calcium et du fer, Améliore la qualité des protéines dans le maïs, les légumes et les grains de céréales.

Chapitre 2. Matériels et méthodes

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse a comporté 2 volets. Le premier avait pour but de déterminer la contribution des plats céréaliers à la nutrition des jeunes enfants du Burkina Faso. Pour cela, des enquêtes de consommation alimentaire ont été réalisées auprès d'enfants âgés de 6 mois à 36 mois. Le deuxième volet s'intéressait aux effets des procédés de transformation primaire des céréales et de préparation de plats traditionnels céréaliers sur leurs teneurs en fer, en zinc et en facteurs réduisant leur biodisponibilité, ainsi que la bioaccessibilité de ces micronutriments évaluée par des méthodes *in vitro*. Les différents matériels utilisés, les protocoles des études réalisées et les méthodes analytiques et statistiques employées sont décrits dans ce chapitre.

2.1. Matériels

Le matériel végétal utilisé est constitué de céréales : mil, sorgho et maïs.

2.1.1. Variétés de mil

Trois variétés de mil (« *casui* » en langue mooré) de l'espèce *Pennisetum glaucum* ont été utilisées : une variété locale appelée « Gampèla » et deux variétés biofortifiées. Les grains de la variété Gampèla sont de couleur jaune et le cycle de floraison de cette variété est de 120 jours. Elle est cultivée au Burkina Faso et très consommée par la population. L'approvisionnement en cette variété a été réalisé auprès des producteurs locaux du village de Gampèla situé à environ 50 km de la capitale Ouagadougou.

Les 2 autres variétés de mil, Tabi et GB8735, résultent de sélection variétale réalisée par l'ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics). Ces deux variétés ont été sélectionnées sur leur capacité à résister à la sécheresse au Niger, au Burkina Faso, et au Mali et sur leurs teneurs élevées en fer et en zinc. Le mil GB8735 a été mis au point en 1984. Son cycle de floraison est de 48 à 50 jours, ses grains sont de forme globulaire et de couleur grise. La variété de mil Tabi a été développée en 2009 au Mali. Les grains sont fins et de couleur jaune, son cycle de floraison est de 55 à 60 jours.

Les différents lots de grains utilisés dans chacune des études seront précisés dans le paragraphe « protocoles d'études ».

2.1.2. Variétés de sorgho blanc

Deux variétés de sorgho blanc de l'espèce *Sorghum bicolor* ont été utilisées : une locale et une biofortifiée. La variété locale est appelée « fibmigou » en langue mooré, ce qui signifie « glumes rouges ». Elle est originaire du plateau central et est très appréciée par la population du Burkina Faso. Son cycle de floraison est de 110 jours. Elle a été obtenue auprès de producteurs sur le site de Gampèla.

La variété biofortifiée « Tiéblé » a été sélectionnée par l'ICRISAT pour sa résistance au décorticage (rendement de décorticage plus élevé entraînant moins de pertes en nutriments). C'est un écotype local issu de la collection malienne de sorgho. Son cycle de floraison est de 90 jours.

2.1.3. Variété de maïs

La variété de maïs (*Zea mays*) utilisée est appelée « Kamboinsè Précoce Blanc » (KPB). C'est une variété à pollinisation libre, mise au point par l'INERA (Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agronomique) dans l'objectif d'améliorer le rendement des récoltes et de lutter contre les problèmes de sécheresse au Sahel. Ses grains sont de couleur blanche et de type demi-denté. Son cycle est de 90 jours. Cette variété a été choisie du fait de sa forte consommation au Burkina Faso.

2.2. Protocoles d'études

2.2.1. Enquêtes de consommation alimentaire auprès des jeunes enfants au Burkina Faso

La situation alimentaire et nutritionnelle des jeunes enfants du Burkina Faso a été appréciée sur différents sites à partir d'enquêtes de consommation alimentaire par pesées et de mesures anthropométriques. L'étude s'est déroulée dans trois zones agro-écologiques différentes, au nord, au centre et à l'ouest du pays, de Janvier à Avril 2009. Les pratiques et la consommation alimentaire des enfants de 6 à 36 mois ont été appréciées dans les ménages à l'aide de questionnaires administrés aux personnes qui s'occupent des enfants. Une mesure des ingérés de l'enfant sur une journée a permis d'estimer les apports en énergie et en nutriments à partir de l'alimentation chez les enfants enquêtés. Les mesures anthropométriques ont permis d'évaluer l'état nutritionnel de notre échantillon et de calculer les pourcentages de maigreur, de retard de croissance et d'insuffisance pondérale.

Le protocole d'enquête, élaboré en partenariat entre les équipes IRD-Nutripass et IRSAT-DTA, a été approuvé par le comité d'éthique pour la recherche en santé du ministère de la santé du Burkina Faso. Les enquêtes au centre et à l'ouest ont été réalisées sous la supervision de Barbara Baille, ingénieur d'étude IRD, et Julien Rougerie (Rougerie, 2009), étudiant en stage de master IRD et j'ai pour ma part supervisé la réalisation des enquêtes au nord.

2.2.1.1. Description des zones d'étude

Les enquêtes ont été menées sur six sites au nord, au centre et à l'ouest. Dans chaque région, un site urbain correspondant à la ville principale et un site rural correspondant à un village situé à au moins 30 km d'un centre urbain ont été choisis pour l'enquête, afin de réduire les effets des habitudes citadines sur la consommation alimentaire dans le village. En fonction de ces critères, les paires villes-villages choisis pour l'étude ont été Dori et Bombofa au nord, Ouagadougou et Komsilga au centre, et enfin Bobo-Dioulasso et Kokorowé à l'ouest (figure 2-1).

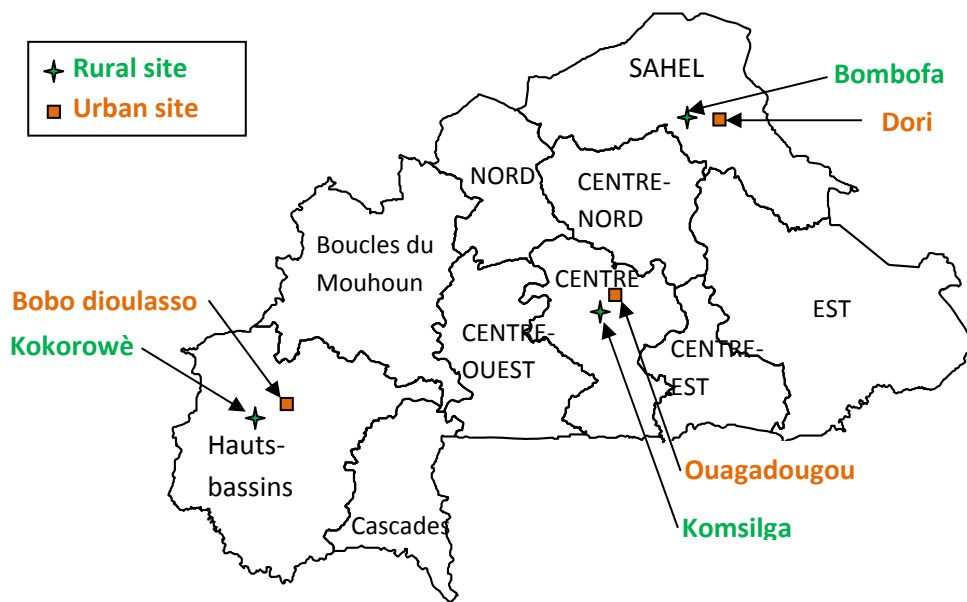


Figure 2.1 : Carte des différentes régions du Burkina Faso indiquant les sites d'enquête.

2.2.1.2. Echantillonnage

L'enquête a été menée auprès de 630 enfants âgés de 6 mois à 36 mois, répartis en 3 classes d'âge : 6-11 mois, 12-23 mois et 24-35 mois. 105 enfants ont été enquêtés sur chacun des 6 sites, avec 35 enfants par classe d'âge. Les enfants ont été sélectionnés de façon aléatoire sur chaque site en respectant les critères d'éligibilité. Ces critères étaient que l'enfant ait commencé à recevoir des aliments autres que le lait maternel et qu'il ne souffre pas de malnutrition sévère (voir fiche d'éligibilité en annexe 2-1).

A Ouagadougou et à Bobo-Dioulasso, les ménages ont été choisis à partir de coordonnées GPS de 35 points (+ 15 points supplémentaires) tirés au sort sur des cartes électroniques. A Ouagadougou, le tirage au sort a été effectué sur une liste de 1000 ménages réalisée lors d'une enquête de consommation alimentaire précédente (Becquey, 2010). Les coordonnées GPS de tous les ménages étaient déjà disponibles. A chaque point GPS, le premier ménage enquêté était celui se trouvant le plus proche. Plusieurs ménages ont été visités aux alentours de ce point de façon à trouver 3 ménages ayant chacun un enfant de l'une des trois classes d'âge. Lorsqu'il n'y avait pas d'enfant éligible dans un ménage, un autre, situé dans la direction désignée par un stylo lancé en l'air, a été visité. Si dans un même ménage, plusieurs enfants étaient éligibles, l'un d'eux a été désigné par tirage au sort. Lorsque le quartier correspondant au point GPS n'était pas habité, le point GPS suivant sur la liste des 35 (+15) points retenus était visité.

A Dori, des registres de recensement des quartiers ont été utilisés pour réaliser un tirage au sort des ménages à enquêter. S'il n'y avait pas d'enfant éligible dans le ménage choisi, le ménage suivant sur la liste des tirés au sort était visité.

Dans les villages de Kokorowé, de Komsilga et de Bombofa, lorsque les registres de recensement étaient disponibles, le choix des ménages a été fait comme précédemment. Sinon, le centre du village était pris comme point de départ et une direction était prise en jetant un stylo en l'air. Tous les ménages situés dans la direction indiquée par le stylo, du centre du village au bout de la direction désignée ont été comptés et le « pas de sondage » correspondant au rapport taille de l'échantillon (nombre total d'enfants à enquêter dans le village) / nombre de ménages dénombrés dans la direction indiquée par le stylo a été calculé. En partant du centre du village, le pas de sondage indiquait alors le nombre de ménages à enquêter dans cette direction.

2.2.1.3. Critères d'éligibilité

Pour être éligible, l'enfant doit être tout d'abord dans la tranche d'âge de 6 mois à 36 mois. Lorsque l'âge de l'enfant n'a pas pu être déterminé, l'enfant n'a pas été retenu pour l'enquête. Lorsque l'âge est déterminé, l'enfant doit appartenir à l'une des classes d'âge 6-11 mois, 12-23 mois, 24-35 mois et avoir commencé à consommer des aliments autres que le lait maternel (fiche d'éligibilité en annexe 2-1). Le chef de ménage ainsi que la personne qui s'occupe de l'enfant doivent donner leur accord pour la participation de leur enfant à l'enquête, indiquer leur disponibilité et signer un formulaire de consentement (annexe 2-2) après qu'on lui ait expliqué le déroulement et les objectifs. Afin de retrouver les ménages sélectionnés pour les visites ultérieures, des indications sur la position géographique du ménage ainsi qu'un numéro de téléphone si possible étaient enregistrées.

2.2.1.4. Recueil de l'âge

L'âge de l'enfant est calculé à partir des pièces justificatives existantes (acte de naissance, carnet de santé). S'il n'y a aucun document, l'âge est estimé à partir d'un calendrier d'événements locaux remis à l'agent (annexe 2-1). Dans ce cas, l'âge est estimé au mois près et l'enfant est considéré comme né au jour 15 du mois. Seuls les enfants dont les âges ont pu être calculés ou estimés ont été retenus. Le poids de naissance des enfants était systématiquement enregistré lorsque l'information était disponible dans le carnet de santé de l'enfant.

2.2.1.5. Mesure des ingérés par pesées

L'objectif de ces mesures était double : il s'agissait d'une part de déterminer la couverture des besoins nutritionnels des enfants par l'alimentation et d'autre part d'identifier les plats les plus consommés par les jeunes enfants. Tous les aliments consommés par l'enfant sont pesés en tenant compte des pertes. Le jour de l'enquête, il était demandé à la personne s'occupant de l'enfant de le servir dans une assiette à part, afin de faciliter les pesées. L'enquêteur pesait l'assiette avant et après consommation. Il suivait également la préparation de tous les plats donnés à l'enfant. Pour les plats préparés dans le ménage, l'enquêteur pesait tous les ingrédients entrant dans la préparation du plat. Lorsque les plats étaient achetés ou donnés, le nom précis du plat était relevé et une recette

moyenne a été établie à partir d'un minimum de trois observations de ce plat auprès de restauratrices. Lorsque les plats avaient été préparés la veille, il était demandé à la personne ayant fait le plat un rappel des ingrédients et une estimation de leur quantité. L'enquêteur restait dans le ménage du lever de l'enfant jusqu'à son coucher. Les informations relatives aux mesures des ingérés ont été notées dans la fiche de questionnaire de mesures des ingérés (Annexe 2-3).

Le choix de cette technique d'évaluation des ingérés de l'enfant, très lourde, s'est appuyé sur les résultats d'étude comparative de la méthode de mesure des ingérés par pesée à celle du rappel de 24 h (Baille, 2008). Cette étude réalisée en 2008 à Ouagadougou a comparé les deux méthodes chez 60 enfants de 12 à 59 mois. Les résultats obtenus par les deux méthodes étaient assez différents, le rappel de 24 h donnant des apports en fer, zinc, énergie plus faibles et dans certains cas des apports en vitamine A et vitamine C plus élevés. Ceci peut s'expliquer par des oublis de la mère ou un complexe de dire réellement ce que l'enfant a consommé ou encore tout simplement une mésestimation des quantités d'aliment ingérées par l'enfant. En effet, au Burkina Faso, les enfants de cet âge sont généralement servis dans la même assiette que celle de leur mère et mangent à la main, ce qui rend difficile l'estimation des quantités ingérées.

Des prélèvements d'environ 20 g ont été faits sur les différents plats pour la détermination de leur teneur en matière sèche (TMS). Pour les plats non homogènes constitués de poissons, ou de viande par exemple, l'échantillon prélevé devait contenir un nombre de morceaux proportionnels à la composition du plat. Les échantillons prélevés étaient placés dans des pots en plastique fermés et étiquetés puis gardés dans une glacière jusqu'au laboratoire où étaient réalisées les analyses de TMS.

2.2.1.6. Questionnaires

Les différents questionnaires de l'enquête ont été administrés à la personne qui s'occupe de l'enfant, la mère, dans la majorité des cas. Chaque ménage à enquêter est prévenu la veille par l'enquêteur et est informé du travail qui sera réalisé. En cas d'indisponibilité du ménage, un autre jour était fixé pour l'enquête de cet enfant. L'enquête se déroulait de 6 h à 21 h. Des questionnaires de fréquence ont également été utilisés et portaient sur les aliments consommés par l'enfant la semaine précédant le jour de l'enquête. Les mesures d'ingérés ont été réalisées sur les aliments consommés par l'enfant le jour de l'enquête et les mesures anthropométriques ont été faites sur l'enfant le jour de l'enquête.

Questionnaire portant sur les pratiques alimentaires (Annexe 2-4) : il sert à recueillir les informations relatives aux pratiques d'allaitement, et les aliments de complément consommés par l'enfant depuis sa naissance. Ce questionnaire visait à mieux connaître les comportements de la mère face à l'alimentation de l'enfant, les interdits religieux et culturels ainsi que les habitudes alimentaires.

Questionnaire de fréquence de consommation d'aliments riches en vitamine A (Annexe 2-5): l'objectif de ce questionnaire était d'évaluer la place des aliments riches en vitamine A dans l'alimentation de l'enfant. Une liste d'aliments riches en vitamine A disponibles localement en cette période de l'année était dressée et il était demandé à la personne s'occupant de l'enfant d'indiquer ceux consommés par l'enfant au cours de la semaine précédant l'enquête et leur fréquence de consommation.

Questionnaire de fréquence de consommation d'aliments riches en fer (Annexe 2-6) : l'objectif de ce questionnaire est d'apprécier la consommation des aliments riches en fer chez les enfants âgés de 6 à 36 mois. Une liste d'aliments riches en fer (produits animaux ou produits fortifiés) disponibles a été dressée et la personne s'occupant de l'enfant devait indiquer ceux que l'enfant avait consommé au cours de la semaine précédent l'enquête et avec quelle fréquence.

Questionnaire de fréquence de consommation et des modes de préparation du mil, du sorgho, du maïs (Annexe 2-7): ce questionnaire visait à déterminer la place des céréales mil, maïs et sorgho dans l'alimentation de l'enfant, leurs fréquences et formes de consommation. Une liste d'aliments à base de ces céréales a été dressée et il a été demandé à la personne qui s'occupe de l'enfant de citer ceux que l'enfant avait consommés au cours de la semaine précédant l'enquête.



Figure 2.2 : Mesure de la quantité de bouillie ingérée par un enfant à Bombofa

Mesures anthropométriques : chaque enfant enquêté a été pesé et mesuré afin d'évaluer son état nutritionnel. Les mesures ont été répétées 3 fois et ont été effectuées entre le repas du matin et celui de midi. Les enfants ont été pesés avec le minimum de vêtements à l'aide d'une balance Salter (précision 100 g, portée 25 kg)

La taille des enfants a été mesurée avec une microtoise précise au mm près. La toise utilisée est en bois et équipée d'un mètre ruban. Les enfants de moins de 2 ans ont été mesurés couchés. Les enfants de 2 ans et plus sont mesurés debout. La mesure est faite sans chaussures. La taille est lue avec une précision de 1 mm. La fiche de recueil des données anthropométrique est présentée en annexe 2-8 sur le questionnaire portant sur l'enfant.

2.2.1.7. Déroulement des enquêtes

Moyens humains et matériels

Les enquêtes menées sur les différents sites ont utilisés la même méthodologie, les mêmes questionnaires. Toutefois, les enquêtes à Ouagadougou, Komsilga, Bobo Dioulasso et Kokorowé n'ayant pas été suivies directement par moi, je ne donnerai ci-dessous que les détails concernant les enquêtes menées au Nord, à Dori et Bombofa, que j'ai supervisées avec l'aide du personnel du DTA. Pour réaliser ces enquêtes, 20 enquêteurs, 2 superviseurs, et un technicien ont été recrutés pour 2 mois. Les mesures anthropométriques ont nécessité l'utilisation de 10 balances Salter, 6 microtoises. Les mesures des ingérés ont nécessité l'utilisation de 10 balances ménagères, 20 serviettes propres pour recueillir les pertes d'aliments, 10 torches ont été remises aux enquêteurs. Un bol et une cuillère ont aussi été remis à chaque enfant, soit 210 bols et 210 cuillères. Près de 200 plats consommés par les enfants ont été prélevés.

La salle de réunion et un espace au sein du laboratoire de l'INERA de Dori ont été mis à notre disposition tout au cours de notre séjour à Dori par le directeur de cet institut.

Formations des enquêteurs

Les enquêtes se sont déroulées de Janvier à Avril 2009 pour tous les sites. Pour les enquêtes du Nord (Dori et Bombofa), 20 enquêteurs ont été recrutés. 10 à Ouagadougou, parmi des enquêteurs déjà formés et ayant déjà participé à une enquête de consommation alimentaire. Le second groupe de 10 enquêteurs parlant couramment le peulh a été recruté à Dori. Les enquêteurs ont ensuite travaillé par binôme (un de Ouagadougou et un de Dori). Le principal objectif était d'avoir des gens de la région pour faciliter l'approche. Que ce soit à Ouagadougou ou à Dori, les enquêteurs ont suivi une formation d'une semaine au bout de laquelle ont été expliqués en détails les objectifs de l'enquête, l'importance et la fiabilité des données collectées et le comportement à adopter auprès des ménages. Les questionnaires ont été parcourus et traduits en peulh pour le second groupe. Les enquêteurs ont été initiés à l'utilisation du matériel anthropométrique et à la réalisation des mesures des ingérés. Il a été remis au 4^{ème} jour de formation à chaque enquêteur les questionnaires pour un test à blanc. Les problèmes rencontrés ont été discutés et au cas où il y avait des changements à faire sur le questionnaire pour mieux

l'adapter, ces changements ont été effectués. Un pré-test a ensuite été réalisé dans la ville de Dori. 2 superviseurs, l'un de Ouagadougou et l'autre de Dori ont également été recrutés.

2.2.1.8. Traitements des données d'enquête

Toutes les données des enquêtes de consommation alimentaire et anthropométriques ont fait l'objet d'une double saisie sur Epidata version 3.1. Les fichiers ont été comparés et les erreurs corrigées. Sur les 630 enfants enquêtés, 628 dossiers ont été saisis, l'un d'entre eux ayant été égaré, l'autre comportant une valeur aberrante. Pour l'essentiel, les données ont été traitées à l'aide d'Epidata Analysis version 2.2.0167 ou Excel 2007.

Données anthropométriques

Les données anthropométriques ont été traitées à l'aide du logiciel WHO Anthro 3.0.1 (OMS 2009). L'objectif est de déterminer l'état nutritionnel des jeunes enfants enquêtés. Les Z-scores des indices poids-pour-taille, taille-pour-âge, poids-pour-âge caractérisant respectivement la maigreur, le retard de croissance et l'insuffisance pondérale ont été déterminés. Un Z-score de l'indice $< -2ET$ indique un état modéré, et un Z-score de l'indice $< -3ET$ un état sévère.

Seules 4 valeurs aberrantes correspondant à des z-scores taille-pour-âge < -6 (« flag » indiqués par Anthro) ont été détectées et les données des enfants correspondants ont été éliminées pour le calcul de la prévalence de retard de croissance.

Données des mesures d'ingérés.

Un fichier unique de tous les enfants enquêtés sur les 6 sites avec une ligne par enfant (désigné par un identifiant codé) décrivant les principales caractéristiques et les ingérés de l'enfant ainsi que les ingrédients utilisés a été mis au point pour toutes les analyses sur Epidata Analysis. Les ingérés de 597 enfants ont finalement pu être exploités.

2.2.1.9. Calcul des apports en énergie et en nutriments à partir des aliments

Pour l'estimation des apports nutritionnels et la couverture des besoins, la table de composition du Mali (Barikmo et *al.*, 2004) complétée par les données de la table FAO Worldfood du Sénégal ainsi que certains résultats d'analyses du laboratoire ont été utilisés (Annexe 2-9). Les quantités de micronutriments de chaque ingrédient sont sommées par plat puis multipliées par les quantités de plats ingérées et ce au cours d'une journée.

Les apports journaliers en énergie et en nutriments des aliments s'obtiennent par la somme des quantités d'énergie et de nutriments apportés par chacun des ingrédients composant les aliments consommés au cours de la journée. Soient X_i la quantité en gramme d'un ingrédient i faisant partie d'un plat consommé par l'enfant au cours de la journée ; Y_i la quantité d'énergie, en kilojoules ou en kilocalories, contenue dans 100 g de l'ingrédient i conformément à la table de composition des aliments, l'ingéré énergétique journalier à

partir des aliments de complément consommé par un enfant, IEAC a été obtenu par la formule suivante :

$$IE_{AC} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i * Y_i}{100}$$

L'apport journalier pour les nutriments à partir des aliments de compléments a été obtenu selon les mêmes formules, en utilisant les teneurs en nutriments de chaque ingrédient indiquées par la table de composition des aliments.

Pour les enfants allaités, les quantités de lait maternel ingérées au cours de la journée de mesure des ingérés n'ont pas pu être mesurées, les apports énergétiques du lait maternel IELM ont été pris en compte en utilisant les données OMS (1998) de valeur énergétique du lait maternel ainsi que de quantités moyennes de lait consommée par les enfants à différents âges dans les pays en développement (annexe 2-10). Ainsi les ingérés énergétiques journaliers totaux IE_{Total} ont été calculés selon la formule suivante :

$$IE_{Total} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i * Y_i}{100} + IELM$$

Les apports journaliers totaux pour les nutriments ont été obtenus selon les mêmes formules, utilisant les données de composition du lait maternel (OMS, 1998).

Le taux de couverture des apports journaliers recommandés est calculé comme le ratio des apports journaliers pour chaque enfant + apports journaliers à partir du lait maternel (si l'enfant est allaité) sur les besoins énergétiques moyens ou les apports de sécurité pour les nutriments proposés par la FAO et l'OMS (FAO/OMS, 2004) et multiplié par 100, selon la formule suivante :

$$\text{Taux de couverture énergie/nutriment \%} = \frac{\text{Apport journalier énergie/nutriment}}{\text{Apports journaliers recommandés énergie/nutriment}}$$

Les valeurs utilisées pour les apports journaliers recommandés (besoins moyens pour l'énergie et apports de sécurité pour les nutriments) sont présentés en annexe (2-11).

Les ingérés ont été comparés aux apports recommandés pour les enfants de la tranche d'âge correspondante (FAO/WHO, 2004 et 2007 ; Dewey et Brown 2003).

2.2.2. Suivi de la préparation des plats traditionnels à base de céréales

L'enquête de consommation alimentaire a permis d'identifier les plats traditionnels à base de céréales locales consommés par les jeunes enfants. Un suivi des diagrammes de production des plats céréaliers et de leurs accompagnements (sauces) a été réalisé à Dori et à Bombofa de Juillet à Août 2009 en 2 étapes. Les résultats de ce suivi ont fait l'objet de la rédaction de fiches recettes qui ont été regroupées avec d'autres résultats de suivi réalisés à

Ouagadougou et à Komsilga dans un livret de recettes dont je suis coauteur (Greffeuille et al, 2011).

A Ouagadougou en Janvier 2010 dans les zones périphériques des suivis des productions de tô dans les ménages ont été réalisés. L'objectif de ce suivi est de déterminer les variabilités de production du tô et d'élaborer un diagramme de production du tô au laboratoire.

2.2.2.1. Matériels du suivi

Pour la réalisation du suivi le matériel utilisé est constitué de :

- 10 balances ménagères (portée 5 kg, précision 1g)
- 10 pH mètres
- 10 thermomètres

2.2.2.2. Déroulement du suivi

Six à huit enquêteurs recrutés parmi ceux ayant effectué les enquêtes de consommation alimentaire ont reçu une formation sur les objectifs du suivi et l'utilisation du matériel de suivi.

Une fiche de suivi (Annexe 2-12) était remise à l'enquêteur afin de recueillir les informations suivantes: la liste et l'ordre dans lequel les ingrédients sont utilisés, les quantités d'ingrédients et d'eau utilisées (mesurées par pesées), la nature et la durée des différentes opérations unitaires subies par les matières premières ainsi que la durée totale de la préparation, les températures aux différentes étapes de la préparation et enfin, les caractéristiques finales du plat : couleur, texture, pH, odeur. Un prélèvement d'environ 50 g de plat final a été réalisé pour la détermination de la TMS.

2.2.3. Effet des décorticages traditionnels des grains sur les teneurs en micronutriments et en facteurs limitant la biodisponibilité des nutriments

L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets des décorticages traditionnels, manuels ou mécaniques, réalisés par les ménages sur les teneurs en fer et en zinc des grains de mil et de sorgho. Une comparaison a été réalisée avec un décorticage abrasif réalisé au laboratoire. Les matières premières de cette étude sont le mil et le sorgho biofortifiés ou non de la récolte de l'année 2009. Le protocole expérimental de l'étude est schématisé en figure 2.3.

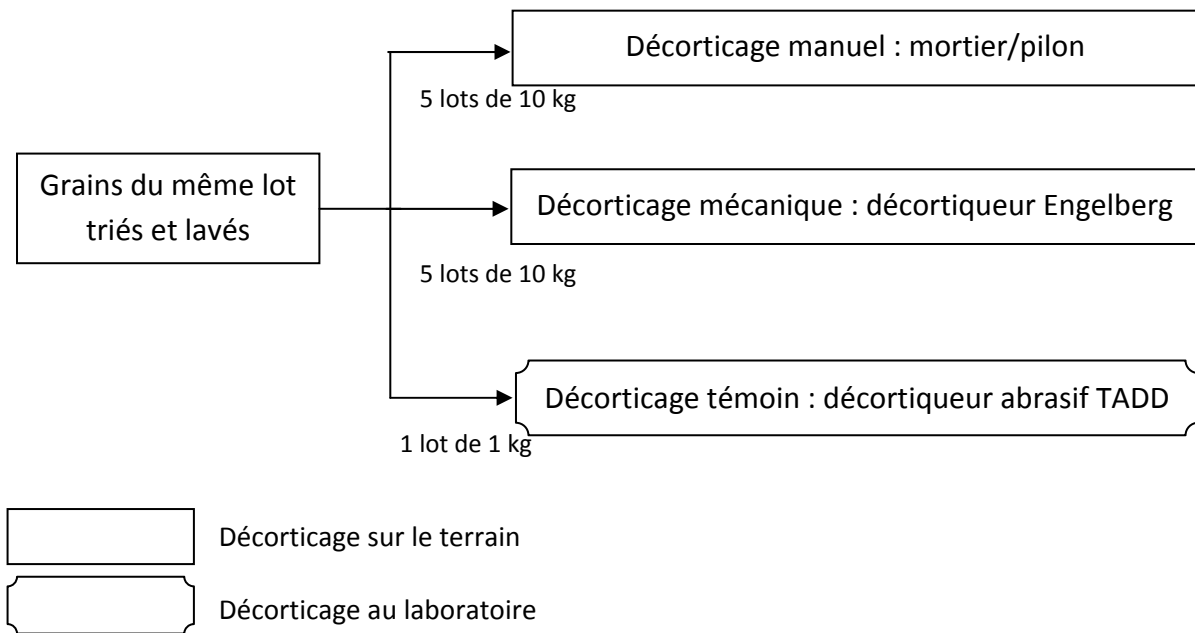


Figure 2.3 : Protocole expérimental de l'étude du décortilage

Environ cent kg de grains de chacune des variétés, ont été triés et lavés, et divisés en lots de 10 kg. Cinq lots ont été décortiqués manuellement au pilon et au mortier par cinq femmes différentes de Ouagadougou ayant l'habitude d'utiliser ce procédé de décortilage. Cinq autres lots ont été décortiqués mécaniquement avec un décortiqueur Engelberg dans cinq ateliers de décortilage différents de la ville, par des opérateurs laissés à leurs habitudes pour l'humidification des grains afin de faciliter l'opération. Après chaque décortilage, 1 kg de grains décortiqués a été lavé et séché à l'étuve (50°C) en vue des analyses biochimiques ultérieures.

Le décortilage au laboratoire est effectué avec un décortiqueur abrasif de type TADD (Tangential Abrasive Dehulling Device) (Venables Machine Works Ltd, Saskatoon, Saskatchewan, Canada). Il a été réalisé dans un laboratoire du CIRAD à Montpellier. Afin de se rapprocher au mieux du niveau d'humidification des grains observés dans les ateliers de décortilage mécanique à Ouagadougou et de standardiser les conditions opératoires, la teneur en eau des grains a été ajustée à 10 %. Après ajout du volume d'eau calculé, le flacon contenant les grains est fermé hermétiquement et est agité à la vitesse de 30 rotations par minute à l'aide d'un agitateur rotatif (Reax 2, Heidolph, Schwabach, Allemagne) pendant une nuit à 20°C.

Pour obtenir 100 g de grains à une TMS de 90 g/100 g, la quantité d'eau ajoutée a été calculée de la manière suivante :

$$\text{Quantité d'eau à ajouter} = 100 - 100/\text{TMS}_i \times 90$$

$\text{TMS}_i = \text{TMS}$ initiale des grains

Les décorticages ont été réalisés pendant des durées différentes allant de 30 s à 9 ou 12 min selon la dureté des grains. A chaque essai, 20 g de grains sont introduits dans les compartiments du TADD. Les expérimentations ont été répétées 3 fois pour chaque durée de décorticage et chaque variété.

2.2.3.1. Calcul des paramètres de décorticage

Les paramètres utilisés pour caractériser les différents types de décorticage sont le rendement de décorticage exprimé sur la base de la matière brute (taux d'extraction selon (Yetneberk *et al.*, 2005), ou bien sur la base de la matière sèche (MS), le pourcentage de perte d'un nutriment au cours du décorticage, l'indice de dureté et l'indice abrasif du disque. Le pourcentage de perte d'un nutriment au cours du décorticage est obtenu en enlevant à 100 le rapport de la teneur de ce nutriment éliminée sur la teneur du nutriment initialement dans la graine.

$$\text{Taux d'extraction \%} = \frac{\text{Masse de grains décortiqués} \times 100}{\text{Masse de grains avant décorticage}}$$

% perte en nutriment (% MS) = 100 – 100*(Teneur en nutriment après décorticage / Teneur en nutriment initiale)

L'indice de dureté à l'abrasion AHI (Abrasive Hardness Index) et l'indice abrasif du disque (DAI) sont déterminés selon Mwasaru *et al.*, (1988) ou Lawton et Faubion (1989) après décorticage au TADD. L'indice de dureté AHI est le temps d'abrasion requis pour éliminer 1 % de la graine. L'index DAI est le pourcentage massique de grain éliminé par minute d'abrasion.

2.2.3.2. Mouture des grains décortiqués pour les analyses biochimiques

Les grains sont broyés avec un broyeur de laboratoire IKA 20 (Labortechnik, Staufen, Germany). La farine obtenue est tamisée à l'aide d'un tamis de mailles 500 µm puis conservée à 4 °C jusqu'aux analyses.

2.2.4. Effet de la mouture sur la teneur et la bioaccessibilité du fer et du zinc des farines de mil, sorgho et maïs et recherche des sources de contamination en fer

Pour cette étude qui vise non seulement à déterminer l'effet de la mouture sur les teneurs en fer et en zinc des grains mais aussi à identifier les sources de contamination en fer au cours de la transformation des grains en farine, le matériel végétal issu de l'étude du décorticage a été utilisé. Trois des cinq lots de grains décortiqués manuellement et mécaniquement ont servi pour cette nouvelle étude. Ils ont d'abord été lavés à l'eau potable, rincés avec de l'eau déminéralisée puis séchés dans une étuve à 50°C. Chacun des 3 lots de grains décortiqués manuellement a ensuite été divisé en 4 parts et 1 kg de chacune des parts a été broyé soit manuellement au mortier et au pilon, soit mécaniquement avec un

broyeur à meules en fer ou un broyeur à meules en corindon, soit encore au laboratoire avec le broyeur IKA M20. Le même protocole de broyage a été appliqué aux 3 lots de grains décortiqués mécaniquement, la seule différence étant que les lots ont été divisés en 3 parts puisque le broyage mécanique n'est traditionnellement jamais réalisé après un décortiquage manuel. Le protocole expérimental de l'étude de mouture est schématisé sur la figure 2.4. Les différentes farines obtenues sont séchées à 45°C, tamisées à 500 µm et conservées à 4°C pour les différentes analyses biochimiques ultérieures.

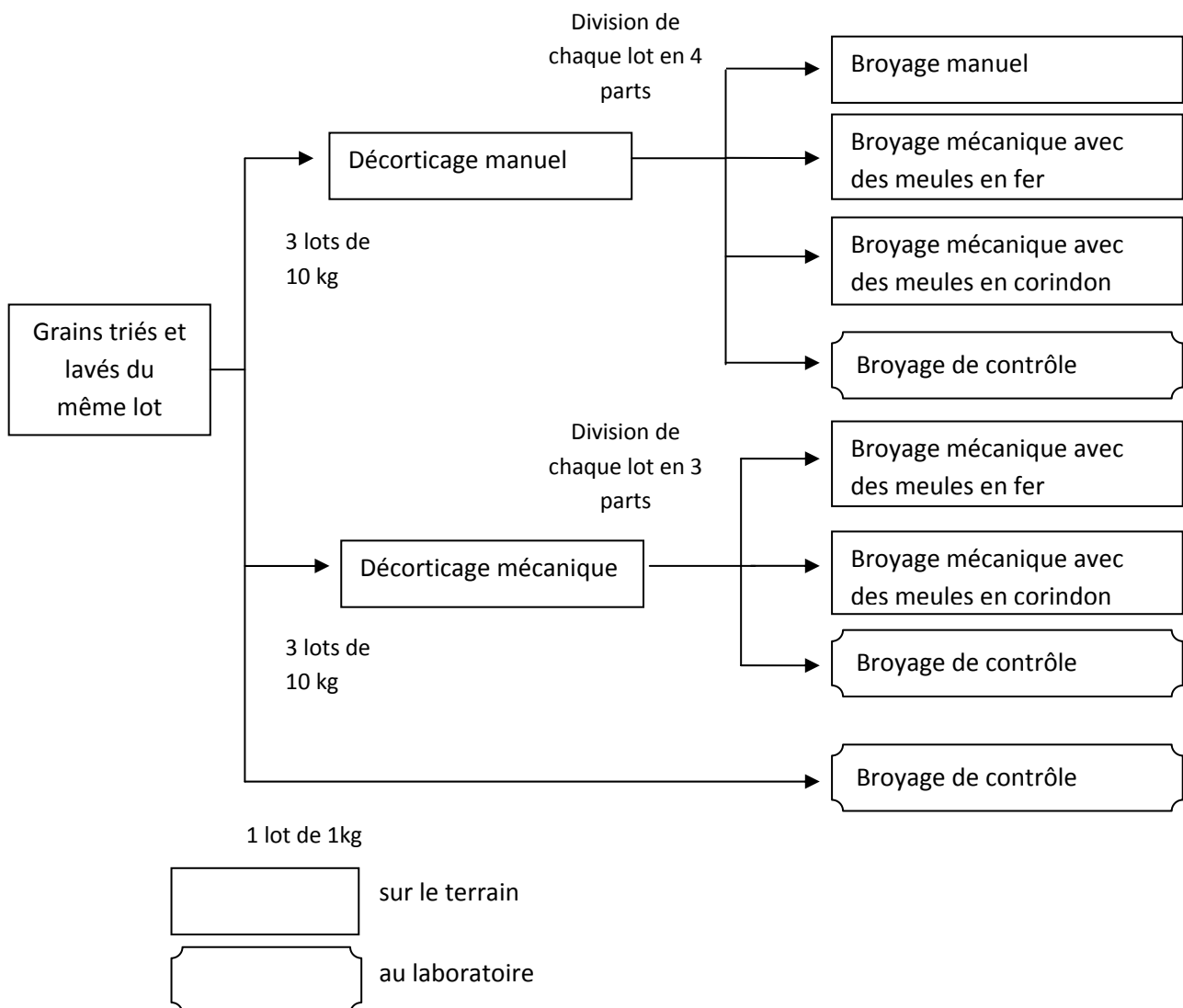


Figure 2.4 : Protocole expérimental de l'étude de mouture

La biodisponibilité des nutriments se mesurant dans des aliments « tels que consommés », le t \hat{o} a été choisi comme aliment « type » pour évaluer la bioaccessibilité du fer et du zinc dans des aliments préparés à partir des farines issues de l'étude sur la mouture.

Traditionnellement, le tô est préparé simplement avec de la farine et de l'eau, ou bien il est acidifié par l'ajout de fruits ou de feuilles de tamarin ou de jus de citron. L'effet de l'acidification du tô sur la bioaccessibilité du fer et du zinc a donc été étudié préalablement. Toutes les préparations de tô et les mesures de bioaccessibilité ont été réalisées au laboratoire de l'IRD de Montpellier. La figure 2.5 représente le diagramme standardisé de fabrication du tô au laboratoire. Afin de limiter les risques de contamination en fer, tout le matériel de préparation et de cuisson a été lavé puis rincé à l'eau ultrapure avant utilisation ; l'eau ultrapure a également été utilisée pour la préparation des plats. Le matériel de cuisson est constitué de casseroles en acier inoxydable.

Les quantités d'eau et de farine ainsi que les durées de cuisson ont été calculées pour obtenir un tô ayant une TMS proche de 23%.

Le tô acidifié a été préparé en remplaçant pour partie l'eau par du jus de tamarin au cours de la préparation. Le jus de tamarin a été préalablement préparé à partir d'environ 800 g de fruits secs de tamarin rincés brièvement à l'eau ultrapure puis mis à macérer dans 1L d'eau ultrapure pendant une nuit. Le lendemain, le jus obtenu, de pH = 2,85, a été filtré, et conservé à 4°C entre les différentes utilisations. L'effet de l'acidification a été étudié sur 3 pH différents : le tô sans acidification à pH = 6,5, le tô légèrement acidifié à pH = 5,5 (17 g de jus de tamarin à compléter à 100 g avec de l'eau.) correspondant au pH fréquemment rencontré sur le terrain et le tô très acide à pH =4,3 (43 g de jus de tamarin à compléter à 100 g avec de l'eau).

Les teneurs en fer, zinc et phytate ont été déterminées dans les différentes farines obtenues après mouture et la bioaccessibilité du fer et du zinc a été mesurée sur les tôs préparés avec les mêmes farines, immédiatement après leur préparation.

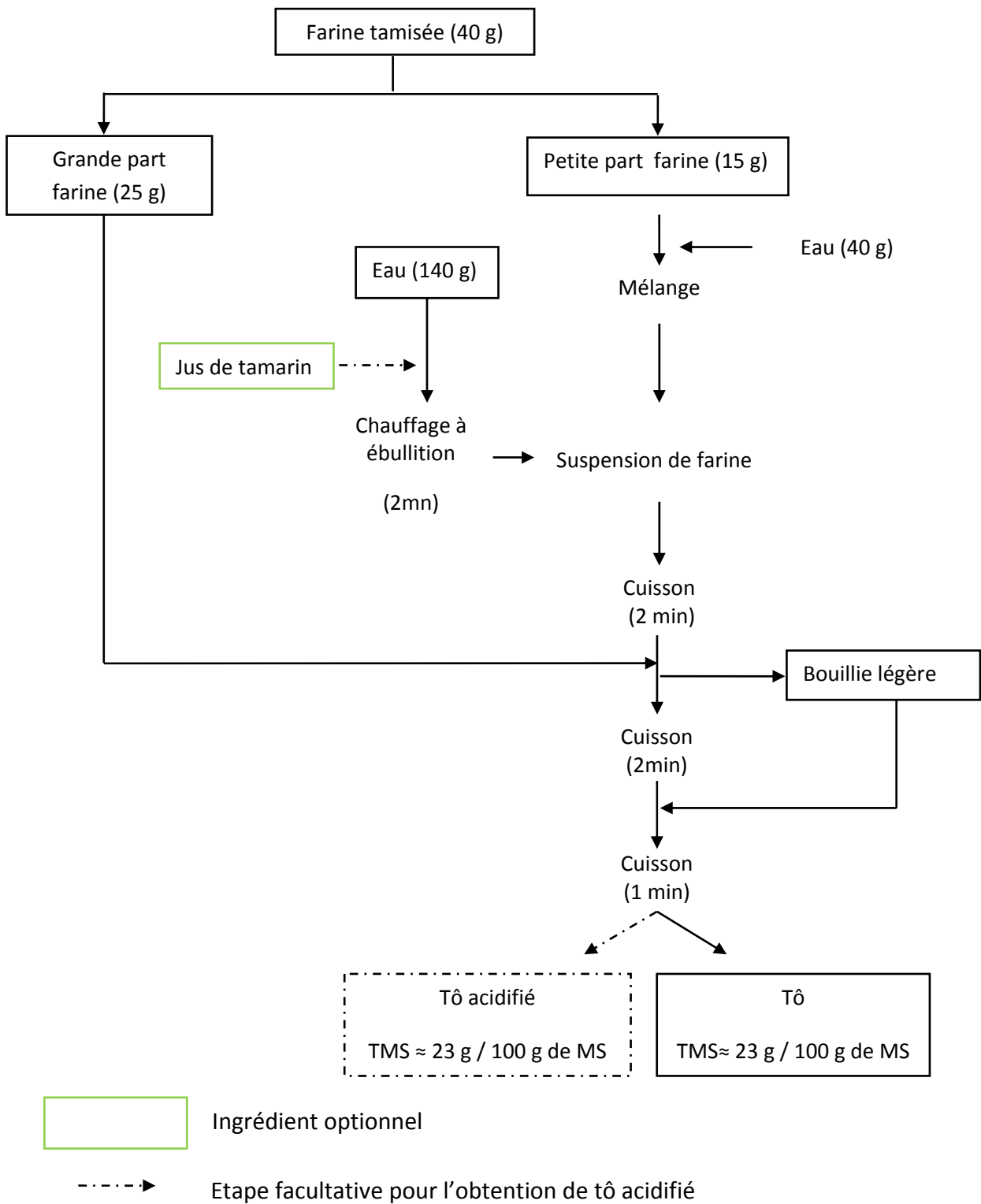


Figure 2.5: Diagramme standard de production du tô au laboratoire

2.2.5. Etude de la biodisponibilité du fer et du zinc et de l'acceptabilité de plats traditionnels préparés avec des variétés biofortifiées de mil et de sorgho

L'acceptabilité de différents plats traditionnels préparés avec les variétés biofortifiées de mil et de sorgho a été évaluée par des tests d'analyse sensorielle. La bioaccessibilité du fer et du zinc a été mesurée, mais seulement dans les plats de tô. Les plats étudiés ont été ceux identifiés comme étant les plus fréquemment consommés par les jeunes enfants de 6 à 59 mois au cours des enquêtes INSTAPA réalisées en 2009, soit, pour le mil, la bouillie fermentée « *benkida* », le tô et les galettes, et pour le sorgho, le tô seulement. Le tô et les galettes étant traditionnellement préparés soit à partir des grains entiers soit à partir de grains décortiqués, les deux options ont été conservées pour les tests d'acceptabilité. En revanche, la bouillie fermentée est toujours préparée à partir de mil entier, et seule cette option a été étudiée.

2.2.5.1. Préparation des plats

Trois plats céréaliers ont été utilisés au cours de ce travail de thèse : le tô, les galettes et la bouillie (Annexe 2-13). Les plats de tô, les galettes et les bouillies ont été préparés par trois préparatrices de Ouagadougou selon leur propre recette, à partir de lots de grains qui leur étaient fournis. Le tô est généralement préparé avec de la farine de mil, de sorgho ou de maïs. Les tôs de notre étude ont été faits avec les trois variétés de mil et les deux variétés de sorgho. Les galettes sont généralement préparées par friture de pâte fermentée de mil, parfois additionnée d'un peu de riz cuit, bouillie de mil cuite, ou tô de sorgho ou de maïs. Le mil étant la céréale la plus utilisée pour la production des galettes, dans notre étude les galettes ont été faites avec les différentes variétés de mil. De même, la bouillie « *benkida* » est une bouillie fermentée à grumeaux traditionnellement préparée à partir de mil. Ce plat a été étudié avec les trois variétés de mil.

Les préparatrices choisies pour l'étude étaient des ménagères produisant et consommant régulièrement ces plats. Les grains utilisés étaient de la récolte 2010. Pour chaque variété, 2 lots ont été préparés, l'un de grains entiers, et l'autre de grains décortiqués. Le décorticage a été réalisé de façon mécanique chez un même opérateur pour tous les types et variétés de céréales. Chaque préparatrice a reçu un lot de grains entiers et un lot de grains décortiqués de chaque variété et a ensuite fait effectuer les broyages dans son atelier de mouture habituel. Toutes les productrices ont utilisé des marmites en aluminium, des tamis métalliques, des ustensiles en plastique et des Calebasses en bois pour la préparation des plats. La cuisson a été réalisée au feu de bois. L'appréciation des préparatrices par rapport aux différentes variétés de céréales testées a été recueillie à la fin de l'étude à l'aide de questions ouvertes.

2.2.5.2. Tests d'analyse sensorielle

Deux types de tests ont été réalisés sur chacun des plats :

- le test hédonique : chaque plat est présenté individuellement au dégustateur, qui l'évalue successivement pour sa couleur, sa texture et son goût, selon une échelle de catégories à 5 points (très agréable, agréable, passable, désagréable, très désagréable) (Annexe 2-14).

- le test de préférence : plusieurs variantes d'un même plat sont présentées simultanément au dégustateur qui les classe par ordre de préférence.

Les tests de classement visaient à déterminer l'influence de la variété de céréale utilisée sur son appréciation, donc au maximum 3 plats à base de mil (1 variété locale, 2 variétés biofortifiées) ou 2 plats à base de sorgho (1 variété locale, 1 variété biofortifiée) étaient présentés au cours d'un même test. Les produits élaborés à partir de grains entiers et ceux élaborés à partir de grains décortiqués ont été évalués séparément. Le panel était constitué de 24 dégustateurs recrutés dans la ville de Ouagadougou, femmes et hommes en nombre égal, chacun devant avoir l'habitude de consommer les plats à déguster et ne pas être malade. Aucun autre critère de sélection des dégustateurs n'a été appliqué.

Les tests de dégustation se sont déroulés dans le laboratoire d'analyse sensorielle de l'IRSAT-DTA. Au début des séances, une formation des dégustateurs a été réalisée afin de leur présenter l'étude et de leur expliquer comment remplir la fiche d'appréciation. Le plateau du dégustateur comportait les variantes d'un même plat préparé avec chacune des 3 variétés de mil ou des deux variétés de sorgho blanc ainsi qu'un verre d'eau et quatre fiches d'appréciation : une pour chacun des attributs couleur, texture et goût et une autre pour le classement par ordre de préférence. Le dégustateur utilisait l'eau pour se rincer la bouche entre deux dégustations. Les tests se déroulaient le matin à partir de 9 h. La figure 2.6 illustre l'organisation pratique des tests sensoriels. Les tests se sont déroulés pendant 8 jours dont 6 jours pour les plats réalisés à partir de mil et 2 jours pour les plats réalisés avec le sorgho.

2.2.5.3. Analyses biochimiques

Des échantillons de tous les plats de tô, galettes et bouillies préparés pour les tests sensoriels ont été prélevés. Une partie de chaque échantillon a été utilisée pour la mesure de la TMS et l'autre partie a été congelée avant d'être transportée à l'IRD de Montpellier où elle a été lyophilisée, broyée (broyeur IKA) et conservée à 4°C jusqu'aux différentes analyses. Les analyses réalisées sont les dosages des teneurs en fer et en zinc totaux et de la teneur en phytates (IP6).

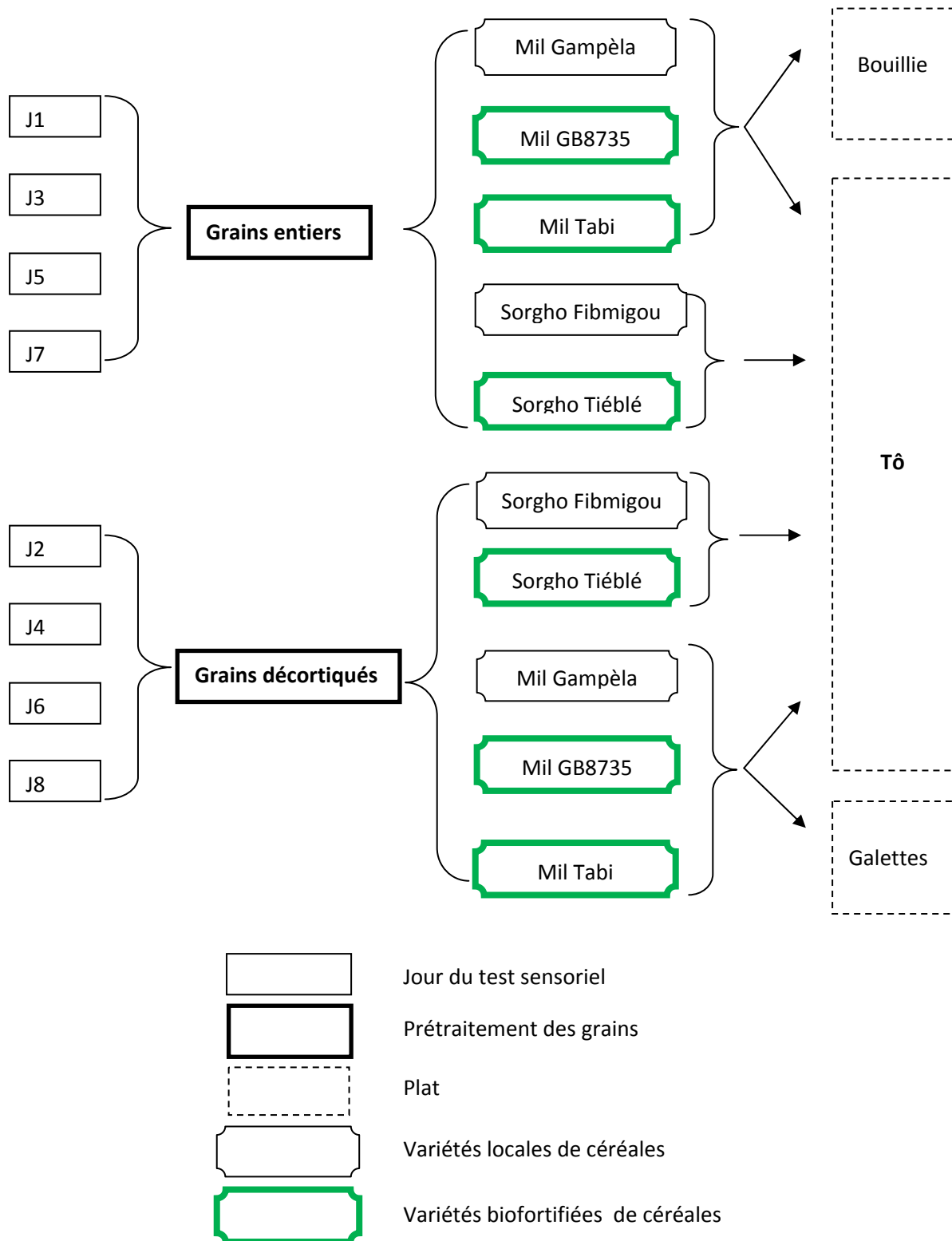


Figure 2.6 : Protocole de l'étude d'analyse sensorielle

2.3. Méthodes analytiques

2.3.1. Préparation des échantillons

Les grains de céréale sont broyés avec le broyeur IKA et les broyats obtenus sont tamisés à l'aide d'un tamis de 0,5 mm. Les farines sont conservées à 4°C pour les différentes analyses biochimiques.

2.3.2. Détermination de la teneur en matière sèche

La teneur en matière sèche a été déterminée après dessiccation de l'échantillon à l'étuve à 105 °C jusqu'à obtention d'un poids constant.

2.3.3. Dosage des lipides

Les lipides ont été extraits à l'éther de pétrole par le système Soxtec 2055 de Tecator (note d'application n°3144 selon la méthode AOAC 2003.06) après hydrolyse acide de l'échantillon à l'acide chlorhydrique 8N à 100°C pendant 30 min. Le solvant est ensuite évaporé afin de déterminer la teneur en lipides par gravimétrie.

2.3.4. Dosage des protéines

La teneur en protéines totales des échantillons a été déterminée par la méthode Kjeldhal (norme NF V03-050, AFNOR, 1970). Cette méthode consiste à doser l'azote organique après minéralisation de l'échantillon. Le sulfate d'ammonium contenu dans la solution minéralisée libère, après alcalinisation, de l'ammoniac qui est entraîné par distillation à la vapeur, puis titré par une solution d'acide sulfurique 0,04 N. Cette teneur en azote est ensuite transformée en teneur en protéines totales en utilisant 6,25 comme coefficient de conversion.

2.3.5. Dosage de l'amidon total

La teneur en amidon est déterminée selon la méthode standard AOAC 996.11. Les échantillons à analyser sont hydratés et l'amidon est hydrolysé en maltodextrines avec une α -amylase thermostable à 95-100°C (E-BLAAM, Megazyme, Wicklow, Ireland). La température et le pH sont ajustés et les maltooligosides sont quantitativement hydrolysés en glucose avec une amyloglucosidase (AMG) purifiée (E-AMGDF, Megazyme). La quantité de glucose est déterminée par dosage colorimétrique avec le kit « Glucose Assay Procedure » (K-GLUC, Megazyme).

2.3.6. Dosage des teneurs en fer et en zinc

Une prise d'essai inférieure à 0,5 g de matière sèche a été ajoutée à 7 ml d'acide nitrique et 1 ml d'eau oxygénée. Le tout est minéralisé dans un four à microondes spécifique (ETHOS-1, Milestone, Italy) à une puissance de 1200 W pendant 30 min. Le fer et le zinc sont ensuite dosés dans les minéralisats par spectrométrie d'absorption atomique en flamme (AAAnalyst 800, Perkin Elmer, Villebon sur Yvette, France).

2.3.7. Dosage fibres ADF

Les fibres ADF, qui correspondent approximativement à la cellulose et la lignine, ont été dosées par la méthode de Van Soest (1963), à l'aide d'un analyseur Fibertec TM 1020 (Foss, Nanterre, France). Les teneurs en fibres ont été déterminées par gravimétrie, après soustraction des quantités de cendres et de protéines dans les résidus d'hydrolyse.

2.3.8. Dosage des phytates

Les phytates (*myo*-inositol 6-phosphate, ou IP6) ont été dosés selon la méthode décrite par Talamond *et al.* (1998) modifiée (Lestienne *et al.*, 2005, 2007), par chromatographie en phase ionique après extraction à l'acide. 200 mg d'échantillon lyophilisé sont additionnés de 10 ml d'HCl 0,5 N et l'ensemble est hydrolysé à 100°C pendant 6 min. Après refroidissement, les extraits sont centrifugés à 5000 *g* pendant 20 min à 4°C. Le surnageant est récupéré et 1,5 ml d'HCl concentré sont ajoutés pour atteindre une concentration en HCl de 2 M. Les extraits sont alors évaporés à sec à l'aide d'un évaporateur centrifuge (Jouan RC10-10, Saint Herblain, France) puis conservés à 4°C. Pour le dosage chromatographique, l'échantillon est repris dans 2 ml d'eau ultrapure, filtré à 0,2 µm puis dilué au 1/50. 50 µl du filtrat dilué sont injectés sur une colonne Ion Pac AS11 (4*250 mm, DIONEX, Voisins-le-Bretonneux, France) équipée d'une précolonne Ion Pac AG11 (4*50 mm). La séparation est assurée par un gradient d'élution composé de NaOH et d'eau.

2.3.9. Dosage des polyphénols

La méthode utilisée est celle décrite par Singleton et Rossi (1965). Elle consiste en une extraction des composés phénoliques, suivie d'une oxydation avec le réactif de Folin-Ciocalteu. 50 mg d'échantillon lyophilisé sont placés dans un tube Eppendorf avec 1,5 ml de mélange acétone/eau 70/30 (v/v). Après agitation à l'abri de la lumière pendant 1h, l'extrait est centrifugé à 5000 *g* pendant 10 min. Cette étape d'extraction est répétée 2 fois, et les deux surnageants sont rassemblés. 300 µl de surnageant sont ensuite additionnés de 5 ml d'eau déminéralisée, de 300 µl de réactif de Folin-Ciocalteu et de 400 µl d'une solution à 20% de carbonate de sodium. Après incubation pendant 30 mn à l'abri de la lumière, l'absorbance est lue à 760 nm.

2.3.10. Bioaccessibilité *in vitro* du fer et du zinc

La méthode utilisée pour déterminer la bioaccessibilité du fer et du zinc dans les différents plats de tôte est celle décrite par Miller *et al.* (1981) modifiée par Greffeuille *et al.* (2011). Le principe de cette méthode est de simuler la digestion gastro-intestinale dans les conditions physiologiques humaines et de déterminer ainsi la proportion de minéraux dialysables qui représente une estimation de la biodisponibilité (figure 2.7). Au cours de la phase intestinale, un boudin de dialyse contenant du tampon PIPES de molarité calculée afin de neutraliser l'acidité du digesta gastrique et de la matrice alimentaire, permet

d'augmenter progressivement le pH à 6,5 en fin de digestion gastrique. Le tampon PIPES à la molarité souhaitée (voir § 2.3.10.1) est préparé la veille de l'analyse de la digestibilité et conservé au réfrigérateur à 4 °C.

2.3.10.1. Détermination de l'acidité titrable et de la molarité du tampon PIPES

L'acidité titrable est déterminée sur du t \hat{o} « as eaten ». Le t \hat{o} a également été dilué à un facteur 2,5 pour faciliter les échanges au cours de l'analyse. A 20 g de t \hat{o} dilué, de l'amylase (Sigma A3403 = Termamyl) est ajoutée et le mélange est laissé sous agitation au bain-marie à 37°C pendant 5 minutes. Puis le pH est ajusté à 2.0 avec une solution d'acide chlorhydrique 6M et 0,5 ml de pepsine (Sigma P7000) sont ajoutés. Le mélange est incubé pendant 1 h au bain marie 37°C. Le pH du produit obtenu a été ramené à 6,5 par titration avec de l'hydroxyde de potassium (KOH) 1M. La quantité de KOH ainsi obtenue permet de calculer la molarité du tampon PIPES qu'il faut préparer.

La concentration du tampon PIPES est calculée de la façon suivante :

$$C_{\text{PIPES}} = (V_{\text{KOH}} + (f \times V_{\text{KOH}})) / (f \times V_{\text{PIPES}})$$

Où C_{PIPES} = concentration du tampon PIPES exprimée en mol/l

V_{KOH} = Volume de KOH 1 M nécessaire pour ramener le pH à 6,5

f : $10^{-\text{pH visé}} / 10^{-\text{pKa}_{\text{PIPES}}}$ ($\text{pKa}_{\text{PIPES}} = 6,8$). $f = 1,995$ (lorsque l'on vise un pH de 6,5)

V_{PIPES} : volume de PIPES à introduire dans la membrane de dialyse (20 mL)

2.3.10.2. Digestion *in vitro*

La bioaccessibilité *in vitro* du fer et du zinc a été mesurée dans les plats de t \hat{o} de mil, de sorgho et de maïs. Les plats de t \hat{o} sont préparés le jour de l'analyse, sont mis à refroidir puis et conservés à 37°C jusqu'à utilisation. L'aliment à analyser doit être sous forme semi-liquide, afin que les échanges avec le tube de dialyse puissent avoir lieu : le t \hat{o} est ainsi dilué 2,5 fois avec de l'eau ultrapure puis homogénéisé à l'Ultra-Turrax.

Pour la digestion gastrique, de l'amylase (10 $\mu\text{l}/100\text{g}$ d'aliment, Sigma A3403) est ajoutée à 140 g de t \hat{o} dilué et le mélange est incubé sous agitation au bain-marie à 37°C pendant 5 à 10 min. Le pH est ensuite ajusté à 2,0 avec une solution d'acide chlorhydrique 6M avant l'ajout de 3,5 ml d'une solution de pepsine (Sigma P7000) à environ 20 kU/ml. Après réajustement du pH à 2,0, les échantillons sont incubés au bain marie pendant 1 heure à 37°C. Le produit obtenu est le digesta gastrique.

Pour la digestion intestinale, 3 aliquots de 40 g de digesta gastrique sont prélevés dans des tubes larges, 20 g sont par ailleurs réservés pour la détermination de la TMS du digesta et des teneurs en fer et en zinc. Un boudin de dialyse (seuil de coupure 12-14 kDa, Spectrum laboratories) contenant 20 ml de solution de tampon PIPES de molarité adéquate (§ 3.10.2) est ajouté dans chacun des trois tubes contenant les aliquots de digesta gastrique. Après 30 min d'incubation à 37°C, 5 ml de pancréatine/extrait de bile (P1750 et B8631, Sigma-Aldrich) sont ajoutés et les échantillons sont incubés pendant 2 heures à 37°C. Les boudins de dialyse sont ensuite retirés des tubes et leur contenu, les dialysats, sont récupérés et conservés à

4°C avant d'être minéralisés pour le dosage du fer et du zinc. La fraction restante dans le tube est le digesta intestinal. Un aliquot de chaque digesta intestinal est prélevé puis centrifugé à 26 000 g à 4°C pendant 15 min afin de séparer les fractions minérales soluble (surnageant) et insoluble (culot). A chaque étape, les masses des différentes fractions (digesta gastrique, digesta intestinal, dialysat) sont mesurées précisément. Leurs teneurs en fer et en zinc ainsi que leurs TMS sont déterminées selon les méthodes décrites aux paragraphes 2.3.6 et 2.3.2.

Les pourcentages des différentes fractions minérales sont exprimées par rapport à la somme des quantités de minéral retrouvées dans le surnageant, le culot et le dialysat et sont calculées de la manière suivante :

- Pourcentage de minéral dialysable

$$\% \text{ Minéral dialysable} = \frac{\text{Quantité de fer dialysable du surnageant} + \text{Quantité de fer dialysable du dialysat}}{\text{Quantité totale de fer retrouvé (surnageant + culot+ dialysat)}} \times 100$$

- Pourcentage du minéral soluble non dialysable :

$$\% \text{ Minéral soluble non dialysable} = \frac{\text{Quantité de fer soluble non dialysable total}}{\text{Quantité totale de fer retrouvé (surnageant + culot+ dialysat)}} \times 100$$

- Pourcentage de fer insoluble

$$\% \text{ Minéral insoluble} = \frac{\text{Quantité de fer du culot}}{\text{Quantité totale de fer retrouvé (surnageant + culot+ dialysat)}} \times 100$$

Les rendements des expériences sont calculés de la manière suivante :

$$\text{Rendement expérience \%} = \frac{\text{Quantité du minéral dans le digesta} + \text{Quantité de minéral dans le dialysat}}{\text{Quantité du minéral dans le plat as eaten}} \times 100$$

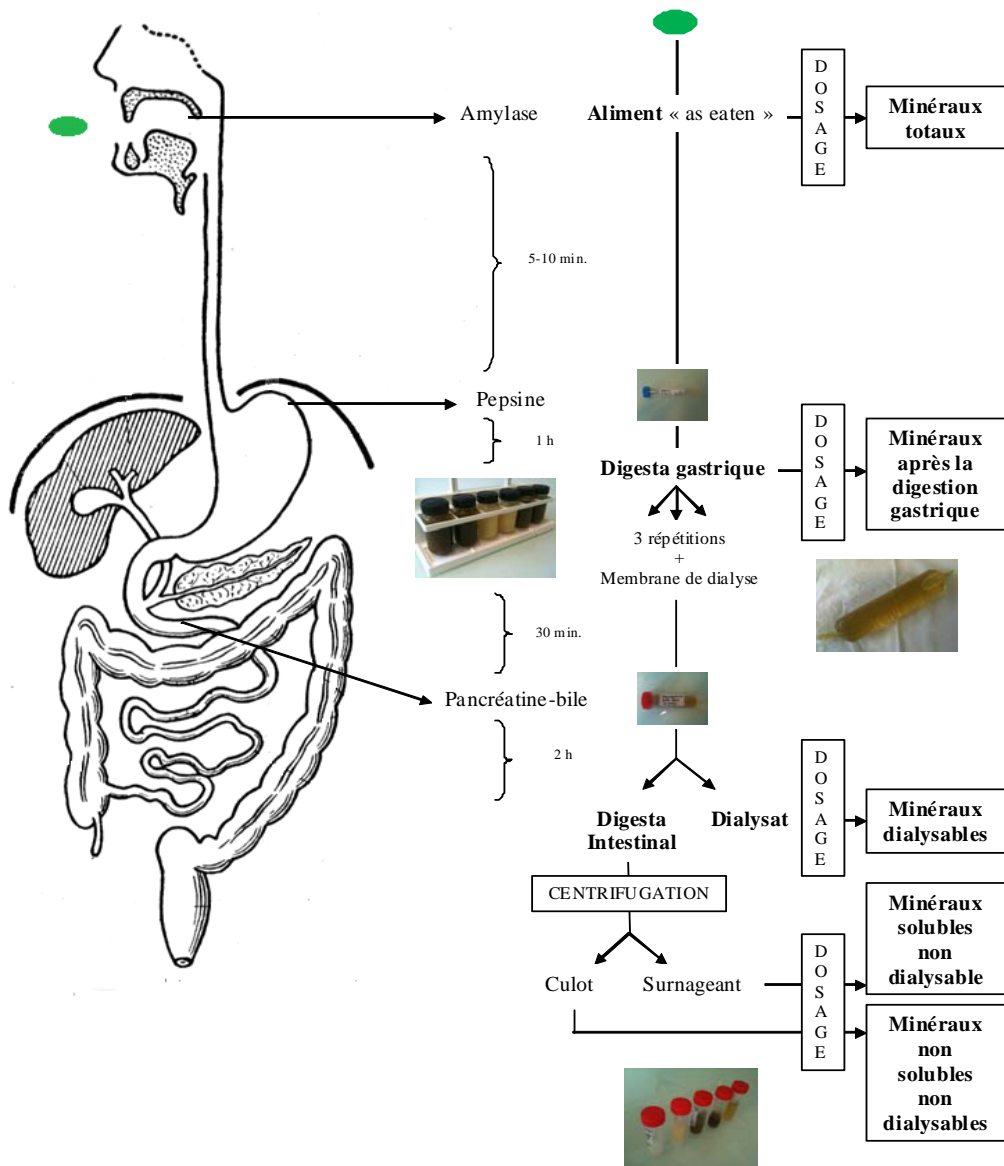


Figure 2.7: Schéma du protocole de digestion *in vitro* (Olive, 2011)

2.3.11. Traitement statistique des données

Pour tous les résultats des analyses biochimiques, les moyennes, écarts-types et coefficients de variation ont été calculés à l'aide d'Excel 2007.

Pour le traitement des données d'analyse sensorielle, 3 tests statistiques ont été utilisés.

L'analyse de variance pour les résultats des tests hédoniques afin de déterminer les différences de notation des différents plats. Elle a été réalisée à l'aide du logiciel STATGRAPHICS PLUS version 5.0.

Le test de Friedman suivi le cas échéant d'un test de comparaison multiple sur les sommes des rangs des produits a été utilisé pour traiter les données des tests de préférence (Danzart, 1990). Ces tests ont été réalisés à l'aide d'Excel 2007.

Chapitre 3. Résultats

3.1. Caractéristiques de l'alimentation des jeunes enfants burkinabè et couverture des apports recommandés en énergie, protéines, fer et zinc

La contribution à l'amélioration de la biodisponibilité du fer et du zinc des plats à base de céréales consommés par les jeunes enfants nécessite tout d'abord une connaissance de la place qu'occupent les céréales dans leur alimentation ainsi que l'identification des principales formes de consommation. Ce chapitre vise à présenter les résultats de l'enquête de consommation alimentaire réalisée au Burkina Faso sur 630 enfants âgés de 6 mois à 36 mois répartis en milieux urbain et rural. Ce premier travail a permis de caractériser les sujets, de décrire l'alimentation générale des jeunes enfants et déterminer la couverture des besoins en énergie et en divers nutriments à partir de cette alimentation. Tous les résultats obtenus des questionnaires d'enquêtes ne seront pas présentés dans ce chapitre, nous avons choisi de nous limiter aux résultats qui nous intéressent pour notre travail. Ainsi seront présentés les résultats concernant la fréquence de consommation des aliments riches en fer. Une importance particulière a ensuite été donnée à la caractérisation des formes de consommation des céréales et des quantités moyennes ingérées, et à l'évaluation de leur contribution à la couverture des apports recommandés en énergie et en certains nutriments.

3.1.1. Principales caractéristiques de l'échantillon et état nutritionnel des jeunes enfants enquêtés

Le tableau 3.1.1 présente la composition et les caractéristiques de l'échantillon.

L'échantillon d'enfants enquêtés est constitué de 53 % de garçons et 47 % de filles. La très grande majorité des enfants de 6-11 mois enquêtés étaient allaités au moment de l'enquête (seul 1 enfant sur 210 ne l'était pas). Dans la classe d'âge des 12-23 mois, encore 79% des enfants étaient allaités, avec une proportion très élevée dans les villages ruraux de Kokorowè et Komsilga. Chez les 24-35 mois, l'allaitement se fait beaucoup plus rare, bien que près de 12% des enfants soient encore allaités.

Le tableau 3.1.2 présente les Z-scores et les prévalences des différentes formes de malnutrition chez les enfants enquêtés. Les moyennes de Z-scores des indices poids/taille, taille/âge et poids/âge sont négatifs dans tous les sites enquêtés. Cependant elles sont plus élevées en milieu urbain qu'en milieu rural où les valeurs sont très faibles. Comme il est observé généralement dans ce type de contexte, le retard de croissance est la forme de malnutrition la plus répandue touchant 32,2 % de l'échantillon, avec toutefois des prévalences nettement plus faibles pour les deux sites urbains de Ouagadougou et Bobo Dioulasso, conformément aux données de la dernière enquête démographique et de santé (EDS) menée en 2011. A Dori, petite ville d'environ 100 000 habitants, les prévalences de malnutrition sont peu différentes de celles obtenues sur les trois sites ruraux. Comme pour les données obtenues au niveau national également (EDS, 2011), les classes d'âge de 12-23 mois et 24-35 mois sont celles qui ont les Z-scores d'indices taille-pour-âge et poids-pour-âge les plus faibles et donc les prévalences de retard de croissance et d'insuffisance pondérale

les plus élevées. Ainsi, l'état nutritionnel des enfants enquêtés semble cohérent avec ce qui a été observé récemment à l'échelle nationale.

Tableau 3.1.1 : Composition et principales caractéristiques de l'échantillon

Caractéristiques de l'enfant		Ouagadougou	Komsilga	Bobo-Dioulasso	Kokorowé	Dori	Bombofa	Total
Total (enfants enquêtés)		105	105	104	105	105	104	628
Sexe (%)	Garçons	50,5	51,4	59,6	51,4	51,4	54,8	53,2
	Filles	49,5	48,6	40,4	48,6	48,6	45,2	46,8
Effectif/Site	6-11	35	36	35	35	36	32	209
	12-23	36	36	34	35	35	35	211
	24-35	34	33	35	35	34	37	208
Age (mois) Moyenne ± ET	6-11	8,6 ± 2,1	8,5 ± 1,7	9,5 ± 1,6	8,6 ± 1,7	9,1 ± 1,6	9,3 ± 1,6	8,9 ± 1,7
	12-23	18,1 ± 3,1	18,9 ± 3,2	19,1 ± 3,4	18,2 ± 2,7	17,6 ± 2,7	17,3 ± 3,7	18,2 ± 3,2
	24-35	30,1 ± 2,8	1,6 ± 0,5	30,5 ± 3,8	30,4 ± 3,2	28,8 ± 2,7	27,8 ± 1,9	29,7 ± 3,1
Taille (cm) Moyenne ± ET	6-11	69,3 ± 3,0	68,3 ± 3,7	71,1 ± 3,7	67,4 ± 3,7	69,8 ± 3,9	68,2 ± 3,0	69,0 ± 3,7
	12-23	78,8 ± 6,1	77,4 ± 4,4	78,7 ± 4,5	76,7 ± 4,7	78,0 ± 4,4	75,9 ± 5,9	77,6 ± 5,1
	24-35	87,1 ± 4,7	84,3 ± 3,9	86,7 ± 3,1	84,5 ± 3,4	82,8 ± 4,7	82,4 ± 4,5	84,6 ± 4,4
Effectifs d'enfants allaités vs non allaités	6-11	34/1	36/0	35/0	35/0	36/32	32/0	208/1
	12-23	25/11	32/4	24/10	34/1	25/10	22/32	165/46
	24-35	1/33	4/29	2/33	7/28	3/31	6/24	23/185

Tableau 3.1.2 : Z-scores et prévalences de la malnutrition au Burkina Faso chez les jeunes enfants enquêtés (référence de croissance OMS, 2006)

	6-11		12-23		24-35		Total		EDS (2011)
	Moy ± ET	% <-2	Moy ± ET	% <-2	Moy ± ET	% <-2	Moy ± ET	% <-2	% <-2
Poids/Taille (Maigreux)									
Ouaga	-0,37 ± 1,32	2,9	-0,40 ± 1,16	5,6	-0,51 ± 1,10	8,6	-0,43 ± 1,19	5,7	17,1
Bobo	0,09 ± 1,23	5,6	-0,99 ± 1,37	20,6	-0,14 ± 0,86	2,9	-0,34 ± 1,25	9,5	
Dori	-1,05 ± 1,18	22,9	-0,60 ± 1,36	23,5	-0,26 ± 1,12	14,9	-0,64 ± 1,26	17,5	
Komsilga	-0,68 ± 1,12	11,1	-1,09 ± 1,40	19,4	-0,64 ± 0,77	0,0	-0,81 ± 1,14	10,5	
Kokorowé	-0,78 ± 1,20	16,7	-0,89 ± 0,77	9,1	-0,34 ± 1,02	2,7	-0,66 ± 1,04	9,5	
Bombofa	-1,17 ± 1,28	27,3	-0,90 ± 1,06	16,7	-0,28 ± 0,94	0,0	-0,76 ± 1,15	14,3	
Urbain	-0,43 ± 1,32	10,4	-0,66 ± 1,31	15,6	-0,30 ± 1,04	6,1	-0,46 ± 1,23	10,8	14,5
Rural	-0,87 ± 1,20	18,1	-0,96 ± 1,11	14,8	-0,41 ± 0,92	1,0	-0,74 ± 1,11	11,4	15,7
Total	-0,65 ± 1,28	14,2	-0,81 ± 1,22	15,7	-0,36 ± 0,98	3,3	-0,60 ± 1,18	11,1	15,5
Taille/âge (Retard de croissance)									
Ouaga	-0,43 ± 0,85	2,9	-0,93 ± 1,94	19,4	-1,27 ± 1,25	22,9	-0,88 ± 1,46	15,1	18,0
Bobo	-0,28 ± 1,66	14,3	-1,34 ± 1,22	23,5	-1,46 ± 0,82	31,4	-1,02 ± 1,38	23,1	
Dori	-0,51 ± 1,61	8,6	-1,17 ± 1,44	29,4	-2,14 ± 1,40	39,4	-1,27 ± 1,62	28,4	
Komsilga	-0,90 ± 1,48	19,4	-1,78 ± 1,56	38,9	-1,97 ± 1,12	57,6	-1,54 ± 1,47	38,1	
Kokorowé	-1,31 ± 1,52	30,6	-1,74 ± 1,73	45,5	-2,01 ± 0,88	62,2	-1,68 ± 1,43	45,7	
Bombofa	-1,23 ± 1,04	27,3	-1,50 ± 1,77	37,1	-2,12 ± 1,06	61,1	-1,65 ± 1,37	42,7	
Urbain	-0,47 ± 1,26	8,6	-1,17 ± 1,55	24,8	-1,56 ± 1,14	33,7	-1,06 ± 1,41	22,1	21,3
Rural	-1,14 ± 1,37	25,7	-1,69 ± 1,65	41,1	-2,05 ± 1,02	60,8	-1,62 ± 1,42	42,2	37,3
Total	-0,77 ± 1,44	17,1	-1,44 ± 1,68	32,4	-1,85 ± 1,19	46,9	-1,36 ± 1,52	32,2	34,6
Poids/âge (Insuffisance pondérale)									
Ouaga	-0,53 ± 1,08	5,7	-0,78 ± 0,95	13,9	-1,04 ± 1,19	20,0	-0,79 ± 1,09	13,2	19,8
Bobo	-0,13 ± 1,31	8,3	-1,36 ± 1,28	23,5	-0,88 ± 0,68	2,9	-0,78 ± 1,23	11,4	
Dori	-1,11 ± 1,31	31,4	-1,00 ± 1,32	20,6	-1,33 ± 1,17	22,4	-1,15 ± 1,26	25,2	
Komsilga	-1,08 ± 0,92	13,9	-1,67 ± 1,16	33,3	-1,55 ± 0,65	21,2	-1,43 ± 0,97	22,9	
Kokorowé	-1,37 ± 1,31	30,6	-1,50 ± 1,20	18,2	-1,38 ± 1,04	29,7	-1,41 ± 1,18	25,7	
Bombofa	-1,55 ± 1,32	33,3	-1,49 ± 1,53	36,1	-1,42 ± 1,01	24,3	-1,50 ± 1,29	31,4	
Urbain	-0,59 ± 1,29	15,1	-1,04 ± 1,20	18,3	-1,10 ± 1,06	16,2	-0,90 ± 1,20	16,6	18,2
Rural	-1,33 ± 1,20	25,7	-1,56 ± 1,28	28,7	-1,45 ± 0,93	25,2	-1,45 ± 1,15	26,7	27,2
Total	-0,95 ± 1,30	20,4	-1,31 ± 1,28	24,5	-1,27 ± 0,99	19,9	-1,18 ± 1,21	21,6	25,7

3.1.1.1. Alimentation générale des jeunes enfants burkinabés enquêtés

Pour toutes les classes d'âge aussi bien chez les enfants allaités comme chez les non allaités, l'alimentation générale des jeunes enfants âgés de 6 mois à 35 mois dans les 6 sites enquêtés comporte essentiellement des bouillies, des plats familiaux constitués d'une base amylacée accompagnée d'une sauce de composition variable, de divers produits de grignotage (« snacks ») et de boissons (l'eau n'est pas prise en compte ici) (figure 3.1.1). Chez les enfants allaités, le nombre de prises alimentaires augmente entre la classe d'âge des 6-11 mois et les deux autres classes d'âge et notamment, le nombre de consommation du plat familial passe de 1 à 2 fois/jour, tandis que le nombre de bouillie diminue concomitamment. Le nombre moyen de tétées est de 12,5/j chez les plus jeunes, se maintient à la même valeur chez les 12-23 mois en milieu rural, alors qu'il diminue légèrement à 10,7/j sur les sites urbains. Chez les 23 enfants de 24-35 mois encore allaités, le nombre moyens de tétées diminuent à 8,4/j. Logiquement, les enfants non allaités bénéficient de une à deux prises alimentaires supplémentaires chaque jour, par rapport aux enfants du même âge allaités.

La bouillie et le plat familial -base amylacée + sauce- représentent plus des trois quarts des prises alimentaires quel que soit l'âge. Le quart restant correspondant à des snacks et des boissons autres que l'eau. Les plats familiaux sont généralement des plats à base de céréale mil, maïs, sorgho, riz. Les snacks peuvent être des gâteaux, des galettes, des beignets ou du pain (encore des aliments amylacés) ou des fruits (mangue pendant la saison), ou beaucoup plus rarement brochettes de viande.

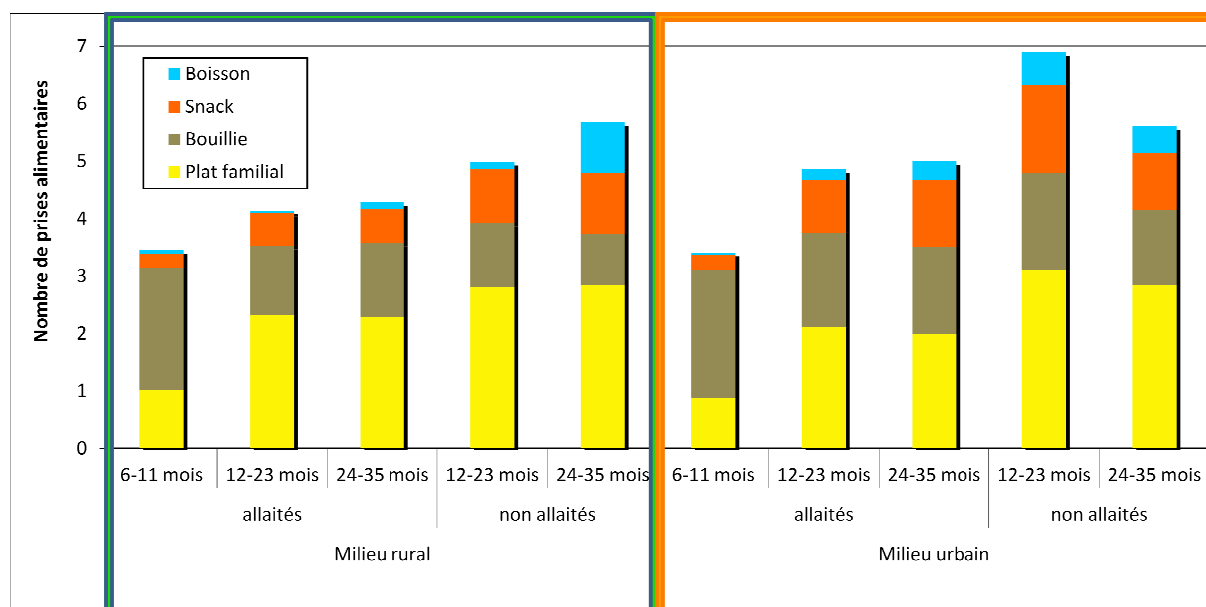


Figure 3.1.1 : Nombre et nature des aliments de complément consommés par les jeunes enfants enquêtés

3.1.2. Couverture des apports recommandés et apports en facteurs chélateurs

Le tableau 3.1.3 présente les pourcentages médians de couverture des apports journaliers recommandés (AJR) en fer, zinc, énergie et protéine à partir du lait maternel et des aliments de complément consommés le jour de l'enquête. Pour l'ensemble des enfants enquêtés, les pourcentages de couverture des AJR les plus élevés sont ceux des protéines. Proches de 100% chez les plus jeunes, ils atteignent 140 à 200% dans les deux classes d'âge des plus âgés, et sont parfois légèrement plus élevés chez les enfants non allaités, ce qui semble montrer qu'il n'y a pas réellement de problème d'apport en protéines sur le plan quantitatif à partir de l'alimentation de complément chez ces jeunes enfants. Toutefois, il serait important de vérifier que la qualité des protéines apportées permet de couvrir les besoins en acides aminés essentiels. Les pourcentages médians de couverture des apports recommandés en énergie sont relativement constants et proches de 100%, ce qui dénote une insuffisance d'apport en énergie chez la moitié des enfants enquêtés. Les pourcentages médians de couverture sont un peu plus élevés chez les enfants allaités que chez les enfants non-allaités, mettant en évidence la contribution non négligeable du lait maternel. Les pourcentages médians de couverture des AJR à partir des aliments de complément (AC) sont nettement plus faibles pour les enfants allaités que pour les enfants non-allaités. Cependant, les apports du lait maternel compensent largement le déficit pour l'énergie et les protéines.

Tableau 3.1.3 : Couverture médiane des apports recommandés à partir des aliments de complément en fonction de l'âge et de l'allaitement sur l'ensemble des sites enquêtés (n=597)

Classe d'âge	Allaitement		% médians de couverture des apports recommandés				
			Fer ¹	Zinc ²	Energie	Protéines	
6-11 mo	L	203	LM ³	0,6	9	80	69
			AC	8	7	20	27
		LM+AC	9	16	100	96	
	NL	1	37*	31*	88	102	
12-23 mo	L	159	LM ³	0,8	8	48	60
			AC	39	17	41	90
		LM+AC	40	25	89	150	
	NL	43	86	43	84	188	
24-35 mo	L	22	LM ³	0,8	8	47	60
			AC	62	32	60	178
		LM+AC	63	40	107	138	
	NL	168	77	39	81	195	

¹ prenant en compte une biodisponibilité du fer du régime de 5% (faible)

² prenant en compte une biodisponibilité du zinc du régime de 15% (faible)

³ contribution du lait maternel calculée à partir des données d'ingérés de lait maternel observés dans les pays en développement (OMS, 1998)

L=allaité ; NL= non allaité

*un seul enfant concerné

Les pourcentages de couverture des AJR en fer et en zinc sont très faibles pour tous les enfants, mais bien plus encore chez les enfants allaités que chez les non-allaités. En effet, le lait maternel ne contient que 1,2 mg de zinc et 0,3 mg de fer par litre (WHO, 1998), pour des AJR de 8,4 mg de zinc et 18,6 mg de fer dans le cas d'un régime alimentaire avec une biodisponibilité faible (soit 15% pour le zinc, et 5% pour le fer). Bien que la biodisponibilité des micronutriments du lait maternel soit très élevée, on doit prendre en compte le mélange dans le bol alimentaire du lait maternel avec les AC riches en facteurs chélateurs.

Pour le zinc, la contribution du lait maternel à la couverture des AJR est donc très faible, voire quasiment nulle pour le fer. Et les AC constituent la principale source de fer et de zinc. A partir de 6 mois, l'allaitement maternel n'est plus suffisant pour subvenir aux besoins de l'enfant (WHO, 1998), et les réserves de fer présentes à la naissance sont épuisées. Il devient crucial d'introduire des aliments de complément au lait maternel sûrs et adéquats du point de vue nutritionnel, riches en fer et en zinc biodisponibles, tout en poursuivant l'allaitement jusqu'à 24 mois ou plus (WHO/UNICEF, 2002).

Au Burkina Faso, l'allaitement maternel est très répandu, 79% des enfants enquêtés étaient encore allaités. Cependant, les aliments de complément sont souvent de faible qualité nutritionnelle, et ne permettent pas de couvrir les AJR en de nombreux micronutriments, comme cela est mis en évidence ici avec le fer et le zinc. Dans notre étude, un des critères d'inclusion dans l'enquête était que l'enfant ait commencé à consommer des aliments autres que le lait maternel, ce qui a masqué une partie du problème. En effet, selon une étude menée dans la Gnagna (province enclavée à l'est du Burkina Faso), seulement 30 % des enfants de 6 à 8 mois reçoivent un aliment de complément (Sawadogo et *al.*, 2003). A l'échelle nationale, la dernière EDS a montré que seulement 52 % des enfants de 6 à 9 mois reçoivent, en plus du lait maternel, des aliments de complément (EDSBF-MICS IV, 2011).

Comme dit précédemment, tous les calculs présentés dans le tableau 3.1.3 ont pris en compte une biodisponibilité du fer et du zinc faible, correspondant à un régime riche en facteurs chélateurs des minéraux tels que les phytates et les fibres.

En effet, des apports élevés en fibres et en phytates ont été observés dans l'alimentation des jeunes enfants enquêtés. Le tableau 3.1.4 présente les apports en fibres et en phytates de l'ensemble des aliments de complément consommés. Ces apports sont moins importants chez les enfants allaités, du fait de leur consommation moindre d'aliments de complément (et de l'absence de ces composés dans le lait maternel). La présence de ces facteurs en quantités non négligeables serait due aux types d'aliments consommés et aux procédés de production de ces aliments donc à leur forme de consommation chez les jeunes enfants burkinabè le jour de l'enquête. Les fibres et les phytates réduisent la biodisponibilité des protéines ainsi que des cations divalents tels que le fer et le zinc présents dans l'alimentation par la formation de complexes insolubles non assimilables par l'organisme humain (Hurrell & Egli, 2010).

Tableau 3.1.4. : Apports en fibres et phytates de l'ensemble des aliments de complément consommés par les jeunes enfants enquêtés

Classe d'âge	allaitement	n	Apports médians	
			Phytate (mg/j)	Fibres (g)
6-11 mo	L	203	64	1,0
	NL	1	915*	2,3*
12-23 mo	L	159	168	3,4
	NL	43	486	6,5
24-35 mo	L	22	312	7,4
	NL	168	548	6,9

*un seul enfant concerné

Les quantités de phytate ingérées sont de l'ordre de 500 mg/jour chez les enfants allaités. Pour l'enfant de 6-11 mois non-allaité toutefois, on note un apport élevé en phytate (915 mg/j), mais il ne s'agit que d'un enfant donc cette donnée est peu significative. Ces valeurs (environ 500 mg/j) sont inférieures à celles mesurées chez des enfants de 18 à 30 mois en Egypte, au Kenya ou au Mexique (Murphy et *al.*, 1992). Cela peut être dû à une consommation totale d'aliments plus faible (puisque nombreux sont les enfants de notre étude qui ne couvrent pas leurs besoins énergétiques) mais aussi à des teneurs en phytate très variables d'un contexte à l'autre. Malgré tout, chez les enfants non-allaités, les quantités de phytates ingérées ont très probablement un effet inhibiteur important sur l'absorption du fer. En effet, selon Hurrell et *al.*, (1992), pour améliorer significativement l'absorption du fer, il est nécessaire que la quantité de phytate ingérée au cours du repas soit inférieure à 10 mg. Concernant les fibres, même si leur effet chélateur des minéraux est reconnu dans la littérature, il n'existe que très peu de données sur la relation entre quantités ingérées et absorption du fer ou du zinc, et leur effet sur la biodisponibilité des minéraux fait l'objet de résultats contradictoires (Frolich, 1995).

3.1.3. Consommation des aliments riches en fer

Elle a été évaluée à partir d'un questionnaire de fréquence de consommation d'une liste d'aliments riches en fer ou fortifiés et disponibles au Burkina Faso. Ce sont principalement la viande, le poisson et les différentes farines infantiles fortifiées (annexe 2-6). Aucune précision n'était demandée sur la forme de consommation de la viande ou du poisson. Les farines fortifiées énumérées sont pour la plupart des farines importées de marque Blédina™, Cérélac™, Phosphatine™ ou Farinor™, ou fabriquées localement et incorporant un complément minéral et vitaminique telles que Vitaline™, Nutrilac™ ou Natavie™. La question de la consommation de Plumpynut™, un supplément fortifié en énergie, vitamines et minéraux utilisé pour la récupération des enfants atteints de

malnutrition aigue sévère était également posée. Enfin, nous avons cherché à savoir si l'enfant avait consommé de la spiruline. En effet, il existe au Burkina Faso de nombreux projets visant à produire et promouvoir la consommation de spiruline, une cyanobactérie riche en fer et en protéines dans le cadre de la lutte contre la malnutrition infantile, bien que son efficacité ne soit pas encore avérée (Simpore et al, 2006 ; Godin, 2006). On la trouve principalement dans les centres de récupération nutritionnelle mais elle est aussi vendue en pharmacie.

La figure 3.1.2 présente le pourcentage d'enfants ayant consommé chaque type d'aliments riches en fer au cours de la semaine précédant l'enquête.

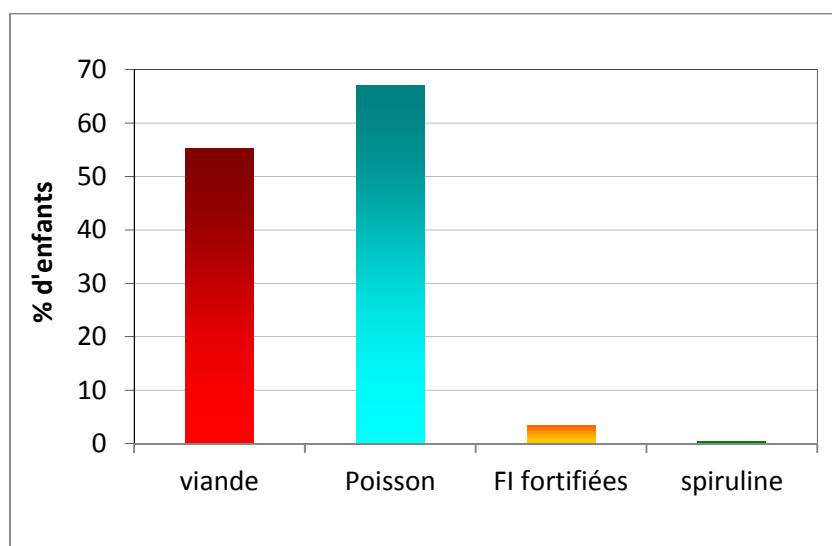


Figure 3.1.2: Pourcentage d'enfants ayant consommé au moins une fois l'aliment au cours de la semaine précédant l'enquête sur l'ensemble des sites enquêtés.

Les aliments riches en fer consommés par un nombre significatif d'enfants sont la viande et le poisson. Le poisson apparaît plus consommé que la viande sur tous les sites enquêtés. Selon les déclarations des personnes chargées de s'occuper de l'enfant, environ 67,1 % des enfants ont consommé du poisson contre 55,2 % de la viande au cours de la semaine précédente. Cette tendance est confirmée par les données de pesée : le jour de l'enquête, 24,5% des enfants ont consommé de la viande et 53,1% du poisson. Cette consommation plus importante de poisson que de viande s'explique par le coût plus élevé de la viande et par sa moindre accessibilité. Dans les villages, c'est uniquement les jours de marché soit généralement une fois par semaine que le ménage peut se procurer de la viande. Le poisson est disponible sous forme fraîche ou séchée, plus facile à conserver. Cependant une analyse plus fine des données indique que les quantités consommées sont très faibles : en moyenne 6,2 g de MS/jour pour ceux qui ont mangé de la viande, et 4,2 g de MS/ jour pour ceux qui ont mangé du poisson. Dans la classe d'âge des plus jeunes, le nombre d'enfants ayant consommé de la viande ou du poisson est deux à trois fois plus faible que dans les deux autres classes d'âge.

Les farines infantiles fortifiées sont très peu consommées par les jeunes enfants. et uniquement dans les sites urbains Ouagadougou, Bobo-Dioulasso et Dori. Un seul enfant enquêté a consommé de la spiruline.

Il apparaît donc que la consommation d'aliments riches en fer par les enfants enquêtés se résume essentiellement à la viande et au poisson, mais que les quantités consommées sont le plus souvent faibles, ne permettant pas de contribuer significativement aux apports en fer et en zinc.

3.1.4. Consommation des céréales

Sur l'ensemble des sites enquêtés au Burkina Faso, selon le questionnaire de fréquence, 578 des 628 enfants enquêtés, soit 92 % ont consommé au moins une fois un plat à base de l'une des trois céréales mil, maïs ou sorgho au cours de la semaine précédant l'enquête et 90 % des enfants au moins une fois au cours de la journée des pesées. Si l'on ajoute le riz, le blé et le fonio, ce pourcentage augmente à 98%. La place des céréales dans l'alimentation des jeunes enfants est donc essentielle aussi bien en milieu urbain que rural. Notons que le blé a été consommé par 120 enfants (19%) dont 101 sur les sites urbains, et seulement 19 sur les sites ruraux, et principalement sous forme de pain, biscuit ou pâtes.

Les résultats obtenus au cours de la journée de mesures des ingérés et ceux du rappel de la consommation d'une semaine étant similaires, nous avons pris en compte pour la suite les résultats de la journée de mesures des ingérés.

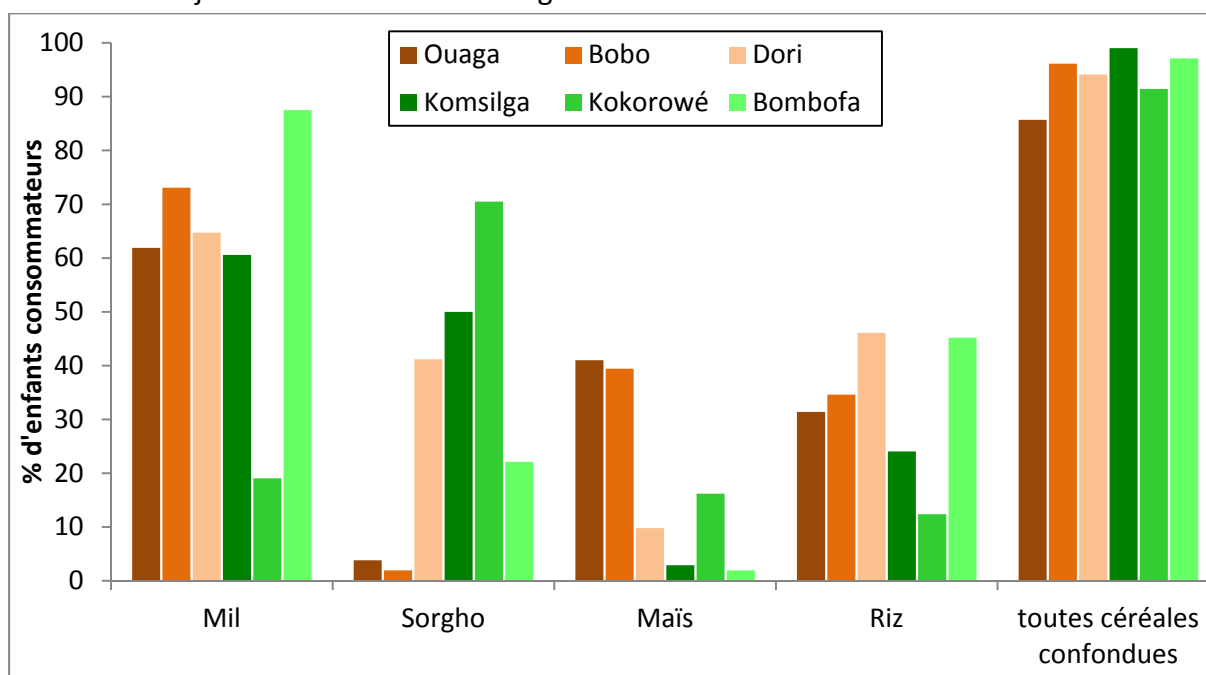


Figure 3.1.3 : Pourcentages d'enfants ayant consommé les différents types de céréales sur les 6 sites enquêtés

Le mil est la céréale consommée par le plus grand nombre d'enfants dans tous les sites enquêtés, suivie du sorgho blanc ou rouge, du riz et du maïs (figure 3.1.3). Par rapport au mil

et au sorgho, céréales cultivées de manière ancestrale au Burkina Faso, le maïs et le riz ont été introduits beaucoup plus récemment. Le projet INSTAPA dans lequel s'inscrit mon étude s'intéresse aux plats à base de mil, maïs et sorgho, c'est pourquoi dans la suite de ce chapitre, seuls les aspects concernant ces céréales seront développés. Le maïs est principalement consommé dans les grandes villes de Ouagadougou et Bobo Dioulasso tandis que le sorgho blanc et rouge sont consommés surtout sur les trois sites ruraux et à Dori.

3.1.4.1. Principales formes de consommation

Les principales formes de consommation des céréales sont présentées sur la figure 3.1.4. Le *tô* et la bouillie sont les formes de consommation les plus courantes, communes aux 4 types de céréale. A Ouagadougou et à Bobo-Dioulasso, le *tô* consommé est plutôt préparé à partir de maïs alors qu'à Dori et dans les villages, les *tôs* de mil et de sorgho blanc prédominent. Le *tô* est surtout consommé par les enfants des classes d'âge 12-23 mois et 24-35 mois, mais environ la moitié des enfants de 6-11 mois en ont consommé le jour de la mesure des ingérés (Tableau 3.1.5).

La bouillie, seconde forme de consommation des céréales la plus fréquente, est le plus souvent à base de mil (Tableau 3.1.5). La bouillie est consommée par la majorité des enfants de 6-11 mois. La fréquence de consommation des bouillies diminue lorsque l'âge augmente et elle est remplacée par le *tô*.

Les bouillies de mil consommées sont généralement fermentées appelées en *mooré*² *benkida* lorsqu'elles contiennent des granules de farine ou *bensaalga* lorsqu'elles n'en contiennent pas. Selon une étude réalisée en 2003, près de 66% des ménages à Ouagadougou consomment ces bouillies fermentées et 52 % des enfants de moins de 2 ans la reçoivent comme aliments de complément (Mouquet-Rivier et al, 2008).

² Langue des *Mossis*, une des principales ethnies du Burkina Faso

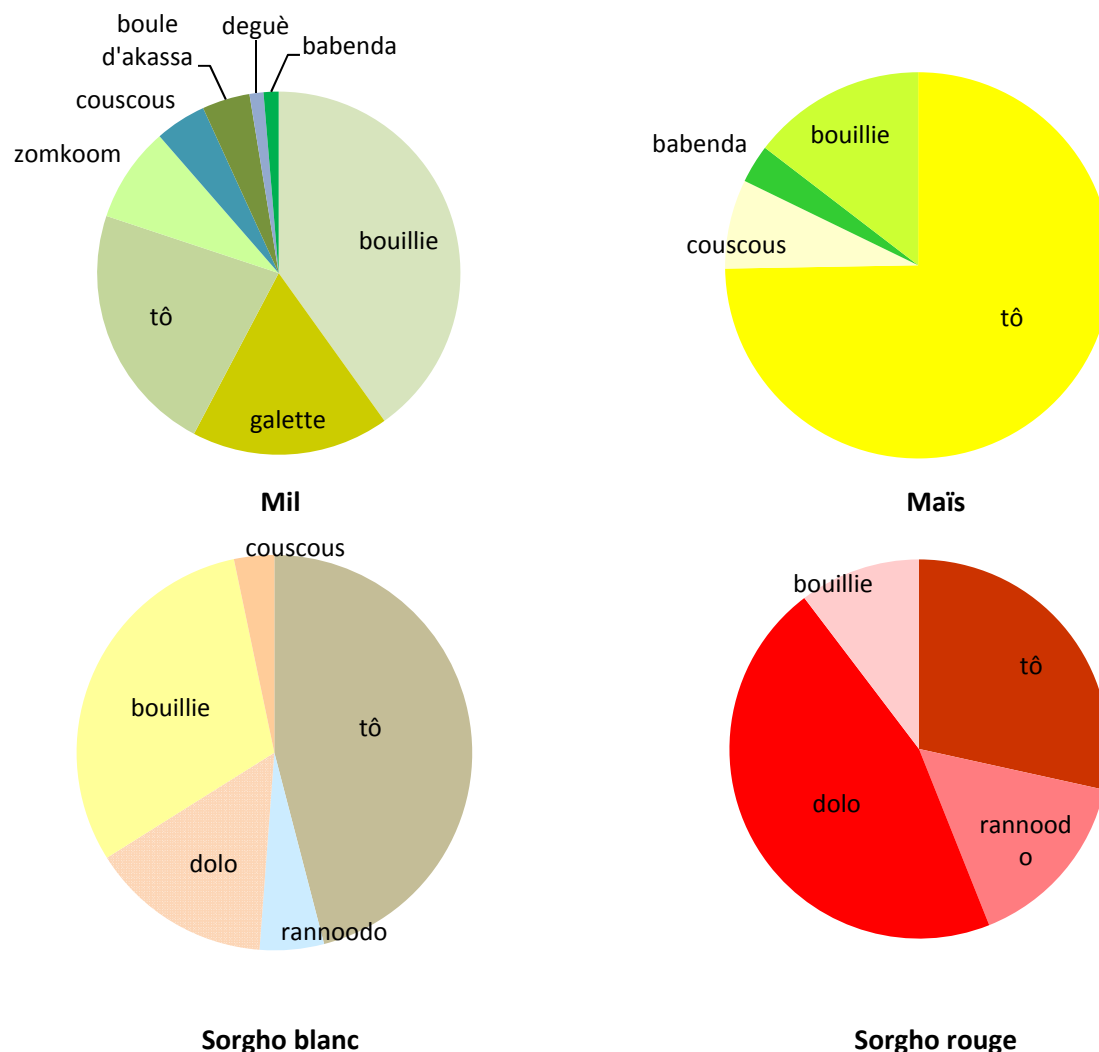


Figure 3.1.4 : Importance relative des différentes formes de consommation des céréales chez l'ensemble des enfants enquêtés.

Le mil est la céréale pour laquelle les formes de consommation sont les plus variées. Ces autres formes de consommation sont les galettes (*fiche recette en annexe 1.3*), le couscous, la boule d'akassa, le *dèguè* et le *zomkoom* (*fiche recette en annexe 1-4*). Dans les sites de l'Ouest Bobo-Dioulasso et Kokorowé ainsi qu'à Komsilga (centre) le sorgho blanc et le sorgho rouge sont consommés sous forme de *rannoodo* et de *dolo*. Le *dolo* correspond à la bière de sorgho traditionnelle et le *rannoodo* correspond au moût sucré non fermenté. Environ 47 % des enfants à Komsilga et 53 % à Kokorowé ont consommé du *dolo* de sorgho rouge le jour de la mesure des ingérés, ce qui en fait la forme de consommation du sorgho rouge par les enfants la plus fréquente.

Tableau 3.1.5: Pourcentages d'enfants enquêtés ayant consommé le tô ou la bouillie

Plats	Classe d'âge	6-11 mo	12-23 mo	24-35mo	Ensemble
		Nombre d'enfants enquêtés	209	211	208
Tô	<i>Toutes céréales confondues</i>	53,3	79,3	91,4	74,6
	mil	19,1	41,5	42,1	34,2
	maïs	25,2	41,0	51,2	39,1
	sorgho blanc	17,6	33,0	49,3	33,3
	sorgho rouge	11,4	9,0	11,0	10,5
Bouillie	<i>Toutes céréales confondues</i>	86,7	67,0	74,2	75,9
	mil	65,2	57,1	61,7	61,3
	maïs	12,4	4,7	2,4	6,5
	sorgho blanc	40,7	17,5	10,6	3,2
	Sorgho rouge	6,2	2,4	1,0	23,0

3.1.4.2. Quantités moyennes ingérées

Les quantités moyennes de MS de chacune de ces différentes formes de consommation des céréales ingérées au cours d'un repas ont été calculées (figures 3.1.5 et 3.1.6). Les quantités moyennes ingérées de tô et de bouillie augmentent avec l'âge. Que ce soit pour le tô ou pour la bouillie, la variabilité interindividuelle est très importante et aucune différence significative entre les différentes céréales n'apparaît. Les valeurs moyennes obtenues apparaissent même remarquablement proches. Les quantités moyennes ingérées de bouillie sont plus importantes que celles du tô quelle que soit le type de céréale. Cependant en exprimant ces quantités sur la base de la matière sèche, les ingérés à partir du tô sont plus élevés que ceux à partir des bouillies.

Les teneurs en matière sèche d'un grand nombre de bouillies et de tôs prélevés le jour de l'enquête ont été mesurées et les moyennes obtenues par sites d'enquête sont présentées dans le Tableau 3.1.6. La TMS moyenne des bouillies est de $10,4 \pm 1,2$ g de MS/100 g et varie peu d'un site à l'autre. Cette TMS correspond à des bouillies de faible densité énergétique nettement inférieure à la recommandation de 75 kcal/100g pour les enfants de 12-23 mois consommant 3 repas/jour (Dewey & Brown, 2003).

La TMS moyenne de tous les types de tô sur les 6 sites est de $19,8 \pm 3,9$ g de MS/100 g. selon les sites, la TMS varie de manière importante. Il se dit généralement que le tô préparé en milieu urbain est plus léger que le tô préparé en milieu rural, plus « lourd » (Konkobo et al, 2002). Ici, la teneur en MS du tô est plus élevée au nord (Dori et Bombofa). Les valeurs les plus faibles sont rencontrées à Ouagadougou et dans les sites de l'ouest (Bobo et Kokorowé). Ces différences mettent en évidence l'intérêt dans cette enquête d'avoir mesuré la TMS du tô consommé par chaque enfant. Cela permet d'approcher beaucoup plus précisément les quantités réelles d'énergie et de nutriments ingérées par chaque enfant.

Tableau 3.1.6 : Teneurs en matière sèche (g/100 g brut) des galettes, des bouillies et du tô selon les sites.

Site	n	Bouillie*	n	Tô*
Ouagadougou	62	10,1 ± 2,7	25	16,6 ± 2,1
Bobo	73	11,5 ± 3,1	44	17,7 ± 6,3
Dori	23	9,9 ± 5,5	36	24,3 ± 7,5
Komsilga	35	11,9 ± 4,1	122	19,8 ± 3,8
Kokorowé	44	10,1 ± 4,3	85	15,6 ± 2,5
Bombofa	85	8,6 ± 4,4	35	24,6 ± 6,4

*valeurs moyennes ± écart-type

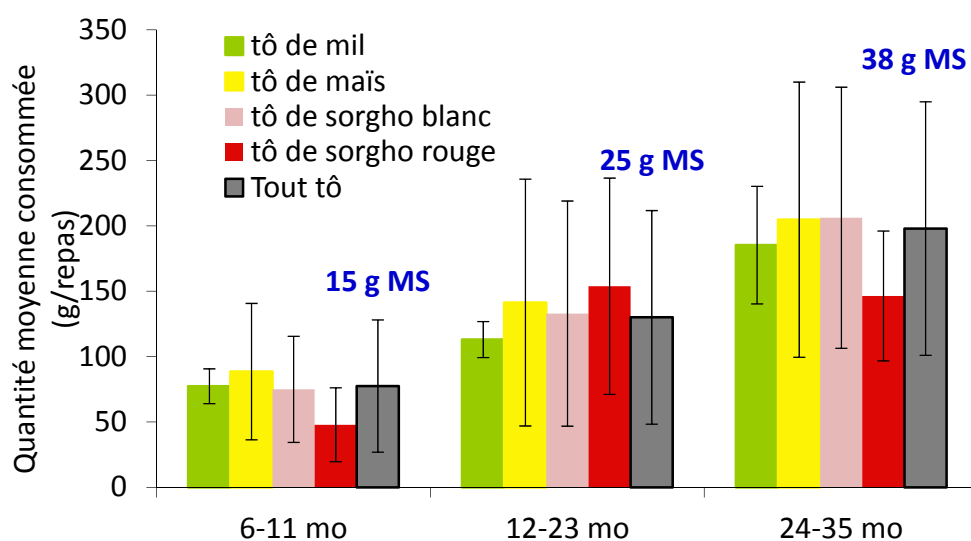


Figure 3.1.5: Quantités moyennes de tô ingérées par repas en fonction de la classe d'âge (quantité moyenne de MS ingérée, tout tôs confondus).

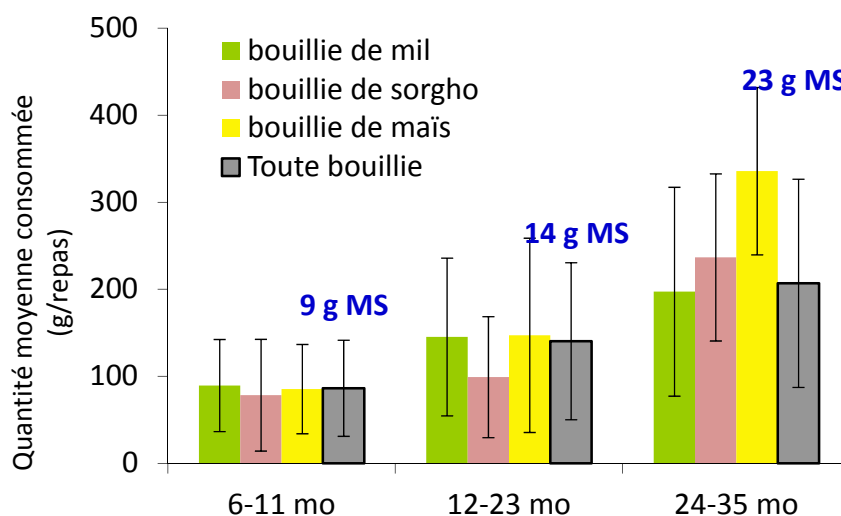


Figure 3.1.6: Quantités moyennes de bouillie ingérées par repas en fonction de la classe d'âge (quantité moyenne de MS ingérée, tout tôs confondus).

3.1.4.3. Contribution des plats de céréales à la couverture des apports recommandés

En prenant en compte la valeur énergétique et les teneurs en protéines, fer et zinc des différents plats à base de céréales, les quantités consommées par repas et les AJR, la contribution des principaux plats à base de céréales à la couverture des apports recommandés a été calculée (Tableau 3.1.7).

Les céréales sont des sources importantes d'énergie, pourtant, étant donné les faibles quantités ingérées, leur contribution à la couverture des besoins énergétiques des jeunes enfants reste très limitée. Le pourcentage moyen de couverture des besoins énergétiques d'un repas de tô est d'environ 15% pour les enfants non-allaités, qui devraient donc en consommer plus de 6 fois par jour pour couvrir la totalité de leurs besoins. Pour les enfants allaités, ce pourcentage tombe à 11%, mais il faut prendre en compte qu'ils bénéficient aussi de l'apport énergétique du lait maternel, d'environ 61%. Au final, la situation des enfants allaités vis-à-vis de la couverture de leur besoins énergétiques est donc moins défavorable. Pour les bouillies, les apports énergétiques sont encore plus faibles, en raison de leur faible TMS. Dans ces conditions, on comprend que plus de la moitié des enfants enquêtés ne couvrent pas la totalité de leurs besoins énergétiques.

Tableau 3.1.7 : Contribution des principaux plats de céréales à la couverture des apports journaliers recommandés en fer, zinc, protéines et énergie par repas chez les enfants enquêtés.

		Allaitement*	N**	% moyens de couverture des AJR /repas			
				Energie	Protéine	Fer	Zinc
Mil	Bouillie	L	189	6,0	6,9	3,8	2,3
		NL	114	8,3	12,7	5,3	2,4
	Tô	L	56	10,7	21,6	12,9	8,1
		NL	51	14,4	32,0	13,0	7,9
Sorgho	Bouillie	L	56	6,1	11,2	1,0	1,3
		NL	11	8,1	17,5	1,6	1,3
	Tô	L	77	11,9	28,0	5,7	3,0
		NL	62	15,8	38,2	4,2	3,2
Maïs	Bouillie	L	31	5,5	7,3	1,8	1,8
		NL	6	14,7	20,7	3,0	2,1
	Tô	L	43	10,1	17,0	2,2	3,9
		NL	47	14,2	28,6	2,0	4,0

*L : allaités ; NL : non-allaités.

**N = nombre d'enfants ayant consommé le plat pendant l'enquête (597 enfants)

La contribution des plats de tô à la couverture des AJR en protéines est nettement plus importante : elle atteint entre 1/4 et un peu plus d'1/3 des AJR en un seul repas chez les enfants non-allaités. Les contributions aux apports protéiques des plats à base de maïs sont les plus faibles, tandis que celles des plats à base de sorgho sont les plus élevées. Cependant,

la valeur biologique des protéines de céréales est faible, du fait de quantités insuffisantes de deux acides aminés essentiels, la lysine et le tryptophane. Il serait intéressant de déterminer quels sont les aliments sources de protéine autres que les céréales dans l'alimentation de ces enfants, afin d'évaluer l'adéquation des apports protéiques sur le plan qualitatif.

Concernant le fer et le zinc, les contributions des deux principaux plats à base de céréales à la couverture des AJR sont très faibles voire insignifiantes dans le cas des bouillies.

Les meilleurs niveaux de couverture sont obtenus avec les plats à base de mil qui ont des teneurs en zinc, et surtout en fer plus élevées. La distribution de ces minéraux dans les graines de céréales est inégale et influence fortement la rétention de ces nutriments au cours des procédés de transformation. Certains procédés comme le décorticage éliminent une partie de la graine entraînant une réduction plus ou moins importante des nutriments. D'autre part, les teneurs moyennes en fer du tô et de la bouillie de mil dans l'enquête, calculées à l'aide de la table de composition, étaient de 7,8 et 5,8 mg de fer/100g MS respectivement. Ce sont des valeurs élevées et on peut se demander s'il s'agit uniquement de fer intrinsèque, ou bien s'il n'y a pas également du fer de contamination.

Conclusion partielle

Cette enquête a permis de caractériser précisément les aliments de complément consommés par les jeunes enfants sur différents sites au Burkina Faso. Les prévalences de retard de croissance sont élevées chez les enfants enquêtés, à l'image de l'ensemble des enfants du pays. L'analyse de leur consommation sur une journée montre qu'en effet, les apports en énergie, fer et zinc à partir de leur alimentation sont insuffisants. Seuls les apports en protéines semblent adéquats sur le plan quantitatif, mais une analyse plus fine des apports en acides aminés doit être menée pour évaluer la qualité de ces protéines.

Pour l'ensemble des enfants enquêtés, la consommation des aliments riches en fer est faible. Sans surprise, les céréales apparaissent comme prépondérantes dans l'alimentation de complément des jeunes enfants, mais le type de céréale consommée est variable suivant le site d'enquête. Le maïs et le riz sont consommés plutôt dans les villes de Ouagadougou et Bobo Dioulasso, le sorgho plutôt sur les sites ruraux et à Dori. Le mil est la céréale la plus consommée par les jeunes enfants sur tous les sites. Les principales formes de consommation sont la bouillie et le tô, tous types de céréale confondus.

Cependant, les quantités de MS ingérées à partir de ces deux types de plats sont faibles, surtout dans le cas des bouillies qui sont préparées à de faibles teneurs en MS. En conséquence, les contributions de ces plats à la couverture des apports recommandés en énergie, et plus particulièrement en fer et en zinc sont très faibles. Ces constatations expliquent que la majorité des enfants enquêtés ne couvrent pas leurs besoins en énergie, fer et zinc.

3.2. Effets des procédés sur la rétention et la biodisponibilité du fer et du zinc dans les plats céréaliers

Ce deuxième chapitre qui est le cœur de notre étude a pour objectif d'étudier l'influence des principales étapes de transformation des céréales sur la rétention et la biodisponibilité du fer et du zinc dans les plats traditionnels. Des suivis de production de plusieurs plats céréaliers consommés au Burkina Faso ont été effectués dans les mêmes sites où a été réalisée l'enquête de consommation alimentaire (Ouagadougou, Bobo-Dioulasso, Dori, Komsilga, Kokorowé, Bombofa). Les résultats de ces suivis ont été compilés avec d'autres données de suivis de production et d'analyses alimentaires réalisées dans le cadre du projet INSTAPA au Burkina Faso et au Bénin dans un livret de recettes publié récemment (Greffeuille et *al.*, 2010). Il ressort des suivis de production des plats à base de mil et de sorgho au Burkina Faso deux étapes très fréquemment réalisées au cours de la transformation des plats céréaliers : le décorticage et la mouture.

Ce chapitre est constitué de 3 parties. Les 2 premières concernent le décorticage et sont présentées sous forme d'articles, le premier publié dans *Journal of Cereal Science* et le second accepté dans *International Journal of Food Science and Technology*. La troisième partie portant sur la mouture est présentée sous forme de projet d'article.

Avant de présenter les résultats de ce chapitre, un exemple de diagramme de production du tô de mil est donné en figure 3.2.1., pour montrer la position des étapes de décorticage et de mouture au cours de la transformation. Lors de ces études, les décorticages ou moutures traditionnels, manuels ou mécaniques, réalisés sur le terrain, ont été comparés aux mêmes procédés réalisés de façon contrôlée au laboratoire. Les céréales utilisées étaient des variétés locales et biofortifiées de mil et de sorgho.

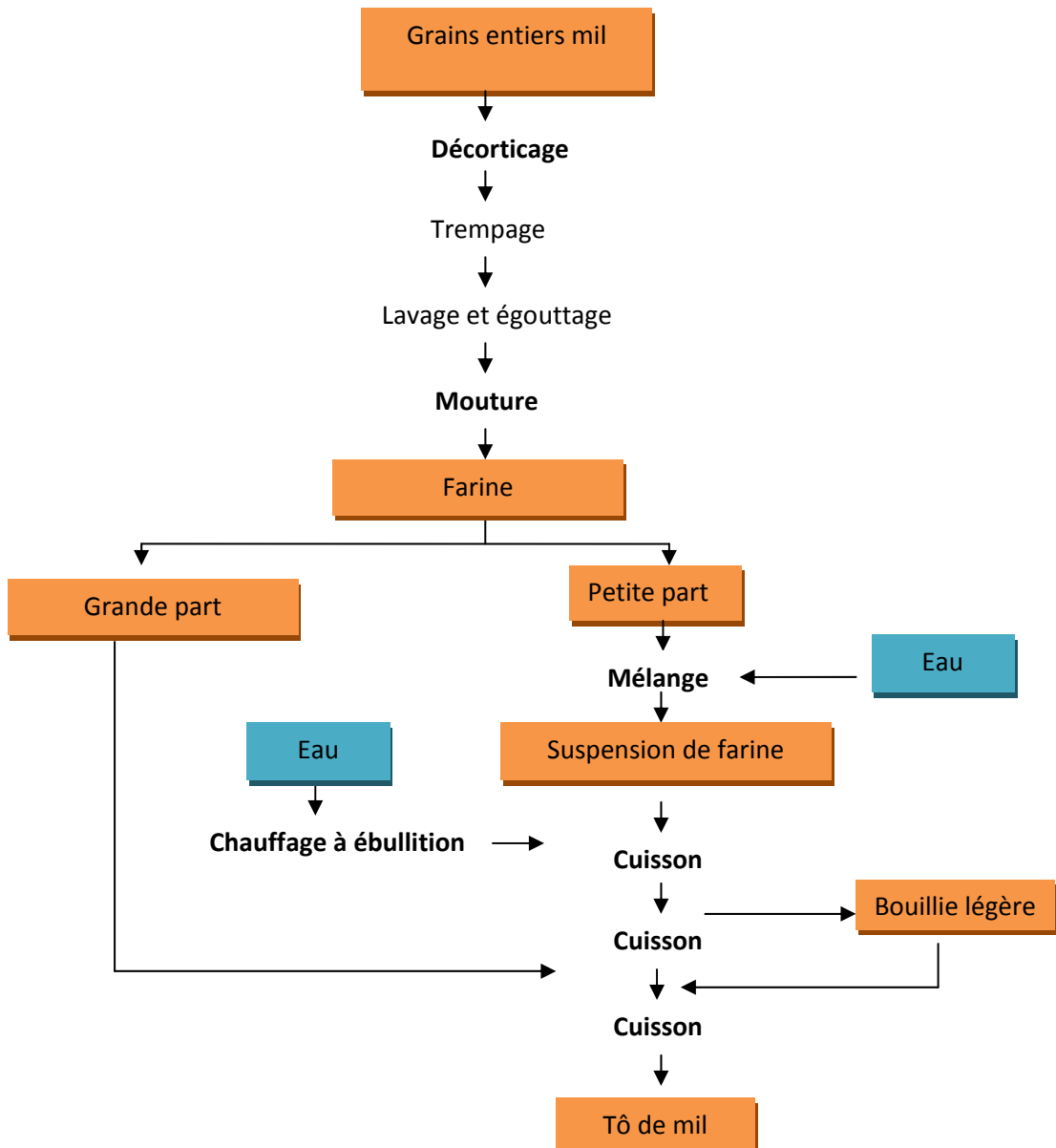


Figure 3.2.1: Diagramme de production du tô de mil

3.2.1. Variations des teneurs en macro et micronutriments du mil et du sorgho au cours de décorticages traditionnels, comparés à un décorticage témoin

Résumé de l'article 1 : **Changes in micro- and macronutrient composition of pearl millet and white sorghum during in field versus laboratory decortication.**

Deux variétés de mil et une variété de sorgho du Burkina Faso ont été décortiquées par différents ménages selon les méthodes traditionnelles de décorticage des grains de céréale, manuelles à l'aide d'un mortier et d'un pilon ou mécaniques à l'aide de décortiqueurs de type Engelberg de différents ateliers de la ville de Ouagadougou. Un décorticage témoin de type abrasif de grains des mêmes lots de mils et de sorgho a également été réalisé au laboratoire. Les paramètres de décorticage, les caractéristiques morphologiques et la composition nutritionnelle des grains après décorticage ont été déterminés afin d'évaluer la distribution des nutriments (fer, zinc, lipides, amidon, phytates, fibres (ADF), polyphénols) dans les grains et l'impact du décorticage sur la valeur nutritionnelle du mil et du sorgho. Le décorticage a de nombreux effets sur la composition nutritionnelle des grains, mais avec peu de différences entre les méthodes traditionnelles utilisées. C'est le type de grains qui est le plus influent, notamment parce qu'au cours du décorticage, une plus grande partie du germe des grains de sorgho est éliminée, celui des grains de mil étant moins accessible car enchâssé dans l'albumen. En réalisant des cinétiques de décorticage au laboratoire, on a pu montrer que l'élimination du germe se traduit par des pertes importantes en zinc et en lipides. Les phytates sont principalement localisés dans les parties périphériques et dans le germe des grains, mais aussi dans l'albumen dans le cas du mil. Les teneurs en fer dans le mil comme dans le sorgho sont réduites de moitié lorsque seulement 10% de la matière sèche des grains est abrasée. Ces pertes en nutriments varient beaucoup avec le niveau de décorticage. D'un point de vue nutritionnel par rapport au problème de carence en micronutriments sévissant dans les pays du Sud, le niveau de décorticage optimal est difficile à déterminer : il faudrait minimiser les pertes de fer et de zinc et maximiser celles de phytates et de fibres qui réduisent leur biodisponibilité, tout en préservant l'albumen qui constitue la principale fraction énergétique. Un décorticage modéré (10% pour le mil et 7% pour le sorgho d'élimination de la MS) permettant de préserver l'intégrité de l'albumen pourrait constituer un bon compromis entre rendement de décorticage et préservation des teneurs en micronutriments, même s'il induit des pertes en fer de 50% et de faibles pertes en zinc. Lors des décorticages traditionnels sur le terrain, les rendements mesurés dépassaient cependant largement ce niveau optimal (pour le mil $24,3\% \pm 5,9$ et $17,0\% \pm 8,4$ d'élimination de la MS respectivement au décorticage manuel et mécanique).



Changes in micro- and macronutrient composition of pearl millet and white sorghum during in field versus laboratory decortication

Fatoumata Hama^a, Christèle Icard-Vernière^{b,*}, Jean-Pierre Guyot^b, Christian Picq^b, Bréhima Diawara^a, Claire Mouquet-Rivier^b

^a IRSAT, Département Technologie Alimentaire, 03 BP 7047, Ouagadougou 03, Burkina Faso

^b IRD, UMR 204 "Prévention des Malnutritions et des Pathologies associées" (Nutripass), IRD/Université Montpellier 2/Université Montpellier 1, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 April 2011

Received in revised form

9 August 2011

Accepted 12 August 2011

Keywords:

Hand pounding

Iron

Zinc

Phytate

ABSTRACT

Traditional decortication of pearl millet and white sorghum by hand pounding or using a mechanical device were performed in Burkina Faso, and compared to abrasive decortication in the laboratory using the same kernel lots. Using some nutrients as histological markers, the decortication characteristics and nutritional composition (iron, zinc, phytates, lipids, ADF fibres and starch) of decorticated grains were measured. Decortication had numerous effects on grain composition but no significant differences were observed between the two traditional methods of decortication. The effects varied according to the type of grain mainly due to the fact that more germ was removed in sorghum than in millet, as the millet germ is more embedded in the endosperm. During abrasive decortication, zinc and lipid losses increased rapidly due to removal of the germ, particularly in sorghum. Phytates were shown to be located mainly in the bran and germ but also in the endosperm in millet. In both sorghum and millet, half the iron was removed when only 10% of grain DM was abraded. The method of decortication, shock or friction vs. abrasion, influenced the fractions removed and thus the chemical composition of the decorticated kernels.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Sorghum and millet cereals are well-adapted to the ecological and climatic conditions of countries with arid and semi-arid climates (ICRISAT/FAO, 1996). Due to the increase in world population and ongoing climatic changes, the interest of these staple cereals will rise sharply in the years to come. Cereals are the main component of the diet of people in sub-Saharan Africa where poor resources hinder access to a sufficiently diversified diet. According to FAOSTAT, in 2007, cereals represented 73% of the total energetic food supply in Burkina Faso. Cereals are rich in carbohydrates and also contain micronutrients, but micronutrient bioavailability is low due to the presence of chelating factors such as phytates, phenolic compounds and fibres that impair their absorption in the

gastrointestinal tract (Camara and Amaro, 2003; Gillooly et al., 1984; Hurrell and Egli, 2010).

The aim of post-harvest processing is to enable cereals to be stored and transported in good conditions, to facilitate their use and to produce foods that are more digestible and more pleasant to eat. Decortication of millet and sorghum is wide-spread practice in sub-Saharan Africa to remove the bran from the starchy endosperm destined for human consumption. Recent food consumption surveys by our team in Burkina Faso showed that *tô*, the traditional cereal-based paste processed from cereal grains that is consumed almost daily, is always decorticated in the case of sorghum and frequently decorticated in the case of millet. Traditionally, in rural areas, decortication is performed either by hand pounding with a wooden pestle and mortar or mechanically with a dehuller in towns, after a short washing of the grains. Decortication is followed by winnowing to separate the bran from the decorticated grains. In the case of hand pounding, decortication occurs mainly due to friction between grains, but also due to the abrasion of the remaining pericarp adhering to the grains by the wet bran firstly removed (Scheuring et al., 1983). The pestle causes shocks between

List of abbreviations: ADF fibre, Acid Detergent Fibre; AHI, Abrasive Hardness index; DAI, Disk Abrasive Index; DM, Dry Matter; DY, Decortication Yield; TADD, Tangential Abrasive Dehulling Device; TKW, Thousand Kernel Weight.

* Corresponding author. Tel.: +33467416280; fax: +33467416157.

E-mail address: christele.verniere@ird.fr (C. Icard-Vernière).

the grains but also between the pestle and the grains, generating strong interactive forces and resulting in the breaking off of large pieces of “hull” (Yetneberk et al., 2005). In the case of mechanical decortication in the field, decortication is mainly performed in district small scale units using Engelberg-type devices, in which decortication is due to friction between the grains and the rotor of the equipment. A third type of decortication, based on abrasion with a TADD (Oomah et al., 1981) is also used at laboratory scale for different purposes: to improve the sorghum injera quality (Yetneberk et al., 2005), to define the amount of decortication needed to improve the colour and yield of sorghum couscous (Aboubacar et al., 2006), or to fractionate sorghum grains to separate wax-rich fractions (Lochte-Watson et al., 2000).

Decortication affects the nutritional value of the grains (Lestienne et al., 2007). The nutrients are distributed unequally in the different fractions of the grains (Table 1). Endosperm, the largest fraction, which represents from 75% to more than 80% of the kernel weight, is the starch rich fraction whereas the pericarp contains mainly fibres. The germ contains most of the lipids, minerals, and phytates, the latter being the main chelating factors that impair absorption of minerals in the duodenum and hence micronutrient bioavailability (Hurrell and Egli, 2010). Phytates and minerals are also contained in the bran, probably in the aleurone layer, like in wheat (Antoine et al., 2004; Hemery et al., 2007). Other studies have been made on nutrient distribution in cereal grains (De Francisco et al., 1982; Godon and Laignelet, 1991; Murty and Kumar, 1995), but few concerned millet and sorghum.

The aim of this study was to measure the effects of traditional manual or mechanical decortication on the nutrient composition of pearl millet and white sorghum grains. After traditional decortication in the household or in small commercial units, the nutrient composition of the grains was compared with that after controlled abrasive decortication in the laboratory, in order to evaluate the distribution of the nutrients in the grains and the impact of decortication on the nutritional value of pearl millet and white sorghum.

2. Material and methods

2.1. Millet and sorghum grains

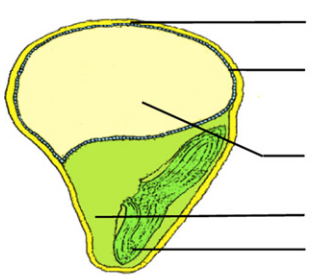
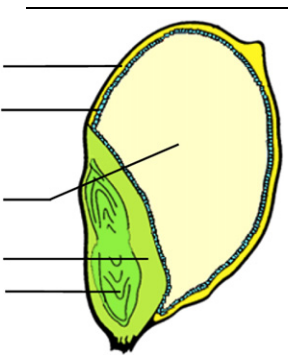
Grains of a local pearl millet (*Pennisetum glaucum*) variety called ‘Gampela’, with a yellow colour, and of a local type I variety of white sorghum (*Sorghum bicolor*) with red glumes called “Fibmigou”, were purchased from producers working for the National Environmental and Agricultural Research Institute (INERA) in Ouagadougou (Burkina Faso). About 150 kg of each were purchased in order to work with the same batches throughout the study.

2.2. Decortication process

Traditional decortication with a wooden pestle and mortar was performed in Ouagadougou (Burkina Faso), by five different women skilled at using this traditional process to decorticate grains in the home. Each woman used her own pestle and mortar, but all were similar. In the field, mechanical decortication was performed in five small decortication units, using a motorized Engelberg huller. This way of decortication is very commonly used in towns. Decortication occurs by throwing the grains against a fluted rotor and a knife. The decortication level depends on the space between the fluted rotor and the knife, which is adjustable and on the debit of the grains through the device. Ten kg of grains were used for each decortication experiment. Each woman in the home and each miller in the decortication units used their own know-how for the initial humidification of the grains to facilitate decortication (by pouring small quantities of water onto the grains) and for the length and intensity of the process. After taking a sample for measurement of DM content, one kg of each batch of decorticated grains was spread out (sheltered from dust) to air-dry before analysis.

Laboratory decortication was performed with a Tangential Abrasive Dehulling Device (TADD) (Venables Machine Works Ltd, Saskatoon, Saskatchewan, Canada), equipped with sample cups of 25 cm². The initial moisture content of millet and sorghum was

Table 1
Structure and composition of different fractions of pearl millet and sorghum grains.

	Pearl millet			Sorghum		
Grain structure ^a						
	Bran/pericarp	Germ	Endosperm	Bran/pericarp	Germ	Endosperm
% of kernel weight	7.5 ^b	17.4 ^b	75.1 ^b	4.9 ^d –8 ^e	6.9 ^d –10 ^e	88.2 ^d –82 ^e
Ash/minerals (%)	13.9 ^b	72.2 ^b	13.9 ^b	7.1 ^d –15.7 ^e	68.2 ^d –81.4 ^e	24.7 ^d –2.9 ^e
Lipids (%)	5.9 ^b	87.8 ^b	6.3 ^b	5.7 ^d –14.6 ^e	76.9 ^d –83.6 ^e	17.5 ^d –1.8 ^e
Crude fibres ^f (%)				53.4 ^d	16.4 ^d	30.2 ^d
Phytates (%)	25 ^c	67 ^c	8 ^c			

^a modified drawings from Miche (1980).

^b Abdelrahman et al. (1984).

^c Simwemba et al. (1984).

^d Reichert and Youngs (1977), with results expressed on a dry matter basis.

^e Favier (1989).

^f crude fibres refer to insoluble fibres.

respectively 6.2 and 8.1%. In both types of grains, it was adjusted to 10.0%, by shaking the grains with the appropriate amount of water in a sealed plastic bottle on a rotary shaker (Reax 2, Heidolph, Schwabach, Germany) at 30 rpm overnight. Aliquots (20 g) of tempered grains were used for the decortication experiment, which was performed in triplicate and for different durations ranging from 30 s to 12 min.

2.3. Preparation of samples and measurement of physical characteristics

The decorticated grains were milled in a laboratory mill (IKA M20, Labortechnik, Staufen, Germany), sieved to pass through a 0.5 mm screen and stored at 4 °C until analysis. The AHI (Abrasive Hardness index), corresponding to the time required to remove 1% of the kernel by abrasive dehulling and the DAI (Disk Abrasive Index) corresponding to the percentage of kernel removed per min were determined according to Mwasaru et al. (1988) or Lawton and Faubion (1989) after TADD decortication. The diameter of 20 different grains was measured with a calliper rule. Thousand kernel weight (TKW) was measured with a Numigral Counter (Sinar Technology, Surrey, UK). Photographs of whole and decorticated grains were taken with a low-power stereo microscope (Leica, Nanterre, France) equipped with a numerical camera.

2.4. Analytical methods

DM contents were determined by oven drying at 105 °C to constant weight. Starch content was determined with the K-TSTA "Total starch in cereal products" assay kit (Megazyme, Wicklaw, Ireland). Lipid content was determined using the semi-automatic 2055 Soxtec system (Foss, Nanterre, France), according to the 2003.05 and 2003.06 procedures approved by AOAC (2006). ADF fibre content, which is part of insoluble fibres and corresponds approximately to cellulose and lignin contents, was determined according to the gravimetric method of Van Soest (1963) using a Dosi-fiber (Foss, Nanterre, France). Phytate content was determined after extraction in acid solution (HCl 0.5 M) at 100 °C for 6 min by measuring the myo-inositol hexaphosphate (IP6) content obtained by high performance anion-exchange chromatography according to the method of Talamond et al. (1998) with the modifications of Lestienne et al. (2005, 2007), and using an AS-11 pre-column and column kit (Dionex, Sunnyvale, USA). Iron and zinc were extracted with a closed-vessel microwave digestion system (ETHOS-1, Milestone, Italy) from about 0.4 g of flour in a 7:1 nitric acid/hydrogen peroxide mixture. The closed vessels were placed in a microwave oven and digested at 1200 W power for 30 min. Iron and zinc content were analysed by atomic absorption spectrometry using a Perkin–Elmer AAnalyst 800 atomic absorption spectrometer with a deuterium background corrector. The elements were identified by air–acetylene flame.

2.5. Calculation of decortication parameters

Extraction rate (%), as defined by Yetneberk et al. (2005), is the proportion of the weight of decorticated grains of the initial weight of the grains. Decortication yield (DY) (%) is the same ratio on a dry matter basis and DM loss is equal to (100–DY). Nutrient losses were determined by subtracting from 100, the ratio (multiplied by 100) of the quantity of the nutrient remaining after decortication from the quantity initially measured in the grains according to the following formula:

$$\text{Nutrient losses}(\%DM) = 100 - ([N]_{DY} * DY) / ([N]_i * 100)$$

where $[N]_i$ is the initial nutrient content and $[N]_{DY}$ is the nutrient content of the decortication yield DY.

2.6. Statistical analysis

Biochemical analyses were performed in triplicate. Values were averaged. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and Tukey's tests were used to compare means at the 5% significance level, using the software Statgraphics Plus version 5.1.

3. Results and discussion






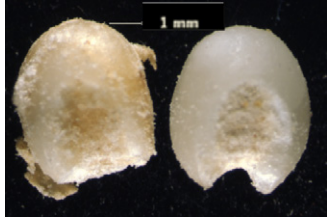
3.1. Characteristics of millet and sorghum grains and traditional decortication

The thousand kernel weight of white sorghum grains was almost three times higher than that of millet (Table 2). The ratio of grain length to mean diameter ratio was 1.36 for millet and 1.26 for sorghum, due to the more rounded shape of the sorghum grains. The ratio of ADF fibres to TKW was more than twice higher in millet, indicating that millet grains contain more bran than sorghum, which is consistent with their smaller size (Abdelrahman et al., 1984). According to the classification proposed by these authors, the millet grains used in this study can be classified as medium size based on their mean diameter. The AHI of Figmigou sorghum is much higher than the one of Gampela millet, indicating that the hardness of its endosperm is higher than the one of the millet. Both were higher than AHI values obtained by Oomah et al. (1981) on 31 samples of sorghum, but decortication in the TADD was realized with twice more grain in our study and their moisture was not exactly the same. Inversely, the DAI of Fibmigou sorghum was lower for analogous TADD decortication conditions.

Concerning decortication characteristics, extraction rates by hand pounding were higher than those obtained with mechanical decortication (Table 2) and also higher than those reported by Favier (1989). This result is at first a little surprising but can be explained by the addition of water before decortication that was observed in all cases. Adding small quantities of water to the grains just before decortication is a common practice to facilitate removal of the pericarp. As stated by Scheuring et al. (1983) in a study on sorghum decortication by hand pounding, the time is too short for the water to move into the endosperm during decortication and it only dampens the outer layers comprising the pericarp and the germ. Most of the water is then removed with the bran, which serves as an abrasive agent that helps to remove the remaining pericarp adhering to the grain. The quantity of water added depends on the know-how of the operator and on grain behaviour during the operation, and more is added when grains are likely to break with the aim of avoiding breakage. Larger amounts of water are used during hand pounding, which considerably increases the final grain weight and hence the extraction rate. This was confirmed by the final water content of the grains, which was around 20% after decortication by hand pounding of both cereals and around 10% after mechanical decortication.

That is why the use of decortication yield, expressed on a dry matter basis, appears to be more appropriate to describe the grain fraction remaining after decortication. In pearl millet, the decortication yield of mechanical decortication was higher than that after manual decortication, while in Fibmigou sorghum yield was similar with the two methods of decortication. This may be due to millet grains being thrown out of the mortar when the pestle is up in the air before it strikes the grains in the mortar, while this does not happen to sorghum grains, which are bigger, or if so, then to a lesser extent. A larger pericarp fraction in millet grains may also explain why there was a difference between decortication yields after hand

Table 2
Kernel and decortication characteristics of Gampela millet and Fibmigou sorghum.

	Whole Gampela millet		Whole Fibmigou sorghum	
				
<i>Grains characteristics</i>				
1000 kernel weight – TKW (g)		8.0		21.1
Grain length (mm)		3.4		4.3
Mean diameter (mm)		2.5		3.4
Abrasive Hardness Index AHI (s)		19.0		32.2
Disk Abrasive Index DAI (% k. r./min)		3.33		2.14
<i>Decortication characteristics^a</i>	<i>Decorticated Gampela millet</i>		<i>Decorticated Fibmigou sorghum</i>	
Decortication type	Pestle and mortar	Mechanical device	Pestle and mortar	Mechanical device
				
Extraction rate (%)	88.8 ± 2.8	85.2 ± 9.2	89.6 ± 2.9	82.6 ± 1.9
DM content (%)	79.9 ± 5.6	91.4 ± 1.2	83.6 ± 1.6	90.3 ± 1.6
Decortication yield (% DM)	75.7 ± 5.9	83.0 ± 8.4	81.6 ± 3.5	81.3 ± 3.1
Decortication time (min)	34.0 ± 2.7	5.2 ± 2.8	36.6 ± 6.2	4.8 ± 0.8

^a Results are mean ± standard deviation, *n* = 5 observations.

pounding and mechanical decortication for millet but not for sorghum.

Decortication by hand pounding took a long time, both for millet and sorghum. Its duration was around seven times longer than mechanical decortication.

As can be seen in the photos of decorticated grains, for both methods of decortication and for both sorghum and millet, bran is not uniformly removed and some pieces of bran are still visible (Table 2). For the Fibmigou sorghum sample used in this study, the main result was that most grains decorticated by hand pounding were cracked, and some were broken. This was not the case for mechanically decorticated sorghum grains. The presence of broken grains after hand pounding of sorghum but not of millet suggests a difference in the hardness of the two types of grains, and may be also related to their pericarp thickness (Scheuring et al., 1983). Fibmigou sorghum has a thinner pericarp, then extra decortication time when pericarp is already removed may cause grain breakage. With both methods of decortication, the germ was partly or completely pulled out. This may have nutritional consequences as the germ contains most minerals and lipids (Table 1).

3.2. Effects of traditional decortication on the presence of some nutrients and micronutrients in millet and sorghum

Table 3 shows the nutrient composition of pearl millet and white sorghum grains before and after traditional decortication. ADF fibre, lipid and starch contents were used as markers of pericarp, germ and endosperm, respectively (Table 1). Iron, zinc, phytate and fibre contents of grains were lower after decortication of pearl millet than of white sorghum. Conversely, starch content increased after decortication.

Iron content was significantly lower in decorticated millet grains than in the whole grains whatever the method of decortication used. In sorghum, decortication also decreased iron content but the decrease was not significant in the case of hand pounding. This confirms the localization of iron in the outer parts of cereal grains (bran and germ).

Zinc content also decreased after decortication and the decrease was much larger in sorghum than in millet due to the main localization of zinc in the aleurone layer and in the germ, like in wheat (Hemery et al., 2007). The difference in the decrease in zinc between millet and sorghum may be due to a higher removal of sorghum germ which is less embedded in the endosperm than the millet germ.

Like for lipid content, there was no significant difference between whole and decorticated millet grains. Conversely, in sorghum, lipid content decreased significantly after decortication, whatever the method of decortication used. As lipids are also mainly located in the germ (Abdelrahman et al., 1984), the decrease in lipid content after decortication was less marked in millet than in sorghum, which is consistent with a higher removal of sorghum germ.

Phytate and fibre content followed the same pattern during decortication. In both millet and sorghum, whatever the method of

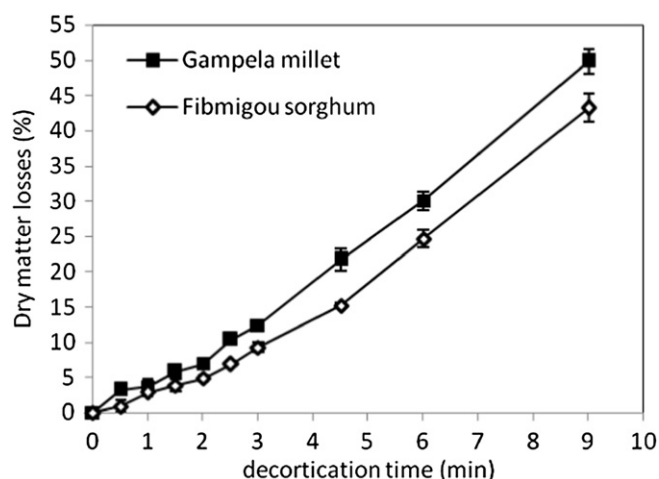


Fig. 1. Effect of TADD decortication time on dry matter losses. Error bars demonstrate the standard deviation ($n = 3$).

decortication used, phytate and ADF fibre contents were significantly lower in the decorticated grains than in the whole grains. These results are consistent with the fact that phytates and fibres, like iron, are mainly co-located in the peripheral parts of the grains (i.e. pericarp and aleurone layer) and that the lower the decortication yield, the more phytates have been removed. The decreases were much greater in millet, due to better removal of the pericarp during decortication. In sorghum, the decrease in ADF fibres and phytates was less marked because the part of the grain removed during decortication included the germ.

As starch is located in the endosperm, that is in the inner part of the grains, its content increased gradually during decortication due to the progressive removal of the peripheral parts of the grains, whatever the method of decortication and in both millet and sorghum.

All these results show that decortication has many effects on the composition of grains, and hence on their nutritional value. As shown by Scheuring et al. (1983), according to the extent of pericarp removing, part of the aleurone and starchy endosperm is also removed. The extent of these effects is mainly due to nutrient distribution and to the morphological differences between Gampela millet and Fibmigou sorghum grains that could be differently affected by decortication itself, rather than by the method of decortication. Indeed, hand pounding is much more laborious and time consuming than mechanical decortication, but no significant differences were observed between the two methods of traditional decortication.

3.3. Effects of abrasive decortication as a function of decortication time

Dry matter losses during abrasive decortication with TADD (Fig. 1) were not linear, as shown by Lawton and Faubion (1989)

Table 3

Changes in grain composition after traditional decortication (on DM basis).

Decortication	Gampela millet			Fibmigou sorghum		
	Not decorticated	By hand pounding $n = 4$	Mechanically $n = 5$	Not decorticated	By hand pounding $n = 3$	Mechanically $n = 5$
Iron (mg/100 g)	4.51 ^a ± 0.04	2.90 ^b ± 0.76	2.52 ^b ± 0.37	4.90 ^a ± 0.48	3.87 ^{a,b} ± 1.02	3.26 ^b ± 0.65
Zinc (mg/100 g)	2.02 ^a ± 0.05	1.59 ^b ± 0.17	1.74 ^{a,b} ± 0.14	2.70 ^a ± 0.34	1.47 ^b ± 0.15	1.37 ^b ± 0.25
Lipids (%)	4.80 ^a ± 0.23	4.78 ^a ± 0.67	5.44 ^a ± 0.57	4.43 ^a ± 0.23	2.86 ^b ± 0.52	2.73 ^b ± 0.59
ADF fibres (%)	2.59 ^a ± 0.38	1.72 ^b ± 0.08	1.75 ^b ± 0.48	2.89 ^a ± 0.14	2.05 ^b ± 0.07	2.36 ^b ± 0.25
Phytates (%)	0.65 ^a ± 0.03	0.30 ^b ± 0.07	0.23 ^b ± 0.05	0.78 ^a ± 0.03	0.56 ^b ± 0.05	0.65 ^b ± 0.08
Starch (%)	72.2 ^a ± 0.4	76.2 ^b ± 1.5	76.4 ^b ± 2.5	71.0 ^a ± 0.9	77.1 ^b ± 0.3	81.3 ^b ± 3.7

Different superscript letters in the same row correspond to significant differences ($p < 0.05$); tests were performed separately for Gampela millet and Fibmigou sorghum.

who modelled it. The graphics followed the same pattern in millet and sorghum, but were slightly higher in millet, perhaps due to the smaller size of millet grains. Lee et al. (2002) showed on six sorghum kernel lots that large kernels lost less relative mass during 1 min of abrasive decortication than small kernels. Loss has also been linked to endosperm hardness (Oomah et al., 1981; De Francisco et al., 1982; Yetneberk et al., 2005) and pericarp thickness (Scheuring et al., 1983). The curves show the same shape for the two cereals, with a progressive increase in slope as decortication progresses. The inner parts of the grains made of softer tissues

are more easily removed than the outer parts, as shown by De Francisco et al. (1982) on pearl millet and sorghum using another type of laboratory abrasive mill.

The changes in micro and macronutrient losses as a function of the abrasive decortication rate of millet and sorghum are shown in Fig. 2. The $y = x$ straight line represents theoretical nutrient losses, if losses were equally distributed throughout the grain tissues, with respect to the decortication rate. Thus, a value of nutrient losses below the $y = x$ line corresponds to the removal of a part of the grain that is poor in the nutrient concerned and consequently to

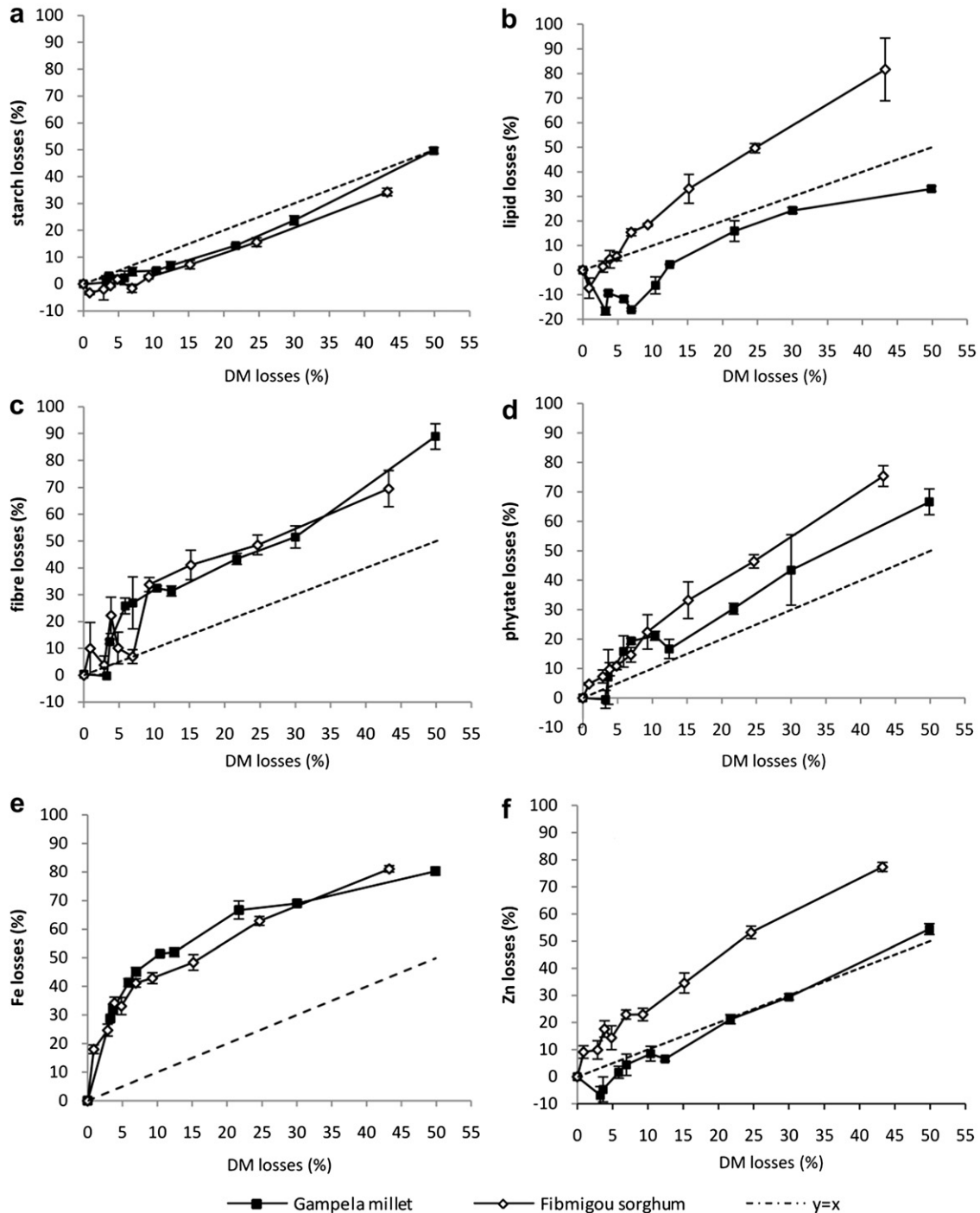


Fig. 2. Relationship between nutrient losses and TADD DM losses during abrasive decortication of Gampela millet and Fibmigou sorghum. a. starch losses. b. lipid losses. c. ADF fibre losses. d. phytate losses. e. iron losses. f. zinc losses. Error bars demonstrate the standard deviation ($n = 3$).

increased nutrient content in the decorticated product. Conversely, a value of nutrient losses above the line corresponds to the removal of a part of the grain that is rich in the nutrient concerned and thus to a lower nutrient content in the decorticated product.

Starch losses (Fig. 2a) at the beginning of decortication were lower than DM losses, showing that the grain tissues removed were free of starch. Beyond around 7% of DM losses in sorghum and 10% in millet, starch losses caught up with DM losses, indicating that the starchy endosperm was abraded. Lestienne et al. (2007) obtained a similar 12% DM loss rate before starch abrasion in pearl millet. DM losses also made it possible to estimate the thickness of peripheral tissues and indicated that the millet variety used in the present study had a thicker pericarp than the sorghum. This is in good agreement with the results of De Francisco et al. (1982) who showed that millet and sorghum tissue removal differed during decortication, mainly due to the size of peripheral tissue fragments and because the millet pericarp was thicker than that of sorghum.

Lipid losses (Fig. 2b) started to increase after 7% of DM loss in millet and 1% loss in sorghum. In millet, after an apparent increase in lipid content due to the removal of lipid-free tissues, losses increased rapidly between 7% and 12% DM loss and more slowly beyond that point. In sorghum, lipid losses increased more rapidly than DM losses, especially between 1% and 9% DM loss, leading to much lower lipid content in decorticated grains than in whole grains. In both millet and sorghum, most lipid losses occurred before starch abrasion. At around 45% of DM loss, about 80% of white sorghum lipids had been removed while less than 30% had been removed in millet. This shows that the sorghum germ was abraded rapidly during decortication due to its external location on the sorghum kernel and due to the round shape of the sorghum kernel, easy to abrade. It is also consistent with the fact that the germ of millet grain is embedded in the endosperm and is thus less easily removed than in sorghum. Similar results were obtained with traditional decortication.

From the beginning of decortication (Fig. 2c), fibre losses were higher than DM losses in the two types of grain. At 10% of DM loss, losses were around 33% in both millet and sorghum and subsequently ran parallel to the $y = x$ line. Lestienne et al. (2007) obtained similar fibre losses in pearl millet at the extraction rate threshold before starch abrasion. Serna-Saldivar et al. (1994) also obtained a strong decrease in insoluble fibre content during decortication of pearl millet.

Like fibre losses, phytate losses (Fig. 2d) were located above the $y = x$ line from the very beginning of the curve, i.e. higher than DM losses. Up to 10% of DM losses, phytate losses were similar in millet and sorghum but above this value, phytate losses were 10–15% higher in sorghum than in millet. At 45% of DM loss, like fibre and lipid losses, phytate losses in sorghum reached about 75% and were thus linked to the removal of the pericarp and the germ. In millet, at 45% of DM loss, phytate losses were nearly 60% while lipid losses were only about 30%. Millet phytates are concentrated in the peripheral layers and in the germ of the grains, but as shown by Lestienne et al. (2007), a non negligible part is also located in the endosperm.

Iron losses (Fig. 2e) were very high and were similar in millet and sorghum from the very beginning of decortication: at about 2% of DM loss, iron losses were around 20% and reached almost 50% at 10–12% of DM loss. At higher DM losses, iron losses continued to increase but at a lower rate. It thus appears that iron is concentrated in the external layers of the millet and sorghum grains. In millet, at the beginning of decortication, iron losses were similar to those obtained previously by Lestienne et al. (2007), but in the present study, at 12% of DM loss, they only reached 27% in pearl millet. However, the initial iron content of millet grains was much lower (1.87 mg/100 g DM, vs. 4.51 mg/100 g DM in our pearl millet sample) possibly due to variations between samples of millet and also to iron

contamination by soil during threshing of grains, despite the fact that the grains were carefully washed before experimentation.

Zinc losses (Fig. 2f) evolved differently from iron losses during decortication, but similarly to lipid losses. This suggests that zinc, like lipids, is mainly located in the germ. In millet, zinc losses started at around 5% of DM loss and followed the $y = x$ relation, indicating that peripheral tissues contained no or very little zinc and that zinc is located in the inner parts of the grain, due to the embedded position of millet germ in the endosperm of the grain. In white sorghum, zinc losses were higher than those in millet and started at the lowest DM loss rates. Zinc loss of about 10% at 1–2% of DM loss indicates that in sorghum, zinc could be located not only in the germ, but also in the pericarp.

From a nutritional point of view concerning micronutrients, the optimum decortication amount is not easy to determine. Taking iron and zinc contents and their bioavailability into account, optimum decortication should maximize iron and zinc content, and reduce phytates and fibres which reduce mineral bioavailability, while keeping the whole endosperm, which is the main energetic fraction. According to our results, the endosperm was abraded at respectively 10% and 7% of DM loss in millet and sorghum. At these decortication levels, the biggest losses concerned iron: almost half of it was lost in millet and 41% in sorghum, while zinc losses were about 8% in millet and 23% in sorghum. Like phytates, only 21% was lost in millet and 15% in sorghum. This limited decrease in phytate content that occurred concomitantly with micronutrient losses may have a negative impact on their bioavailability.

3.4. Comparison of the effect of the same DM loss during traditional and TADD decortication on nutrient losses

Results obtained in the field using the traditional decortication devices were compared to those obtained with TADD in the laboratory for the same DM loss. DM losses and corresponding nutrient losses obtained in the field with each of the two traditional decortication methods (manual and mechanical) are listed in Table 4. These field values of DM losses were used to estimate the corresponding TADD nutrient loss rates from Fig. 2.

Dry matter losses in the field (Table 4) were higher than the 7% and 10% of DM losses previously identified as corresponding to the beginning of attack on starch. Decortication in the field thus appears to go a bit too far. Nutrient losses were in the same range after hand pounding and traditional mechanical decortication except for lipids and zinc in millet for which hand pounding led to higher losses than mechanical decortication.

Calculated nutrient losses with TADD, compared to measured nutrient losses in the field, produced variable results depending on the nutrients and the cereal concerned. In millet, TADD decortication led to similar lipid and fibre losses as the two traditional methods of decortication, whereas in sorghum, the results of TADD decortication differed from the traditional methods. Phytate losses were similar in sorghum whatever the method of decortication used, whereas in millet losses were much higher in the field than with TADD. Zinc losses in both millet and sorghum were higher with the traditional decortication methods than with TADD. The reverse was true for iron after hand pounding despite the difference not being significant, whereas values in the same range were obtained with TADD and with the in field mechanical decortication.

Nevertheless, after in field manual or mechanical decortication, considerable iron and zinc losses were observed in both cereals. Phytate losses were very high in millet but much lower in sorghum. These observations lead us to the conclusion that the expected effects on mineral bioavailability of in field decortication depend on the cereal type, on the grain properties, and can differ from those obtained with TADD. Therefore, data obtained from TADD decortication

Table 4
Comparison of nutrient losses after in field (pestle and mortar and mechanical) and laboratory decortication ($n = 5$).

	Pestle and mortar		Calculated nutrient losses with TADD ^{c,d}	Mechanical device		Calculated nutrient losses with TADD ^{c,d}
	DM losses in field (%)	Measured nutrient losses in field (%)		DM losses in field (%)	Measured nutrient losses in field (%)	
<i>Gampela millet</i>						
Iron	24.3 ± 5.9	50 ^a ± 15	63 ^a ± 4	17.0 ± 8.4	54 ^a ± 5	53 ^a ± 11
Zinc		46 ^a ± 8	24 ^b ± 7		35 ^a ± 11	15 ^b ± 10
Lipids		15 ^a ± 14	17 ^a ± 6		1 ^a ± 18	6 ^a ± 14
ADF fibres		42 ^a ± 7	46 ^a ± 8		41 ^a ± 19	38 ^a ± 9
Phytates		61 ^a ± 10	37 ^b ± 10		69 ^a ± 6	27 ^b ± 9
Starch		7 ^a ± 4	18 ^b ± 7		10 ^a ± 10	11 ^a ± 8
<i>Fibmigou sorghum</i>						
Iron	18.4 ± 3.5	35 ^a ± 18	54 ^a ± 5	18.7 ± 3.1	46 ^a ± 12	54 ^a ± 5
Zinc		55 ^a ± 6	41 ^b ± 7		59 ^a ± 9	41 ^b ± 6
Lipids		42 ^a ± 13	39 ^a ± 6		49 ^a ± 12	39 ^a ± 5
ADF fibres		29 ^a ± 5	44 ^b ± 3		25 ^a ± 9	44 ^b ± 3
Phytates		38 ^a ± 5	33 ^a ± 5		31 ^a ± 7	38 ^a ± 4
Starch		3 ^a ± 7	10 ^a ± 3		8 ^a ± 4	10 ^a ± 3

Different superscript letters in the same row correspond to significant differences ($p < 0.05$); tests were performed separately for Gampela millet and Fibmigou sorghum and for pestle and mortar and mechanical decortication.

^c at the same DM loss value.

^d values obtained by reporting DM losses in field in Fig. 2: nutrient losses with TADD = $f(\text{TADD DM losses})$.

on nutrient losses cannot be used to predict nutrient losses after traditional decortication in the field. Differences may be due to the decortication method, shocks between the pestle and the grains and between the grains themselves during hand pounding, or friction between the grains and the knives since the mechanical device is harsher on the germ than abrasion with the TADD device.

4. Conclusion

Due to large and variable amounts of water added during in field decortication, decortication yield and corresponding DM losses appear to be more appropriate than extraction rate to compare the results of the processes. Decortication has many effects on the nutrient composition of the grains, mainly depending on the characteristics of the grains. Indeed, few differences were observed between traditional manual and mechanical decortication. Results of decortication with TADD showed that the nutrient losses of the grains vary with the level of decortication. A moderate level of decortication enabling the whole endosperm to be preserved may be the best compromise between decortication yield and bioavailable micronutrient contents even if it causes losses of about half of the iron and moderate zinc losses. However, in the field, decortication methods often go beyond this optimal level.

Acknowledgements

The authors are thankful to J. Grabulos and J.F. Cruz from CIRAD (Montpellier, France), the first for technical assistance with TADD decortication, and the second for providing grain drawings, modified from Miche (1980). This research was realized in the framework of INSTAPA Project, funded by the European Union's Seventh Framework Programme [Fp7/2007–2013] under grant agreement n°211484.

References

- AOAC – Association of Official Agricultural Chemists (2006). Crude fat in feeds, cereal grains, and forages Randall/Soxtec/Hexanes extraction–submersion method. First Action 2003, Final Action 2006.
- Abdelrahman, A., Hosney, R.C., Varriano-Marston, E., 1984. The proportions and chemical compositions of hand-dissected anatomical parts of pearl millet. *Journal of Cereal Science* 2, 127–133.
- Aboubacar, A., Yazici, N., Hamaker, B., 2006. Extent of decortication and quality of flour, couscous and porridge made from different sorghum cultivars. *International Journal of Food Science and Technology* 41, 698–703.
- Antoine, C., Peyron, S., Lullien-Pellerin, V., Abécassis, J., Rouau, X., 2004. Wheat bran tissue fractionation using biochemical markers. *Journal of Cereal Science* 39, 387–393.
- Camara, E., Amaro, M.A., 2003. Nutritional aspect of zinc availability. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 54, 143–151.
- De Francisco, A., Shepherd, A.D., Hosney, R.C., Varriano-Marston, E., 1982. Decorticating pearl millet and grain sorghum in a laboratory abrasive mill. *Cereal Chemistry* 59, 1–5.
- Favier, J.-C., 1989. Valeur nutritive des céréales au cours de leurs transformations. AUPELF-UREF. In: *Céréales en régions chaudes*. John Libbey Eurotext, Paris, pp. 285–297.
- Gillooly, M., Bothwell, T.H., Charlton, R.W., Torrance, J.D., Bezwoda, W.R., MacPhail, A.P., Derman, D.P., Novelli, L., Morrall, P., Mayet, F., 1984. Factors affecting the absorption of iron from cereals. *British Journal of Nutrition* 51, 37–46.
- Godon, B., Laignelet, B., 1991. Composition biochimique des céréales. In: Godon, B., Willm, C. (Eds.), *Les industries de premières transformations des céréales*. Technique et Documentation Lavoisier, Paris, pp. 77–104.
- Hemery, Y., Rouau, X., Lullien-Pellerin, V., Abécassis, J., 2007. Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science* 46, 327–347.
- Hurrell, R.F., Egli, I., 2010. Iron bioavailability and dietary reference values. *American Journal of Clinical Nutrition* 91 (suppl), 1461S–1467S.
- International Crops Research Institute for the Semi Arid Tropics (ICRISAT)/Food and Agriculture Organization (FAO), 1996. *The World Sorghum and Millet Economies*. ICRISAT, Patancheru, India/FAO, Rome.
- Lawton, J.W., Faubion, J.M., 1989. Measuring kernel hardness using the tangential abrasive dehulling device. *Cereal Chemistry* 66, 519–524.
- Lee, W.J., Pedersen, J.F., Shelton, D.R., 2002. Relationship of sorghum kernel size to physicochemical, milling, pasting and cooking properties. *Food Research International* 35, 643–649.
- Lestienne, I., Icard-Vernière, C., Mouquet, C., Picq, C., Trèche, S., 2005. Effects of soaking whole cereal and legume seeds on iron, zinc and phytate contents. *Food Chemistry* 89, 421–425.
- Lestienne, I., Buisson, M., Lullien-Pellerin, V., Picq, C., Trèche, S., 2007. Losses of nutrients and antinutritional factors during abrasive decortication of two pearl millet cultivars (*Pennisetum glaucum*). *Food Chemistry* 100, 1316–1323.
- Lochte-Watson, K.R., Weller, C.L., Jackson, D.S., 2000. Fractionation of grain sorghum using abrasive decortication. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77, 203–208.
- Miche, J.C. (1980). Utilisation potentielle du sorgho dans un système industriel intégré de mouture et de pastification. In "Amélioration des systèmes post-récolte en Afrique de l'Ouest. Agence de Coopération Culturelle et Technique". Paris, France. pp 171–192.
- Murty, D.S., Kumar, K.A., 1995. Traditional uses of sorghum and millets. In: Dendy, D.A.V. (Ed.), *Sorghum and Millets: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, pp. 185–222.
- Mwasaru, M.A., Reichert, R.D., Mukuru, S.Z., 1988. Factors affecting the abrasive efficiency of high-tannin sorghum. *Cereal Chemistry* 65, 171–174.
- Oomah, B.D., Reichert, R.D., Youngs, C.G., 1981. A novel, multi-sample, tangential abrasive dehulling device. *Cereal Chemistry* 58, 392–395.
- Reichert, R.D., Youngs, C.G., 1977. Dehulling cereal grains and grain legumes for developing countries. II. Chemical composition of mechanically and traditionally dehulled sorghum and millet. *Cereal Chemistry* 54 (1), 174–178.
- Scheuring, J.F., Sidibe, S., Rooney, L.W., Earp, C.F., 1983. Sorghum pericarp thickness and its relation to decortication in a wooden mortar and pestle. *Cereal Chemistry* 60, 86–89.

- Serna-Saldivar, J.F., Clegg, C., Rooney, L.W., 1994. Effects of parboiling and decortication on the nutritional value of sorghum (*Sorghum bicolor* L Moench) and pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.). *Journal of Cereal Science* 19, 83–89.
- Simwemba, C.G., Hoseney, R.C., Varriano-Marston, E., Zeleznak, K., 1984. Certain B vitamin and phytic acid contents of pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 32, 31–34.
- Talamond, P., Gallon, G., Trèche, S., 1998. Rapid and sensitive liquid chromatographic method using a conductivity detector for the determination of phytic acid in food. *Journal of Chromatography A* 805, 143–147.
- Yetneberk, S., Rooney, L.W., Taylor, J.R.N., 2005. Improving the quality of sorghum injera by decortication and compositing with tef. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 1252–1258.

3.2.2. Potentialités d'amélioration des teneurs et de la biodisponibilité du fer et du zinc de variétés de mil biofortifiées au cours du décortilage abrasif

Résumé de l'article 2: **Potential of non-GMO biofortified pearl millet (*Pennisetum glaucum*) for increasing iron and zinc content and their bioavailability during abrasive decortication**

Accepté pour publication dans International Journal of Food Sciences and technology

Dans une étude de l'effet du décortilage sur les teneurs et la biodisponibilité du fer et du zinc, deux variétés de mil biofortifiées non OGM, le mil Tabi et le mil GB 8735, ont été comparées à une variété de mil local du Burkina Faso, le mil Gampéla. Les décorticages ont été réalisés au laboratoire avec un décortiqueur abrasif (TADD) et la biodisponibilité du fer et du zinc a été estimée par les rapports molaires phytate/fer et phytate/zinc.

Les variétés biofortifiées Tabi et GB8735 ont des teneurs en fer et en zinc 2 à 3 fois supérieures à celles de la variété locale. Les teneurs en fer des variétés biofortifiées atteignent 7,2 et 6,7 mg/100 g MS, ce qui correspond à la valeur cible des programmes de biofortification de cette céréale. Les teneurs en zinc sont respectivement de 5,6 et 4,1 mg/100 g MS pour les variétés GB8735 et Tabi. Grâce à des cinétiques de décortilage, on a pu montrer que la distribution du fer et du zinc dans les variétés biofortifiées n'était pas significativement différente de celle de la variété locale, et que les teneurs en fer et en zinc diminuaient de manière analogue. Du fait de l'élimination très partielle des phytates, les rapports molaires phytates/fer sont plus faibles dans les variétés biofortifiées comparées à la variété locale, sans toutefois descendre en dessous du seuil correspondant à une amélioration de l'absorption. Cependant, quel que soit le taux d'extraction, les rapports molaires phytate/zinc sont compris entre 4 et 18, montrant que l'absorption du zinc pourrait être meilleure dans des plats préparés avec ces variétés biofortifiées. Les teneurs en autres facteurs chélateurs de minéraux (fibres, polyphénols) ne diminuent toutefois que faiblement au cours du décortilage dans l'ensemble des variétés étudiées.

Potential of non-GMO biofortified pearl millet (*Pennisetum glaucum*) for increasing iron and zinc content and their estimated bioavailability during abrasive decortication

Running title: Iron and zinc in biofortified millet

Fatoumata Hama¹, Christèle Icard-Vernière^{2*}, Jean-Pierre Guyot², Christian Picq², Bréhima Diawara¹, Claire Mouquet-Rivier²

¹IRSAT, Département Technologie Alimentaire, 03 BP 7047, Ouagadougou 03, Burkina Faso

²IRD UMR 204 « Prévention des Malnutritions et des Pathologies Associées » (Nutripass), IRD/Montpellier2/Montpellier1, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

*Corresponding author: christele.verniere@ird.fr

Key words: Phytate/iron ratio; Phytate/zinc ratio; millet; biofortification; bioavailability; decortication; micronutrient; iron; zinc; cereal;

Abstract

Two non-GMO biofortified and one traditional pearl millet varieties were compared in abrasive decortication studies to evaluate their potential for increasing iron and zinc content. The phytate to mineral ratios were used to estimate mineral bioavailability. Iron and zinc contents in the biofortified varieties Tabi and GB8735 were 2 to 3-fold higher than in the traditional variety. Iron content reached 7.2 and 6.7 mg/100 g DM in the biofortified varieties, which corresponds to the target values of biofortification programs. Zinc content was respectively 5.6 and 4.1 mg/100 g DM in the GB8735 and Tabi varieties. Due to the presence of phytate and to other chelating factors that were only partially removed during decortication, there was no improvement in iron bioavailability in the biofortified varieties. But whatever extraction rate, phytate to zinc ratios ranged between 6 and 18: zinc absorption could be improved by using these biofortified varieties for food processing.

Introduction

Micronutrient deficiencies, mainly iron, zinc, iodine and vitamin A, affect more than two thousand million people in the world. This is mainly due the vegetable-based diets of the populations and to crops grown in areas with low mineral phytoavailability, resulting in raw materials with poor nutritional value. Micronutrient deficiencies can be remedied in four different ways: dietary diversification, mineral or vitamin supplementation, food fortification or biofortification (White and Braodley, 2009). These four approaches are complementary and each has its particular strengths, but biofortification, despite numerous studies and continuing development, should not been seen as a substitute for other interventions (Bouis, 2000; Stein *et al.*, 2008).

In areas with low mineral phytoavailability, plant breeding objectives were first to improve farm productivity by developing crops with higher yields (Bouis, 2000, Bouis *et al.*, 2011), and to enhance resistance against pests and diseases and tolerance of environmental stresses, such as drought. The combination of agronomic properties with desirable traits like improved nutritional value came later in plant breeding programs (Graham *et al.*, 1999). Biofortification is the process of generating improved staple food crops that are rich in bioavailable micronutrients. This can be achieved either through conventional breeding, by selecting genotypes with the highest micronutrient content observed in the crop concerned; through genetic modification, such as gene insertion or induced mutations; or through agricultural practices, such as application of fertilizer containing the mineral, as reported for zinc by Hotz, (2009). Beyond a significant increase in micronutrient content, recently illustrated by the increase in ferritin content of a rice variety (Briat *et al.*, 2010), another possible breeding strategy to improve mineral bioavailability is increasing the levels of promoter compounds such as amino acids. However, the decrease of the content of substances that decrease mineral bioavailability such as phytate should not be sought because this would have unacceptable effects on crop yields or susceptibility to stress (Bouis, 2000; Raboy, 2009).

A more promising approach, reported by Raboy (2009) consists in engineering “high phytase” seeds. Many studies on iron or zinc homeostasis are underway to advance our understanding of the mechanisms involved, with a view to improving plant properties, as reviewed by several authors (Clemens *et al.*, 2002, Palmgren *et al.*, 2008, Jeong and Guerinot, 2009).

Food fortification is considered to be the safest and most cost-effective approach for populations who consume significant quantities of industrially manufactured foods, but fortification has proved to be ineffective or impracticable in several developing countries for technical reasons (inappropriate chemical nature of iron fortification, insufficient levels of fortification, etc.) as well as for economic reasons, mainly due to poor education, undeveloped communication systems and lack of general infrastructure (Hurrell *et al.*, 2010, Brinch-Pedersen *et al.*, 2007). Supplementation strategies that are not food based are not discussed in this paper.

Meenakshi *et al.* (2010) evaluated the potential net benefits of biofortification with provitamin A, iron, and zinc of a variety of staple foods (rice, wheat, cassava, maize, sweet potato, beans) in Africa, Asia, and Latin America. These authors showed that significant effects can be achieved in developing countries, but with differences among crops, micronutrients and countries. Other projects are underway on these staple foods (Hotz, 2009) and also on sorghum (<http://biosorghum.org>), but very little information is available on millet (<http://www.harvestplus.org/content/iron-pearl-millet-india>).

Beyond improving the micronutrient content of staple food crops, it is important to take into account the amount of micronutrients that remain in the grains after standard processing, as well as their bioavailability in the usual daily diet (Hirshi, 2008; Hotz, 2009). The bioavailability of a nutrient is defined as the proportion of the ingested micronutrient that is absorbed and used for normal body functions (Fairweather-Tait *et al.*, 2007). It depends both on dietary factors and on the characteristics of the subject. Phytate is the main inhibitor of iron (Hurrell and Egli, 2010) and zinc (Hambidge *et al.*, 2010) absorption in plant based diets. In the case of zinc, the adverse effect is dose dependent (Gibson *et al.*, 2010). Phytate to mineral ratios can be used to estimate the effects of phytates on absorption. To improve iron absorption, the phytate to iron ratio should be <1:1 and preferably <0.4:1 in plain cereal and legume based meals containing no iron absorption enhancers and in composite meals containing enhancers like ascorbic acid or meat, respectively, or <6:1 in composite meals including vegetables that contain ascorbic acid and meat as enhancers (Hurrell and Egli, 2010). To improve zinc absorption, if the phytate to zinc ratios are higher than 18, which is the case in diets based on unrefined cereals, zinc absorption is estimated to be 18 to 28% whereas at phytate to zinc ratios of between 4 and 18, absorption is 26-34% (IZINCG, 2004).

Decortication is commonly one of the first steps in the preparation of traditional cereal based dishes in West Africa. The aim is to separate the bran, a coloured and not easily digestible grain fraction, from the starchy endosperm, but part of the germ is often removed during the process. Although the pericarp contains mostly fiber, the aleurone layer - located between the pericarp and the endosperm- and the germ contain a large proportion of micronutrients of the grains (Favier *et al.*, 1989). Abrasive decortication is frequently used at laboratory scale to simulate industrial or traditional mechanical decortication, to study the effect of this process in cereal based foods (Hama *et al.*, 2011, Lochte-Watson *et al.*, 2000; Yetneberk *et al.*, 2005).

The aim of this study was to evaluate the ability of two biofortified millet varieties selected by conventional breeding to produce flours with increased iron and zinc contents, or with improved iron and zinc bioavailability, after decortication at different extraction rates.

Materials and methods

Plant material

Three varieties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) were used. A local yellow variety, Gampela millet, was purchased from a local producer who works for the Environmental and Agricultural National Research Institute (INERA) in Ouagadougou (Burkina Faso). The two biofortified varieties, Tabi millet and GB8735 millet, were supplied by the International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) in Mali. The grey coloured GB8735 variety resulted from recurrent selection of local cultivars from Niger and was obtained in 1987. The yellow Tabi variety was a free pollination variety recently developed in Niger and is still at the experimental stage.

Sample preparation and grain characteristics

Mean grain diameter (measured with a calliper rule) and grain length were estimated with 20 repetitions. The AHI (Abrasive Hardness Index), corresponding to the time required to remove 1% of the kernel by abrasive dehulling was determined according to Mwasaru et al. (1988) or Lawton and Faubion (1989) after decortication with a Tangential Abrasive Dehulling Device (TADD). Thousand kernel weight (TKW) was measured with a Numigral Counter (Sinar Technology, Surrey, UK).

The decorticated grains were milled with a laboratory mill (IKA M20, Labortechnik, Staufen, Germany), sieved to pass through a 0.5 mm screen and stored at 4 °C for further analysis.

Decortication process

Laboratory decortication was performed with a Tangential Abrasive Decortication Device (TADD, Venables Machine Works Ltd, Saskatoon, Saskatchewan, Canada). The initial moisture content of the Gampela, Tabi and GB8735 grains was 6.2 %, 7.2% and 8.8% respectively, and was adjusted to 10% by shaking the grains with the appropriate amount of water in sealed plastic bottles on a rotary shaker (Reax 2, Heidolph, Schwabach, Germany) at 30 rpm overnight. Tempered grains (20 g) were used for the decortication experiments, which were performed in triplicate for different durations of 30 s to 9 min, and of 12 and 18 min for the hard grains like those of GB 8735 in order to completely remove the peripheral parts of the grains.

Analytical methods

Starch content was determined using the K-TSTA “Total starch in cereal products” assay kit (Megazyme, Wicklaw, Ireland). *Lipid* content was determined by the semi-automatic 2055 Soxtec system (Foss, Nanterre, France), approved by AOAC according to the 2003.05 and 2003.06 procedures. *ADF fibre (Acid Detergent Fibre)* content, which corresponds approximately to cellulose and lignin contents, was determined using the gravimetric method of Van Soest (1963) in a Dosi-fiber (Foss, Nanterre, France). *Phytate* content was determined by determination of myo-inositol hexaphosphate (IP6) content by

anion-exchange liquid chromatography according to the method of Talamond *et al.*, (1998) with the modifications of Lestienne *et al.*, (2007), and using an AS-11 pre-column and column kit (Dionex, Sunnyvale, USA). Total phenolic compounds were extracted twice from 50 mg of flour in 1.5 mL 70% acetone. Total phenolic compounds were then measured following the method of Singleton and Rossi (1965) using Folin-Ciocalteu's reagent (F9252, Sigma-Aldrich, France). Gallic acid (G7384, Sigma-Aldrich, France) was used as standard and the results are expressed in mg of gallic acid equivalent (GAE) per 100 g dry matter (DM). Iron and zinc contents were analyzed with a Perkin-Elmer AAnalyst 800 atomic absorption spectrometer after microwave digestion as previously reported (Hama *et al.*, 2011).

Calculation of extraction rates, dry matter losses and component loss rates

The extraction rate (ER) was calculated as the proportion of the weight of decorticated grains in the initial weight of the grains. Dry matter (DM) losses were calculated as the complement to 100 of the previous ratio on a dry weight basis. The extraction rate (ER) and corresponding 100-DM losses were almost the same due to the adjustment of grain water content to 10% before decortication. Component losses were determined by subtracting from 100 the ratio (multiplied by 100) of the quantity of the component remaining in the grain after decortication in the quantity initially measured in the grains.

Statistical analysis

Biochemical analyses were performed in triplicate. Values were averaged. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and Tukey's tests were used to compare means at the 5% significance level, using the software Statgraphics Plus version 5.1.

Results and discussion

Characterization of the millet varieties

Based on TGW and on length and diameter (Table 1), the GB8735 grains were the largest and the Tabi grains were the smallest. Tabi and GB8735 grains had a higher fibres:TGW ratio than the control, indicating a larger amount of pericarp in the biofortified varieties than in the traditional variety. For Tabi grains, this result is in agreement with Abdelrahman *et al.*, (1984) and Hama *et al.*, (2011), who showed that the relative amount of pericarp in grains increased with a decrease in the size of the seed. The result for GB8735 grains was more surprising, because these grains were bigger than Tabi grains and had also a higher fibre content. This may be due to properties of the variety. After calculating the length:mean diameter ratios, it was concluded that Gampela grains were rounder than those of Tabi and GB8735, which were elongated, which may have an influence on their decortication behaviour.

The abrasive hardness index (AHI) of GB8735 was high, close to 39 s. It was twice as high as that of Gampela and 2.7 times higher than that of Tabi,. This shows that GB8735

grains were much harder than those of the two other millet varieties and also harder than grains of sorghum cultivars, whose AHI ranges from 3.1 to 18.0 s (Mwasaru *et al.*, 1988). Kernel characteristics of Gampela and Tabi millet varieties were similar but differed from those of GB8735.

Table 1 gives details of the composition of the whole grains of each variety with respect to the main nutrients either related to a specific tissue, e.g. starch, fibres, or lipids, or to mineral content and bioavailability, e.g. phytates and phenolic compounds. Starch content was almost the same in the three varieties. The lipid content of the biofortified varieties, especially Tabi, was higher than that of the traditional Gampela. The lipid content of Tabi variety is also higher than that of GB8735. Despite the fact GB8735 grains are bigger than those of Tabi, as lipids are mainly located in the grain germ (Abdelrahman *et al.*, 1984), it was concluded that the amount of germ is not proportional to the size of the grain. Iron content was about 70% higher in the biofortified varieties than in the traditional Gampela variety, with values reaching respectively 7.2 and 6.7 mg/100 g DM in Tabi and GB8735 varieties versus 4.1 mg/100 g DM in Gampela. These iron contents are close to the preliminary target level of 7.7 mg of iron per 100 g of biofortified pearl millet developed by Harvest Plus for India (<http://www.harvestplus.org/content/iron-pearl-millet-india>). Significant differences, ranging from two to almost three fold, in initial zinc content were observed between the traditional and the biofortified varieties but also within biofortified varieties. Both micronutrients were enriched in the two biofortified varieties studied here. Very little information was found in the literature on zinc biofortified varieties, except on the Harvest Plus website, which reports that biofortified wheat with targeted zinc value of 3.3 mg zinc per 100 g is currently under development. Fibre content was also higher in the biofortified varieties, which is in good agreement with previous results on kernel characteristics. Whatever the millet variety, phenolic compounds ranged between 250-350 mg GAE/100 g DM, i.e. in the same range as pearl millet varieties from Sudan (El Hag *et al.*, 2002). In Tabi and GB8735, phytate content was respectively 20 and 46% higher than that in Gampela millet.

Effect of abrasive decortication on nutrient contents and losses

The kinetics of grain weight losses during decortication confirmed the greater hardness of GB8735 grains highlighted by its AHI (Figure 1). The Tabi variety suffered the highest losses, reaching 22% after 4.5 min of decortication, similar to Gampela (about 19%) while in GB8735, losses were less than 10%. After 9 min, losses reached around 50% in Tabi and Gampela, but only 24% in GB8735.

Changes in nutrient contents during decortication are shown in Figures 2a to 2g and nutrient losses at three extraction rates are shown in Table 2. These ranges of extraction rates correspond to decortication levels encountered in the field in Burkina Faso. After decortication with a mortar and pestle or mechanical decortication, Hama *et al.*, (2011) found DM losses ranging from 18 to 30% and 9 to 25%, respectively. Extraction rates of around 70% are also reported in the field and even in the literature (Hotz, 2009). For

practical reasons, in this paper, we distinguished three levels of extraction rate: low ER (69-71%), medium ER (76-80%) and high ER (89-91%).

In all three millet varieties studied, iron content decreased sharply immediately after decortication began and continued until the extraction rate reached 97%, showing that the iron was most concentrated in the outer parts of millet grains (figure 2.a). The decrease in iron content remained high until 88-91% of extraction. In the Gampela and Tabi varieties, iron losses were close to 46% at high ER, and were significantly lower (around 34%) in GB8735 millet. Iron content then decreased more progressively whatever the variety. At low ER, iron content was about 3.2 mg/100 g DM in the biofortified varieties and 2.0 mg/100 g DM in the Gampela variety, showing that the differences in iron contents between the traditional and biofortified varieties were still present after decortication, even if they were small at low ER. It thus appears that the additional iron supplied by biofortification via conventional breeding, which is the largest pool of iron in the grain, is uniformly distributed throughout the grain tissues.

In the Gampela variety, zinc content remained stable during abrasive decortication, attesting to the uniform distribution of this micronutrient in the grain (figure 2.b). Losses were low, ranging from 6.6 to 29.5% at high and low ERs, and were always significantly lower than zinc losses in the biofortified varieties. At medium and low ERs, zinc losses differed significantly in the three varieties: losses were highest in the GB8735 variety and the lowest in Gampela. Differences in zinc content between varieties thus tended to decrease as decortication progressed. Nevertheless, even at low extraction rates, after decortication, zinc content in the biofortified varieties was still significantly higher than that of the Gampela variety (3.2 and 3.7 vs 2.0 mg/100 g DM). In the biofortified varieties, there was not only more zinc in the outer parts of the grains than in the traditional Gampela variety but also in the inner parts of the grains, as shown by the highest zinc content after equivalent decortication levels. The benefits of these biofortified varieties thus appear to be real at medium and high extraction rates, i.e. around 80-90%. But as chelating factors in the grain may impair mineral bioavailability their presence must be taken into account.

During decortication, the phytate content of the grains decreased at different rates depending on the variety (figure 2.c). At high ER, phytate losses in GB8735 and Gampela varieties were low: 13-16%. Losses were significantly higher in the grains of the Tabi variety, around 33%. This result revealed an interesting characteristic of the biofortified Tabi variety. At lower extraction rates, when most bran was removed, phytate losses continued to increase, reaching 43.5% in the Gampela variety and 67-68% in the biofortified varieties at medium ER, with contents around 0.5 g/100 g DM. Biofortified varieties had higher initial phytate contents than the traditional variety but more phytate was removed during abrasive decortication, especially in the Tabi variety. Whatever the variety, the linear decrease in phytate content between 90 and 50% ER showed that phytates were uniformly distributed in the inner part of the grains, most probably in the endosperm when considering starch results. In all cases, at decortication levels corresponding to traditional processing in Africa,

at least 40% of the initial phytate content remained in the grains. These remaining phytates may have a strong negative effect on micronutrient bioavailability.

The decrease in phenolic compounds in the Gampela and GB8735 varieties was progressive and in line with the extraction rate, indicating uniform distribution of the phenolic compounds in both the peripheral tissues and in the endosperm (figure 2.d). This result was a little surprising because phenolic compounds are usually reported to be located in the pericarp and testa tissues (Kloppfenstein and Hosney, 1995). The concentration of phenolic compounds in the Tabi variety was initially 33% higher than that in the other varieties but decreased sharply up to 95% ER and then a little more slowly, to reach a third of its initial value at 75% ER. The curve representing phenolic content as a function of the extraction rate resembled that of fiber content, showing that both components were mainly located in the bran in Tabi. Whatever the millet variety, at low ER, i.e. close to 30%, which corresponds to decortication levels usually encountered in Africa, the residual phenolic content was about half its initial value, showing that a non-negligible proportion was located in the endosperm.

From the beginning of decortication, and at extraction rates above 92%, the lipid content of the three varieties increased slightly, showing that the material containing no lipids had been removed (figure 2.e). At high ER, lipid losses differed significantly in the three varieties. This shows that the germ was not attacked immediately after the beginning of decortication, but that initial losses concerned peripheral parts of the grains. Progressively, these peripheral tissues were abraded to varying extents, depending on the germ size and on its more or less embedded position in the grain. Thereafter, the lipid content decreased proportionally to the extraction rate, about twice as rapidly in the biofortified varieties as in the traditional one: at medium ER, almost half the lipids were lost in the two biofortified varieties but only 16% in the Gampela variety. It can thus be hypothesized that the germ of the biofortified varieties was not only bigger than that of Gampela millet, but also that it is located in a more external position in the grain, which may result in a lower lipid content in decorticated grains. It is interesting to note that even at very low extraction rates (around 50%), the residual lipid content was not negligible.

Whatever the variety, the fibre content of the grains decreased sharply immediately after decortication began and continued until extraction rates reached 93%, and subsequently more progressively (figure 2.f). At high and medium ER, fibre losses were significantly lower in Gampela (around 50%) than in the biofortified varieties (74% in Tabi and 85% in GB8735). Thus, even if biofortified varieties had higher initial fibre contents, their fibres are more easily removed and after decortication, their fibre contents were similar or even lower. This may have an enhancing effect on mineral bioavailability as some fibres are known to be mineral chelators (Camara and Amaro, 2003). At extraction rates close to 50%, fibre contents were 0.5-1g/100 g DM whatever the variety, showing that almost all bran had been

removed; the residual fibre probably corresponded to the cellulose and lignin in the cell walls of the endosperm.

Starch content increased progressively with the extraction rate, due to the fact the starch was located in the endosperm and to the removal of the pericarp, aleurone layer and germ (figure 2.g). The biggest increase in starch content was obtained at the lowest extraction rate in the Tabi variety, which was previously shown to be the easiest to decorticate. At high ER, starch losses were significantly lower in the GB8735 than in Tabi and Gampela, probably due to a thicker pericarp and higher hardness levels. But at extraction rates below 75%, there was no longer any significant difference between the three varieties. High starch losses occurred at a low extraction rate, and hence produced a low yield of flour from millet grains. Consequently, to limit losses of this energetic nutrient, high extraction rates are recommended.

Calculation of phytate/iron and phytate/zinc molar ratios

In Gampela and GB8735 varieties, the phytate/iron molar ratio increased at high ER and leveled off at medium and low ER, but in the Tabi variety, this ratio decreased at low ER (figure 3). Whatever the decortication rate, the phytate/iron molar ratios of the biofortified varieties were lower than that of Gampela, but remained greater than 1, the threshold value for cereal based dishes under which an increase in iron absorption could be achieved. These results also show that cereal based foods prepared with decorticated grains from traditional or biofortified varieties will exhibit low iron bioavailability, unless biotechnological processes such as fermentation or malting are included in processing, as these enable a decrease in phytate content through phytase activation. The phytate/zinc molar ratios of biofortified varieties were at least twice lower than that of Gampela millet whatever the decortication rate. Thus all values in biofortified varieties were below 18, corresponding to moderate zinc bioavailability (around 30%) (Gibson, 2006), while they were much higher than the threshold value of 18 in Gampela millet, corresponding to low zinc bioavailability (around 15%). At extraction rates of less than 70%, the phytate/zinc molar ratios decreased in all varieties. In Tabi millet, it almost reached the threshold value of 4, at which zinc bioavailability is qualified as good, but such extraction rates are unrealistic in the field as they entail enormous waste of the harvest. The relative stability of the molar ratios was due to simultaneous phytate, iron and zinc losses during decortication from the grain tissues where they are mainly located, in the bran and the aleurone layer for phytate and iron, and in the germ for zinc. In food processed using decorticated biofortified varieties, zinc could reach a moderate level of bioavailability, but this also depends on other technological processes than decortication used to prepare the food. Greffeuille *et al.* (2011) showed that the processes may have a positive effect on the phytate/iron and phytate/zinc molar ratios during traditional African processing of maize. In all cases, accompaniments that are consumed at the same time as cereal based foods, such as vegetable sauces, must also be taken into account when evaluating the overall bioavailability of iron and zinc in the diet, as they can provide more iron and zinc, but also some phytate or other chelating factors.

Special care should be paid to complementary foods for young children because studies of the phytate to mineral ratios have only been conducted in adults, and it is unclear if the results are also applicable to infants and young (Gibson *et al.*, 2010). An appropriate combination of different strategies – decortication, biofortification, improved food processing and formulation – would probably be required to produce cereal based foods with both satisfactory iron and zinc content and bioavailability. But to ensure better results in the future, in the development of more appropriate biofortified staple foods, new biofortified varieties should be developed by breeders and plant scientists with increased micronutrient content in the starchy portion of the grain, to protect them against removal by decortication (Hotz, 2009).

Conclusion

Iron and zinc contents in the biofortified varieties Tabi and GB8735 were 2 to 3-fold higher than those in the local Gampela variety. During decortication, the distribution of iron and zinc in biofortified millet grains did not differ significantly from that of traditional Gampela millet, and changes in iron and zinc contents followed more or less the same pattern, with a decrease of their content in both cases. After decortication at high to medium extraction rates, iron and zinc contents were still twice as high in biofortified varieties as in the traditional variety, but at lower extraction rates, the benefits of using biofortified varieties were lower. Even if phytate/iron molar ratio was not decreased during decortication at the range of extraction rates encountered in the field, the iron bioavailability assessment was better in the biofortified varieties, above all in Tabi. On the other hand, changes in phytate/zinc molar ratios revealed that it is possible to improve zinc absorption, which is low in the traditional variety, and moderate in the biofortified varieties. This result is the first optimistic prognosis for the use of these non-GMO biofortified millet varieties. But the effects of subsequent processing steps on the phytate/iron and phytate/zinc molar ratios should be investigated up to the final form in which the millet is consumed. Consumer acceptability of dishes prepared with these non-GMO biofortified varieties should also be checked as their use might result in changes in the color, texture or taste of the food.

Acknowledgements

The authors are thankful to Eva Weltzien from ICRISAT (Mali) for providing biofortified varieties and for helpful discussions. This research was realized in the framework of INSTAPA Project, funded by the European Union's Seventh Framework Programme [Fp7/2007-2013] under grant agreement n°211484.

REFERENCES

Abdelrahman, A., Hosney, R.C. & Varriano-Marston E (1984). The proportions and chemical compositions of hand-dissected anatomical parts of pearl millet. *Journal of Cereal Science*, **2**, 127–133.

AOAC - Association of Official Agricultural Chemists (2006). Crude fat in Feeds, cereal Grains, and forages Randall/Soxtec/Hexanes Extraction-Submersion Method. First Action 2003 , Final Action 2006.

Bouis, H.E. (2000). Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. *Nutrition*, **16**, 701-704.

Bouis, H.E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J.V. & Pfeiffer, W.H. (2011). Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food and Nutrition Bulletin*, **32(1)**, S31-S40.

Briat, J.-F., Duc, C., Ravet, C. & Gaymard, F. (2010). Ferritins and iron storage in plants. *Biochimica et Biophysica Acta*, **1800**, 806-814.

Brinch-Pedersen, H., Borg, S., Tauris, B. & Holm PB (2007). Molecular genetic approaches to increasing mineral availability and vitamin content of cereals. *Journal of Cereal Science*, **46**, 308-326.

Camara, E. & Amaro, M.A. (2003). Nutritional aspect of zinc availability. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **54**,143-151.

Clemens, S., Palmgren, M.G. & Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, **7**, 309-315.

El Hag, M.E., El Tinay, A.H. & Yousif, N.E. (2002). Effect of fermentation and dehulling on starch, total polyphenols, phytic acid content and in vitro protein digestibility of pearl millet. *Food Chemistry*, **77**, 193-196.

Fairweather-Tait, S., Phillips, I., Wortley, G., Harvey, L. & Glahn, R. (2007). The use of solubility, dialyzability, and Caco-2 cell methods to predict iron bioavailability. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, **77**, 158-165.

Favier, J.-C. (1989). Valeur nutritive des céréales au cours de leurs transformations. In « Céréales en régions chaudes », AUPELF-UREF, Eds John Libbey Eurotext, Paris, pp 285-297.

Gibson, R.S. (2006). Zinc: the missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries. *Proceedings of the Nutrition Society*, **65**, 51-60.

Gibson, R.S., Bailey, K.B., Gibbs, M. & Ferguson, E.L. (2010). A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. *Food and Nutrition Bulletin*, **31**, S134-S146.

Graham, R.D., Senadhira, B.S., Iglesias, C. & Monasterio, I. (1999). Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crops Research*, **60**, 57-80.

Greffeuille, V., Kayodé, A.P.P., Icard-Vernière, C., Gnimadi, M., Rochette, I. & Mouquet-Rivier, C. (2011). Changes in iron, zinc and chelating agents during traditional African

processing of maize: effect of iron contamination on bioaccessibility. *Food Chemistry*, **126**, 1800-1807.

Hama, F., Icard-Vernière, C., Guyot, J.-P., Picq, C., Diawara, B. & Mouquet-Rivier, C. (2011). Evolution of the micro- and macronutrient composition of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) and white sorghum (*Sorghum bicolor*) during in field versus laboratory decortications. *Journal of Cereal Science*, **54**:425-433.

Hambidge, K.M., Miller, L.V., Westcott, J.E., Sheng, X. & Krebs, N.F. (2010). Zinc bioavailability and homeostasis. *American Journal of Clinical Nutrition*, **91**, 1478S-1483.

Harvest Plus (<http://www.harvestplus.org/content/iron-pearl-millet-india>)

Hirschi, K. (2008). Nutritional improvements in plants: time to bite on biofortified foods. *Trends in Plant Science*, **13**, 459-463.

Hotz, C. (2009). The potential to improve zinc status through biofortification of staple crops with zinc. *Food and Nutrition Bulletin*, **30**, S172-S178.

Hurrell, R. & Egli, I. (2010). Iron bioavailability and dietary reference values. *American Journal of Clinical Nutrition*, **91**, 1461S-1467.

Hurrell, R., Ranum, P., de Pee, S., Biebonger, R., Hulthen, L., Johnson, Q. & Lynch, S. (2010). Revised recommendations for iron fortification of wheat flour and an evaluation of the expected impact of current national wheat flour fortification programs. *Food and Nutrition Bulletin*, **31**, S7-S21.

IZiNCG (International Zinc Nutrition Consultative Group): Brown, K.H., Rivera, J.A., Bhutta, Z., Gibson, R.S., King, J.C., Lönnerdal, B., Ruel, M.T., Sändtrom, B., Wasantwisut, E., Hotz, C. (2004). Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food and Nutrition Bulletin*, **25**, S99-S199.

Jeong, J. & Guerinot, M.L. (2009). Homing in on iron homeostasis in plants. *Trends in Plant Science*, **14**, 280-285.

Klopfenstein, C.F. & Hosney, R.C. (1995). Nutritional properties of sorghum and millets. In: Dendy, D.A.V. (Ed.), *Sorghum and Millets- chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, MN, pp 125-168.

Lawton, J.W. & Faubion, J.M. (1989). Measuring kernel hardness using the tangential abrasive dehulling device. *Cereal Chemistry*, **66**, 519-524. Lestienne, I., Buisson, M., Lullien-Pellerin, V., Picq, C. & Trèche, S. (2007). Losses of nutrients and anti-nutritional factors during abrasive decortication of two pearl millet cultivars (*Pennisetum glaucum*). *Food Chemistry*, **100**, 1316-1323.

Lochte-Watson, K.R., Weller, C.L. & Jackson, D.S. (2000). Fractionation of grain sorghum using abrasive decortication. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **77**, 203-208.

Meenakshi, J. V., Johnson, N.L., Manyong, V.M., DeGroot, H., Javelosa, J., Yanggen, D.R., Naher, F., Gonzalez, C., García, J. & Meng, E. (2010). How cost-effective is biofortification in combating micronutrient malnutrition? An Ex ante Assessment. *World Development*, **38**, 64-75.

Mwasaru, M.A., Reichert, R.D., Mukuru., S.Z. (1988). Factors affecting the abrasive dehulling efficiency of high-tannin sorghum. *Cereal Chemistry*, **65**, 171-174.

Palmgren, M.G., Clemens, S., Williams, L.E., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J.K. & Sanders, D. (2008). Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends in Plant Science*, **13**, 464-473.

Raboy, V. (2009). Approaches and challenges to engineering seed phytate and total phosphorus. *Plant Science*, **177**, 281-296.

Singleton V.L. & Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, **16**, 144-158.

Stein, A.J., Meenakshi, J.V., Qaim, M., Nestel P., Sachdev, H.P.S., Bhutta, Z.A. (2008). Potential impacts of iron biofortification in India. *Social Science & Medecine*, **66**, 1797-1808.

Talamond, P., Gallon, G., & Trèche, S. (1998). Rapid and sensitive liquid chromatographic method using a conductivity detector for the determination of phytic acid in food. *Journal of Chromatography A*, **805**, 143-147.

Van Soest, P.S. (1963). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds IV- Determination of plant cell-wall constituents. *Journal of Association of Official Analytical Chemistry*, **50**, 50-55.

White, P.J. & Broadley, M.R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Physiology*, **182**, 49-84.

Yetneberk, S., Rooney, L.W. & Taylor, J.R.N. (2005). Improving the quality of sorghum injera by decortications and compositing with tef. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **85**, 1252-1258.

Table 1 : Characteristics of local and biofortified varieties of pearl millet

Millet variety	Gampela	Tabi	GB 8735
Kernel characteristics			
1000 grain weight TKW (g)	8.0	6.8	11.4
fibers :1000 grain weight	0.313	0.470	0.342
ratio length:diameter	1.36	1.52	1.46
mean diameter (mm)	2.5	2.1	2.6
AHI (s)	19.0	14.7	38.9
Nutrient content (/100g DM)			
iron (mg)	4.05 ± 0.62	7.20 ± 0.22	6.73 ± 0.08
zinc (mg)	2.02 ± 0.05	4.11 ± 0.46	5.63 ± 0.02
phytates (g)	0.65 ± 0.02	0.78 ± 0.04	0.95 ± 0.05
phenolic compounds (g GAE)	0.28 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.26 ± 0.02
lipids (g)	4.7 ± 0.3	6.6 ± 0.2	5.8 ± 0.2
ADF fibres (g)	2.6 ± 0.4	3.3 ± 0.2	4.0 ± 0.0
starch (g)	72.2 ± 0.5	71.8 ± 0.3	71.9 ± 2.0

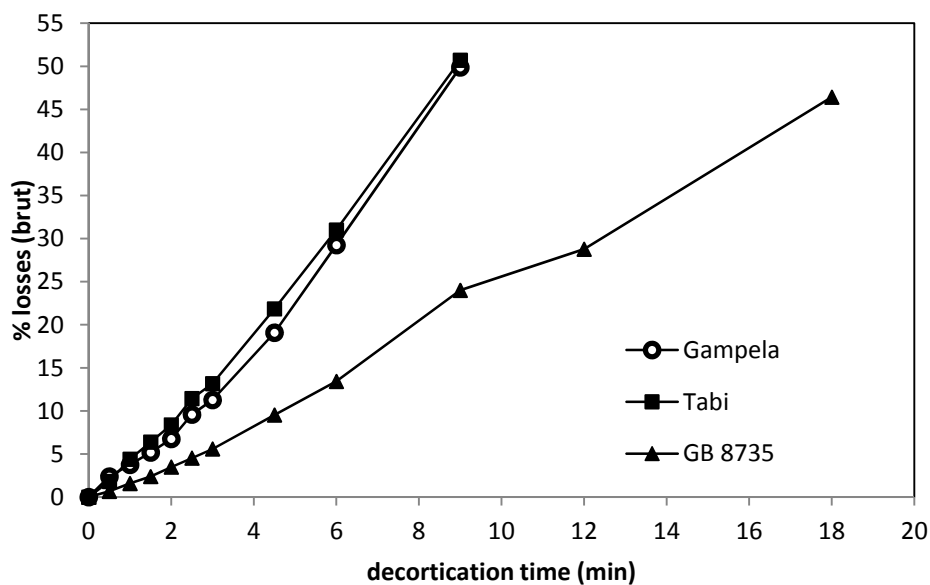


Figure 1: Millet grain losses during abrasive decortications

Table 2 : Changes in nutrient losses at different ranges of extraction rates

Range of extraction rates		89 – 91 (high)			76 – 80 (medium)			69 – 71 (low)		
		Gampela	Tabi	GB 8735	Gampela	Tabi	GB 8735	Gampela	Tabi	GB 8735
millet variety	iron	46.5 ± 1.7 ^a	45.6 ± 1.0 ^a	33.9 ± 0.7 ^b	62.9 ± 3.5 ^a	57.1 ± 1.1 ^b	56.4 ± 0.4 ^b	65.5 ± 1.3 ^a	70.1 ± 1.0 ^b	65.6 ± 1.5 ^a
	zinc	6.6 ± 0.8 ^a	15.9 ± 1.8 ^b	14.8 ± 0.5 ^b	21.2 ± 1.6 ^a	31.3 ± 2.1 ^b	41.4 ± 0.4 ^c	29.5 ± 1.1 ^a	46.3 ± 1.2 ^b	53.8 ± 0.3 ^c
	phytates	16.6 ± 3.2 ^a	33.3 ± 0.5 ^b	12.8 ± 3.9 ^a	30.4 ± 1.8 ^a	52.4 ± 4.9 ^b	53.1 ± 11.4 ^b	43.5 ± 12.0 ^a	64.5 ± 4.8 ^b	60.7 ± 10.5 ^{a,b}
	fibres	31.4 ± 1.8 ^a	47.0 ± 4.8 ^b	52.5 ± 3.1 ^b	43.3 ± 2.1 ^a	67.3 ± 3.7 ^b	68.0 ± 4.9 ^b	51.5 ± 4.1 ^a	73.7 ± 0.9 ^b	84.6 ± 1.6 ^c
	lipids	2.3 ± 0.1 ^a	17.4 ± 1.6 ^b	7.4 ± 2.7 ^c	15.9 ± 4.2 ^a	46.4 ± 0.4 ^b	44.6 ± 4.2 ^b	24.3 ± 1.2 ^a	59.3 ± 0.9 ^b	57.4 ± 4.3 ^b
	starch	6.9 ± 1.4 ^a	7.5 ± 1.4 ^a	1.3 ± 1.6 ^b	14.3 ± 0.4 ^a	14.5 ± 0.8 ^a	15.2 ± 1.5 ^a	23.7 ± 1.7 ^a	19.3 ± 5.7 ^a	26.6 ± 3.0 ^a
	phenolic compounds	23.0	41.5	33.5	39.0	57.0	58.5	51.0	65.5	ND

Different superscript letters in the same row correspond to significant differences ($p < 0.05$); tests were performed separately for each range of extraction rates

ND = not determined.

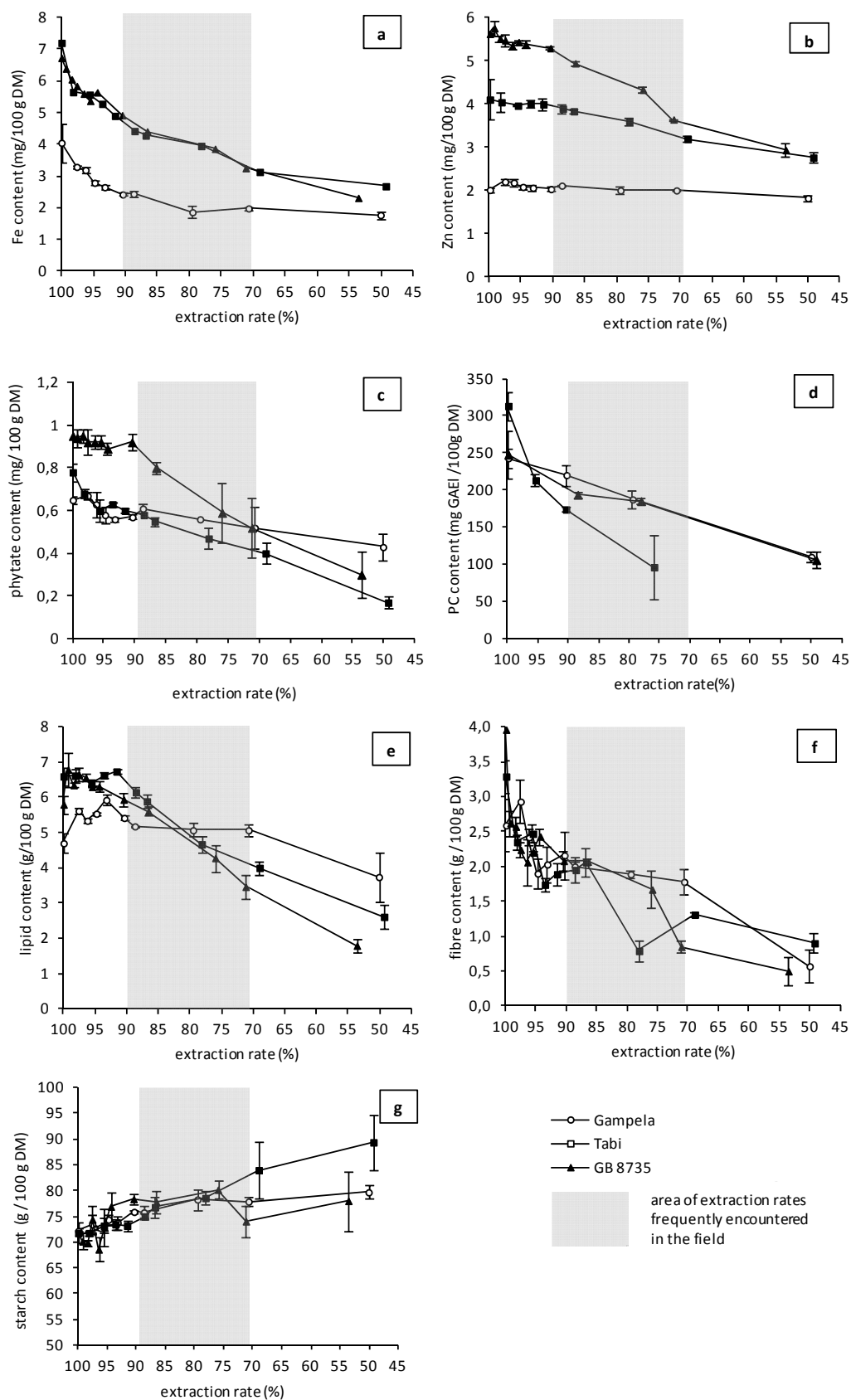


Figure 2 a - g: Effects of abrasive decortication on the nutrient content of different millet varieties : a. iron, b. zinc, c. phytate, d. phenolic compounds, e. lipid, f. fibres, g.

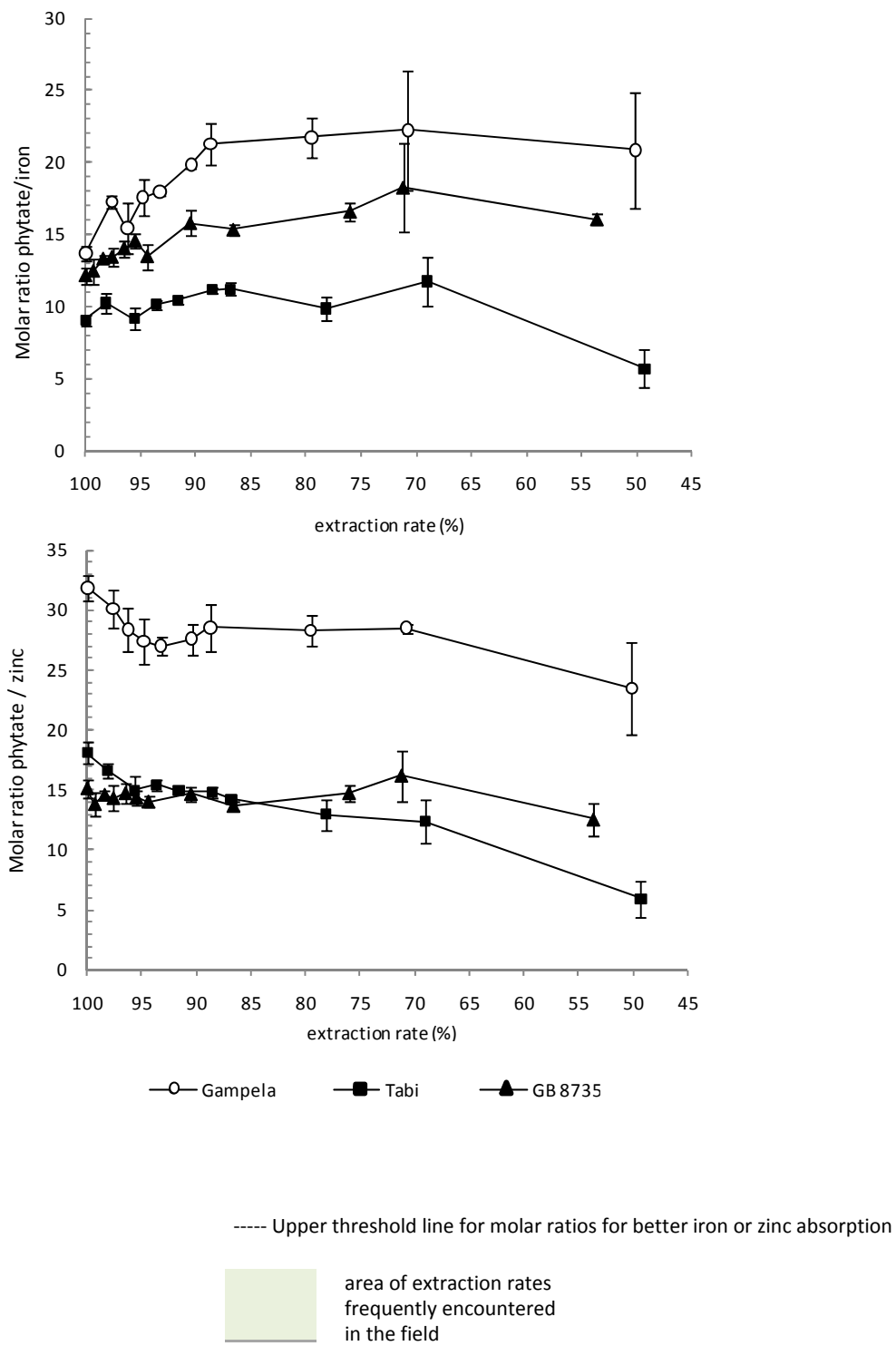


Figure 3: Changes in phytate/iron (a) and phytate/zinc (b) molar ratios in different millet varieties during abrasive decortication with TADD

3.2.3. Biodisponibilité du fer intrinsèque et du fer de contamination au cours des moutures traditionnelles et de la production du tô.

Faisant suite au projet d'article présenté ci-après, un paragraphe (3.2.3.2) apportera quelques résultats complémentaires obtenus sur le maïs.

3.2.3.1. Résumé du projet d'article sur la mouture

La contamination en fer a été mesurée dans des variétés locales de mil et de sorgho blanc du Burkina Faso, après décorticage et mouture traditionnels réalisés à Ouagadougou selon différentes méthodes, manuelle à l'aide d'un pilon et d'un mortier, ou bien mécaniques avec un décortiqueur ou un moulin de quartier. Les résultats ont été comparés avec une mouture en conditions contrôlées réalisée au laboratoire. Le décorticage n'entraîne pas de modification significative de la teneur en fer total des farines : il est vraisemblable que les pertes de fer consécutives à l'élimination des enveloppes au cours du décorticage soient compensées par une contamination en fer au cours de l'opération unitaire.

Pendant la mouture au contraire, des contaminations en fer importantes ont été mises en évidence lors de l'utilisation de la méthode mécanique, alors que la méthode manuelle n'entraîne pas de contamination significative. Dans les différents échantillons de mil et de sorgho, les teneurs en fer de contamination sont comprises entre 3 et 6 mg/100g MS, selon la nature des meules des moulins (fer ou corindon). Pour le mil, la contamination en fer est plus élevée après mouture avec des meules en fer comparée à celle réalisée avec des meules en corindon. Des mesures de bioaccessibilité ont ensuite été réalisées sur des tô, plats de base traditionnels au Burkina Faso, préparés avec des farines de mil et de sorgho fortement ou faiblement contaminées en fer. Les résultats ont permis de montrer que les pourcentages de fer dialysable étaient plus élevés dans les tô faiblement contaminés en fer. Les quantités de fer dialysables sont également plus importantes dans le tô de mil faiblement contaminé comparé au tô de mil contaminé, alors qu'un résultat inverse est obtenu pour le sorgho. Dans les tô préparés avec les farines faiblement contaminées, la bioaccessibilité du fer, mesurée en quantité ou en pourcentage, est 2,5 fois plus élevée dans le mil que dans le sorgho. Quelle que soit la céréale, les pourcentages et les teneurs en fer insolubles sont nettement plus importants dans les tô de mil et de sorgho préparés à partir des farines très contaminées en fer, indiquant que le fer de contamination a probablement rejoint en grande partie cette fraction. Cependant, les teneurs en fer solubles sont également plus élevées dans les tô préparés à partir des farines très contaminées en fer, ce qui suggère que cette fraction pourrait être partiellement mobilisable par la mise en œuvre de procédés visant à réduire les teneurs en facteurs chélateurs. Mais dans les tô tels que préparés traditionnellement, il apparaît clairement que le fer de contamination n'est pas bioaccessible et ne peut donc contribuer à améliorer le statut en fer des populations.

BIOACCESSIBILITY OF INTRINSIC AND CONTAMINANT IRON DURING IN-FIELD MILLING OF MILLET AND SORGHUM AND “TÔ” PROCESSING

Christèle Icard-Vernière^{a*}, Fatoumata Hama^b, Jean-Pierre Guyot^a, Bréhima Diawara^b, Claire Mouquet-Rivier^a

^a IRD, UMR 204 « Prévention des Malnutritions et des Pathologies associées » (Nutripass), IRD/Université Montpellier 2/ Université Montpellier 1, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

^b IRSAT, Département Technologie Alimentaire, 03 BP 7047, Ouagadougou 03, Burkina Faso

* Corresponding author: Christèle Icard-Vernière

IRD, UMR 204 « Prévention des Malnutritions et des Pathologies associées » (Nutripass), IRD/Université Montpellier 2/ Université Montpellier 1, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France

christele.verniere@ird.fr

Tel. +33467416280; Fax +33467416157

Projet d'article préparé pour soumission à Journal of Agricultural and Food Chemistry

Abstract

Iron contamination was measured in millet and sorghum grains after decortication and milling with different devices, in field in Burkina Faso and under controlled conditions. Few iron contamination occurred during decortication. Contaminant iron after mechanical milling was about 3-6mg/100gDM, depending on the grindstones. In millet, contaminant iron was significantly higher in mechanically decorticated grains milled with iron grindstones compared to the same grains milled with corundum grindstones. Contamination level was variable and mainly due to devices wear. In a bioaccessibility study on traditional cereal pastes called tô, prepared with contaminated or not contaminated flours, it was shown that the quantity and the percentage of dialyzable iron was significantly higher in the not contaminated dishes. Bioaccessibility of iron in tô was 2.5 fold higher in millet than in sorghum. For both cereals, contaminant iron was not bioaccessible and cannot contribute efficiently to improve micronutrient status of people in developing countries.

Keywords: contamination, decortication, milling, iron, phytate, grindstone, bioavailability, phytate/iron molar ratio, Burkina Faso

Introduction

Iron and zinc deficiencies are the most prevalent micronutrient deficiencies worldwide and specially in developing countries, affecting particularly women and children (Zimmerman and Hurrell, 2007). In these countries, people diet is mainly based on cereals and legumes, whose mineral content is low and content in chelating agents is high. Moreover, the form of the mineral is of great importance. The type of iron entering this plant-based diet is mainly non-haem iron, which bioavailability is known to be low compared to haem iron found in animal products. The fate of non-haem iron pool in the duodenum is greatly influenced by dietary factors mainly by the presence of chelating agents like phytate or some phenolic compounds that impair its absorption by enterocytes (Hurrell and Egli, 2010), . These compounds also influence the absorption of others divalent cations like zinc (Lonnerdal, 2000). The bioavailability of iron and zinc, corresponding to the fraction of these ingested minerals that is absorbed in the gastrointestinal tract and used for normal body functions, is then lower in plant-based diets compared to diets including both plant and animal sources.

Food processing is also known to influence mineral content and bioavailability (Watzke, 1998). In post-harvest processing of cereals, grain decortication is often practiced in northern as in southern countries. In previous studies, Hama et al (2011, and 2012 in press) showed that during traditional manual or mechanical decortication of millet, iron losses were about 50% while zinc losses were lower, ranging from 46 to 35%. For sorghum, zinc losses were a bit higher than iron losses. The type of grain was more influent than the method of decortication. For local as for biofortified varieties, phytates and other chelating agents were only partially removed during decortication. The influence of other food unit operations of cereal processing on mineral content were studied by Greffeuille et al (2011), showing various effects depending on the process, and highlighting the effect of cereal fermentation for iron and zinc bioavailability improvement.

As reported by Harvey et al (2000) in a literature review, extrinsic iron may represent several times the iron content in the staple foods or dishes from developing countries, with iron coming from food contamination by soil or dust, from iron leaching into food during storage and cooking or from contamination during food processing. Cary et al (1994), in an experimental study in the USA, reported that 70% of the iron in plant samples could originate from soil particulate inclusion by the plant tissues during its growth and was considered as contamination iron. Despite careful washing of plants or grains for the preparation of most dishes, extrinsic iron is still recovered in foods consumed. Extrinsic iron may then increase largely the **iron intake** in developing countries. Contaminant iron on the surface of cereals and pulses purchased in a market in India was estimated to be 13-47% of total iron (Prabhavathi and Rao, 1981). Abebe et al (2007) found iron contents up to 20 times higher in endogenous Ethiopian teff compared to other cereals like maize and barley and assigned it to **soil** contamination, linked to the traditional method of threshing. Teff is also a very small cereal grain and due to its larger specific surface, soil contamination is higher than for bigger grains. Analogous soil contamination of teff was found by Hallberg and Bjorn-Rasmussen (1981). The same authors also measured 30mg iron/100 g in rice flour

purchased in a Thai market whereas the iron content was only 1.4 mg/100g in polished rice from the same market, showing that the levels of extrinsic iron from soil, or may be also due to milling, can be very high. A non negligible part of extrinsic iron in foods can also come from **cookware**. Park and Brittin (1997) showed that the iron content of most foods cooked in stainless steel utensils was higher than that of the same foods cooked in glass ware, with a small but significant mean difference of about 0.11 mg/100g. Similarly, Adish et al (1999) obtained from 1.5 to 2 fold much iron in Ethiopian foods cooked in iron pots compared to the same foods cooked in aluminum or clay pots. However, the authors showed large variations between countries and depending on factors like the size of the cooking pot. **Food processing** can also have an effect on the total iron content of flours. Prabhavathi and Rao, (1981) showed that a significant increase of iron content, ranging 2 to 7 mg/100 g, was measured in the flour after the milling, and estimated that less than 2% of this contaminant iron was in an absorbable form. When comparing the iron contents of rice flour and polished rice coming from the same Thai market, Hallberg and Björn-Rasmussen (1981) measured a difference in iron content of 28.6 mg/100g, attributable to contamination. By using a strong magnet, they showed that about 60% of this contaminant iron was metal particles from the flour-mill. More recently, in a study of African traditional processing of maize, Greffeulle et al (2011) also measured iron content increases ranging from 43 to 138% between grains and flours, increasing with milling intensity. The contaminant iron represented 1 to 3.3 mg/100 g DM, that is to say more than intrinsic iron.

Beyond its contribution to iron intake, contaminant iron can have a nutritional interest only if it participates to iron status improvement. This is hardly measurable and lead to controversial results. Therefore, contaminant iron, as intrinsic iron, should be **absorbed** in the small intestine, and for that it should be first exchangeable, is soluble in the intestine to join the common non-haem pool. The absorption of exchangeable contaminant iron is subject to the same interactions with other constituents in the diet as the non-haem intrinsic iron. Abebe et al (2007) reported that there is no simple method predicting the exchangeability of contaminant iron. A radioiron absorption study to determine soil addition to rice-based Thai meals was conducted by Hallberg et al (1977). This study showed that depending on pH, there was either partial or no exchangeability of iron from clay. And when exchangeable, the iron from clay was available for absorption. It was then suggested that the form of iron in foods contaminated with soil influences iron absorption (Hallberg and Björn-Rasmussen, 1981). Derman et al (1982) showed that the most common forms of contaminant iron, ferric oxide and ferric hydroxide, added to maize porridge to simulate contamination, were poorly available and that addition of ascorbic acid improved the absorption at a level neighboring the non-haem dietary iron pool. Adish et al (1999) found that children fed from iron pots had lower rates of anemia and better growth than children who did not. In a systematic review, Geerligts et al (2003) also showed that eating foods prepared in iron pots increased the hemoglobin concentration of anemic/iron deficient individuals.

The first aim of this work was to measure the iron contamination levels in millet and sorghum grains of the same seed lots after decortication and milling with different devices in field and under controlled conditions. Zinc contents were determined simultaneously. The second objective was to assess the bioavailability of contaminant iron using *in vitro* digestion followed by measurements of dialyzable, soluble and insoluble iron. The traditional paste “tô” was prepared “as eaten” with either contaminated or non-contaminated flours for this purpose.

2. Materials and methods

2.1. Millet and sorghum

Grains of a yellow local pearl millet (*Pennisetum glaucum*) variety called ‘Gampela’ and of a local white sorghum (*Sorghum bicolor*) variety called ‘Fibmigou’ were purchased from producers working for the National Environmental and Agricultural Research Institute (INERA) in Ouagadougou (Burkina Faso). About 150 kg of each were purchased in order to work with the same batches throughout the study.

2.2. Experimental design and process for decortication and milling

In Ouagadougou (Burkina Faso), about 120 kg of millet and sorghum grains were sorted and washed (Figure 1). Ten seed lots of 10 kg of the washed millet and sorghum grains were decorticated, five manually and five mechanically as specified below, and 20 kg of the remaining washed grains were kept to realize controls in the laboratory. Three of the five seed lots of millet and sorghum grains, which weighed about 8 kg after manual or mechanical decortication, were divided into three small seed lots of 2 kg. Each of them was then milled either manually with a mortar and pestle, or mechanically with a device with either iron or corundum milestones. The two remaining small seed lots were kept for further control milling with a laboratory miller. Manual decortication with wooden pestle and mortar was performed, by a woman skilled at using this traditional process to decorticate grains in the home. Mechanical decortication was performed in a small unit using a motorized device of the Engelberg type. In towns, women usually bring their grains to this type of unit for decortication. Ten kg of grains were used for each decortication experiment. The woman in the home and the miller in the decortication unit used their know-how for grain humidification to facilitate decortication (by pouring small quantities of water onto the grains) and for the duration of the process. After taking a sample for dry matter content (DMC) measurement, one kg of each batch of decorticated grains was spread out (sheltered from dust) to air-dry before analysis.

Laboratory milling was performed with a mill IKA M20 (Labortechnik, Staufen, Germany), sieved to pass through a 0.5 mm screen and stored at 4 °C until analysis.

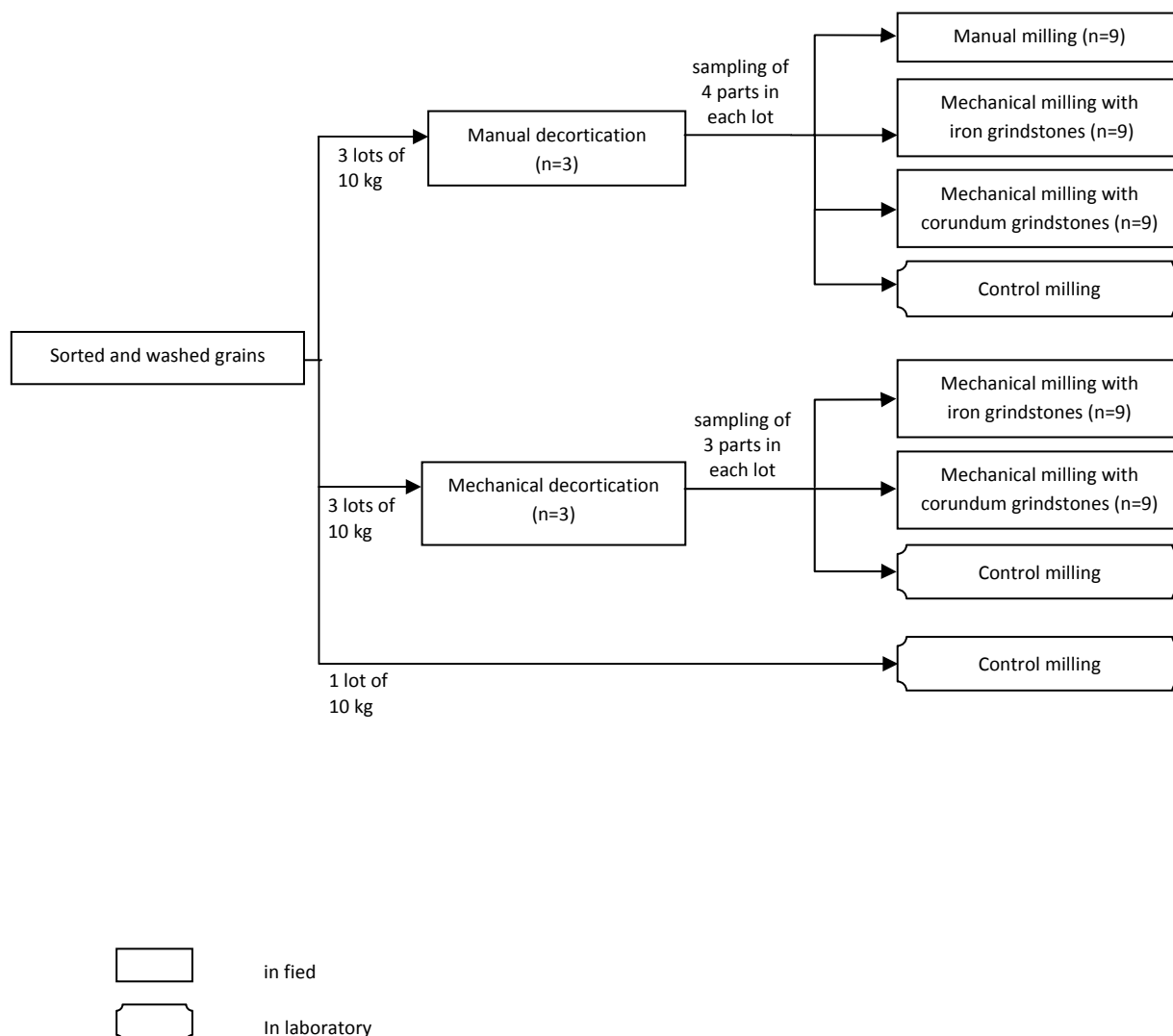


Figure 1: Experimental design for decortication and milling of millet and sorghum

2.3. Standardized cereal processing into « t \hat{o} »

A cereal-based thick paste –locally called « t \hat{o} », »- was prepared with a dry matter content of about 22-23% according to a traditional recipe from Burkina Faso (Greffeuille et al, 2010) adapted for quantities to laboratory practice (Figure 2). The initial flour, resulting from milling of decorticated grains, was divided in two parts, a small one of 15 g and a larger one of 25 g. The small part of flour was mixed with 40 g of ultrapure water to obtain a flour suspension which was then mixed with 140g of boiling ultrapure water. The “thin gruel” obtained was cooked for 2 min, mixed with the saved large part of flour, cooked again for 6 min while stirring. The paste obtained was the “t \hat{o} ”. Optionally, as sometimes observed in field, the pH of t \hat{o} was lowered by replacing part of water by tamarind juice.

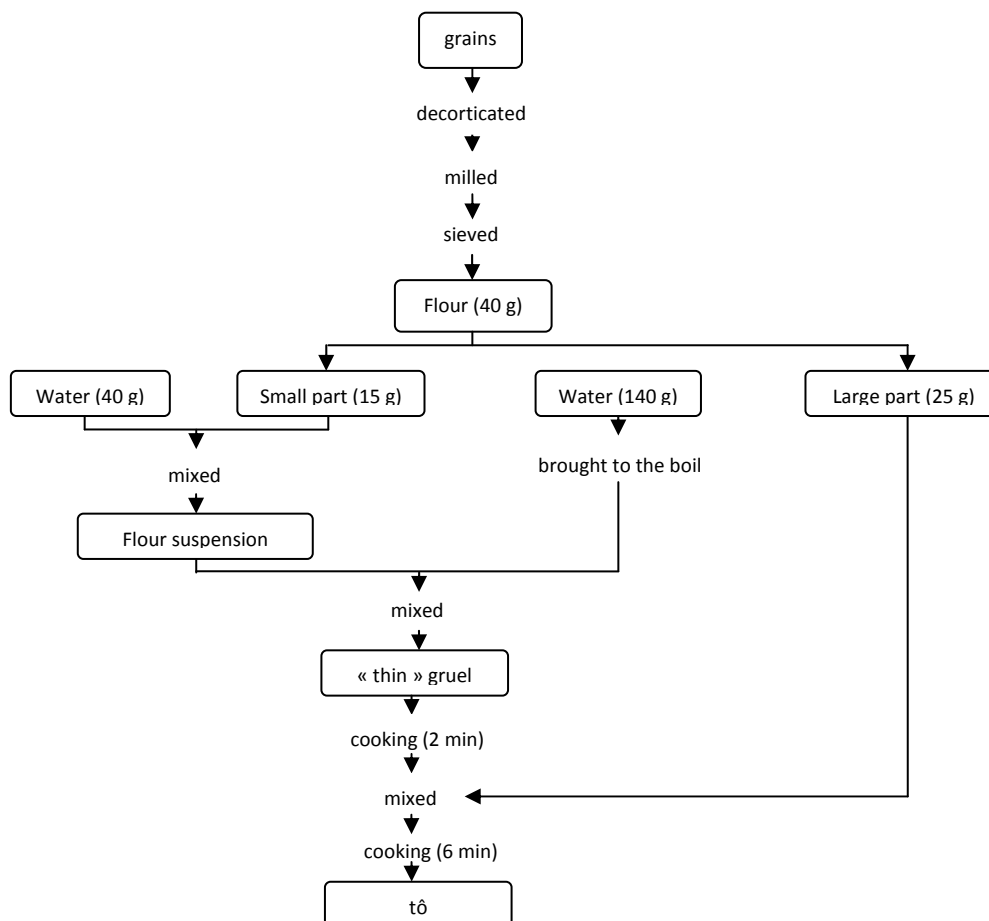


Figure 2: Standardized method for the preparation of t̂o in the laboratory

2.4. Analytical methods

DM contents were determined by oven drying at 105 °C to constant weight. Phytate content was determined after extraction in acid solution (HCl 0.5 M) at 100°C for 6 min by measuring the myo-inositol hexaphosphate (IP6) content obtained by high performance anion-exchange chromatography according to the method described by Lestienne et al. (2005, 2007), and using an AS-11 pre-column and column kit (Dionex, Sunnyvale, USA). Iron and zinc were extracted with a closed-vessel microwave digestion system (ETHOS-1, Milestone, Italy) from about 0.4 g of flour in a 7:1 nitric acid/hydrogen peroxide mixture. The closed vessels were placed in a microwave oven and digested at 1200 W power for 30 min. Iron and zinc content were analysed by atomic absorption spectrometry using a Perkin-Elmer AAnalyst 800 atomic absorption spectrometer with a deuterium background corrector. The elements were identified by air-acetylene flame.

Iron bioaccessibility was determined by enzymatic in vitro digestion according to the method of Greffeuille et al (2011), based on the methods of Wolfgor et al (2002) and Miller et al (1981), with modifications. First, the titratable acidity of the samples was determined (Wolfgor et al., 2002) in order to determine the molarity of the PIPES (piperazine-N,N'-bis-[2-

ethanesulfonic acid] sodium salt) buffer (Sigma, P-3768) that will be used thereafter, specifically for each sample, for pH equilibration.

For the gastric digestion, *tô* samples were firstly diluted with ultrapure water and homogenized, to obtain a dry matter content neighboring 9-10% in sealed glass flasks and brought to 37 °C in a water bath. 20 µL of alpha-amylase from *Bacillus licheniformis* (Sigma A-3403-1MU) was added to the samples that were then incubated at 37°C for 5 min. After an adjustment of the pH to 2.0 with 1 M HCl, 1 mL of pepsin solution was added (Sigma, P-7000, 14900 u/mL in 0.1 M HCl) and the samples were incubated horizontally for 1 h at 37°C in a shaking water bath. Aliquots of 40 g of each pepsin-digested sample were then transferred in separate large tubes for the intestinal digestion. To gradually increase the pH to mimic intestinal digestion, a dialysis bag (Spectra/por I dialysis tubing, MCO 12-14kDa) containing 20 mL of the PIPES buffer of the previously determined molarity, was introduced into each large tube that were incubated at 37 °C for 30 min to reach pH 6.7. Five mL of enzyme solution, containing pancreatin (Sigma, P1750, 1.85 mg/mL) and bile extract solution (Sigma, B8631, 11 mg/mL in 0.1M NaHCO₃), were then added before incubation for 2 h at 37°C horizontally in a shaking water bath. During incubation, dialyzable iron diffused into the dialysis bag, to reach the same concentration on both sides of the membrane.

Thereafter, dialysis bags were removed and washed with pure water. Their content, the dialysates, were weighed. The digestion mixtures remaining in the tubes were centrifuged at 10 000 g for 15 min at 4 °C to separate insoluble and soluble iron fractions, respectively in the pellet and supernatant. Thus, the sum of dialyzed, soluble non-dialyzed and insoluble fractions should be equal to the total amount of mineral in the sample before digestion.

The dialysates, supernatants and pellets were analyzed for iron contents as previously described. Iron contents of the pellets corresponded to the insoluble fraction of iron after enzymatic digestion. Dialysable and soluble non dialysable (soluble ND) Fe were calculated as follows:

$$\text{Dialysable Fe \%} = C_D (W_D + W_S) / (C_D W_D + C_S W_S + C_I W_I) \times 100$$

And

$$\text{Soluble ND Fe \%} = W_S (C_S - C_D) / (C_D W_D + C_S W_S + C_I W_I) \times 100$$

where C_D , C_S and C_I are iron concentrations in the dialysate, supernatant and pellet fractions in µg/100g and W_D , W_S and W_I are the weights (g) of dialysate, supernatant and pellet fractions.

All samples were analyzed at least in triplicate.

2.6. Statistical analysis

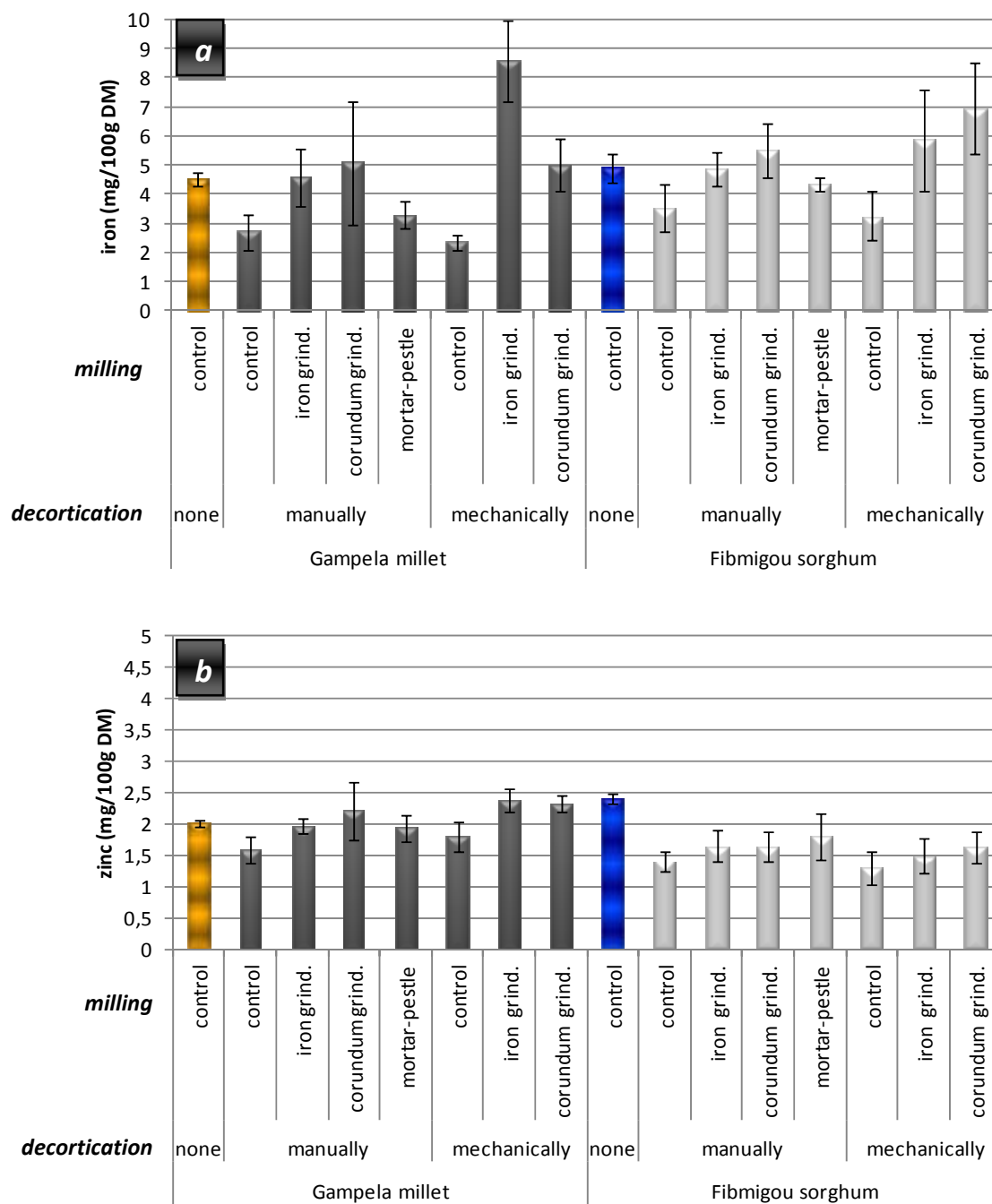
Biochemical analyses were performed in triplicate. Values were averaged. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and Fischer's least significant difference (LSD) tests were used to compare means at the 5% significance level, using the software Statgraphics Plus version 5.1.

3. Results and discussion

3.1. Effect of decortication and milling processing techniques on iron and zinc content in millet and sorghum

Iron contents were determined in Gampela millet and Fibmigou sorghum after control milling of whole grains and decorticated grains with the laboratory mill and after milling of manually or mechanically decorticated grains either with mortar and pestle, or with mechanical devices equipped with iron or corundum grindstones (Figures 3a and 3b). Grains decorticated mechanically are traditionally never milled manually that is why the corresponding samples were not prepared. Zinc contents were also, for its nutritional interest and also as a negative control of contamination, due to its very low concentration in soil and dust, iron or corundum grindstone. In the Earth's crust, iron is the fourth most abundant element representing about 5% of its weight, but with huge variations depending on the soil type, whereas there are only traces of zinc.

Iron contents of manually and mechanically decorticated millet grains milled with the control mill were very close, and about 40 to 50% lower than the iron content of the whole grains milled in the same way. This result is in good agreement with previous results (Hama et al, 2011) and corresponds to losses of the iron located in the peripheral parts of the grains, namely the pericarp and part of the aleurone layer that are removed during decortication. The iron content in the grains decorticated manually and milled with mortar and pestle is a bit higher, but the difference was not significant. This may be due to dust contamination during milling, which is realized outside in a windy environment, and the soil in Burkina Faso is known to be iron-rich. The same manually decorticated grains milled with the mechanical devices with either corundum or iron grindstones have iron content higher than the initial iron content of the grains, showing a contamination by exogenous iron. The standard deviations of all results for samples obtained in field are high, especially with the mechanical devices equipped with corundum grindstones, showing that the contamination randomly occurs. Compared to the control milling, the increase in iron content after mechanical milling - whatever the grindstones - ranges from about 60 to 80%, reaching final iron content up to 8.5 mg/100gDM. The iron content in mechanically decorticated grains is not significantly different from the grains manually decorticated after control milling for both. But a 3 to 4 fold increase in iron content is measured in grains milled mechanically with the devices equipped with iron grindstones, and at least a 2 fold increase is obtained with the corundum grindstones. This confirms our previous hypothesis of an iron contamination probably due to the wear of the grindstones of the devices, but may be also of others metallic pieces of the mill as show by iron contamination after milling with corundum grindstones. These results are in good agreement with Prabhavathi and Rao, (1981) and Greffeuille et al (2011), who obtained similar iron contamination attributable to milling devices.



Analogous results were obtained for sorghum, except for the mechanical milling of mechanically decorticated grains: with the iron grindstones, the iron increase was a bit less than 2 fold compared to control milling whereas it was a bit higher than 2 folds with the corundum grindstones, but no significant difference was measured. In both cases, high standard deviations were obtained, probably due the heterogeneity of the the wear of metallic parts of the mill according to the milling units.

For millet as for sorghum, zinc contents of decorticated grains, were and remained low after milling even if a slight increase appeared after milling in field, whatever the method. Iron contents ranged from 1.6 to 2.4 mg/100g DM. This did not correspond to consistent changes. The main difference between millet and sorghum is that more zinc is lost in sorghum during decortication, as shown when comparing zinc content in decorticated grains compared to the control not decorticated. This was already reported in Hama et al (2011) who obtained zinc losses after manual and mechanical decortication of respectively 55 and 59% in sorghum, whereas they were only 46 and 35% in millet, mainly due a higher germ removal in sorghum. These results also confirm our previous hypothesis that no significant zinc contamination occurs during the first steps of cereal processing.

3.2. Factors influencing iron content in decorticated and milled cereal grains

All iron contents in millet and sorghum grains after milling, with and without previous decortication were subjected to multifactorial anova analysis, including the type of cereal, the method of decortication and the method of milling as factors (Table 1).

Table 1: Effects of processing factors on iron content after decortication and milling (ANOVA analysis)

			iron		
	p		n	mean	SD
			(mg/100gDM)		
cereal	0.0147	Gampela millet	63	3.99 ^a	± 2.02
		Fibmigou sorghum	44	4.89 ^b	± 1,55
decortication	0.1196	mortar-pestle	56	4.01	± 1.33
		mechanical	43	4.78	± 2.50
		without	8	4.61	± 0.31
milling	0.0000	control	48	3.09 ^a	± 0.95
		mortar-pestle	12	3.82 ^a	± 0.63
		iron grindstones	24	5.96 ^b	± 2.00
		corundum grindstones	23	5.65 ^b	± 1.61

Values in a column for the same process with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$).

The parameter “cereal” was significant. Iron contents were quite high in millet as in sorghum, neighbouring respectively 4 and 5 mg/100g DM, but with significantly higher content in sorghum. Decortication also affects iron content but not significantly and depending on the decortication method used. There was a small difference on iron content between mechanical and manual decortication, but iron content of decorticated grains was close to that of whole grains. This hides the decreasing effect of decortication on iron content, as previously shown by Hama et al (2011). The effect of milling was on the contrary highly significant, showing that this processing technique have a great influence on iron content. Iron contents were higher after milling with mortar and pestle than after control milling, but the difference was not significant. And iron contents were also much higher after mechanical milling, either with iron or corundum grindstones, than after mortar and pestle milling, and the difference was significant. Iron contamination appears then clearly, with probable different origins, mainly from devices but also from soil. No significant differences appeared between samples milled with iron grindstones and those milled with corundum grindstones. The contamination effect of mechanical milling could mainly be due to the contact with metallic parts of the device, and not specifically the grindstones.

3.3. pH effect on iron bioaccessibility in *tô* prepared with iron contaminated flour

Traditionally in Burkina Faso, *tô* is sometimes acidified during its preparation for organoleptic purpose. Moreover, as several authors have already shown that a low pH of the food obtained by fermentation can favour a better micronutrient bioavailability (Greffeulle, 2011, Proulx, 2007), iron bioaccessibility was measured in *tô* prepared at different pH ranging from 4.3 to 6.5 corresponding to the range that can be encountered in field with a millet flour highly contaminated in iron (Table 2).

Table 2: Phytate/Fe molar ratio and iron bioaccessibility in millet *tô* prepared at different pH with an iron contaminated flour

<i>tô</i> pH	Total iron	phytate	IP6/Fe molar ratio	Dialysable iron		Soluble ND iron		Insoluble iron	
	(µg/100 g DM)	(g/100 g DM)		(µg/100 g DM)	(%)	(µg/100 g DM)	(%)	(µg/100 g DM)	(%)
4.3				320 ^a ± 130	3.8 ^a ± 1.4	1738 ^a ± 306	20.8 ^a ± 3.2	6274 ^a ± 288	75.4 ^a ± 4.4
5.3	8579 ± 641	0.30	3.0	249 ^a ± 83	2.6 ^a ± 0.9	1822 ^a ± 205	19.0 ^a ± 2.4	7539 ^b ± 300	78.4 ^a ± 3.0
6.5				236 ^a ± 90	2.8 ^a ± 1.2	2157 ^a ± 661	25.0 ^a ± 9.0	6371 ^a ± 1221	72.3 ^a ± 10.0

Values in a column for the same process with different superscript letters are significantly different (p < 0.05).

There was no significant effect of *tô* pH on dialyzable, soluble ND or insoluble iron either expressed as contents or as percentages. At the three levels of pH, dialyzable iron was about 3% of total iron, while soluble non dialyzable and insoluble iron represented respectively about 20 and 75% of total iron. In all cases, it can be hypothesized that iron bioavailability

was low and that contaminant iron did probably not join the non haem iron exchangeable pool of the food. Conversely, Hallberg et al (1977) obtained a partial isotopic exchange between clay iron and intrinsic iron in *in vitro* studies using radioiron when the pH was low whereas it was not the case at higher pH. After dialysis and ultrafiltration studies in sorghum beer, Derman et al (1980) showed that a large part of soluble iron was in an ionic form or complexed with low-molecular-weight compounds. But at neutral pH, they obtained little or none chelator that could stabilize iron in a soluble form. None of these pH effects was obtained with the *tô*, maybe due to protective effect of the matrix with a high stability of iron complexes, or due to the fact that the pH tested were not low enough.

3.4. Iron bioaccessibility of intrinsic and contaminant iron in millet and sorghum-based *tô*.

For millet as for sorghum, the estimation of iron bioavailability was performed in samples of *tô* prepared with flour either with a high level of iron, supposed to be highly iron contaminated, or with a low iron level, supposed to be less contaminated (Table 3).

Table 3: Phytate/Fe molar ratio and iron bioaccessibility in millet and sorghum *tô* prepared from flours highly or slightly contaminated with iron

Samples	Iron cont. level	Total iron (µg/100g DM)	phytate (g/100g DM)	IP6/Fe molar ratio	Dialysable iron		Soluble ND iron		Insoluble iron	
					(µg/100g DM)	(%)	(µg/100g DM)	(%)	(µg/100 g DM)	(%)
millet	high	8766	0.30	2.9	207 ^a ± 61	2.4 ^a ± 0.8	1895 ^a ± 181	21.5 ^a ± 3.2	6777 ^a ± 790	76.1 ^a ± 3.8
	low	3668	0.25	5.8	503 ^b ± 169	13.0 ^b ± 3.1	927 ^b ± 208	25.1 ^a ± 9.5	2384 ^b ± 584	61.8 ^b ± 7.6
sorghum	high	8043	0.71	7.5	372 ^a ± 40	4.5 ^a ± 0.2	1899 ^a ± 116	23.0 ^a ± 0.8	5991 ^a ± 615	72.5 ^a ± 0.8
	low	3835	0.59	13.1	200 ^b ± 40	5.2 ^a ± 0.7	1005 ^b ± 76	26.4 ^a ± 2.4	2631 ^b ± 437	68.4 ^b ± 2.0

cont.= contamination

Values in a column for the same cereal with different superscript letters are significantly different (p < 0.05).

The *tô* were prepared without pH adjustment, i.e. the initial pH was about 6.5, as it was previously shown that *tô* pH had no effect on iron bioaccessibility. For both cereals, total iron content was at least two fold higher in the iron-contaminated flour compared to the less-contaminated one, showing that extrinsic iron is quantitatively more important than intrinsic iron. Millet and sorghum flours were chosen to have analogous total iron content, whatever the contamination level. In both cases, iron contents reached 8000-9000 µg/100gDM in iron-contaminated flours, what was a much higher contamination level than that obtained by Greffeuille et al (2011) in maize flour in Benin, whom iron content was about 4800 µg/100g DM. It can be assumed that iron-contamination by the dust is more important in Burkina Faso compared to Benin, where the soil is probably richer in iron and the weather is dry and windy. The devices used to mill the grains are also different, with a higher wearing of metallic parts. Phytate content in sorghum was more than two fold higher

than in millet. This result was in good agreement with Hama et al (2011) who obtained similar results in decorticated grains of millet and sorghum. Then, the phytate/iron molar ratios of the iron-contaminated millet and sorghum flours were also about twice smaller than in the less contaminated flour. In all cases, they are above 1, the threshold value under which the intestinal iron absorption is optimal, but the values are not high. It can be assumed that these flours, used in composite meals including vegetables that contain ascorbic acid and meat as enhancers, could lead to molar ratios below 6, i.e. will show a quite good iron absorption. The only exception could be with the less-contaminated sorghum flour, whom phytate to iron ratio exceeds 13.

As nutrient bioaccessibility is preferably measured in “as eaten” foods, *tô* were prepared as described previously with one sample of contaminated and not contaminated flour of millet and sorghum. They will be called “iron-contaminated *tô*” and “less-contaminated *tô*” in the following text.. In iron-contaminated *tô* prepared from millet, the content and the percentage of dialyzable iron were very low, showing a poor bioaccessibility. Percentage of dialyzable iron did not exceed 2.4%. The quantity and percentage of dialyzable iron were significantly higher in less-contaminated *tô*: they were respectively 2.4 and 5.4 fold higher than in the iron-contaminated *tô*. In millet, contaminant iron was not bioaccessible and moreover impaired the dialysability, then the bioaccessibility, of intrinsic iron. For sorghum, the quantity of dialyzable iron was significantly higher in the case of iron-contaminated *tô* compared to the less-contaminated one, but the percentage of dialyzable iron, ranging from 4.5 to 5.2%, was a bit lower, although not significantly. When comparing cereals, it appears that bioaccessibility in less-contaminated *tô*, measured by the quantity of dialyzable iron, was 2.5 fold better in millet compared to sorghum. It might be due to the lower content of phytates in millet, and probably of phenolic compounds, other component chelating iron and impairing its bioavailability in foods.

The content in soluble ND iron, representing the fraction of total iron potentially absorbable but most probably engaged in molecular complexes, was significantly higher in millet and sorghum iron-contaminated *tô* compared to the less-contaminated ones. However, the percentages of soluble ND iron were not significantly different, ranging from 21 to 26%. It may be assumed that iron in soluble fraction could be released and dialyze if less chelating factors were present initially in the food or if part of them were destroyed during food processing. This could be a way to obtain a better iron bioaccessibility in these cereals products.

Insoluble iron represented the largest fraction in millet and sorghum *tô*, iron-contaminated or not: the percentage of insoluble iron ranged from 61-68% in less-contaminated millet and sorghum *tô*, and from 72 to 76% of total iron in contaminated one. But in millet as in sorghum, the percentages of insoluble iron were significantly higher in iron-contaminated *tô* compared to the less-contaminated one. The quantity of insoluble iron was also much higher in iron-contaminated *tô*, especially for millet.

To better understand the fate of extrinsic iron and its distribution between the fractions during *in vitro* digestion, differences in total, dialyzable, soluble and insoluble iron were

calculated from data expressed in $\mu\text{g}/100\text{gDM}$ in iron-contaminated or less-contaminated flour or *tô*. In millet, extrinsic iron represented about 5100 $\mu\text{g}/100\text{gDM}$ and was divided into soluble and insoluble fractions, for respectively a fifth and four fifth. It was thus estimated that 60% of intrinsic iron joined the pool of extrinsic iron. The distribution was a bit different for sorghum: extrinsic iron, which represented about 4200 $\mu\text{g}/100\text{gDM}$, joined the soluble fraction for about 4%, about 20% joined the dialyzable fraction and the rest was in the insoluble fraction. For both cereals, it appears clearly that most part of extrinsic iron was not bioaccessible because insoluble but that part of it can be considered as potentially absorbable. The soluble fraction may be considered as an intermediate fraction, which composition influences the fate of iron. In a perspective of improving the bioaccessibility of iron during processing of foods, as the insoluble fraction is the largest, it forms also the best stock of iron and special attention should probably be paid to it to mobilize iron to get a larger dialyzable fraction.

These results obtained after *in vitro* digestion showed that in presence of contaminant iron, molar ratios iron/phytate gave an inverse relationship of iron bioavailability assessment. For millet as for sorghum, the lowest molar ratios were obtained in the iron-contaminated dishes whereas percentage of dialyzable iron was lower. To our knowledge, this result was not previously reported in the literature.

Abbreviations used

IP6: inositol-6-phosphate or phytate; DM: dry matter,

Acknowledgment

This research was realized in the framework of INSTAPA Project, funded by the European Union's Seventh Framework Programme [Fp7/2007-2013] under grant agreement n°211484.

7. Literature cited

Abebe, Y.; Bogale, A.; Hambidge, K.M.; Stoecker, B.J.; Bailey, K.; Gibson, R.S. Phytate, zinc, iron and calcium content of selected raw and prepared foods consumed in rural Sidama, Southern Ethiopia, and implications for bioavailability. *J Food Comp. Anal.* **2007**, 20, 161-168.

Adish, A.A.; Esrey, S.A.; Gyorkos, T.W.; Jean-Baptiste, J.; Rojhani, A. Effect of consumption of food cooked in iron pots on iron status and growth of young children: a randomized trial. *Lancet* **1999**, 353, 712-716.

Cary, E.E.; Grunes, D.L.; Dallyn, S.L.; Pearson, G.A.; Peck, N.H.; Hulme, R.S. Plant Fe, Al and Cr concentrations in vegetables as influenced by soil inclusion. *J. Food Quality* **1994**, 17, 467-476.

Derman, D.P.; Bothwell, T.H.; Torrance, J.D.; MacPhail, A.P.; Bezwoda, W.R.; Charlton, R.W.; Mayet, F.G. Iron absorption from ferritin and ferric hydroxyde. *Scand. J. Haematol.* **1982**, 29, 18-24.

Geerligs, P.D.P.; Brabin, B.J.; Omari, A.A.A. Food prepared in iron cooking pots as an intervention for reducing iron deficiency anemia in developing countries: a systematic review. *J. Hum. Nutr. Diet.* **2003**, *16*, 275-281.

Greffeuille, V.; Mouquet-Rivier, C.; Icard-Vernière, C.; Ouattara, L.; Kayodé, A.P.; Amoussa, W.; Hama, F. Traditional recipes of millet-, sorghum-, and maize-based dishes and related sauces frequently consumed by young children in Burkina Faso and Benin. **2010**, <http://www.instapa.org/instapa>

Greffeuille, V.; Kayodé, A.P.; Icard-Vernière, C.; Gnimadi, M.; Rochette, I.; Mouquet-Rivier, C. Changes in iron, zinc and chelating agents during traditional African processing of maize: Effect of iron contamination on bioaccessibility. *Food Chem.* **2011**, *126*, 1800-1807.

Hallberg, L.; Björn-Rasmussen, E.; Rossander, L.; Suwanik, R. Iron absorption from Southeast Asian diets. II. Role of various factors that might explain low absorption. *Am. J. Clin. Nutr.* **1977**, *30*, 539-548.

Hallberg, L.; Björn-Rasmussen, E. Measurement of iron absorption from meals contaminated with iron. *Am. J. Clin. Nutr.* **1981**, 2808-2815.

Hama, F.; Icard-Vernière, C.; Guyot, J.-P.; Picq, C.; Diawara, B.; Mouquet-Rivier, C. Changes in micro- and macronutrient composition of pearl millet and white sorghum during in field versus laboratory decortication. *J. Cereal Sci.* **2011**, *54*, 425-433.

Hama, F.; Icard-Vernière, C.; Guyot, J.-P.; Rochette, I.; Diawara, B.; Mouquet-Rivier, C. Potential of non-GMO biofortified pearl millet (*Pennisetum glaucum*) for increasing iron and zinc content and their estimated bioavailability during abrasive decortication. *Int. J. Food Sci. Technology*. **in press**

Harvey, P.; Dexter P.; Darnton-Hill, I. The impact of consuming iron from non-food sources on iron status in developing countries. *Public Health Nutr.* **2000**, *3*, 375-383.

Hurrell, R.F.; Egli, I. Iron bioavailability and dietary reference values. *Am. J. Clin. Nutr.* **2010**, *91*, 1461S-1467.

Lestienne, I.; Icard-Vernière, C.; Mouquet, C.; Picq, C.; Trèche, S. Effects of soaking whole cereal and legume seeds on iron, zinc and phytate contents. *Food Chem.* **2005**, *89*, 421-425.

Lestienne, I.; Buisson, M.; Lullien-Pellerin, V.; Picq, C.; Trèche, S. Losses of nutrients and antinutritional factors during abrasive decortication of two pearl millet cultivars (*Pennisetum glaucum*). *Food Chem.* **2007**, *100*, 1316-1323.

Lonnerdal, B. Dietary factors influencing zinc absorption. *J. Nutr.* **2000**, *130*, 1378S-1383S.

Miller, D.; Schricker, B.; Rasmussen, R.; Van Campen, D. An in vitro method for estimation of iron availability from meals. *Am. J. Clin. Nutr.* **1981**, *34*, 2248-2256.

Park, J.; Brittin H.C. Increased iron content of food due to stainless steel cookware. *J. Am. Diet. Assoc.* **1997**, *97*, 659-661.

Prabhavathi, T.; Narasinga Rao, B.S. Contaminant iron in foods and its bioavailability predicted by in vitro method. *Indian J. Med. Res.* **1981**, *74*, 37-41.

Proulx, A.K.; Reddy, M.B. Fermentation and lactic acid addition enhance iron bioavailability of maize. *J. Agric. Food Chem.* **2007**, *55*, 2749-2754.

Watzke, H. J. Impact of processing on bioavailability examples of minerals in foods. *Trends Food Sci. Tech.* **1998**, 9, 320-327.

Wolfgor, R.; Drago, S. R.; Rodriguez, V.; Pellegrino, N. R.; Valencia, M. E. In vitro measurement of available iron in fortified foods. *Food Res. Int.*, **2002**, 35, 85-90.

Zimmermann, M.B.; Hurrell, R.F. Nutritional iron deficiency. *Lancet*, **2007**, 370, 511-520.

3.2.3.2. Résultats complémentaires : Bioaccessibilité du fer de contamination dans les plats de tô à base de maïs

Rappel concernant le traitement des grains :

Le maïs blanc KPB utilisé dans cette étude complémentaire a suivi les mêmes procédés de décortiquage et de mouture que le mil et le sorgho présentés dans la publication précédente (Figure 1). Les grains de maïs décortiqués ont été séparés en deux lots d'environ 8 kg chacun puis broyés dans des moulins de quartier, certains équipés de meules en fer et d'autres de meules en corindon. Une partie des grains décortiqués a été conservée pour être broyé de façon contrôlée au laboratoire (témoin).

Le tableau 3.2.1 présente les pourcentages et les teneurs en fer total, dialysable, soluble non dialysable et insoluble des plats de tô préparés avec de la farine de grains de maïs entiers faiblement et fortement contaminée en fer. La teneur en fer du maïs est faible, 1,3 mg/100g MS, 2 fois moins élevée que celle du sorgho. Le niveau de contamination en fer est d'environ 3,7 mg/100g MS, analogue à celui obtenu avec le mil et le sorgho.

Tableau 3.2.1 Teneurs et pourcentages de fer dialysable, soluble non dialysable et insoluble dans le tô préparé à partir de farines de maïs fortement et faiblement contaminée en fer.

Céréale	Niveau de contamination en fer	Fer total	Fer dialysable		Fer soluble non dialysable		Fer insoluble
		($\mu\text{g}/100\text{ g DM}$)	($\mu\text{g}/100\text{ g DM}$)	(%)	($\mu\text{g}/100\text{ g DM}$)	(%)	(%)
Maïs	élevé	5093	205a \pm 33	4.1a \pm 0.4	2715a \pm 116	53.5a \pm 4.0	58.7a \pm 4.2
	faible	1314	219a \pm 49	21.2a \pm 13.4	91b \pm 49	6.7b \pm 1.2	50.7a \pm 11.0

Les teneurs en fer dialysable sont identiques dans les tô de maïs quel que soit le niveau de contamination en fer de la farine (alors que le pourcentage de fer dialysable est environ 5 fois plus faible avec les tô de maïs contaminé en fer. Tout comme dans le mil et le sorgho, le fer de contamination n'est pas bioaccessible dans les plats de tô de maïs blanc. Un résultat similaire a été observé par Greffeuille et *al.*, (2011) sur la bioaccessibilité de plats traditionnels béninois à base de maïs où environ seulement 1,9 % du fer était dialysable. Les teneurs et les pourcentages de fer soluble non dialysable sont beaucoup plus élevés dans les tô hautement contaminés comparés à ceux des tô faiblement contaminés, atteignant respectivement des teneurs et des pourcentages 200 et 9 fois plus élevés. Dans le même temps, les pourcentages de fer insolubles sont analogues. Ces résultats sont très similaires à ceux obtenus avec le mil et le sorgho.

Ces résultats montrent que le fer de contamination n'est pas bioaccessible dans le plat de tô de maïs tel que préparé traditionnellement mais il serait intéressant d'étudier l'effet de la mise en œuvre de certains procédés en vue de mobiliser la fraction soluble du fer et améliorer sa bioaccessibilité.

3.3. Rétenion du fer et du zinc et acceptabilité des plats traditionnels du Burkina Faso préparés à partir de variétés biofortifiées de mil et de sorgho.

Après les travaux réalisés sur le décortilage, et plus particulièrement ceux obtenus sur le décortilage des variétés biofortifiées (chapitre 3.2), nous avons jugé nécessaire de vérifier qu'après transformation en plats, ces variétés biofortifiées de mil et de sorgho présentaient toujours un intérêt nutritionnel, et également une bonne acceptabilité sur le plan organoleptique. L'objectif de ce chapitre 3.3 est de présenter brièvement les résultats de l'étude d'acceptabilité de différents plats traditionnels préparés avec les variétés biofortifiées, et de déterminer la rétention et la bioaccessibilité du fer et du zinc dans ces plats. Pour cette étude, une première phase « de terrain » a été entreprise, au cours de laquelle des tests d'acceptabilité des plats les plus fréquemment consommés par les jeunes enfants (*tô*, bouillie fermentée et galettes pour le mil, *tô* seul pour le sorgho, cf. chapitre 3.1) ont été réalisés. Vingt-quatre consommateurs adultes de ces plats ont réalisé les tests de dégustation, et l'avis des productrices sur le comportement de ces nouvelles variétés au cours de la préparation des plats a également été recueilli. Rappelons ici que trois productrices différentes ont préparé chacun des plats, chacune avec ses ustensiles et procédés habituels, seuls les grains entiers ou décortiqués des variétés de mil ou de sorgho leur ayant été fournis. Une deuxième phase plus analytique a ensuite consisté, au laboratoire, à évaluer la biodisponibilité du fer et du zinc par le calcul des ratios molaires phytates/fer et phytates/zinc ainsi que par la mesure de la bioaccessibilité du fer et du zinc. Compte tenu des résultats précédemment acquis, la comparaison des variétés a été réalisée sur des plats préparés à partir de grains entiers ou décortiqués.

Par manque de temps, ce chapitre ne présente que de manière succincte l'ensemble des résultats obtenus au cours de cette étude. Ces résultats seront analysés de façon plus détaillée et leurs commentaires seront prochainement retravaillés pour donner lieu à une publication.

3.3.1. Acceptabilité des variétés de mil et de sorgho biofortifiées

3.3.1.1. Point de vue des productrices sur l'aptitude à la transformation des grains des différentes variétés en plats

Toutes les productrices ont souligné des différences entre les variétés au cours de la fabrication des plats. Elles ont jugé que les grains de la variété de mil biofortifié GB8735 étaient durs comparés aux grains des autres variétés de mil. Certaines d'entre elles ont estimé qu'ils étaient aussi durs que les grains de sorgho. Ceci avait été noté lors d'une étude antérieure sur le comportement des variétés biofortifiées au cours du décortilage. Les productrices de bouillie et de galettes ont estimé qu'il était nécessaire d'allonger la durée de trempage des grains de cette variété ainsi que la durée de cuisson des plats. Cependant

toutes les productrices de tô, de bouillie et de galettes ont apprécié le goût final des plats préparés avec la variété de mil biofortifié GB8735 et surtout leur odeur. Selon les productrices de tô et de bouillie, la variété de mil Tabi permettrait un « gonflement rapide » des plats à la cuisson. Les productrices de bouillie ont également trouvé que la fermentation était rapide et donnait satisfaction. Cependant les productrices de galettes ont souligné quant à elles que la friture des galettes préparées avec la variété Tabi consommait beaucoup d'huile, plus qu'avec les autres variétés.

Toutes les productrices ont apprécié le sorgho biofortifié Tiéblé pour sa couleur, qui donne au tô une belle présentation.

3.3.1.1. Acceptabilité des plats par un jury de consommateurs

Du tô, des galettes et de la bouillie ont été préparés avec les différentes variétés de mil local et biofortifiées, entières ou décortiquées, sauf la bouillie fermentée dont la préparation inclut une étape de tamisage humide éliminant les drèches et qui n'est donc traditionnellement jamais préparée à partir de grains décortiqués. De même avec le sorgho, seul le tô a été préparé car c'est de loin la forme de consommation la plus répandue (cf. figure 3.1.4).

Pour tous les plats de mil, préparés avec des grains entiers ou avec des grains décortiqués, la préférence des consommateurs se porte sur les plats préparés avec la variété locale Gampèla (Tableau 3.3.1). Les consommateurs ont mieux noté à la fois la couleur, la texture et le goût des plats préparés avec le mil Gampèla que ceux préparés avec les variétés biofortifiées que le mil soit entier ou décortiqué.

Si on compare les variétés biofortifiées entre elles, la différence d'appréciation est moins nette. Les notes attribuées pour la couleur, la texture et le sont souvent supérieures pour le mil Tabi à celles du mil GB8735, mais les différences sont rarement significatives excepté pour le goût du tô préparé avec les grains entiers. Le mil GB8735 est particulièrement sombre, ce qui confère une couleur très foncée aux plats préparés avec cette variété. C'est probablement un critère qui a notablement influencé les notations des juges. Cependant, pour les galettes préparées à partir de mil entier, les trois notes du mil Tabi sont significativement inférieures à celles du mil GB8735. Cela peut être mis en relation avec l'appréciation des productrices qui ont souligné le fait que les galettes préparées avec ce mil consommaient beaucoup d'huile lors de la friture.

Concernant les tests de préférence, les plats préparés avec le mil Tabi, décortiqué ou non, sont généralement classés devant ceux préparés avec la variété GB8735, mais la préférence n'est pas significative. Pour les galettes de mil entier cependant, la préférence est significative en faveur du mil GB8735.

Pour le sorgho (Tableau 3.3.2), que ce soit à partir de grains entiers ou décortiqués, le jury de consommateurs a préféré le tô préparé avec la variété biofortifiée et a donné une note supérieure à la couleur, au goût comme à la texture du produit, même si les différences observées ne sont pas toujours significatives.

Tableau 3.3.1: Résultats des tests hédoniques de notation et des tests de classement par ordre de préférence de plats préparés à partir des variétés de mil locale et biofortifiées.

	mil entier				mil décortiqué				
	Tests hédoniques (note moyenne/5)			Test de préférence (rang)	Tests hédoniques (note moyenne/5)			Test de préférence (rang)	
	Tô				Tô				
couleur	texture	goût	couleur		texture	goût			
Gampèla	4,4 ^a	4,4 ^a	4,3 ^a	1 ^a	Gampèla	4,7 ^a	4,4 ^a	4,5 ^a	1 ^a
Tabi	3,3 ^b	3,5 ^b	3,6 ^b	2 ^b	Tabi	3,4 ^b	3,6 ^b	3,4 ^b	2 ^b
GB8735	3,1 ^b	3,4 ^b	3,3 ^c	3 ^b	GB8735	3,2 ^b	3,3 ^b	3,1 ^b	3 ^b
p	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<0,05	p	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<0,05
	Galettes				Galettes				
Gampèla	4,6 ^a	4,4 ^a	4,2 ^a	1 ^a	Gampèla	4,6 ^a	4,1 ^a	4,2 ^a	1 ^a
Tabi	3,1 ^c	3,3 ^c	3,5 ^b	3 ^c	Tabi	3,6 ^b	3,7 ^b	3,7 ^b	2 ^b
GB8735	3,5 ^b	3,8 ^b	4,0 ^a	2 ^b	GB8735	3,3 ^b	3,6 ^b	3,8 ^b	3 ^b
p	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<0,05	p	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<0,05
	Bouillie				Bouillie				
Gampèla	4,6 ^a	4,2 ^a	4,2 ^a	1 ^a	Gampèla	4,6 ^a	4,2 ^a	4,2 ^a	1 ^a
Tabi	3,7 ^b	3,8 ^b	3,8 ^b	3 ^b	Tabi	3,7 ^b	3,8 ^b	3,8 ^b	3 ^b
GB8735	3,5 ^b	3,6 ^b	3,8 ^b	2 ^b	GB8735	3,5 ^b	3,6 ^b	3,8 ^b	2 ^b
p	< 0,01	< 0,01	0,01<p< 0,05	<0,05	p	< 0,01	< 0,01	0,01<p< 0,05	<0,05

Des petites lettres différentes, par colonne et pour un même plat, indiquent que les notes ou les rangs sont significativement différents.

Tableau 3.3.2 : Résultats des tests hédoniques de notation et des tests de classement par ordre de préférence de plats préparés à partir des variétés de sorgho locale et biofortifiée.

	Sorgho entier				Sorgho décortiqué				
	Tests hédoniques (note moyenne/5)			Test de préférence (rang)	Tests hédoniques (note moyenne/5)			Test de préférence (rang)	
	Tô				Tô				
	couleur	texture	goût		couleur	texture	goût		
Fibmigou	4,0 ^a	3,8	4,1	2	Fibmigou	3,9 ^b	3,8 ^b	4,0 ^b	2 ^b
Tiéblé	4,3 ^b	3,9	4,1	1	Tiéblé	4,6 ^a	4,1 ^a	4,5 ^a	1 ^a
p	<0,01	0,62	0,83	>0,05	p	<0,01	0,01<p<0,05	<0,01	<0,05

Des petites lettres différentes, par colonne et pour un même plat, correspondent à des différences significatives

3.3.2. Rétention du fer et du zinc dans les plats à base de variétés locales et biofortifiées de mil et de sorgho.

3.3.2.1. Composition en fer, en zinc et en phytates des variétés biofortifiées

Les teneurs en fer, zinc et phytates des différentes variétés de l'étude ont été mesurées dans les grains avant et après décortiquage (tableau 3.4.3).

Rappelons que les différentes variétés de céréales utilisées dans cette étude provenaient de la récolte 2010, tandis que les variétés de mil caractérisées dans le chapitre 3.2.2 provenaient de la récolte 2009, ce qui explique quelques différences de composition (un récapitulatif sera donné dans la discussion générale).

Tandis que les teneurs en fer et zinc des deux variétés biofortifiées de mil sont 2 à 3 fois supérieures à celles des variétés locales, celles des variétés locale et biofortifiée de sorgho diffèrent très peu. Selon Eva Weltzien de l'ICRISAT (communication personnelle), la variété Tiéblé a en effet été sélectionnée plutôt sur la base d'une meilleure résistance au décortiquage, plutôt que sur sa richesse initiale en fer et en zinc. Les teneurs en phytates des variétés biofortifiées sont légèrement supérieures à celles des variétés locales. Après le décortiquage mécanique des grains, une réduction importante des teneurs en fer, zinc et phytates est observée dans toutes les variétés. Cependant les teneurs en fer et en zinc des variétés biofortifiées de mil restent supérieures à celles de la variété locale Gampèla, tandis que celles du sorgho biofortifié Tiéblé deviennent supérieures à celles de la variété locale Fibmigou. Les teneurs en phytate sont plus faibles après décortiquage dans la plupart des variétés de mil et de sorgho, sauf pour le mil Tabi. Les résultats sur le décortiquage des grains ayant déjà été présentés aux chapitres 3.2.1 et 3.2.2, ils ne feront pas l'objet de discussion supplémentaire dans cette partie.

Tableau 3.3.3 : Teneurs en fer et en zinc (pour 100 g de MS) des variétés locales et biofortifiées de mil et de sorgho blanc

Céréale	Variété	Grains entiers			Grains décortiqués		
		Fer (mg)	Zinc (mg)	IP6 (g)	Fer (mg)	Zinc (mg)	IP6 (g)
Mil	Gampèla	2,9 ± 0,0	2,2 ± 0,0	0,9 ± 0,0	2,3 ± 0,2	1,6 ± 0,1	0,8 ± 0,1
	GB8735	6,5 ± 0,0	4,0 ± 0,2	1,1 ± 0,0	5,7 ± 0,3	3,5 ± 0,0	0,8 ± 0,0
	Tabi	5,3 ± 0,1	3,6 ± 0,1	1,0 ± 0,0	3,9 ± 0,1	2,8 ± 0,0	1,0 ± 0,0
Sorgho	Fibmigou	5,8 ± 0,2	2,5 ± 0,0	1,0 ± 0,0	2,4 ± 0,1	1,2 ± 0,0	0,7 ± 0,0
	Tiéblé	4,5 ± 0,1	2,2 ± 0,0	1,1 ± 0,0	3,9 ± 0,1	1,4 ± 0,0	0,8 ± 0,0

Tableau 3.3.4 : Teneurs en fer, zinc et phytates (moyenne \pm ET) des plats préparés à partir des différentes variétés de mil et de sorgho

Plats	Variétés	Traitement	TMS (%)	Teneur pour 100 g de MS			Ratio molaire IP6/Fer	Ratio molaire IP6/Zinc	
				Fer (mg)	Zinc (mg)	IP6 (g)			
Tô	Mil Gampèla	entier	23,4 \pm 3,2	15,2 \pm 3,6	2,3 \pm 0,1	0,9 \pm 0,1	5,0	38,8	
		décortiqué	24,2 \pm 2,6	7,4 \pm 2,7	2,3 \pm 0,0	0,8 \pm 0,1	9,5	35,7	
	Mil Tabi	entier	23,7 \pm 3,7	20,6 \pm 10,0	3,9 \pm 0,1	0,9 \pm 0,0	3,9	27,0	
		décortiqué	23,2 \pm 3,1	10,6 \pm 5,2	3,1 \pm 0,0	0,7 \pm 0,0	5,5	22,4	
	Mil GB8735	entier	24,2 \pm 2,6	22,7 \pm 9,8	3,9 \pm 0,1	1,0 \pm 0,0	3,6	24,1	
		décortiqué	22,2 \pm 3,8	13,8 \pm 5,6	3,8 \pm 0,0	0,9 \pm 0,1	5,5	23,1	
	Sorgho Fibmigou	entier	20,1 \pm 1,2	28,5 \pm 15,2	2,7 \pm 0,3	1,0 \pm 0,1	3,0	36,0	
		décortiqué	19,7 \pm 0,4	7,6 \pm 1,9	1,5 \pm 0,1	0,6 \pm 0,0	6,1	35,5	
	Sorgho Tiéblé	entier	23,4 \pm 2,6	29,0 \pm 10,4	2,4 \pm 0,5	1,2 \pm 0,2	3,4	47,8	
		décortiqué	20,5 \pm 1,5	8,0 \pm 1,1	1,4 \pm 0,1	0,6 \pm 0,0	6,2	43,0	
	Gallettes	Mil Gampèla	entier	57,2 \pm 5,0	13,0 \pm 11,4	1,5 \pm 0,3	0,4 \pm 0,0	2,8	28,2
			décortiqué	57,3 \pm 9,2	8,7 \pm 5,3	1,6 \pm 0,2	0,5 \pm 0,0	5,1	31,1
Mil Tabi		entier	55,6 \pm 1,2	9,3 \pm 3,3	2,7 \pm 0,4	0,4 \pm 0,0	4,0	16,1	
		décortiqué	54,8 \pm 5,7	8,1 \pm 2,5	2,5 \pm 0,4	0,5 \pm 0,0	5,1	19,1	
Mil GB8735		entier	55,8 \pm 4,6	10,2 \pm 2,4	2,5 \pm 0,2	0,4 \pm 0,0	3,7	17,3	
		décortiqué	54,2 \pm 3,8	6,9 \pm 1,6	2,7 \pm 0,4	0,5 \pm 0,1	6,4	19,1	
Bouillie	Mil Gampèla	entier	9,2 \pm 4,7	10,5 \pm 6,7	1,9 \pm 0,2	0,5 \pm 0,1	4,2	27,3	
	Mil Tabi	entier	10,1 \pm 4,9	9,2 \pm 1,4	2,9 \pm 0,2	0,6 \pm 0,0	5,4	20,2	
	Mil GB8735	entier	9,4 \pm 4,8	10,7 \pm 2,1	3,3 \pm 0,4	0,6 \pm 0,1	4,4	16,9	

3.3.2.2. Composition en fer, en zinc et en phytates des plats élaborés à partir des variétés locales et biofortifiées

Le tableau 3.3.4 présente les teneurs en fer, zinc et phytates des *tô*, des galettes et des bouillies préparés avec les différentes variétés entières ou décortiquées de mil et de sorgho blanc, biofortifiées ou non. Pour tous les plats, les teneurs en fer des plats issus des grains entiers sont plus élevées que celles des plats issus des grains décortiqués. Elles sont beaucoup plus importantes. De plus, elles varient de manière importante pour un même plat et une même variété (les écart-types sont très élevés). Ces premiers résultats laissent présager une forte contamination en fer des plats, pouvant provenir soit des moulins comme précédemment montré, mais aussi du sol, de l'eau souvent stockée dans des fûts métalliques dans les ménages, et des ustensiles de cuisine des productrices, parfois pas exempts de rouille (Adish et *al.*, 1999, Abebe et *al.*, 2007 ; Greffeuille et *al.*, 2011). Au Burkina Faso, la cuisson des plats tels que le *tô* et la bouillie est réalisée dans des marmites en aluminium, mais contenant aussi du fer, ce qui est donc cohérent avec notre hypothèse. Pour la production des galettes, le matériel utilisé est généralement une poêle en terre cuite, donc pouvant également contenir des quantités importantes de fer. Les plats de *tô* ont des teneurs en fer plus importantes que celles des bouillies et des galettes, ce qui pourrait être lié non seulement aux diagrammes de fabrication de ces plats (cf. annexes 1-1, 1-2, 1-3), mais aussi à leur formulation car la préparation du *tô* n'implique pas de mélange avec d'autres ingrédients, comme par exemple, pour les galettes qui contiennent une quantité d'huile importante. Pour la bouillie, le trempage des grains réalisé en début de préparation peut entraîner d'importantes pertes en minéraux au cours du trempage (Afifi et *al.*, 2011 ; Kayodé et *al.*, 2006 ; Lestienne et *al.*, 2005). De même, toujours au cours de la préparation de la bouillie de mil fermentée, une étape d'élimination des drèches contenant les parties périphériques des grains riches en fer, et dans une moindre mesure en zinc, a lieu avant la fermentation. Lors de la préparation des galettes, une étape de tamisage de la farine est souvent réalisée avant fermentation, ce qui induit une élimination partielle des parties périphériques des grains, et le mélange avec du riz, voire avec du *tô* délayé de maïs, est également une pratique courante.

Les différences de teneurs en fer et en zinc entre plats préparés à partir de grains entiers et de grains décortiqués sont liées en partie à l'élimination au cours du décortiquage des enveloppes et parfois du germe dans le cas du sorgho, effets que nous avons discutés précédemment (cf. chapitre 3.1). Cependant, les différences observées semblent bien supérieures à celle obtenues entre les grains entiers et décortiqués, semblant indiquer une contamination plus importante dans les plats à partir des grains entiers.

Les teneurs en zinc des plats de toutes les variétés varient très peu comparées à celles du fer car il n'y a pas de contamination en zinc au cours de la préparation des plats, cet élément étant présent à des concentrations beaucoup plus faibles dans l'environnement. Pour les variétés de mil, les teneurs en zinc des grains entiers et des grains décortiqués sont peu différentes, ce qui confirme les résultats obtenus lors de l'étude sur le décortiquage, du fait de l'enchâssement du germe dans l'albumen du grain de mil. En revanche, pour le sorgho les

teneurs en zinc des plats des grains décortiqués sont égales à la moitié de celles des plats des grains entiers, ce qui confirme là encore nos précédents résultats montrant que les germes des grains de sorgho étaient plus facilement perdus ou abrasés que ceux du mil lors du décortiquage.

Les plats des variétés biofortifiées de mil ont des teneurs en fer et en zinc supérieures à ceux de la variété locale, qu'il y ait ou non décortiquage préalable. Tout comme pour le fer, et pour les mêmes raisons, les teneurs en zinc des plats de *tô* sont supérieures à celles des galettes et des bouillies. En revanche, il n'y a aucune différence pertinente de teneurs en fer et en zinc entre les plats préparés à partir de sorgho local ou biofortifié, même après décortiquage. L'intérêt de l'utilisation même de la variété Tiéblé est remis en cause ici. Cependant, selon Eva Weltzien (communication personnelle), la variété locale utilisée à des fins de comparaison était particulièrement intéressante pour ses teneurs en fer et en zinc élevées.

Les teneurs en phytates des plats de *tô* sont plus élevées que celles des bouillies et des galettes. Comme expliqué ci-dessus pour les minéraux, lors de la préparation du *tô* avec des grains entiers, il n'y a pas d'étape de tamisage ou d'élimination des drèches comme cela est le cas lors de la préparation de la bouillie ou des galettes. De plus, plusieurs auteurs ont montré qu'une diminution des phytates se produit lors des étapes de trempage et de fermentation des céréales sous l'effet de phytases endogène ou d'origine microbienne. Les molécules d'IP6 (inositol-6-phosphate) sont alors hydrolysées en molécules d'IP4, IP3, IP2, ayant des propriétés de chélation moindres (Hotz & Brown, 2001, Afifi et al., 2011, Lestienne et al., 2005).

Les ratios molaires phytate/fer sont supérieurs aux seuils de 1 qui correspondrait à une biodisponibilité moyenne dans les plats céréaliers (Hurrell et Egli, 2010), mais dans notre cas le niveau de contamination est tel que, comme montré au chapitre 3.2.3 dans l'étude sur l'effet de la mouture, l'utilisation des rapports molaires pour estimer la biodisponibilité du fer n'est pas adaptée. Même s'ils sont plus faibles dans les plats des variétés biofortifiées, les ratios molaires phytates/zinc des plats de *tô* sont très élevés, supérieurs à 18, ce qui correspond au seuil de biodisponibilité faible (15%) (Hotz & Brown, 2004). Dans les galettes ou les bouillies préparées à partir des variétés biofortifiées cependant, les ratios sont très proches de 18, pouvant laisser espérer dans certains cas, une amélioration de la biodisponibilité.

3.3.3. Bioaccessibilité du fer et du zinc dans les plats de *tô* des variétés locales et biofortifiées

3.3.3.1. Rendements en fer en zinc obtenus au cours des expériences de DIV

Le contrôle des rendements en minéraux au cours des expériences de digestion *in vitro* est indispensable à une interprétation fiable des résultats. Les rendements en fer et en zinc des expériences de digestion *in vitro* ont été calculés en faisant le rapport de la somme des quantités de minéral mesurées dans les fractions dialysables, solubles et insolubles et de la quantité initiale de minéral mesurée dans l'aliment étudié (tableau 3.3.5). Des rendements

satisfaisants ont été obtenus pour le fer mais pas pour le zinc. Au cours des expériences de digestibilité *in vitro*, des pertes de zinc parfois supérieures à 50% se produisent, rendant impossible toute interprétation. Cela peut être dû aux très faibles teneurs en zinc dans les aliments étudiés et à des pertes par adsorption sur les parois de la vaisselle utilisée pour l'expérience. En dépit de nombreuses mises au point méthodologiques, les rendements en zinc n'ont pu être améliorés dans les plats céréaliers.

Tableau 3.3.5: Rendements en fer et zinc au cours des expériences de DIV (pourcentage de minéral retrouvé par rapport à la quantité de minéral initiale dans le plat) sur le tô

	Rendement en Fer (% de Fer retrouvé par rapport au Fe initial)	Rendement en zinc (% de Zinc retrouvé par rapport au Zn initial)
Mil Gampèla	90,7	52,5
Mil GB8735	93	45,6
Mil Tabi	81	43,5
Sorgho Fibmigou	107,2	71,5
Sorgho Tiéblé	103,1	50,8

3.3.3.2. Bioaccessibilité du fer et du zinc dans les plats

La bioaccessibilité du fer et du zinc a été mesurée sur des tô préparés avec des farines issues des grains entiers des variétés de mil et de sorgho locales et biofortifiées (Tableau 3.3.6.). Les résultats obtenus pour le zinc ont été reportés dans le tableau, mais ne seront pas commentés en raison de leur manque de significativité liée aux faibles rendements d'expérience obtenus.

Pour les tô de mil préparés avec les variétés biofortifiées, les pourcentages de fer dialysables sont significativement plus faibles que celle du tô préparé avec le mil Gampèla, cependant, lorsque l'on exprime les valeurs en teneur en fer dialysable, il n'y a plus aucune différence significative entre les trois variétés. Pour le sorgho une faible différence de teneurs en fer dialysable apparaît en faveur de la variété biofortifiée, mais cette différence n'est pas significative, ni pertinente sur le plan nutritionnel.

Les teneurs en fer solubles et insolubles des tô préparés à partir des variétés biofortifiées sont quant à elles plus élevées que dans le tô de mil Gampèla -même si les pourcentages de fer soluble sont plus faibles- semblant indiquer que le fer apporté par la biofortification se répartit entre les deux fractions solubles et insolubles. Pour le sorgho, seule la fraction soluble augmente dans la variété biofortifiée Tiéblé.

Les variétés biofortifiées testées, en dépit de teneur en minéraux parfois plus élevées que les variétés locales, ne permettent pas de mettre en évidence une amélioration de la fraction dialysable des minéraux. Leur intérêt nutritionnel est donc discutable, cependant, du fait de leurs teneurs en fer soluble plus élevées, leur utilisation combinée à des actions visant à réduire les facteurs chélateurs des aliments pour les « libérer » de cette fraction

soluble dans laquelle ils sont liés à d'autres composants de la matrice alimentaire, est certainement une voie de développement à approfondir.

Tableau 3.3.6 : Effet de la biofortification sur la bioaccessibilité du fer et du zinc des plats de tô des différentes variétés de céréales

Tô préparé avec :	Fer					
	dialysable		soluble non dialysable		insoluble	
	µg/100 g MS	%	µg/100 g MS	%	µg/100 g MS	%
Mil Gampèla	346 ^a ± 201	11,3 ^a ± 4,0	808 ^a ± 250	28,5 ^a ± 7,5	2015 ^{a,c} ± 571	61,4 ^a ± 5,5
Mil GB8735	280 ^{a,b} ± 60	5,2 ^b ± 1,1	1605 ^c ± 269	17,3 ^b ± 2,0	4188 ^b ± 233	77,5 ^b ± 1,5
Mil Tabi	239 ^{a,b} ± 76	4,8 ^b ± 1,6	1230 ^{b,c} ± 64	17,3 ^b ± 2,0	3896 ^b ± 236	76,7 ^b ± 2,6
Sorgho Fibmigou	179 ^b ± 55	5,6 ^b ± 1,7	763 ^a ± 445	21,4 ^{a,b} ± 8,2	2329 ^c ± 577	73,1 ^b ± 7,4
Sorgho Tiéblé	199 ^{a,b} ± 44	6,8 ^b ± 1,2	1093 ^{a,b} ± 140	37,4 ^c ± 3,4	1622 ^a ± 89	55,8 ^a ± 3,3
Tô préparé avec :	Zinc					
	dialysable		soluble non dialysable		insoluble	
	µg/100 g MS	%	µg/100 g MS	%	µg/100 g MS	%
Mil Gampèla	402 ± 181	24,4 ± 15,5	109 ± 41	22,8 ± 9,7	871 ± 67	52,8 ± 5,8
Mil GB8735	262 ± 22	8,6 ± 1,2	326 ± 13	21,5 ± 1,6	901 ± 121	70,0 ± 2,7
Mil Tabi	408 ± 85	16,3 ± 6,1	189 ± 8	24,4 ± 3,8	800 ± 183	59,3 ± 9,9
Sorgho Fibmigou	272 ± 138	28,0 ± 1,2	0*	0*	810 ± 43	83,5 ± 6,3
Sorgho Tiéblé	95 ± 14	6,6 ± 2,0	21 ± 2	6,7 ± 1,7	1218 ± 174	86,7 ± 2,8

3.3.4. Conclusion partielle

Ainsi les variétés biofortifiées évaluées dans ce chapitre semblent finalement présenter un intérêt très modéré :

-du point de vue de l'acceptabilité, les variétés de mil biofortifiées ont été significativement moins appréciées que la variété locale Gampèla pour les trois types de plats testés. Cela montre qu'un travail de sensibilisation et de promotion devrait être mené en vue de promouvoir l'utilisation de telles variétés dans les ménages. Pour les variétés de sorgho en revanche, la variété biofortifiée Tiéblé ne pose aucun problème d'acceptabilité.

-du point de vue des teneurs en fer et en zinc dans les plats après préparation : elles sont effectivement plus élevées pour le zinc dans les plats à base de mil biofortifié, mais pour le fer, l'interprétation est difficile en raison de la présence d'une quantité importante de fer de contamination. Pour le sorgho, aucune différence n'apparaît entre les teneurs en zinc des variétés locale et biofortifiée.

-du point de vue de la bioaccessibilité du fer dans le tô enfin, aucun avantage de l'utilisation des variétés de mil ni de sorgho n'a pu être mis en évidence.

Chapitre 4 :

Discussion et Conclusion générale

Les enquêtes de consommation alimentaire réalisées sur les 6 sites au Burkina Faso ont bien montré que l'alimentation des jeunes enfants âgés de 6 mois à 36 mois est essentiellement à base de céréales. Près de 90% des enfants ont consommé au moins une fois un plat à base de céréales mil, maïs et sorgho. Le mil et le sorgho sont les céréales les plus consommées aussi bien en milieu urbain qu'en milieu rural. De plus, de faibles consommations des aliments riches en fer ont été observées.

Il en résulte des apports inadéquats en fer et en zinc et des apports en phytates susceptibles de diminuer la biodisponibilité de ces minéraux. L'alimentation observée chez ces jeunes enfants prédispose aux carences multiples en minéraux et en vitamines.

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse a visé à évaluer le potentiel d'amélioration de la couverture des apports journaliers recommandés en fer et en zinc à partir des plats à base de céréales. Essentiellement 2 points clés ont été explorés :

- l'influence des procédés de fabrication des aliments,
- l'utilisation de variétés biofortifiées.

Pour l'ensemble des travaux réalisés, les variétés de céréales provenant de deux récoltes différentes (2009 et 2011) ont été utilisées. Le Tableau 4.1 présente les principales caractéristiques –pour celles qui nous intéressent, c'est-à-dire les teneurs en fer, en zinc et en phytates- de l'ensemble des échantillons utilisés. Pour une même variété, il apparaît des différences entre les années de récolte 2009 et 2011, indiquant une variabilité de la composition et des teneurs en micronutriments d'une année à une autre. Cette variabilité, bien que non mise en évidence ici, existe également d'un pays à un autre voire d'une région à une autre, comme cela a été rapporté par plusieurs travaux (Barikmo et al., 2004a). Greenfield and Southgate (2003) soulignent que la composition et la teneur en micronutriments des grains de céréales est plus influencée par les facteurs écologiques que par les facteurs génétiques.

Tableau 4.1 : Teneurs en fer, zinc et phytates des variétés de céréales utilisées en fonction de l'année de récolte.

Année de récolte	Mil						Sorgho		
	Gampèla		Tabi		GB8735		Fibmigou	Tiéblé	
	2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011	2011
Fer	4,0 ± 0,6	2,9 ± 0,0	7,2 ± 0,2	5,3 ± 0,1	6,7 ± 0,1	6,5 ± 0,0	4,9 ± 0,5	5,8 ± 0,2	4,5 ± 0,1
Zinc	2,0 ± 0,1	2,2 ± 0,0	4,1 ± 0,5	3,6 ± 0,1	5,6 ± 0,0	4,0 ± 0,2	2,7 ± 0,3	2,5 ± 0,0	2,2 ± 0,0
Phytates	0,7 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,8 ± 0,0	1,0 ± 0,0	0,9 ± 0,1	1,1 ± 0,0	0,8 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,1 ± 0,0

Cependant, il apparaît que les teneurs en fer et en zinc (et parfois même aussi en phytates) des variétés de mil biofortifiées sont toujours supérieures à celles de la variété Gampèla de la même année, alors que dans le cas du sorgho, il n'apparaît pas de différence importante entre les variétés locale et biofortifiée. Rappelons que le critère de sélection du sorgho

biofortifié était principalement sa résistance au décortiquage, permettant une meilleure rétention des minéraux.

En utilisant les quantités moyennes ingérées par les enfants des différentes classes d'âge pendant l'enquête, les quantités de fer et de zinc ingérées par repas de *tô* préparé à partir des différentes variétés de céréale ont été calculées (tableau 4.2). Les valeurs des teneurs en fer et en zinc mesurées dans les plats de *tô* préparés à Ouagadougou ont été utilisées (cf. tableau 3.3.4).

Tableau 4.2 : Estimation des quantités de fer et de zinc ingérées (mg) par repas de *tô* chez les jeunes enfants en fonction des variétés locales et biofortifiées de céréales utilisées, calculées à partir des valeurs mesurées dans les *tô* préparés dans les ménages de Ouagadougou.

		Classe d'âge					
Quantité de <i>tô</i> consommée ¹ (g de MS/repas)		15		25		38	
Céréales	Variétés	6-11 mois		12-24 mois		24-35 mois	
		entier	décortiqué	entier	décortiqué	entier	décortiqué
Fer							
Mil	Gampèla	2,3	1,1	3,9	1,9	5,7	2,8
	Tabi	3,1	1,6	5,2	2,7	7,7	4,0
	GB8735	3,4	2,1	5,8	3,5	8,5	5,2
Sorgho	Fibmigou	4,3	1,1	7,2	1,9	10,7	2,9
	Tiéblé	4,4	1,2	7,4	2,1	10,9	3,0
Zinc							
Mil	Gampèla	0,3	0,3	0,6	0,6	0,9	0,9
	Tabi	0,5	0,5	0,9	0,8	1,3	1,2
	GB8735	0,6	0,6	1	1	1,5	1,4
Sorgho	Fibmigou	0,4	0,2	0,7	0,4	1	0,6
	Tiéblé	0,4	0,2	0,6	0,4	0,9	0,5

¹Valeurs issues des données d'enquête, cf figure 3.1.5

En raison de l'augmentation des quantités de *tô* ingérées/repas avec l'âge, on observe des différences de quantités de fer et de zinc ingérés également importantes. Cependant, pour les 3 classes d'âge, les quantités ingérées de fer et de zinc à partir des *tô* des variétés biofortifiées de mil sont de 1,5 à 2 fois plus élevées que celles ingérées avec le *tô* de la variété de mil locale et ceci avec ou sans décortiquage des grains. Ceci n'a pas été observé

avec la variété biofortifiée de sorgho et les quantités de fer et de zinc ingérées sont similaires pour les 2 variétés, que les grains soient décortiqués ou non.

Cependant pour toutes les variétés de mil et de sorgho, les quantités de fer ingérées sont réduites presque de moitié après le décortiquage des grains. Pour le zinc, c'est surtout avec le sorgho que l'on observe une diminution importante des ingérés. Les variétés biofortifiées étudiées ici se comportent donc de la même façon que les variétés locales au cours du décortiquage. Ce résultat vient montrer l'importance du décortiquage sur la rétention en fer et zinc des plats consommés. Selon les résultats du chapitre 3.2, le décortiquage traditionnel entraîne des pertes en fer de près de 50 % et 41 % respectivement dans le mil et le sorgho. Et pour le zinc, 8 % et 23 % sont éliminés respectivement dans le mil et le sorgho. Ces pertes importantes en fer et en zinc sont également accompagnées d'importantes pertes de matière sèche au cours des décorticages traditionnels. Les pertes en matière sèche sont respectivement pour le mil et le sorgho de 17 % et 18 % au décortiquage mécanique, 24 % et 18 % au décortiquage manuel. Pourtant, la pratique du décortiquage est ancestrale et il ne semble pas faisable de demander à la population d'éliminer cette opération. Dans certaines localités, malgré l'absence de la mécanisation les femmes décortiquent manuellement de grosses quantités de grains pour les repas familiaux. Ceci montre l'importance de la place du décortiquage dans la transformation des plats céréaliers au Burkina Faso. A part le tô de mil où les grains peuvent ou non être décortiqués selon le choix du ménage, les autres céréales sorgho, maïs, sont toujours décortiquées pour la préparation du tô. En effet, le décortiquage offre un meilleur confort digestif, il réduit la teneur en fibres (Lestienne et *al.*, 2007 ; El Hag et *al.*, 2002).

Les expériences effectuées par décortiquage abrasif ont permis de montrer qu'un décortiquage léger permettait de réduire les pertes en fer et en zinc de manière importante. Dans notre étude (Chapitre 3.2.1), une augmentation du taux d'extraction à 89-91% réduit les pertes des teneurs en fer à 46 % dans la variété locale et à 34% dans la variété biofortifiée GB8735 faisant gagner 15 à 20% du fer comparé aux décorticages traditionnels. De même, les pertes zinc baissent de 6% et 15% pour la variété locale et les variétés biofortifiées faisant un gain également de 15% à 20%. Ainsi, la formulation de recommandations en faveur d'augmentation du taux d'extraction de matière sèche du grain au cours des décorticages traditionnels pourrait augmenter les quantités ingérées de fer et de zinc des plats préparés avec des céréales décortiquées. L'élimination de moins de 5 % de la matière sèche des grains qui correspond au début de l'attaque des fractions riches en zinc pourrait quasiment annuler les pertes de zinc et limiter les pertes à 20% pour le fer. Mais qu'en est-il de la faisabilité de telles recommandations au Burkina Faso ? Il devrait être possible d'obtenir cette augmentation du taux d'extraction avec le décortiquage mécanique, qui permet un meilleur contrôle de l'opération, mais très difficile avec le décortiquage manuel. En effet le décortiquage manuel, encore largement utilisé au Burkina Faso à l'heure actuelle, surtout en milieu rural, dépend d'abord de l'opérateur. Le décortiqueur mécanique de type Engelberg™ est le seul modèle utilisé au Burkina Faso. Il est surtout utilisé dans les villes parce que peu de villages disposent de l'électricité et donc peuvent avoir accès à cet équipement. De plus, l'utilisation

du décorticage mécanique est un service payant, qui nécessite donc un certain revenu, ce qui ne facilite pas son accessibilité aux populations les plus vulnérables, qui sont les plus touchées par les problèmes de carences en micronutriments.

Il ressort également du tableau 4.2 que les quantités de fer total ingérées sont très importantes comparées à celles en zinc quels que soient les grains. Les valeurs de teneurs en fer utilisées pour le calcul sont celles mesurées dans les *tô* préparés dans les ménages à Ouagadougou, pour lesquels une contamination en fer au cours des autres étapes de production du *tô* a été mise en évidence. L'importance des quantités de fer ingérées est donc due à la présence de fer de contamination. La production du *tô* suit les principales étapes suivantes : décorticage, lavage, mouture, tamisage et cuisson hydrothermique. L'étape de mouture est une étape-clé entraînant d'importantes contaminations en fer. Nous avons mis en évidence des teneurs en fer des grains très variables, pouvant être multipliées par 2 ou 3 après mouture (chapitre 3.2.3), notamment lorsque l'opération est réalisée avec des moulins à meules. Greffeuille et *al.*, (2011) avaient également observé des contaminations en fer très importante lors de la mouture des grains de maïs pour la production du *mawè* (plat béninois). Cependant, les teneurs en fer mesurées sur les *tô* préparés dans les ménages pour l'étude d'acceptabilité montrent que les contaminations en fer se poursuivent après l'étape de mouture, au cours des étapes de tamisage et de cuisson dans l'eau. Ces nouvelles contaminations peuvent être attribuées aux ustensiles de cuisine utilisés –tamis à grille métallique par exemple- à la poussière du sol ou encore à l'eau utilisée pour la cuisson. Des contaminations d'origines similaires ont été rapportées dans la littérature (Adish et *al.*, 1999, Abebe et *al.*, 2007 ; Greffeuille et *al.*, 2011).

Cependant, les mesures de bioaccessibilité réalisées sur le *tô* ont montré que pour la majeure partie, ce fer de contamination n'est vraisemblablement pas absorbable au niveau intestinal. C'est pourquoi, les quantités de fer ingérées à partir de farines des variétés locales et biofortifiées préparées au laboratoire –correspondant au fer intrinsèque- ont également été calculées, excluant toute forme de contamination (Tableau 4.3). Il apparaît que les quantités de fer intrinsèque ingérées sont environ 5 fois inférieures à celle de fer total pour toutes les variétés. Bien que les quantités ingérées de fer soient très faibles pour les *tô* de toutes les variétés, celles des variétés biofortifiées de mil sont supérieures à celles de la variété locale Gampèla, en moyenne le double. Pour le sorgho, les quantités de fer ingérées sont supérieures pour la variété locale lorsque les grains sont entiers. Mais, cette fois, la meilleure résistance au décorticage apparaît, et les quantités de fer ingérées à partir du *tô* de grains décortiqués de la variété biofortifiée sont légèrement supérieures à celles de la variété locale.

Tableau 4.3 : Estimation des quantités de fer intrinsèque ingérées (mg) par repas chez les jeunes enfants en fonction des variétés de céréales locales et biofortifiées¹ (sans prise en compte de la contamination en fer).

		Classe d'âge					
Quantité de t \hat{o} consommée ¹ (g de MS/repas)		15		25		38	
Céréales	Variétés	6-11 mois		12-24 mois		24-35 mois	
		entier	décortiqué	entier	décortiqué	entier	décortiqué
Fer							
Mil	Gampèla	0,4	0,3	0,7	0,6	1,1	0,9
	Tabi	1,0	0,9	1,7	1,4	2,4	2,1
	GB8735	0,8	0,6	1,3	1,0	2,0	1,5
Sorgho	Fibmigou	0,9	0,4	1,5	0,6	2,2	0,9
	Tiéblé	0,7	0,6	1,1	1,0	1,7	1,5

¹Valeurs du tableau 1 de l'article sur le décortiquage n°2.

Même si les variétés biofortifiées de mil améliorent les teneurs et la rétention du fer intrinsèque et du zinc des plats de t \hat{o} , quelle serait la contribution à la couverture des AJR en fer et en zinc de ces quantités de minéraux ingérées par repas? Les contributions potentielles aux apports journaliers recommandés des t \hat{o} préparés à partir des différentes variétés ont été calculés (tableau 4.4). Les seuils de ratios molaires phytate/fer et phytate/zinc (Hurrell et Egli, 2010 ; Hotz & Brown, 2004) ont été utilisés pour estimer la biodisponibilité en utilisant les ratios molaires correspondant à chaque variété, avec ou sans contamination. Mais dans tous les cas, les ratios molaires sont supérieurs à 1 pour le fer et supérieurs à 18 pour le zinc, correspondant à un pourcentage d'absorption faible de 5 et 15% respectivement.

Si l'on prend en compte le fer de contamination, les contributions à la couverture des AJR sont significatives atteignant plus de 60% avec les variétés biofortifiées entières de mil et les variétés entières de sorgho chez les plus âgés, qui consomment de plus grande quantités et ont des besoins moindres. Mais il semble peu réaliste de considérer le fer de contamination comme autant biodisponible que le fer intrinsèque.

Les contributions à la couverture des AJR en fer calculées en ne prenant en compte que le fer intrinsèque sont très faibles, particulièrement chez les jeunes enfants, où elles sont à peine significatives, dans la plupart des cas inférieures à 5% quelles que soient la céréale, la variété et qu'elle soit décortiquée ou non. A partir de 12 mois, lorsque les quantités ingérées sont supérieures et que les besoins sont moindres, les contributions deviennent plus significatives, mais même chez les plus âgés et dans le meilleur des cas, ne dépassent pas 20%.

Pour le zinc également, les contributions à la couverture des AJR sont très faibles. Mais il faut noter malgré tout une augmentation de cette contribution avec les variétés biofortifiées de mil, notamment la variété GB8735.

Tableau 4.4 : Contribution à la couverture des apports journaliers recommandés¹ en fer et en zinc des plats de tô issus des différentes variétés de l'étude pour une biodisponibilité faible²

		Classe d'âge					
		6-11 mois		12-24 mois		24-35 mois	
Céréales	Variétés	entier	décortiqué	entier	décortiqué	entier	décortiqué
Fer							
Mil	Gampèla	12,3/2,3 ³	6,0/1,9	33,3/6,4	16,2/5,0	49,3/9,4	24,0/7,5
	Tabi	16,6/5,2	8,5/3,1	45,1/14,2	23,4/8,5	66,8/21,1	34,7/12,6
	GB8735	18,4/4,3	11,1/4,6	49,9/11,6	30,2/12,5	73,9/17,2	44,7/18,5
Sorgho	Fibmigou	23,0/4,7	6,1/1,9	62,4/12,7	16,6/5,3	92,4/18,8	24,6/7,8
	Tiéblé	23,4/3,6	6,5/3,1	63,5/9,9	17,5/8,5	94,0/14,6	25,9/12,6
Zinc							
Mil	Gampèla	4,1	4,1	7,0	7,0	10,4	10,4
	Tabi	6,3	5,5	10,7	9,4	15,8	14,0
	GB8735	7,0	6,8	11,9	11,6	17,6	17,1
Sorgho	Fibmigou	4,8	2,7	8,2	4,6	12,2	6,8
	Tiéblé	4,3	2,5	7,3	4,3	10,8	6,3

¹ AJR (exprimés en minéral biodisponible) pour le fer = 0,93 mg chez les 6-11 mois, 0,58 mg chez les 12-23 et les 24-35 mois. Pour le zinc, 1,25 mg chez les 6-11 mois, 1,26 mg chez les 12-23 et les 24-35 mois.

² ratios molaires phytate/fer >1 (biodisponibilité = 5%) et ratios molaires phytate/zinc >18 (biodisponibilité = 15%).

³ Valeurs calculées **avec/sans** contamination en fer

En effet, la biodisponibilité du fer et du zinc est fortement influencée par les teneurs en phytates élevées qui conduisent ici à des ratios molaires phytate/fer et phytate/zinc défavorable, correspondant à une biodisponibilité faible. Cela signifie que l'élimination partielle des phytates au cours du décorticage (69% dans le mil et 31% dans le sorgho), n'a pas eu d'effet positif sur la biodisponibilité des minéraux.

Cependant, le tô n'est pas consommé seul, mais généralement accompagné de sauces composées souvent de feuilles fraîches ou sèches, avec du poisson ou de la viande. La présence d'acide ascorbique ou de protéines de viande ou de poisson dans les sauces pourrait améliorer la biodisponibilité du fer dans les plats de tô. Ainsi, si l'on prend en compte le seuil de ratio molaire phytate/fer > 6 recommandé par Hurrell & Egli (2010) pour les plats mixtes, la biodisponibilité pourrait être de 10% et il en résulterait un doublement des couvertures des AJR en fer à partir des aliments céréaliers, sans prendre en compte les apports de la sauce elle-même. La contribution à la couverture des AJR en fer des tô sans contamination en fer pour les variétés biofortifiées Tabi et GB8735 s'élèverait alors

respectivement à 42% et 34% pour la classe d'âge des 24-35 mois qui a les ingérés les plus importants. Ces résultats traduisent la nécessité de l'accompagnement des plats céréaliers par des aliments sources de facteurs activateurs de la biodisponibilité du fer et du zinc. Plusieurs études ont montré l'effet positif sur la biodisponibilité du fer et du zinc de l'ajout d'acide ascorbique ou d'aliments d'origine animale dans l'alimentation. Cependant au Burkina Faso, la viande étant chère et difficilement accessible à tous les ménages, le poisson séché est le plus utilisé étant meilleur marché et plus facile à conserver. L'effet du séchage du poisson cependant sur l'effet activateur de l'absorption du fer des protéines animales n'est pas connu et devrait être étudié. L'augmentation des teneurs en acide ascorbique dans les sauces accompagnant les plats de tô reste également difficile. En effet, la chaleur et le stockage dégrade l'acide ascorbique compromettant ainsi l'effet activateur (Teucher et *al.*, 2004).

Comparaison des méthodes d'estimation de la biodisponibilité

Dans ces travaux, l'expression « évaluation de la biodisponibilité » (ou bien son équivalent anglais « bioavailability assessment »), a été utilisée à maintes reprises pour présenter des résultats de rapports molaires phytates/fer ou phytate/zinc, ou bien encore ceux obtenus par une méthode de digestion *in vitro*, encore définie par le terme bioaccessibilité (bioaccessibility). Ceci amène à une réflexion sur les méthodes existantes de détermination de la biodisponibilité des minéraux. Qu'est-ce qui justifie le choix des méthodes utilisées ? Pourquoi ne pas avoir utilisé d'autres méthodes plus reconnues, comme par exemple les méthodes *in vivo*? Qu'auraient-elles apporté de plus?

Les méthodes *in vitro* ont été utilisées préférentiellement car un grand nombre de mesures devaient être réalisées, en vue de cribler des matières premières ou des produits intermédiaires de fabrication d'aliments, pour déterminer l'influence des procédés de transformation. Pour les rapports molaires comme pour les digestions *in vitro*, ces méthodes présentent l'avantage de pouvoir être utilisées sur tous types de produits, elles sont applicables à un nombre important d'échantillons, sont relativement faciles à mettre en œuvre et sont peu coûteuses. Cependant, elles ont aussi leurs limites. Au delà de la transposition hypothétique de leurs résultats à l'homme, largement discutée dans la littérature, il a été clairement mis en évidence que les rapports molaires phytate/fer donnaient des résultats erronés en présence de fer de contamination. En effet, en présence de teneurs en fer élevées, on obtient une réduction du ratio molaire phytate/fer pouvant traduire une meilleure biodisponibilité. Ceci pourrait ne pas être le cas si ce fer de contamination n'est pas bioaccessible. De plus, la méthode d'estimation de la biodisponibilité à partir des ratios molaires phytate/minéral mise au point par Davies et Olpin (1979) considère les phytates comme principal inhibiteur de la biodisponibilité des minéraux mais ne tient pas compte des autres inhibiteurs de l'absorption du fer et du zinc tels que les polyphénols, également présents dans les céréales ou d'activateurs tels que l'acide ascorbique, dans le cas de repas mixtes. Des algorithmes visant à estimer de la

biodisponibilité du fer ont été développés à partir de données d'absorption mesurées *in vivo* ont été proposés, notamment par Hallberg and Hulthen (2000) ou Reddy et al. (2000). Ils consistent en des fonctions continues mettant en relation chacun des facteurs inhibiteurs ou activateurs et leurs interactions au sein des repas pour estimer le pourcentage de fer absorbé. Cependant, les algorithmes nécessitent de nombreuses déterminations biochimiques de ces facteurs ou bien leur estimation avec des tables de composition. De plus, aucune donnée bibliographique n'a pu nous renseigner sur la validité des algorithmes dans le cas d'aliments contenant des teneurs importantes en fer de contamination. Car en fait, la question derrière ces interrogations est de savoir si le fer de contamination est bien échangeable, à savoir est-ce que ce fer extrinsèque intègre le pool de fer non héminique de l'aliment, ce qui rendrait son absorption sujette aux mêmes interactions avec la matrice alimentaire que le fer non-héminique intrinsèque. C'est ce que nous avons cherché à évaluer via les mesures de digestion *in vitro* dans le projet d'article sur la mouture, et la réponse semble négative. Nous avons identifié le fer de contamination comme étant du fer provenant principalement des meules et d'autres pièces métalliques des moulins, ainsi que du fer provenant de la poussière du sol, et les résultats obtenus montrent non seulement que ce fer n'est pas dialysable, mais que dans certains cas il pourrait même diminuer la dialysabilité du fer intrinsèque. Ainsi, la méthode de digestion *in vitro* utilisée, bien qu'ayant ses limites notamment en raison des résultats insatisfaisants obtenus pour estimer la biodisponibilité du zinc ou du choix, critiquable bien qu'universellement utilisé, du seuil de coupure de la membrane de dialyse, a permis d'obtenir des informations intéressantes concernant la biodisponibilité du fer de contamination dans les plats de tô. Et ces premiers résultats encourageants avec des méthodes *in vitro* permettent d'envisager, pour les mêmes plats ou pour ces plats avec la sauce avec laquelle ils sont consommés habituellement, l'utilisation de méthodes *in vivo*, beaucoup plus coûteuses et difficiles à mettre en œuvre du fait de la nécessité de faire appel à des volontaires humains et à des méthodes invasives et du fait du matériel et des compétences techniques nécessaires. Une autre contrainte de ces méthodes est l'emploi d'isotopes radioactifs ou stables. Si pour des raisons éthiques les premiers sont désormais rarement utilisés, les isotopes stables sont aujourd'hui utilisés dans de nombreuses études menées par quelques équipes de recherche. Mais une fois de plus, le fer de contamination présent dans les aliments pourrait constituer un obstacle. Le marquage du fer de pièces métalliques ou du sol est irréaliste, et un marquage extrinsèque ne pourrait être réalisé avec une forme chimique de fer analogue à celle du fer de contamination. Donc, les méthodes *in vivo* pourraient donner des informations complémentaires sur l'absorption du fer, mais aussi du zinc, de quelques plats consommés par les jeunes enfants burkinabés, mais ne peuvent pas vraiment renseigner sur la biodisponibilité du fer de contamination. Aussi, dans le cadre d'études de biodisponibilité de minéraux, avec une analyse d'un nombre important d'échantillons, on pourrait envisager d'apporter d'autres améliorations à la méthode de digestion *in vitro* actuellement utilisée, voire, pour quelques échantillons particulièrement intéressants, et sous réserve de disposer de matériel et de compétences adaptées, de la coupler à des mesures d'absorption sur modèles cellulaires caco-2.

Conclusion générale.

La faible couverture des apports recommandés en fer et zinc chez les jeunes enfants burkinabès sur les six sites enquêtés est principalement due aux faibles ingérés alimentaires (en quantité de matière sèche, et par conséquent en énergie), aux faibles teneurs en fer et en zinc des aliments consommés et à leurs apports importants en facteurs chélateurs des minéraux. L'étude de l'alimentation et de l'état nutritionnel sur d'autres sites du Burkina Faso pourrait compléter ces informations et apporter une meilleure vision de l'alimentation dans l'ensemble du territoire.

Les principales étapes des procédés de préparation des plats céréaliers (*tô* et bouillie) ouvrent très peu de voies quant à l'amélioration de la rétention et de la biodisponibilité du fer et du zinc. Les méthodes traditionnelles utilisées pour éliminer le son des grains, réduisent de moitié la teneur en fer et du tiers celle du zinc. Les moulins utilisés par les ménages pour la transformation des grains en farine apportent d'importantes quantités de fer dans le plat final du jeune enfant. Ces ingérés élevés du fer par le jeune enfant sont pour une grande partie du fer de contamination qui n'est pas bioaccessible à l'organisme. Bien que les variétés biofortifiées de mil Tabi et GB8735 aient des teneurs en fer et zinc de départ 2 à 3 fois plus importantes que celles des variétés locales, le potentiel d'amélioration de la couverture des apports recommandés en fer et zinc reste très faible. La résistance au décortiquage du fer et du zinc de la variété de sorgho biofortifiée est une qualité intéressante qui n'a pas pu être exploitée du fait des faibles teneurs en fer et zinc de la variété étudiée.

Cette étude a également permis de porter une attention particulière aux méthodes d'estimation de la biodisponibilité du fer du fait de la présence du fer de contamination qui est non bioaccessible.

Aussi l'amélioration de la couverture des apports recommandés en fer et zinc à partir des plats céréaliers apparaît très difficile. Cependant, les variétés biofortifiées pourraient contribuer de manière plus importante à la couverture des apports recommandés en fer et en zinc si une amélioration des taux d'extraction au décortiquage était possible et si les sauces accompagnant les plats de *tô* contenaient des quantités importantes d'activateurs de la biodisponibilité tels que l'acide ascorbique et les protéines d'origine animale. L'effet de la cuisson à ébullition des sauces risquant d'inactiver l'acide ascorbique, peut-être serait-il préférable de sensibiliser les populations à la consommation d'un fruit après la prise d'un plat céréalier. L'amélioration de la sauce pourrait être une stratégie plus efficace. Des travaux sont actuellement en cours dans le cadre du projet INSTAPA pour améliorer les formulations de sauces à base de légumes-feuilles, en augmentant les proportions ingrédients riches en fer et zinc et qui restent accessibles à la population en termes de coût et de disponibilité. Pour cela, des études orientées sur la biodisponibilité des micronutriments dans les sauces et les ingrédients qui les composent seront d'importants atouts pour l'amélioration de la couverture des AJR en fer et zinc. Au final, il sera nécessaire d'étudier le potentiel de couverture des AJR en fer et en zinc du plat complet, c'est-à-dire *tô*

+ sauce afin de vérifier que les teneurs importantes de phytates et autres facteurs chélateurs des plats de tô ne compromettent pas la biodisponibilité des minéraux apportés par la sauce.

Il faut cependant ajouter que l'utilisation des variétés biofortifiées telles que celles étudiées dans ce travail ne sera pas sans difficultés au niveau des ménages au Burkina Faso. Les tests d'acceptabilité réalisés ont montré des préférences significatives au niveau du goût, de la couleur et de la texture en faveur des tô préparés à partir des variétés locales de mil. Le changement dans les habitudes alimentaires des populations est difficile –d'autant que l'enjeu apparaît limité–, cependant des séances de sensibilisation pourraient jouer positivement sur l'acceptabilité de ces variétés. Les variétés biofortifiées étudiées ici sont au nombre de 2 pour le mil et une seule pour le sorgho, d'autres variétés biofortifiées à teneurs en fer et zinc plus importantes pourraient également faire l'objet d'étude. Des variétés sélectionnées pour leur résistance au décorticage comme le sorgho Tiéblé mais ayant des teneurs en minéraux plus importantes pourraient présenter un réel intérêt pour l'amélioration de la couverture des AJR. Cependant, il s'agissait des meilleures variétés disponibles obtenues par sélection classique à partir des variétés africaines existantes.

Selon les chercheurs du programme Harvest plus (<http://www.harvestplus.org/>), l'obtention de variétés biofortifiées plus intéressantes avec un fort potentiel de couverture des AJR en fer et en zinc nécessite maintenant d'avoir recours aux organismes génétiquement modifiés, mais cette stratégie n'est pas sans risque ni universellement acceptée.

Dans tous les cas, la plus grande part de contribution à l'amélioration de l'état nutritionnel des jeunes enfants revient aux dirigeants et aux décideurs politiques. Parmi les voies alimentaires de lutte contre les carences en micronutriments la diversification alimentaire, encore incomplètement explorée reste la méthode la plus durable et la plus sûre.

Références bibliographiques

- AOAC -Association of Official Agricultural Chemists .2006.** Crude fat in feeds, cereal grains, and forages Randall/Soxtec/Hexanes extraction-submersion method. First Action 2003, Final Action 2006.
- Abdelrahman, A., Hosney, R. C. & Varriano-Marston E., 1984.** The proportions and chemical compositions of hand-dissected anatomical parts of pearl millet. *Journal of Cereal Science*, 2, 127–133.
- Abebe, Y., Bogale, A., Hambidge, K. M., Stoecker, B. J., Bailey, K., & Gibson, R. S. 2007.** Phytate, zinc, iron and calcium content of selected raw and prepared foods consumed in rural Sidama, Southern Ethiopia, and implications for bioavailability. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20, 161–168
- Aboubacar, A., & Hamaker, B. R. 1999.** Physicochemical properties of flours that relate to sorghum couscous quality. *Cereal Chemistry*, 76, 308–313.
- Aboubacar, A., Yazici, N., Hamaker B., 2006.** Extent of decortication and quality of flour, couscous and porridge made from different sorghum cultivars. *International Journal of Food Science and Technology* 41, 698-703.
- Abrams SA, Schanler RJ, Yergey AL, Vieira NE, Bronner F. 1994.** Compartmental analysis of calcium metabolism in very low birth weight infants. *Pediatric Research*; 36:424–8.
- Abrams SA, O'Brien KO, Stuff JE. 1996.** Changes in calcium kinetics associated with menarche. *Journal of Clinical Endocrinology Metabolism* 1996; 81:2017–20.
- Adish A.A., Esrey S.A, Gyorkos T.W., Jean-Baptiste J., Rojhani A. 1999.** Effect of consumption of food cooked in iron pots on iron status and growth of young children: a randomized trial. *Lancet*; 353: 712-16.
- Afifi AE-MMR, El-Beltagi HS, Abd El-Salam SM, Omran AA. 2011.** Bioavailability of Iron, Zinc, Phytate and Phytase Activity during Soaking and Germination of White Sorghum Varieties. *PLoS ONE* 6(10): e25512. doi:10.1371/journal.pone.0025512.
- Aidoo K.E., Nout M.J.R., Sarkar P.K., 2006.** Occurrence and function of yeasts in Asian indigenous fermented foods. *FEMS Yeast Research*. 6, 30–39.
- Akingbala, J. O., & Rooney, L. W. 1987.** Paste properties of sorghum flour and starches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 11, 13–24.
- Ali, M.A.M., El Tinay, A.H., Abdalla, A.H. 2003.** Effect of fermentation on the in vitro protein digestibility of pearl millet. *Food Chemistry* 80, 51-54.
- Allen Lindsay. 1998.** Zinc and micronutrient supplements for children. *American Journal of Clinical Nutrition*, 68, 495 S-8S.

- Amoa Awua W.K., Ngunjiri P., Anlobe J., Kpodo K., Halm M., Hayford A.E., Jakobsen M., 2007.** The effect of applying GMP and HACCP to traditional food processing at a semi-commercial kenkey production plant in Ghana. *Food Control*. 18, 1449–1457.
- Anand AN, Subadra S. 1995.** A quantitative model for prediction of iron bioavailability from Indian meals: An experimental study. *International Journal of Food Science and Nutrition* 46:335-342
- Andag'o PE, Osendarp SJ, Ayah R, et al. 2007.** Efficacy of iron-fortified whole maize flour on iron status of schoolchildren in Kenya: a randomised controlled trial. *Lancet* 2007; 369: 1799–806
- Awika J. M., 2000.** M. S. thesis, Texas A&M University, College Station, TX.
- Axtell, J.D., Kirleis, A., Hassen, M.M., D'Croz-Mason, N., Mertz, E.T. and Munck, L. 1981.** Digestibility of sorghum proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 78 (1981) 1333–1335.
- Baille Barbara. 2008.** Mémoire. Évaluation de la couverture des besoins en énergie, fer, zinc et vitamine A par l'alimentation chez les enfants de 1 à 5 ans en zone urbaine (Ouagadougou, Burkina Faso) et estimation de la participation des plats à base de mil, sorgho, maïs et manioc. Université de Montpellier 2.
- Barikmo I. F., Ouattara F., Oshaug A. 2007.** Differences in micronutrients content found in cereals from various parts of Mali. *Journal of Food Composition and Analysis* 20; 681–687
- Barikmo I., Ouattara F., Oshaug A., 2004a.** Protein, carbohydrate and fibre in cereals from Mali-how to fit results in a food composition table and database. *Journal of Food Composition and Analysis* 17, 291–300.
- Batterman-Azcona, S.J. and Hamaker, B.R. 1988.** Changes occurring in protein body structure and -zein during cornflake processing. *Cereal Chemistry* 75 217–221.
- Becquey Elodie. 2010.** Thèse: Sécurité Alimentaire des ménages urbains au Burkina Faso: caractéristiques et mesure. Université de Paris VI.
- Bednar, G.E., Patil, A.R., Murray, S.M., Grieshop, C.M., Merchen, N.R., Fahey Jr., G.C., 2001.** Starch and fiber fractions in selected food and feed ingredients affect their small intestinal digestibility and fermentability and their large bowel fermentability *in vitro* in a canine model. *Journal of Nutrition*, 131, 276–286
- Bermejo, P., Pena, E.M., Dominguez, R., Bermejo, A., Cocho, J.A., Fraga, J.M. 2002.** Iron and zinc in hydrolysed fractions of human milk and infant formulas using an *in vitro* method. *Food Chemistry* 77, 361-369.
- Beta, T., Rooney, L., Marovatsanga, L. T., Taylor, J.R. N. 1991.** Phenolic compounds and kernel characteristics of Zimbabwean sorghums. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 79, 1003-1010.

- Becker, G., and L. Acker,** in "Die Lipide der Getreidestarken," Paul Parey, Berlin, Germany, 1976.
- Bezwoda W.R, Bothwell T.H, Torrance J.D, MacPhail A P, Charlton R W, Kay G, Levin J. 1979.** Relationship between marrow iron stores, plasma ferritin concentrations and iron-absorption. *Scandinavian Journal of Haematology*; 22:113–20.
- Bjarnson I., MacPherson A, Hollander D. 1995.** Intestinal permeability: An overview. *Gastroenterology* 1995; 108: 1566-81.
- Black, R.E., Allen, L.H., Bhutta, Z.A., Caulfield, L.E., de Onis, M., Ezzati, M., Mathers, C., Rivera, J. 2008.** Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *Maternal and Child Undernutrition* 1, Series. The Lancet 371, 243–60
- Blandino A., Al-Aseeri M.E., Pandiella S.S., Cantero D., Webb C., 2003.** Cereal-based fermented foods and beverages. *Food Research International* 36, 527-543.
- Bouis, H.E. 2000.** Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. *Nutrition*, 16, 701-704.
- Bouis, H.E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J.V. & Pfeiffer, W.H. (2011).** Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food and Nutrition Bulletin*, 32(1), S31-S40.
- Boren, B., Waniska, R.D., 1992.** Sorghum seed color as an indicator of tannin content. *Journal of Applied Poultry Research* 1, 117–121.
- Bornet, F.R.J., Bizais, Y., Bruley des Varannes, S., Pouliquen, B., Delort Laval, J., Galmiche, J.P., 1990.** α -amylase (EC 3.2.1.1) susceptibility rather than viscosity or gastric emptying rate controls plasma responses to starch in healthy humans. *British Journal of Nutrition* 63, 207–220
- Bothwell TH. 1995.** Overview and mechanisms of iron regulation. *Nutrition Reviews*, 53:237-45.
- Bothwell TH, Charlton RW, Cook ID, Finch CA. 1979.** Iron metabolism in man. London, *Blackwell Scientific Publications*.
- Branca F, Ferrari M. 2002.** Impact of micronutrient deficiencies on growth: the stunting syndrome. *Annals of Nutrition and Metabolism* 46, 8 ± 17.
- Bravo L. 1998** Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Reviews* 56, 317–333.
- Briat, J.-F., Duc, C., Ravet, C. & Gaymard, F. 2010.** Ferritins and iron storage in plants. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1800, 806-814.

- Brinch-Pedersen, H., Lisbeth, D. S. & Preben, B. H. 2002.** Engineering crop plants: Getting a handle on phosphate. *Trends in Plant Science*, 7, 118–124
- Brinch-Pedersen, H., Borg, S., Tauris, B. & Holm PB. 2007.** Molecular genetic approaches to increasing mineral availability and vitamin content of cereals. *Journal of Cereal Science*, 46, 308-326.
- Brown IL, McNaught KJ & Moloney E. 1995.** Hi-maize™: new directions in starch technology and nutrition. *Food Australia* 47: 272–5.
- Brune M, Rossander-Hulthen L, Hallberg L, Gleerup A, Sandberg A-S. 1992.** Iron absorption from bread in humans: Inhibiting effects of cereal fiber, phytate and inositol phosphates with different numbers of phosphate groups. *Journal of Nutrition*, 122, 442-449.
- Buerkert, A., Haake, C., Ruckwied, M., Marschner, H. 1998.** Phosphorus application affects the nutritional quality of millet grain in the Sahel. *Field Crops Research* 57, 223-235.
- Budavari S, ed. 1989.** The Merck index: an encyclopedia of chemicals, drugs and biologicals. 11th ed. Rahway, NJ: Merck and Co, 1989.
- Bungiro R, Cappello M. 2004.** Hookworm infection: new developments and prospects for control. *Current Opinion Infection Disease*; 17: 421–26.
- Cakmak I. 2000.** Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. *New Phytologist* 146:185–205
- Camara E. & Amaro M. A., 2003.** Nutritional aspect of zinc availability. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 54, 143–151.
- Carmel R. 1996.** Prevalence of undiagnosed pernicious anemia in the elderly. *Archives and Internal Medicine* 156: 1097-1100.
- Cary, E.E.; Grunes, D.L.; Dallyn, S.L.; Pearson, G.A.; Peck, N.H.; Hulme, R.S.1994.** Plant Fe, Al and Cr concentrations in vegetables as influenced by soil inclusion. *Journal Food Quality*, 17, 467-476.
- Cavalli-Sforza T, Berger J, Smitasiri S, Viteri F. 2005.** Weekly iron-folic acid supplementation of women of reproductive age: impact overview, lessons learned, expansion plans, and contributions toward achievement of the millennium development goals. *Nutrition Review*; 63: S152–58.
- Chang R., Schwimmer S. & Burr H.K. 1977.** Phytate: removal from whole dry beans by enzymatic hydrolysis and diffusion. *Journal of Food Science* 42, 1098–1101.
- Cheryan M. 1980.** Phytic acid interactions in food systems. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 13, 297–335.

- Chesters JK. 1989.** Biochemistry of zinc in cell division and tissue growth. In: Mills C, ed. Zinc in human biology. London: Springer-Verlag, 109–18.
- Chavan, J. K. and S. S. Kadam 1989.** "Nutritional improvement of cereals by fermentation." *CRC Critical Reviews in Food Science and Technology* **28**(5): 349
- Clemens, S., Palmgren, M.G. & Krämer, U. 2002.** A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, **7**, 309-315.
- Colonna P, Leloup V, Buléon A. 1992.** Limiting factors of starch hydrolysis. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46:S17-32.
- Conrad ME, Schade SG. 1968.** Ascorbic acid chelates in iron absorption: a role for hydrochloric acid and bile. *Gastroenterology*, 55:35–45.
- Cook J.D., Monsen, E.R. 1977.** Vitamin C, the common cold and iron absorption. *American Journal of Clinical Nutrition*, 30: 235-41.
- Cook J.D, Dassenko S.A, Whittaker P. 1991.** Calcium supplementation—effect on iron-absorption. *American Journal of Clinical Nutrition*, 53:106–11.
- Cook J.D, Dassenko S.A, Lynch S. R. 1991.** Assessment of the role of non heme iron availability in iron balance. *American Journal of Clinical Nutrition*, 54:717–22.
- Cornell, H.J., Hoveling, A.W., Chryst, A., Rogers, M., 1994.** Particle size distribution in wheat starch and its importance in processing. *Starch* 46, 203–207.
- Coudray C, Bellanger J, Castiglia-Delavaud C, Remesy C, Vermorel M, Rayssiguier Y. 1997.** Effect of soluble or partly soluble dietary fibres supplementation on absorption and balance of calcium, magnesium, iron and zinc in healthy young men. *European Journal of Clinical Nutrition*; 51:375–80.
- Danzart 1990.** Evaluation sensorielle : Manuel méthodologique.
- Davidsson, P Galan, P Kastenmayer, F Cherouvrier, M A Juillerat, S Hercberg, R F Hurrell, 1994b.** Iron absorption in infants: The influence of phytic acid and ascorbic acid in formulas based on soy isolate. *Pediatric Research* 36: 816-822.
- Davidsson L. 2003.** Approaches to improve iron bioavailability from complementary foods. *Journal of Nutrition*, 133, 1560S–1562S
- Davidsson L, Ziegler EE, Kastenmayer P, Van Dael P, Barclay D. 2004.** Dephytinization of soy isolate with low phytic acid content has limited impact on mineral and trace element absorption in healthy infants. *British Journal of Nutrition*; 91: 287–93

- Davies, N.T., Olpin, S.E. 1979.** Studies on the phytate: zinc molar contents in diets as a determinant of Zn availability to young rats. *British Journal of Nutrition* 41, 590-603.
- Dalby, A., & Tsai, C. Y. 1976.** Lysine and tryptophan increases during germination of cereal grains. *Cereal Chemistry*, 53, 222–226.
- De Boland AR, Garner GB, O'Dell BL. 1975.** Identification and properties of phytate in cereal grains and oilseed products. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 42:1098-1101.
- De Onis Mercedes, Blössner M., Borghi E. 2010.** Global prevalence and trends of overweight and obesity among preschool children. *American Journal of Clinical Nutrition* ; 92:1257–64.
- De Francisco, A., Shepherd, A.D., Hosney, R.C., Varriano-Marston, E., 1982.** Decorticating pearl millet and grain sorghum in a laboratory abrasive mill. *Cereal Chemistry* 59, 1-5.
- Demigne C., Levrat MA, Younes H, Remesy C. 1995.** Interactions between large intestine fermentation and dietary calcium. *European Journal of Clinical Nutrition* 49, Suppl (3): S235-8.
- Derman, D.P.; Bothwell, T.H.; Torrance, J.D.; MacPhail, A.P.; Bezwoda, W.R.; Charlton, R.W.; Mayet, F.G. 1982.** Iron absorption from ferritin and ferric hydroxyde. *Scand. J. Haematol.* 29, 18-24.
- Dewey, K.G., Brown, K.H. 2003.** Update on technical issues concerning complementary feeding of young children in developing countries and implications for intervention programs. *Food and Nutrition Bulletin*, 24(1), 5-28.
- Direction Générale de la Promotion de l'Economie Rurale (DGPER)/MAHRH/Burkina Faso. 2010**
«Etude sur la consommation alimentaire au Burkina Faso »
- Disler PB, Lynch SR, Charlton RW, Torrance JD, Bothwell TH, Walker RB & Mayet F. 1975.** The effect of tea on iron absorption. *Gut* 16, 193–200.
- Direction de la nutrition. 2009.** Enquête nutritionnelle nationale, Octobre 2009, Ouagadougou, 54 p.
- Direction Générale de l'Information et des Statistiques sanitaires. 2010.** La santé d'après les enquêtes statistiques nationales. Une synthèse des résultats disponibles depuis l'indépendance du Burkina Faso. Secrétariat Général. Ministère de la Santé. Burkina Faso.
- Dijkhuizen MA, Wieringa FT, West CE, Martuti S, Muhilal.** Effects of iron and zinc supplementation in Indonesian infants on micronutrient status and growth. *Journal of Nutrition* 2001; 131:2860–5.
- Domellöf M., Lönnerdal B., Abrams S.A., Hernell O. 2002.** Iron absorption in breast-fed infants: Effects of age, iron status, iron supplements, and complementary foods. *American Journal Clinical Nutrition*, 76:198–204.

- Duhan A., Khetarpaul N., Bishnoi S. 2002.** Content of phytic acid and HCl-extractability of calcium, phosphorus and iron as affected by various domestic processing and cooking methods. *Food Chemistry*; 78, 9-14.
- Du S, Zhai F, Whang Y, Popkin BM.2000.** Current methods for estimating dietary iron dietary bioavailability do not work in China. *Journal of Nutrition*; 130: 193-8.
- Duodu K.G., Nunes A., Delgadillo I., Parker M. L., Mills E.N.C., Belton P.S., 2002.** Effect of grain structure and cooking on sorghum and maize in vitro protein digestibility. *Journal of Cereal Science*, 35, 161–174.
- Dykes L. & Rooney L. W. 2006.** Sorghum and millet phenols and antioxidants. *Journal of Cereal Science*, 44, 236–251.
- Earp C.F., McDonough C.M., Awika J., Rooney L.W., 2004a.** Testa development in the caryopsis of *Sorghum bicolor (L.) Moench*. *Journal of Cereal Science* 39, 303–311.
- Earp C.F., Mc Donough C.M., Rooney L.W., 2004b.** Microscopy of pericarp development in the caryopsis of *Sorghum bicolor (L) Moench*. *Journal of Cereal Science* 39, 21–27
- Earp C.F., Akingbala J.O., Ring, S.H., Rooney L.W., 1981.** Evaluation of several methods to determine tannins in sorghums with varying kernel characteristics. *Cereal Chemistry* 58, 234–238.
- Earle, F.R., J.J. Curtis and J.E. Hubbard, 1946.** Composition of the component parts of the corn kernel. *Cereal Chemistry*. 23:504.
- Egli I, Davidsson L, Juillerat M-A, Barclay D, Hurrell R.F. 2002.** The influence of soaking and germination on the phytase activity and phytic acid content of grains and seeds potentially useful for complementary feeding. *Journal of Food Science* 67 (9):3484–8.
- Egli I, Davidsson L, Juillerat M. A, Barclay D., Hurrell R. F. 2003.** Phytic acid degradation in complementary foods using phytases naturally occurring in whole grain cereals. *Journal of Food Science* 68, 1855–1859.
- Egli I, Davidsson L, Zeder C, Walczyk T & Hurrell R., 2004** Dephytinization of a complementary food based on wheat and soy increases zinc, but not copper apparent absorption in adults. *Journal of Nutrition* 134, 1077–1080.
- El Hag M.E., El Tinay A.H., Yousif N.E. 2002.** Effect of fermentation and dehulling on starch, total polyphenols, phytic acid content and in vitro protein digestibility of pearl millet. *Food Chemistry* 77, 193-196.
- Elmaki, H.B., Babiker, E.E., El Tinay, A.H. 1999.** Changes in chemical composition, grain malting, starch and tannin contents and protein digestibility during germination of sorghum cultivars. *Food chemistry*, 64, 331-336.

- Engle M.J, Goetz G.S, Alpers D.H. 1998.** Caco 2 cells express a combination of colonocyte and enterocyte phenotypes. *Journal of Cellular Physiology*, 174:362-369.
- Englyst HN, Kingman SM & Cummings J.H. 1992.** Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition* 46: S33–50.
- Enquête démographique et de Santé, 1993** Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) du Burkina Faso. Macro International Inc. Calverton, Maryland USA
- Enquête démographique et de Santé, 1999.** Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) du Burkina Faso.
- Enquête démographique et de Santé, 2003** Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) du Burkina Faso, Calverton, MD: Author.
- Enquête Démographique et de Santé (EDS-IV) et à Indicateurs Multiples (MICS). 2010.** Rapport préliminaire. Ministère de l'économie et de finances. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Burkina Faso. Measure DHS, ICF Macro, Calverton, Maryland, USA.
- Elyas, S.H.A., El Tinay, A.H., Yousif, N.E., Elsheikh, E.A.E. 2002.** Effect of natural fermentation on nutritive value and in vitro protein digestibility of pearl millet. *Food Chemistry* 78, 75-79.
- Evers, A.D., Blakeney, A.B., O'Brien, L., 1999.** Cereal structure and composition. *Australian Journal of Agricultural Research* 50, 629-650.
- Eyzaguirre Romina Zanabria, Nienaltowska Katarzyna, de Jong Linda EQ, Hasenack Birgit BE and Nout MJ Robert. 2006.** Effect of food processing of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) IKMP-5 on the level of phenolics, phytate, iron and zinc. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86:1391–1398.
- Erdman JW, Pneros-Schneier AG. 1994.** Factors affecting nutritive value in processed foods. In: Shils ME, Olson JA, Shile M, editors. *Modern nutrition in health and disease*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1994, p.1569–78.
- Fageer Aisha S.M., Babiker Elfadil E., El Tinay Abdullahi H. 2004.** Effect of malt pretreatment and/or cooking on phytate and essential amino acids contents and in vitro protein digestibility of corn flour. *Food Chemistry* 88. 61–265
- Fairweather-Tait, S., Phillips, I., Wortley, G., Harvey, L., & Glahn, R. 2007.** The use of solubility, dialyzability, and Caco-2 cell methods to predict iron bioavailability. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 77, 158–165.
- Fairweather-Tait S, Lynch S, Hotz C, 2005.** The usefulness of in vitro models to predict the bioavailability of iron and zinc: a consensus statement from the HarvestPlus expert consultation. *International Journal of Vitamin and Nutrition Research*; 75:371–4

- Fairweather-Tait SJ, Powers HJ, Minski MJ, Whitehead J, Downes R. 1992** Riboflavin deficiency and iron-absorption in adult Gambian men. *Annals of Nutrition and Metabolism*; 36:34–40.
- Favier, J.-C. 1989.** Valeur nutritive des céréales au cours de leurs transformations. In « Céréales en régions chaudes », AUPELF-UREF, Eds John Libbey Eurotext, Paris, pp 285-297.
- Febles, C.I., Arias, A., Hardisson, A., Rodriguez-Alvarez, C., Sierra, A., 2002.** Phytic acid level in wheat flours. *Journal of Cereal Science* 36, 19-23.
- Fischer P.W.F., Giroux A, L'Abbé MR. 1984.** Effect of zinc supplementation on copper status in adult man. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1984, 40:743–746.
- Food and Agriculture Organization, 1995.** Le sorgho et les mil dans la nutrition humaine. Rome, ORGANISATIONS DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. (consulté en juillet 2004) <http://www.fao.org/docrep/T0818F/T0818F00.htm>
- Food and Agriculture Organization/World Health Organization. 1988.** Requirements of vitamin A, iron, folate and vitamin B12. Rome: FAO.
- Food and Agriculture Organization/World Health Organization /UNU. 2001.** FAO Human energy requirements. Food and nutrition technical report series. Rome, octobre 2001.
- Food and Agriculture Organization/World Health Organization. 2004a.** Iron. Dans : Vitamin and mineral requirements in human nutrition, Report of a joint FAO/WHO expert consultation, Bangkok, Thailand, pp 246-272. Rome : FAO.
- Food and Agriculture Organization/World Health Organization. 2004b.** Zinc. Dans : Vitamin and mineral requirements in human nutrition, Report of a joint FAO/WHO expert consultation, Bangkok, Thailand, pp 230-243. Rome : FAO.
- Food and Agriculture Organization/World Health Organization. 2004.** Vitamin and mineral requirements in human nutrition. Report of a joint FAO/WHO expert consultation, Bangkok. 2nd Ed.
- Forbes, A. L., Adams, A. E., Arnaud, M. J., Chichester, C. O., Cook, J. D., Harrison, B. N., Hurrell, R. F., Kahn, S. G., Morris, E. R., Tanner, J. T., & Wittaler, P. 1989.** Comparison of in vitro, animal, and clinical determinations of iron availability: International nutritional anemia consultative group task force report on iron bioavailability. *American Journal of Clinical Nutrition*, 49, 225–238.
- Friel JK, Andrews WL, Hall MS, 1995.** Intravenous iron administration to very-low-birth-weight newborns receiving total and parenteral nutrition. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition* 19:114–8.
- Frölich, W. 1995.** Bioavailability of micronutrients in a fibre-rich diet, especially related to minerals. *European Journal of Clinical Nutrition*, 49(S3), 116-122.

- Gangloff, M. B., Lai, C., Van Campen, D. R., Miller, D. D., Norvell, W. A. & Glahn, R. P. 1996** Ferrous iron uptake but not transfer is down-regulated in Caco-2 cells grown in high iron serum-free medium. *Journal of Nutrition*. 126: 3118–3127.
- Garenne M, Becher H, Ye Y, Kouyate B, Müller O. 2007.** Sex-specific responses to zinc supplementation in Nouna, Burkina Faso. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 44. 619-28
- Geerligs, P. D. P., Brabin, B. J., & Omari, A. A. A. 2003.** Food prepared in iron cooking pots as an intervention for reducing iron deficiency anaemia in developing countries: A systematic review. *Journal of Human Nutrition & Dietetics*, 16(4), 275–281.
- Ghosh, H.P., Sarkar, P.K. & Guha, B. 1963.** Distribution of the bound form of nicotinic acid in natural materials. *Journal of Nutrition*. 79: 451 -453.
- Gibson, R.S., Ferguson, E.L. 1998.** Nutrition intervention strategies to combat zinc deficiency in developing countries. *Nutrition Research Reviews*, 11, 115-131.
- Gibson R.S. & Hotz C. 2000.** The adequacy of micronutrients in complementary foods. *Pediatrics* 106, 1298–1299.
- Gibson, R. S. & Hotz, C. 2001.** Nutritional causes of linear growth faltering in infants during the complementary feeding period. In: *Nutrition and Growth*. Nestle Nutrition Workshop Series No. 47 (Martorell, R. & Haschke, F., eds.), pp. 159–192. Nestec Inc, Vevey/Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia, PA.
- Gibson R.S., Perlas L. and Hotz C. 2006.** Improving the bioavailability of nutrients in plant foods at the household level. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65, 160–168.
- Gibson R. S. 2007.** The role of diet and host-related factors in nutrient bioavailability and thus in nutrient-based dietary requirement estimates. *Food and Nutrition Bulletin*, 28:S77-S98.
- Gibson, R.S., Bailey, K.B., Gibbs, M. & Ferguson, E.L. 2010.** A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. *Food and Nutrition Bulletin*, 31, S134-S146.
- Gillooly M., Bothwell T.H., Torrance J.D., MacPhail A.P., Derman D.P., Bezwoda W.R., W. Mills and Charlton R.W. 1983.** The effect of organic acids, phytates and polyphenols on absorption of iron from vegetables. *British Journal of Nutrition*, 49:331–342.
- Gillooly M., Bothwell T.H., Charlton R.W., Torrance J.D., Bezwoda W.R., MacPhail A.P., Derman D.P., Novelli L., Morrall P., Mayet F., 1984.** Factors affecting the absorption of iron from cereals. *British Journal of Nutrition* 51, 37-46.

- Giugliano R, Millward D.J. 1984.** Growth and zinc homeostasis in the severely Zn-deficient rat. *British Journal of Nutrition* 52:545–60.
- Glahn, R. P., Lee, O. A., & Yeung, A., Goldman, Ml., & Miller, D.D. 1998.** Caco-2 cell ferritin formation predicts nonradiolabeled food iron availability in an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model. *Journal of Nutrition*, 128, 1555–1561
- Gleerup A, Rossander-Hulthen L, Gramatkovski E, Hallberg L.** Iron absorption from the whole diet: comparison of the effect of two different distributions of daily calcium intake. *American Journal of Clinical Nutrition* 1995; 61:97–104
- Godin E (2006)** Impact et enjeux économiques, sociaux, sanitaires et de développement de l'implantation de la culture de spiruline au Burkina Faso. In Mémoire de maîtrise *d'anthropologie*, pp. 89. Paris, France: Université Paris 8.
- Godon, B., Laignelet, B., 1991.** Composition biochimique des céréales. In: Godon, B., Willm, C. (Eds.), *Les industries de premières transformations des céréales. Technique et Documentation Lavoisier*, Paris, pp. 77-104.
- Gopalan, C., Rama Sastri, B.V. & Balasubramanian, S.C. 1989.** Nutritive value of Indian foods (revised and updated by B.S.Narasinga Rao, Y.G. Deosthale, & K.C. Pant). *Hyderabad, India, National Institute of Nutrition*.
- Graham, R.D., Senadhira, B.S., Iglesias, C. & Monasterio, I.1999.** Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crops Research*, 60, 57-80.
- Grams G. W., Blessin C. W. and Inglett G. E. 1970.** Distribution of tocophérol within the corn kernel. *Journal of the American oil chemists's society*. Volume 47, Page 337-339
- Green AM, Steinmetz ND. 1997.** Legal issues in human clinical investigation: a primer for physicians. *Journal of Nuclear Cardiology*; 4:539–49.
- Greenfield H., Southgate D.A.T., 2003.** Food Composition Data Production, Management and Use, second ed. FAO, Rome.
- Greiner R. 2002** Purification and characterization of three phytate degrading enzymes from germinated lupin seeds (*Lupinus albus* var. *Amiga*). *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 50: 6858–6864
- Greffeuille, V.; Mouquet-Rivier, C.; Icard-Vernière, C. ; Ouattara, L. ; Kayodé, A.P.; Amoussa, W. ; Hama, F. 2010.** Traditional recipes of millet-, sorghum,- and maize-based dishes and related sauces frequently consumed by young children in Burkina Faso and Benin <http://www.instapa.org/instapa>

- Greffeuille V., Kayodé A.P. P., Icard-Vernière C., Gnimadi Muriel, Rochette I., Mouquet-Rivier C. 2011.** Changes in iron, zinc and chelating agents during traditional African processing of maize: Effect of iron contamination on bioaccessibility. *Food Chemistry*, 126, 1800-1807.
- Greffeuille V. 2002.** Comparaison de méthodes d'évaluation in vitro de la biodisponibilité du fer et du zinc: application aux produits de transformation du mil, Mémoire de DESS Nutrition dans les PED, 2002.
- Guesry P. 1998.** The role of nutrition in brain development. *Prey Med*; 27 : 189-194.
- Gunshin H, Fujiwara Y, Custudio A.O, Drenzo C, Robine S, Andrews NC. 2005.** Slc11A2 is required for intestinal iron absorption and erythropoiesis but dispensable in placenta and liver. *Journal of Clinical Investigation*; 115:1258–66.
- Hahn D. H., Rooney L. W. & Earp C. F. 1984.** Tannins and phenols of sorghum. *Cereal Foods World*, 29, 776–779.
- Hallberg L, Hulthen L. 2000.** Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *American Journal of Clinical Nutrition* 71:1147-1160.
- Hallberg L, Brune M, Rossander L. 1986.** Effect of ascorbic acid on iron absorption from different types of meals. Studies with ascorbic acid given in different amounts with different meals. *Human Nutrition Applied Nutrition*, 40: 97-113.
- Hallberg L, Brune M, Rossander L. 1989.** Iron absorption in man: ascorbic acid and dose-dependent inhibition by phytate. *American Journal of Clinical Nutrition*; 49:140–4.
- Hallberg L. and Rossander-Hulthén L. 1991.** Iron requirements in menstruating women. *American Journal of Clinical Nutrition*; 54:1047–58.
- Hallberg L., Bjorn-Rasmussen E. 1981.** Measurement of iron absorption from meals contaminated with iron. *American Journal of Clinical Nutrition*, 34: 2808-15.
- Hallberg, L. 1998.** Does calcium interfere with iron absorption? *American Journal of Clinical Nutrition*, 68: 3–4.
- Hama, F. ; Icard-Vernière, C.; Guyot, J.-P. ; Picq, C.; Diawara, B. ; Mouquet-Rivier, C. 2011.** Changes in micro- and macronutrient composition of pearl millet and white sorghum during in field versus laboratory decortication. *J. Cereal Sci.*, 54, 425-433.
- Hama, F.; Icard-Vernière, C.; Guyot, J.-P.; Rochette, I.; Diawara, B.; Mouquet-Rivier, C.** Potential of non-GMO biofortified pearl millet (*Pennisetum glaucum*) for increasing iron and zinc content and their estimated bioavailability during abrasive decortication. *Int. J. Food Sci. Technology*. in press

- Hamaker, B.R., Kirleis, A.W., Mertz, E.T. and Axtell, J.D. 1986.** Effect of cooking on the protein profiles and in vitro digestibility of sorghum and maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 34 647–649.
- Hamaker, B.R., Kirleis, A.W., Butler, L.G., Axtell, J.D. and Mertz, E.T. 1987.** Improving the in vitro protein digestibility of sorghum with reducing agents. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America* 84 626–628.
- Hambidge K. M, Huffer J. W, Raboy V., Grunwald G. K, Westcott J. L, Sian L., Miller L. V., Dorsch J. A, Krebs N. F. 2004.** Zinc absorption from a low-phytate hybrids of maize and their wild-type isohybrids. *American Journal of Clinical Nutrition*. 79:1053–9.
- Hambidge KM, Krebs KM, Westcott JL, Sian L, Miller LV, Peterson KL, Raboy V. 2005.** Absorption of calcium from tortilla meals prepared from low-phytate maize. *American Journal of Clinical Nutrition* 82:84–7.
- Hambidge KM, Miller LV, Westcott JE, Sheng X, Krebs NF. 2010.** Zinc bioavailability and homeostasis. *American Journal of Clinical Nutrition*; 91:1478S-83S.
- Han, O., Failla, M. L., Hill, A. D., Morris, E. R. & Smith, J. C., Jr. 1994.** Inositol phosphates inhibit uptake and transport of iron and zinc by a human intestinal cell line. *Journal. Nutrition*. 124: 580–587.
- Han, O., Failla, M. L., Hill, A. D., Morris, E. R. & Smith, J. C., Jr. 1995.** Reduction of Fe (III) is required for uptake of nonheme iron by Caco-2 cells. *Journal of Nutrition*.125: 1291–1299
- Harlan, J.R. & de Wet, J.M.J. 1972.** A simplified classification of cultivated sorghum. *Crop Science*, 12: 172- 176.
- Harris H. B., and Burns R. E., 1970.** Influence of tannin content on pre-harvest seed germination in sorghum. *Agronomy Journal* 62:835.
- Harvest Plus** (<http://www.harvestplus.org/content/iron-pearl-millet-india>)
- Harvey, P.; Dexter P.; Darnton-Hill, I. 2000.** The impact of consuming iron from non-food sources on iron status in developing countries. *Public Health Nutr.* 3, 375-383.
- Hassan I. A. G. & El Tinay A. H. 1995.** Effect of fermentation on tannin content and in-vitro protein and starch digestibilities of two sorghum cultivars. *Food Chemistry*, 53, 149–151.
- Hazell, T., & Johnson, I. T. 1987.** In vitro estimation of iron availability from a range of plant foods: influence of phytate, ascorbate and citrate. *British Journal of Nutrition*, 57, 223–233
- Hemery, Y., Rouau, X., Lullien-Pellerin, V., Barron, C., Abécassis, J., 2007.** Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science* 46, 327-347

- Henderson LM, Brewer GJ, Dressman JB, SZ Swida, DJ DuRoss, CH Adair, JL Barnett, RR Berardi.** 1996. Use of zinc tolerance test and 24-hour urinary zinc content to assess oral zinc absorption. *Journal of the American College of Nutrition*, 15:79–83.
- Henriksen LK, Mahalko JR, Johnson LAK.** 1985 Canned foods: Appropriate in trace element studies? *Journal of American Dietetic Association* 85: 563–568
- Hibberd, C.A., Wagner, D.G., Schemm, R.L., Mitchell, F.,D. Jr, Weibel, D.E. & Hintz, R.L.** 1982. Digestibility characteristics of isolated starch from sorghum and corn grain. *J. Anim. Sci.*, 55: 1490- 1497.
- Hicks PD, Zavaleta N, Chen Z, Abrams SA, Lönnerdal B.** 2006. Iron deficiency, but not anemia, upregulates iron absorption in breast-fed Peruvian infants. *Journal of Nutrition*; 136:2435–8.
- Hirschi, K.** 2008. Nutritional improvements in plants: time to bite on biofortified foods. *Trends in Plant Science*, 13, 459-463.
- Hotz, C.** 2009. The potential to improve zinc status through biofortification of staple crops with zinc. *Food and Nutrition Bulletin*, 30, S172-S178.
- Hotz Christine and Gibson Rosalind S.,** 2001. Assessment of Home-Based Processing Methods to reduce the Phytate Content and Phytate/Zinc Molar Ratio of White Maize (*Zea mays*). *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 49, 692–698.
- Hotz C & Brown KM.** 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food and Nutrition Bulletin* 25, S99–S199.
- Hounhouigan D.J., Nout M.J.R., Nago C.M., Houben J.H., Rombouts F.M.,** 1993b. Composition and microbiological and physical attributes of mawe, a fermented maize dough from Benin. *International Journal of Food Technology*, 28, 513–517
- Hounhouigan, D.J., Nout, M.J.R., Nago, C.M., Houben, J.H., Rombouts, F.M.,** 1999. Use of starter cultures of lactobacilli and yeast in the fermentation of mawe, an African maize product. *Tropical Science*, 39, 220–226
- Hounhouigan DJ,** 2004. La valorisation des céréales locales pour les marchés urbains en Afrique de l’Ouest: les atouts, contraintes et perspectives, in *Food Based Approaches for A Healthy Nutrition in West Africa*; Proceedings of the 2nd International workshop, ed. by Brouwer ID, Traore AS and Treche S. University of Ouagadougou; Institute for Development Research, Montpellier; Wageningen University; Food and Agriculture Organization, Rome, Ouagadougou, pp. 359–368.
- Huh EC, Hotchkiss A., Brouillette J., Glahn RP.** 2004. Carbohydrate fractions from cooked fish promote iron uptake by Caco-2 cells. *Journal of Nutrition* 134 (7):1681–9.

- Huo J, Sun J, Miao H, 2002.** Therapeutic effects of NaFeEDTA-fortified soy sauce in anaemic children in China. *Asia Pacifique Journal of Clinical Nutrition*; 11: 123–27
- Hubbard J.E., Hall H.H. & Earle F.R., 1950.** Composition of the component parts of the sorghum kernel. *Cereal Chemistry*, 27: 415-420.
- Hulse, J.H., Laing, E.M. & Pearson, O.E. 1980.** Sorghum and the millets: their composition and nutritive value. New York, Academic Press. 997 p.
- Hurrell RF, Lynch SR, Trinidad TP, Dassenko SA, Cook JD. 1989.** Iron absorption in humans as influenced by bovine milk proteins. *American Journal of Clinical Nutrition* 49: 546-52.
- Hurrell R.F, Juillerat M.A, Reddy M.B, Lynch S.R, Dassenko S.A, Cook J.D. 1992.** Soy protein, phytate, and iron-absorption in humans. *American Journal Clinical Nutrition*; 56:573–8.
- Hurrell RF. 1997.** Preventing iron deficiency through food fortification. *Nutrition Review* 1997; 55:210-22.
- Hurrell R, Bothwell T, Cook JD, et al., Sustain Task Force. 2002.** The usefulness of elemental iron for cereal flour fortification: a SUSTAIN task force report. *Nutrition Review*; 60: 391–406
- Hurrell R. F. 2002.** Bioavailability—a time for reflection. *International Journal of Vitamin Nutrition Research* 2002; 72:5–6.
- Hurrell R.F. 2002.** How to ensure adequate iron absorption from iron-fortified food. *Nutrition Review*; 60: S7–15.
- Hurrell R.F. 2002.** Fortification: Overcoming Technical and Practical Barriers. *Journal of Nutrition* 132 (4): 806S-12S.
- Hurrell R. F. 2003.** Influence of vegetable protein sources on trace element and mineral bioavailability. *Journal of Nutrition* 133, 2973S–2977S
- Hurrell R.F, Reddy M.B, Juillerat M.A, Cook J.D. 2003.** Degradation of phytic acid in cereal porridges improves iron absorption by human subjects. *American Journal of Clinical Nutrition*; 77:1213–9.
- Hurrell RF, Lynch S, Bothwell T, et al. 2004.** Enhancing the absorption of fortification iron. *International Journal of Vitamin Nutrition Research*; 74: 387–401.
- Hurrell R. F. 2004.** Phytic acid degradation as a means of improving iron absorption. *International Journal of Vitamin Nutrition Research*; 74:445–52.
- Hurrell R. & Egli I., 2010.** Iron bioavailability and dietary reference values. *American Journal of Clinical Nutrition*, 91 (5), 1461S–1467S.

- Hurrell, R., Ranum, P., de Pee, S., Biebonger, R., Hulthen, L., Johnson, Q. & Lynch, S. 2010.** Revised recommendations for iron fortification of wheat flour and an evaluation of the expected impact of current national wheat flour fortification programs. *Food and Nutrition Bulletin*, **31**, S7-S21.
- International Crops Research Institute for the Semi Arid Tropics (ICRISAT)/Food and Agriculture Organization (FAO), 1996.** The World Sorghum and Millet Economies. ICRISAT, Patancheru, India/FAO, Rome.
- Institute of Medicine. 2001.** Iron. In: Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington, DC: National Academy Press: 290–393
- Isaksson B, Sjogren G. 1967.** A critical evaluation of the mineral and nitrogen balances in man. *Proceedings of the Nutrition Society* :26:106-16.
- Iqbal TH, Lewis KO, Cooper BT. 1994.** Phytase activity in the human and rat small intestine. *Gut*, 35:1233–6.
- Iyengar G.V. 1998.** Reevaluation of the trace element content in reference man. *Radiation Physics and Chemistry*; 51 : 545–60.
- IZiNCG (International Zinc Nutrition Consultative Group): Brown, K.H., Rivera, J.A., Bhutta, Z., Gibson, R.S., King, J.C., Lönnerdal, B., Ruel, M.T., Sändtrom, B., Wasantwisut, E., Hotz, C. 2004.** Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food and Nutrition Bulletin*, **25**, S99-S199.
- Jacobs A., and D. A. Greenman.** Availability of food iron. *British Medical Journal*. 1: 673, 1969
- Jacobs, J.W. & Walker, R. B. 1977.** Localization of iron in *Vigna sinensis* (L.) and *Zea mays* (L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 25(4), 803–806
- Jahn-Deesbach W. R. Marquard and M. Heil Z. Lebensm. 1975.** Unters. Forsch. 159:279.
- Jambubathan R., Mertz E.T. 1973.** Relationship between tannin levels, rat growth, and distribution of proteins in sorghum. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 21, 692–696.
- Jambunathan et al., 1980.** Improvement of the nutritional quality of sorghum and pearl millet. *Food Nutrition: Bulletin* 2: 11 - 16.
- Jambunathan, R. & Subramanian, V. 1988.** Grain quality and utilization of sorghum and pearl millet. In Biotechnology in tropical crop improvement. Proceedings of the International Biotechnology Workshop, Patancheru, Inde, 12-15 janvier 1987, p. 133139. Patancheru, ICRISAT.

- Jansman AJM, Houdijk JGM, Verstegen MWA. 1993.** Effect of condensed tannins in faba beans (*Vicia faba* L.) on the availability of minerals in pigs. In: Schlemmer U, ed. Bioavailability '93: Nutritional, chemical and food processing implications of nutrient availability. Karlsruhe, Germany: Federation of European Chemical Societies.
- Jansman AJ, Enting H, Verstegen MWA, Huisman J. 1994.** Effect of condensed tannins in hulls of faba beans (*vicia faba* L.) on the activities of trypsin (EC 2.4.21.4) and chymotrypsin (EC 2.4.21.1) in digesta collected from the small intestine of pigs. *British Journal Nutrition* ; 71: 627-41.
- Jellum, M.D. & Powell, J.B. 1971.** Fatty acid composition of oil from pearl millet seed. *Agronomic Journal*, 63: 29-33.
- Jensen, S.A., Martens, H., 1983.** The botanical constituents of wheat and wheat milling fractions. II. Quantification by amino acids. *Cereal Chemistry*, 60, 172–177.
- Jeong, J. & Guerinot, M.L. 2009.** Homing in on iron homeostasis in plants. *Trends in Plant Science*, **14**, 280-285.
- Kayodé A.P.P. 2006.** Diversity, users' perception and food processing of sorghum: Implications for dietary iron and zinc supply. Ph.D. thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. pp 1–151.
- Kayode A.P.P., Hounhouigan D.J., Nout M.J.R., 2007a.** Impact of brewing process operations on phytate, phenolic compounds and in-vitro solubility of iron and zinc in opaque sorghum beer. *Food Science and Technology LWT* 40, 834–841.
- Kayode A.P.P., Hounhouigan D.J., Nout M.J.R., Niehof A., 2007b.** Household production of sorghum beer in Benin: technological and socio-economical aspects. *International Journal of Consumer Studies*. 31, 258–264.
- Kayode A.P.P., Adégbidi A., Linnemann A.R., Nout M.J.R. & Hounhouigan D.J. 2005.** Quality of farmer's varieties of sorghum and derived foods as perceived by consumers in Benin. *Ecology of Food and Nutrition*; 44, 271–294.
- Kennedy, G., Nantel, G., Shetty, P. 2003.** The scourge of "hidden hunger": global dimensions of micronutrient deficiencies. *Food, Nutrition and Agriculture* 32, 8-16.
- Kennedy JA, Powell HPJ. 1985.** Polyphenol interactions with aluminium (III) and iron (III): Their possible involvement in the podzolization process. *Australian Journal of Chemistry*; 38:897-888
- Kent N.L. and Evers A.D. 1994.** Kent's Technology of Cereals' 4th edn. Pergamon Press Ltd., Oxford.

- Khetarpaul, N., Chauchan, B.M. (1989).** Effect of germination and pure culture fermentation on HCl-extractability of minerals of pearl millet (*Pennisetum typhoides*). *International Journal of Food Sciences and Technology* 24, 327-331.
- Kim M., Atallah M.T., 1992.** Structure of dietary pectin, iron bioavailability and hemoglobin repletion in anemic rats. *Journal of Nutrition*; 122:298–305.
- Kling P.J, Schmidt R.L, Roberts RA, Widness J.A. 1996.** Serum erythropoietin levels during infancy: Associations with erythropoiesis. *Journal of Pediatrics*; 128:791–6
- Klopfenstein, C.F. & Hosney, R.C. 1995.** Nutritional properties of sorghum and millets. In: Dendy, D.A.V. (Ed.), *Sorghum and Millets- chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, MN, pp 125-168.
- Ko, K.M., Gold, D.V., 1990.** Ferric ion-induced lipid peroxidation in erythrocyte membranes: effects of phytic acid and butylated hydro-xytoluene. *Molecular and Cellular Biochemistry* 95, 125-128.
- Koh, B.K., Singh, V., 2009.** Cooking behavior of rice and black gram in the preparation of idli, a traditional fermented product of indian origin, by viscosography. *J. Text. Stud.* 40, 36–50.
- Konietzny U, Greiner R 2002.** Molecular and catalytic properties of phytate-degrading enzymes (phytases). *International Journal of Food Sciences and Technology* 37: 791–812.
- Konkobo Y.C, Karimou AR, Kaboré S., Diasso K., 2002.** Les pratiques alimentaires à Ouagadougou, Burkina Faso. CNRST, CIRAD.
- Knudsen, E., Sandström, B. & Solgaard, P. 1996.** Zinc, copper and magnesium absorption from a fibre-rich diet. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 10:68–76.
- Krebs, N. F., Miller, L. V., Naake, V. L., Lei, S., Westcott, J. E. & Fennessey, P. V.1995.** The use of stable isotope techniques to assess zinc metabolism. *Nutrition Biochem.* 6: 292–301.
- Kretchmer N, Beard JL, Carlson S. 1996.** The role of nutrition in development of normal cognition. *American Journal of Clinical Nutrition*; 63: 997 S-1001 S.
- Krishnan, S., Datta, K., Baisakh, N., de Vasconcelos, M., Datta, S.K., 2003.** Tissue-specific localization of beta-carotene and iron in transgenic indica rice (*Oryza sativa* L.). *Current Science* 84, 1232–1234.
- Kurien, P.P., Narayanarao, M., Swaminathan, M. and Subrahmanyam, V. 1960.** The metabolism of nitrogen, calcium and phosphorus in undernourished children. 6. The effect of partial or complete replacement of rice in poor vegetarian diets by kaffircorn (*Sorghum vulgare*). *British Journal of Nutrition* 14 339–345.

- Kumari, M., Gupta, S., Lakshmi, A. J., & Prakash, J. 2004.** Iron bioavailability in green leafy vegetables cooked in different utensils. *Food Chemistry*, 86(2), 217–222.
- Landry, J., Moureaux, T. 1970.** Heterogeneite des glutenines du grain de maïs: Extraction selective et composition en acides amines des trios fractions isolees. *Bulletin de la Societe de Chimie Biologique* 52, 1021–1031.
- Larocque R., Casapia M., Gotuzzo E., Gyorkos T.W. 2005.** Relationship between intensity of soil-transmitted helminth infections and anemia during pregnancy. *American Journal of Tropical Medicine Hygienic*; 73: 783.
- Latunde-Dada GO, Van der Westhuizen J, Vulpe CD, Anderson GJ, Simpson RJ, McKie AT. 2002.** Molecular and functional roles of duodenal cytochrome B (Dcytb) in iron metabolism. *Blood Cells Molecular Disease*; 29: 356–60.
- Lawton J.W., Faubion J.M. 1989.** Measuring kernel hardness using the tangential abrasive dehulling device. *Cereal Chemistry*, 66 (6), 519-524
- Lee W.J., Pedersen J.F., Shelton D.R. 2002.** Relationship of Sorghum kernel size to physicochemical, milling, pasting and cooking properties. *Food Research International* 35, 643-649.
- Lending, C.R., Kriz, A.L., Larkins, B.A., Bracker, C.E., 1988.** Structure of maize protein bodies and immunocytochemical localisation of zeins. *Protoplasma* 143, 51–62.
- Leeson and Summers. 1998.** Structure of a phytate molecule; www.spesfeed.co.za/winter_99.htm
- Lestienne I., Buisson, M., Lullien-Pellerin, V., Picq, C., Trèche, S., 2007.** Losses of nutrients and antinutritional factors during abrasive decortication of two pearl millet cultivars (*Pennisetum glaucum*). *Food Chemistry* 100, 1316-1323.
- Lestienne I., Besancon P., Caporiccio B., Lullien-Pelerin V., & Treche S. 2005.** Iron and zinc in vitro availability in pearl millet flour (*Pennisetum glaucum*) with varying phytate, tannin, and fiber contents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*; 53, 3240–3247.
- Lochte-Watson K. R., Weller C. L. & Jackson D. S. 2000.** Fractionation of grain sorghum using abrasive decortication. *Journal of Agricultural and Engineering Research*; 77, 203–208.
- Lønnerdal B. 2003.** Genetically modified plants for improved trace element nutrition. *Journal of Nutrition*; 133 (suppl 1): 1490S–93S.
- Lønnerdal B, Sandberg A, Sandström B, Kunz C. 1989.** Inhibitory effects of phytic acid and other inositol phosphates on zinc and calcium absorption in suckling rats. *Journal of Nutrition*; 119:211–4.

- Lowe NM, Shames DM, Woodhouse LR, et al. 1997.** A compartmental model of zinc metabolism in healthy women using oral and intravenous stable isotope tracers. *American Journal of Clinical Nutrition*; 65:1810–9
- Lu Z.H., Cao W., Peng H.H., Wang F., Tatsumi E., Kohyama K., Li L.T., 2008a.** Effect of fermentation metabolites on rheological and sensory properties of fermented rice noodles. *Journal of Science Food and Agriculture*. 88, 2134–2141
- Lu Z.H., Peng H.H., Cao W., Tatsumi E., Li L.T., 2008b.** Isolation, characterization and identification of lactic acid bacteria and yeasts from sour Mifen, a traditional fermented rice noodle from China. *Journal of Applied Microbiology*, 105, 893–903.
- Lucca P, Hurrell R, Potrykus I. 2001.** Genetic engineering approaches to improve the bioavailability and the level of iron in rice grains. *Theoretical and Applied Genetics*; 102: 392–97
- Lukaski HC, BOLONCHUK W.W., KLEVAY L.M., MILNE D. B. et al. 1984.** Changes in plasma zinc content after exercise in men fed a low-zinc diet. *American Journal of Physiology*, 1984, 247:E88–E93.
- Lynch S.R, Hurrell R.F, Dassenko S.A, Cook J.D. 1989.** The effect of dietary proteins on iron bioavailability in man. *Advances in Experimental Medicine and Biology*; 249: 117–32.
- Maclean, W.C., DeRomana, G.L., Placko, R.P. and Graham, G.G. 1981.** Protein quality and digestibility of sorghum in pre-school children: Balance studies and plasma free amino acids. *Journal of Nutrition* 111, 1928–1936.
- Mahoney AW, Hendricks DG. 1984.** Potential of the rats as model for predicting iron bioavailability for humans. *Nutrition Research* 4: 913-922.
- Maier-Redelsperger M, Noguchi C, de Montalembert M, Rodgers G, Schechter A, Gourbil A, Blanchard D, Jais J, Ducrocq R, Peltier JY, Cottat MC, Lacaille F, Belloy M, Elion J, Labie D, Girot R. 1994.** Variation in fetal hemoglobin parameters and predicted hemoglobin S polymerization in sickle cell children in the first two years of life: *Parisian Prospective Study on Sickle Cell Disease*. *Blood*; 84:3182–8.
- Manary MJ, Hotz C, Krebs NF, Gibson RS, Westcott JE, Broadhead RL & Hambidge KM 2002a.** Zinc homeostasis in Malawian children consuming a high-phytate, maize-based diet. *American Journal of Clinical Nutrition* 75, 1057–1061.
- Manelius, R., Bertoft, E., 1996.** The effect of Ca²⁺ ions on the α -amylolysis of granular starches from oats and waxy-maize. *Journal of Cereal Science*. 24, 139–150.
- Marine D, Kimball OP. 1920.** Prevention of simple goiter in man. *Archives of Internal Medicine*, 1920, 25:661–672.

- Mbugua S.K., Njenga J., 1992.** The antimicrobial activity of fermented uji. *Ecology of Food and Nutrition* 28, 191–198.
- McDonald MC, Abrams SA, Schanler RJ. 1998.** Iron absorption and red blood cell incorporation in premature infants fed an iron-fortified infant formula. *Pediatric Research*; 44:507–11.
- McDonough C.M., Rooney L.W., Earp C.F., 1986.** Structural characteristics of Eleusine coracana (finger millet) using scanning electron and fluorescence microscopy. *Food Microstructure*; 5, 247–256.
- McKevith B. 2004.** Nutritional aspects of cereals. *Nutrition Bulletin* 29:111-142
- Meenakshi, J. V., Johnson, N.L., Manyong, V.M., DeGroot, H., Javelosa, J., Yanggen, D.R., Naher, F., Gonzalez, C., García, J. & Meng. E. 2010.** How cost-effective is biofortification in combating micronutrient malnutrition? An Ex ante Assessment. *World Development*, 38, 64-75.
- Mercy G. Lung'aho and Raymond P. Glahn. 2009.** Micronutrient sprinkles add more bioavailable iron to some Kenyan complementary foods: studies using an in vitro digestion/Caco-2 cell culture model. *Maternal and Child Nutrition*, 5, pp. 151–158
- Miche J.C. 1980.** Utilisation potentielle du sorgho dans un système industriel intégré de mouture et de pastification. In "Amélioration des systèmes post- récolte en Afrique de l'Ouest. Agence de Coopération Culturelle et Technique». Paris, France. pp 171-192
- Miller, D. D., Schrick, B. R., Rasmussen, R. R., & Campen, D. 1981.** An in vitro method for estimation of iron availability from meals. *American Journal of Clinical Nutrition*, 34, 2248–2256
- Minihane AM, Fairweather-Tait SJ. 1998** Effect of calcium supplementation on daily nonheme-iron absorption and long-term iron status. *American Journal of Clinical Nutrition*; 68:96–102.
- Mitchikpe E. C. S., Dossa R. A.M., Ategbro E.-A. D., van Raaij J.M. A., Hulshof P. J.M. & Kok, F. J. 2008.** The supply of bioavailable iron and zinc may be affected by phytate in Beninese children. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21(1), 17–25.
- Monsen E.R, Hallberg L., Layrisse M., et al. 1978.** Estimation of available dietary iron. *American Journal Clinical Nutrition*; 31:134–41.
- Mouquet C., Guyot J.P., Trèche S. 2001.** Changes in phytate content during traditional processing of cereal into fermented gruels in west-African small scale units. *Annals of Nutrition & Metabolism of the 17th International congress of Nutrition*. 27-31 August. Vienna, Austria.
- Mouquet-Rivier C., Icard Vernière C., Guyot J.P., Hassane Tou E., Rochette I., Trèche S., 2008.** Consumption pattern, biochemical composition and nutritional value of fermented pearl millet gruels in Burkina Faso. *International of Journal Food Science Nutrition*, 59, 716–729.

- Morrison W.R., D.L. Mann, W. Soon, and A.M. Coventry, J. 1975.** *Scio Food Agric.* 26:507.
- Muliman VH, Vadiraj S 1994.** Changes in trypsin and chymotrypsin inhibitory activity on soaking of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plant Foods for Human Nutrition* 46: 27–31.
- Munck, L., Bach Knudsen, K.E. & Axtell, J.D. 1982.** Milling processes and products as related to kernel morphology. In L.W. Rooney & D.S. Murty, édés. *Proceedings of the International Symposium on Sorghum Grain Quality*, Hyderabad, Inde, 28-31 Octobre 1981, p. 200-210. Patancheru, Inde. ICRISAT.
- Murphy SP., Beaton GH, Calloway DH. 1992.** Estimated mineral intake of toddlers: Predicted prevalence of inadequacy in village populations in Egypt, Kenya, and Mexico. *American Journal of Clinical Nutrition*, 56:565-72.
- Murty D.S., Kumar K.A. 1995.** Traditional uses of sorghum and millets. Dans: *Sorghum and millets: Chemistry and technology* (édité par Dendy D.A.V.), pp. 185-222. St Paul : American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Mwasaru M.A., Reichert R.D., Mukuru S.Z. 1988.** Factors affecting the abrasive efficiency of high-tannin sorghum. *Cereal Chemistry*; 65, 171-174
- Narasinga Rao BS, Prabhavathi T. 1978.** An in vitro method for predicting the bioavailability of iron from foods. *American Journal of Clinical Nutrition*; 31 : 169.175.
- Narasinga Rao BS, Prabhavathi T. 1982.** Tannin content of foods commonly consumed in India and its influence on ionisable iron. *Journal Science Food Agriculture* 33:89-96.
- Nävert B, Sandström B, Cederblad A. 1985.** Reduction of phytate content of bran by leavening in bread and its effects on zinc absorption in man. *British Journal Nutrition* 53, 47-53.
- Nirmala, M., Subba Rao, M.V.S.S.T., Muralikrishna, G. 2000.** Carbohydrates and their degrading enzymes from native and malted finger millet (*Ragi*, *Eleusine coracana*, Indaf 15). *Food Chemistry*, 69, 175-80.
- Nout M.J.R. 1994.** Fermented foods and food safety. *Food Research International* 27, 291-298.
- Nout M.J.R. 2009.** Rich nutrition from the poorest – Cereal fermentations in Africa and Asia. *Food Microbiology* 26 (2009) 685–692
- Nout, M.J.R., Sarkar, P.K. 1999.** Lactic acid food fermentation in tropical climates. *Antonie Van Leeuwenhoek* 76, 395-401.
- Nout MJR, Rombouts FM, Hautvast GJ. 1989.** Accelerated natural lactic fermentation of infant food formulations. *Food Nutrition Bulletin* 11(1):6573.

- Oberleas D. 1983.** Phytic content in cereals and legumes on method of determination. *Cereal Chemistry*, 28, 352–356.
- Obilana A.B. 2003.** Overview: Importance of millets in Africa. In P.S. Belton & J. R. N. Taylor (Eds.), *Proceeding of the workshop on the proteins of sorghum and millets: Enhancing nutritional and functional properties for Africa*, 2–4 April 2003, Pretoria, South Africa. <<http://www.afripro.org.uk>> Accessed July 2004.
- O'Brien KO, Zavaleta N, Caulfield LE, Wen J., Abrams SA. 2000.** Prenatal iron supplements impair zinc absorption in pregnant Peruvian women. *Journal of Nutrition*; 130:2251–5.
- O'Dell B.L., De Boland A.R., Koirtiyohann S.R. 1972.** Distribution of phytate and nutritionally important elements among the morphological components of cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 20, 718-721.
- Odunfa, S. A., Adeyele, S. 1985.** Microbiological changes during the traditional production of ogi-baba, a West African fermented sorghum gruel. *Journal of Cereal Science* 3, 173-180.
- Oelshlegel FJ, Brewer GJ. 1977.** Absorption of pharmacologic doses of zinc. In: Brewer GJ, Prasad AS, eds. *Zinc metabolism: current aspects in health and disease*. Vol 14. New York: Alan R Liss, 299–316.
- Ohta A, Ohtsuki M., Baba S., Takizawa T., Adachi T., Kimura S. 1995.** Effects of fructooligosaccharides on the absorption of iron, calcium and magnesium in iron-deficient anemic rats. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology* (Tokyo); 41:281–91.
- Ohkawara Y, Bamba M, Nakai I, Kinka S, Masuda M. 1963.** Absorption of iron from human large intestine. *Gastroenterology*; 44:611–4.
- Oikeh, S. O.; Menkir, A.; Maziya-Dixon, B.; Welch, R.; Glahn, R. P. 2003.** Assessment of concentrations of iron and zinc and bioavailable iron in grain of early-maturing tropical maize varieties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 51, 3688-3694.
- Olive F. 2011.** Faisabilité de la fabrication de sauces à base de légumes feuilles pour la réalisation d'une étude d'efficacité biologique auprès des jeunes enfants burkinabès. Mémoire Master. Université de Montpellier 2.
- Oomah B.D. Reichert R D; Youngs C. G. 1981.** A novel, multisample, tangential abrasive dehulling device (TADD). *Cereal Chemistry*, 58, 392-395
- O'Neil-Cutting M.A, Crosby W.H. 1987.** Blocking of iron absorption by a preliminary oral dose of iron. *Archive of International Medicine* 147:489–91.
- Onyango, C., Noetzold, H., Bley, T., Henle, T. 2004.** Proximate composition and digestibility of fermented and extruded uji from maize-finger millet blend. *Food Science and Technology*. LWT 37, 827–832.

- Onyeka, U., Dibia, I. 2002.** Malted weaning food made from maize, soybean, groundnut and banana. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82, 513-316.
- Oppenheimer SJ. 2001.** Iron and its relation to immunity and infectious disease. *Journal of Nutrition*; 131(2S-2):616S–33S; discussion 633S–5S
- Oria, M.P., Hamaker, B.R. and Shull, J.M. 1995** Resistance of sorghum and kafirins to pepsin digestion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43, 2148–2153.
- Ouédraogo Laetitia, 2009.** Rapport ENIAM Enquête de consommation alimentaire et identification d'un « panier alimentaire » type du ménage » dans huit régions du Burkina Faso. Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST) Institut de Recherche en Sciences de la Santé, FAO.
- Ouédraogo Hermann, 2008.** Anémie chez les jeunes enfants : situation et stratégies de prévention en milieu rural du Burkina Faso. Thèse en Santé Publique. Université Libre de Bruxelles.
- Oyewole, O. B., 1997.** Lactic fermented foods in Africa and their benefits. *Food Control*; 8, 289–297.
- Ozturk, L., Yazici, M.A., Yucel, C., Torun, A., Cekic, C., Bagci, A., Ozkan, H., Braun, H.J., Sayers, Z., Cakmak, I., 2006.** Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia Plantarum* 128, 144–152.
- Palmgren, M.G., Clemens, S., Williams, L.E., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J.K. & Sanders, D. 2008.** Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends in Plant Science*, 13, 464-473.
- Park, J.; Brittin H.C. 1997.** Increased iron content of food due to stainless steel cookware. 1997. *Journal of American Diet. Assoc.*, 97, 659-661.
- Paulis, J.W., Wall, J.S., 1979.** Distribution and electrophoretic properties of alcohol-soluble proteins in normal and high-lysine sorghums. *Cereal Chemistry* 56, 20–23.
- Payton KB et al 1982.** Technique for determination of human zinc absorption from measurement of radioactivity in a fecal sample or the body. *Gastroenterology*. 83: 1264-1270.
- Pedersen, B. & Eggum, B.O. 1983.** The influence of milling on the nutritive value of flour from cereal grains. 6. Sorghum. *Qual Plant. Plant Foods Human Nutrition*, 33: 313-326.
- Pia G. W., Fritz J. C 1971.** Collaborative study of the hemoglobin repletion test in chicks and rats for measuring availability of iron. *AOAC* 54 13-17.
- Powell SR. 2000.** The antioxidant properties of zinc. *Journal of Nutrition*. 130: S1447-54.

- Prabhavathi, T.; Narasinga Rao, B.S. 1981.** Contaminant iron in foods and its bioavailability predicted by in vitro method. *Indian Journal of Medicine Research*. 74, 37-41.
- Prasad AS, Halsted JA, Nadimi M. 1961.** Syndrome of iron deficiency anemia, hepatosplenomegaly, hypogonadism, dwarfism and geophagia. *American Journal of Medicine*; 31: 532-46
- Prasad AS. 1991.** Discovery of human zinc deficiency and studies in an experimental human model. *American Journal of Clinical Nutrition* 53: 403-12
- Prasad AS, Beck FWJ, Nowak J. 1993.** Comparison of absorption of five zinc preparations in humans using oral zinc tolerance test. *Journal of Trace Elements Exp Med*; 6:109–15.
- Prasad A. S. 2004.** Antioxidant effect of zinc in human. *Free Radical Biology & Medicine*; 37:1182–90
- Proulx A. K. & Reddy M. B. 2007.** Fermentation and lactic acid addition enhance iron bioavailability of maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (7), 2749–2754
- Purseglove, J.W. 1972.** Tropical crops: monocotyledons, Vol. 1. Londres, Longman Group Limited. 334 p.
- Raboy V. 2000.** Low-phytic-acid grains. *Food Nutrition Bulletin*; 21: 423–27
- Raboy, V. 2009.** Approaches and challenges to engineering seed phytate and total phosphorus. *Plant Science*, 177, 281-296.
- Ramachandra, G., Virupaksha, T. K., Shadaksharaswamy, M. 1977.** Relationship between tannin levels and in vitro protein digestibility in finger millet (*Eleusine coracana* Gaertn). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 25, 1101–1104.
- Ranhotra, G. S., F. N. Hepburn and W. D. Bradley. 1971.** Availability of iron in enriched bread, *Cereal Chemistry*. 48: 377.
- Ravindran, V., Bryden W.L., Kornegay E. T. 1995.** Phytin: occurrence, bioavailability and implications in poultry nutrition. *Poultry and Avian Biology Reviews*; 6, 125–143.
- Recensement Général de la Population et de l’Habitation.** 2006. Institut National de Statistiques et de la Démographie. Ministère de l’Economie et des Finances. Burkina Faso
- Reddy N, Person M, Sathe S and Salunkhe D. 1989.** Phytates in cereals and legumes. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida.
- Reddy M. B, Cook J. D. 1991.** Assessment of the dietary determination of non-heme iron absorption in humans and rats. *American Journal of Clinical Nutrition* 54: 723—728.

- Reichert, R.D., Youngs, C.G. 1977.** Dehulling cereal grains and grain legumes for developing countries. II. Chemical composition of mechanically and traditionally dehulled sorghum and millet. *Cereal Chemistry* 54, 174-178.
- Report of a WHO Expert Consultation, Geneva 8-11 December 2008.** Programms and Projects- Nutrition - Micronutrient deficiency-Iron deficiency anemia, OMS. www.who-int.
- Regional Strategic Analysis and Knowledge Support System-West Africa(ReSAKSS WA). 2009.** « Etude sur l'évolution du secteur agricole et des conditions de vie des ménages en Afrique de l'Ouest »
- Rooney, L.W. & Serna-Saldivar, S.O. 1991.** Sorghum. In K.J. Lorenz & K. Kulp, eds. Handbook of cereal science and technology p. 233-269. New York, Marcel Dekker.
- Rooney L. W. & Miller F.R. 1982.** Variation in the structure and kernel characteristics of sorghum. In L. W. Rooney & D.S. Murty (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Sorghum Grain Quality* (pp. 143–162). Patancheru, India: ICRISAT.
- Ross, J. H., Ebaugh, F. G., Jr. & Talbot, T. R., Jr. 1958.** Radioisotopic studies of zinc metabolism in human subjects. *Transaction of the Association of American Physicians*. 71:322–336.
- Rotruck J. T, Luhrsen K. R. 1979.** A Comparative study in rats of iron bioavailability from cooked beef and soybean protein. *Journal of Agriculture Food Chemistry* 27: 27-33.
- Rougerie Julien 2009.** Mémoire Identification, description, et analyse des modes de préparation d'aliments constituant des sources potentielles en vitamine A dans l'alimentation des enfants de 6 à 35 mois au Burkina Faso.
- Roughead Z. K, Hunt J. R. 2000.** Adaptation in iron absorption: iron supplementation reduces nonheme-iron but not heme-iron absorption from food. *American Journal of Clinical Nutrition*; 72:982–9.
- Ruel, M.T., Levin, C.E. 2000.** Assessing the potential for food-based strategies to reduce vitamin A and iron deficiencies: A review of recent evidence. *Food Consumption and Nutrition Division* (Discussion paper N°92, consulté en Mai 2003) (http://www.ifpri.org/divs/fcnd/dp/papers/fcn_dp92.pdf).
- Ruel, M. T., Harimond, M. 2003.** Diversification alimentaire, couverture des besoins nutritionnels et croissance des enfants : Connaissances actuelles et recherches nécessaires. Proceedings of the 2nd international workshop, Food-based approaches for a healthy nutrition in West Africa: The role of food technologists and nutritionists. 23-28 November. Ouagadougou, Burkina Faso. In press.

- Saito, K., Ito, T., Kuribayashi, T., Mochida, T., Nakakuki, T., Shibata, M., Sugawara, M., 2001.** Effect of raw and heat-moisture treated high-amylose corn starch on fermentation by the rat coecal bacteria. *Starch* 53, 424–430
- Saha, P.R., Weaver, C.M., Mason, A.C. 1994.** Mineral bioavailability in rats from intrinsically labeled whole wheat flour of various phytate levels. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 42, 2531-2535.
- Sandberg A.S., Brune M., Carlsson N.G, Hallberg L., Skoglund E., Rossander-Hulthen L. 1999.** Inositol phosphates with different numbers of phosphate groups influence iron absorption in humans. *American Journal of Clinical Nutrition*; 70:240–6
- Sandberg A-S.1991** The effect of food processing on phytate hydrolysis and availability of iron and zinc. In *Nutritional and Toxicological Consequences of Food Processing*, pp. 499–508 [M Friedman, editor]. New York: Plenum Press.
- Sandström B. 1997.** Bioavailability of zinc. *European Journal of clinical Nutrition*; 51, S17-9.
- Sandström B. 1992.** Dose dependence of zinc and manganese absorption in man. *Proceedings of the Nutrition Society*; 51:211–8.
- Sandström B. & Sandberg A.S. 1992.** Inhibitory effects of isolated inositol phosphates on zinc absorption in humans. *Journal of Trace Elements and Electrolytes in Health and Disease*; 6: 99–103.
- Sandstrom B and Cederblad A, 1980.** Zinc absorption from composite meals, *American Journal of Clinical Nutrition*, 33:1778-1783.
- Sawadogo SP, Martin-Prével Y, Savy M, Kameli Y, Traoré SA. 2003.** Infant feeding practices in a rural area in Burkina Faso (Gnagna Province): description and nutritional consequences]. In: Brouwer ID, Traoré SA, Trèche S, editors. *Food-based approaches for a healthy nutrition in West Africa (Proceedings of the second international workshop)*. Ouagadougou, Burkina Faso: Presses Université de Ouagadougou; 2003. p. 317–27.
- Sazawal S, Black RE, Ramsan M, et al. 2006.** Effects of routine prophylactic supplementation with iron and folic acid on admission to hospital and mortality in preschool children in a high malaria transmission setting: community-based, randomised, placebo-controlled trial. *Lancet* 367: 133–43.
- Scalbert A., Deprez S., Mila I., Albrecht A., Huneau J. & Rabot S. 2000.** Proanthocyanidins and human health: Systemic effects and local effects in the gut. *BioFactor*, 13, 115–120.
- Scheuring J. F; Sidibe S.; Rooney LW; Earp C F 1983.** Sorghum bran thickness and its relation to decortication in a wooden mortar and pestle. *Cereal Chemistry*, 60, 86-89

- Schricker, B.R., Miller, D.D., Rasmussen, R.R., Van Campen, D. 1981.** A comparison of *in vivo* and *in vitro* methods for determining availability of iron from meals. *American Journal of Clinical Nutrition* 34, 2257-2263.
- Schakleton L., Mc Cance, R.A. 1936.** The ionizable iron in foods. *Biochemistry Journal* 30: 582
- Serna-Saldivar, S.D., McDonough, C.M. & Rooney, L.W. 1991.** The millets. In K.J. Lorenz & K. Kulp, éd. Handbook of cereal science and technology p. 271 300. New York, Marcel Dekker
- Serna-Saldivar S., & Rooney, L.W. 1995.** Structure and chemistry of sorghum and millets. In D. A. V. Dendy (Ed.), Sorghum and millets: chemistry and technology (1st ed., pp. 69–124). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, Inc
- Serna-Saldivar, J.F., Clegg, C., Rooney, L.W., 1994.** Effects of parboiling and decortication on the nutritional value of sorghum (*Sorghum bicolor* L Moench) and pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.). *Journal of Cereal Science* 19, 83-89.
- Severson, D.K., 1998.** Lactic acid fermentations. In: Nagodawithana T.W., Reed G. (Eds.), Nutritional Requirements of Commercially Important Microorganisms. Esteekey Associates, Milwaukee, USA, pp. 258– 297.
- Sharma, A., Khetarpaul, N. 1997.** Effect of fermentation with whey on the HCl extractability of minerals from rice-dehulled blackgram blends. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45, 2258-2261.
- Sharp P. 2005.** Methods and options for estimating iron and zinc bioavailability using caco2 cell models: benefits and limitations, *International Journal of Vitamin and Nutrition Research*, 75(6):413-421.
- Shull, J.M., Chandrashekar, A., Kirleis, A.W. and Ejeta, G. 1990.** Development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) endosperm in varieties of varying hardness. *Food Structure* 9; 253–267.
- Siegenberg D, Baynes RD, Bothwell TH, MacFarlane BJ, Lamparelli RD, Car NG, McPhail AP, Schmidt U, Tal A & Mayet F. 1991** Ascorbic acid prevents the dose-dependent inhibitory effects of polyphenols and phytates on non-heme iron absorption. *American Journal of Clinical Nutrition* 53, 537–541.
- Singleton and Rossi 1965.** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, Vol 16 : 144-158.
- Simpore J, Kaboré F, Zongo F, Dansou D, Bere A, Pignatelli S, Biondi D, Ruberto G & Musumeci S (2006)** Nutrition rehabilitation of undernourished children utilizing Spiruline and MISOLA. *Nutrition Journal* 5.

- Simwemba, C.G., Hosoney, R.C., Varriano-Marston, E., Zeleznak, K., 1984.** Certain B vitamin and phytic acid contents of pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 32, 31-34
- Solomons NW, Jacob RA, Pineda O, Viteri FE. 1979.** Studies on the bioavailability of zinc in man. II. Absorption of from organic and inorganic sources. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine* 1979; 94: 335-43.
- Solomons, N.W., Jacob, R.A. 1981.** Studies on the bioavailability of zinc in humans: Effect of heme and nonheme iron on the absorption of zinc. *American Journal of Clinical Nutrition* 34, 475-482.
- Solomons NW, Shrimpton R. 1983.** Zinc. In: Warren KS, Mahmoud, eds. *Tropical and geographic medicine*. New York: McGraw-Hill, 1059-63.
- Solomons NW, Cousins RJ. 1984.** Zinc. In : Solomons NW, Rosenberg IH, eds. *Absorption and malabsorption of mineral nutrients*. New York: Alan R. Liss, 1984: 125-97
- Songré-Ouattara L.T., Mouquet-Rivier C., Icard Vernière C., Humblot C., Diawara B., Guyot J.P. 2008.** Enzymes activities of lactic acid bacteria from a pearl millet fermented gruel (*bensaalga*) of functional interest in nutrition. *International Journal of Food Microbiology*, 128. 395-400.
- Sreedhar B, Subramaniyan R, Nair KM. 2004.** A protective role for zinc on intestinal peroxidative damage during oral iron repletion. *Biochemical and Biophysical Research Communication* 318:992–7.
- Stein, A.J., Meenakshi, J.V., Qaim, M., Nestel P., Sachdev, H.P.S., Bhutta, Z.A. 2008.** Potential impacts of iron biofortification in India. *Social Science & Medecine*, 66, 1797-1808.
- Sunitha, R.K., Chandrashekar, A. and Shetty, H.S. 1997.** Proteins in developing sorghum endosperm of sorghum that may be involved in resistance to grain molds. *Journal of Science and Food Agriculture* 60 257–282.
- Suryanarayana Rao, K., Rukmini, C. & Mohan, V.S. 1968.** 13-carotene content of some yellow-endospenn varieties of sorghum. *Indian Journal of Agriculture Science*, 38: 368-372.
- Svanberg U, Lorri W. 1997.** Fermentation and nutrient availability. *Food Control* 8: 319–327.
- Talamond, P., Gallon, G., Trèche, S., 1998.** Rapid and sensitive liquid chromatographic method using a conductivity detector for the determination of phytic acid in food. *Journal of Chromatography A* 805, 143-147.
- Tamang J.P., Sarkar P.K., Hesseltine C.W. 1988.** Traditional fermented foods and beverages of Darjeeling and Sikkim – a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 44, 375–385

- Taylor J.R.N. & Dewar J. 2001.** Developments in sorghum food technologies. *Advances in Food and Nutrition Research*, 43, 218–264
- Temple L, Gibson RS & Hotz C. 2002.** Use of soaking and enrichment for improving the content and bioavailability of calcium, iron and zinc in complementary foods and diets of rural Malawian weanlings. *Journal of Food Science* 67, 1926–1932.
- Teucher B, Olivares M, Cori H. 2004.** Enhancers of iron absorption: ascorbic acid and other organic acids. *International Journal of Vitamin and Nutrition Research*; 74:403–419.
- Tidehag P, Hallmans G., Wing K, Sjöström R, Agreen G, Lundin E, Zhang JX. 1996.** A comparison of iron absorption from single meals and daily use of radioFe (⁵⁵Fe, ⁵⁹Fe). *British Journal of Nutrition*; 75: 281-9.
- Tou E.H., Guyot J.P., Mouquet-Rivier C., Rochette I., Counil E., Traoré A.S., Trèche S. 2006.** Study through surveys and fermentation kinetics of the traditional processing of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) into ben-saalga, a fermented gruel from Burkina Faso. *International Journal of Food Microbiology*, 106: 52-60.
- Tou, E.H., Mouquet-Rivier, C, Rochette., I, Traoré, A.S., Trèche, S., Guyot, J.P. 2007a.** Effect of different process combinations on the fermentation kinetics, microflora and energy density of *ben-saalga*, a fermented gruel from Burkina Faso. *Food Chemistry* 100, 935-943.
- Towo E., Matuschek E., & Svanberg U. 2006.** Fermentation and enzyme treatment of tannin sorghum gruels: Effects on phenolic compounds, phytate and in vitro accessible iron. *Food Chemistry*, 94 (3), 369–376.
- Traoré Tahirou, Mouquet C., Icard-Vernière C., Traore A.S., Treche S. 2004.** Changes in nutrient composition, phytate and cyanide contents and α -amylase activity during cereal malting in small production units in Ouagadougou (Burkina Faso). *Food Chemistry* 88. 105-114.
- Trèche, S. 1995.** Techniques pour augmenter la densité énergétique des bouillies. In :Trèche S, de Benoist B, Benbouzid D, Verster A, Delpeuch F, eds : *l'alimentation de complément du jeune enfant*. Paris, 1995, Orstom, collection colloques et séminaires: 7-13.
- Trèche S., Mbome I. 1999.** Viscosity, energy density and osmolality of gruels for infants prepared from locally produced commercial flours in some developing countries. *International Journal of Food Science and Nutrition* 50, 117-125
- Trowell H., Southgate D.A.T., Wolever T.M.S. 1976.** Dietary fibre redefined. *Lancet* 1: 967.
- Tuntawiroon M, Sritongkul N, Rossander-Hulten L, 1990.** Rice and iron absorption in man. *European Journal of Clinical Nutrition* 1990; 44: 489–97.

- Turnlund, J. R., King, J. C., Keyes, W. R., Gong, B. & Michel, M. C. 1982** A stable isotope study of zinc absorption in young men: effects of phytate and α -cellulose. *American Journal of Clinical Nutrition*, 40: 1071–1077
- Underwood, B.A., Hofvander, Y. 1982.** Appropriate timing for complementary feeding of the breast-fed infant. A review. *Acta Paediatrica Scandinavica, suppl*, 294, 32p.
- UNICEF, 1997.** La situation des enfants dans le monde 1997
- UNICEF, 2011.** La situation des enfants dans le monde, 2011.
- Van den Heuvel EGH, Muys Th, van Dokkum W & Schaafsma G. 1999** Oligofructose stimulates calcium absorption in adolescents. *American Journal of Clinical Nutrition* (In the Press).
- Van Soest PS. 1963.** Use of detergents in the analysis of fibrous feeds II*a rapid method for the determination of fiber and lignin. *J AOAC* 46:829835.
- Viteri Fe, Kohaut BA. 1997.** Improvement of the Eakins and Brown method for measuring ^{59}Fe and ^{55}Fe in blood and other iron-containing materials by liquid scintillation counting and sample preparation using microwave digestion and ion-exchange column purification of iron. *Analytical Biochemistry*; 244: 116–23.
- Vijayaraghavan K. 2002.** Control of micronutrient deficiencies in India: obstacles and strategies. *Nutrition Review*, 60:S73-S76
- Wang, H.Y., Zhang, X.J., Zhao, L.P., Xu, Y., 2008b.** Analysis and comparison of the bacterial community in fermented grains during the fermentation for two different styles of Chinese liquor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*; 35, 603–609
- Wambach, K., Campbell, S.H., Gill, S.L. 2005.** Clinical lactation practice: 20 years of evidence. *Journal Human Lactation*, 21:245–58.
- Watzke HJ. 1998.** Impact of processing on bioavailability: Examples of minerals in foods. *Trend in Food Science & Technology*.; 9: 320-7.
- Weaver C.M. & Kannan S. 2002.** Phytate and mineral bioavailability. Dans: Food phytates (édité par N.R. Reddy, S.K. Sathe). pp. 211-224. Boca Raton : CRC Press.
- Weber Evelyn J. 1978.** The lipids of corn germ and endosperm. *Journal of the American oil chemists'society*, 56, 637-641.
- Wedekind KJ, Hortin AE, Baker DH. 1992.** Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide. *Journal of Animal Science*;70: 178–87.

- White, P.J. & Broadley, M.R. 2009.** Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Physiology*, 182, 49-84.
- World Health Organization. 1998.** Complementary feeding of young children in developing countries: a review of current scientific knowledge. UNICEF/ University of California-Davis/ WHO/ ORSTOM. Geneva: WHO/NUT/98.1.
- World Health Organization/UNICEF/UNU. 2001.** Iron Deficiency Anemia Assessment, Prevention, and Control. Geneva: World Health Organization.
- World Health Organization/UNICEF. 2002.** Global strategy for infant and young child feeding. Geneva: World Health Organization.
- Wills R B H; Ali MR. 1983.** Effect of grain size on dehulling of sorghum. *Cereal Chemistry*, 60, 12-14.
- Williams AW, Ewrdman JW Jr. 1999.** Food processing: Nutrition, safety and quality balances. In: Shils ME, Olson JA, Shike M, Ross AC, eds. *Modern nutrition in health and disease*, 8th eds. Baltimore, Md, USA: Williams & Wilkins, 1999: 1813-21.
- Wise, A. 1983.** Dietary factors determining the biological activities of phytate. *Nutrition Abstracts Review*, 46, 791-806.
- Woodhead, S., Padgham D. E. and Bernays E. A. 1980.** Insect feeding on different sorghum cultivars in relation to cyanid and phenolic acid content. *Annals of Applied Biology*; 95:151.
- Wolters, M. G. E., Schreuder, H. A., Van den Heuvel, G., Van Lonkhuijsen, H. J., Hermus, R. J., & Voragen, A. G. 1993.** A continuous in vitro method for estimation of the bioavailability of minerals and trace elements in foods: application to breads varying in phytic acid content. *British Journal of Nutrition*, 69, 849–861.
- Wolfgor R., Drago S.R, Rodriguez V., Pellegrino N.R., Valencia M.E. 2002.** In vitro measurement of available iron in fortified foods. *Food Research International* 35, 85–90
- World Health Organization. 1996.** Trace Elements in Human Nutrition and Health. Geneva: WHO, 1996.
- World Health Organization. 2006.** Guidelines on food fortification with micronutrients. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Yadav SK, Sehgal S. 2002.** Effect of domestic processing and cooking methods on total, HCl extractable iron and in vitro availability of iron in spinach and amaranth leaves. *Nutrition Health* ; 16:113–20.

- Yetneberk S., Rooney, L.W., Taylor, J.R.N. 2005.** Improving the quality of sorghum injera by decortication and compositing with tef. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 1252-1258
- Yip R, Binkin NJ, Flashood L, Trowbridge FL. 1987.** Declining prevalence of anemia among low income children in the United States. *JAMA* 1987; 258: 1619–23.
- Yun S, Habicht JP, Miller DD and Glahn RP. 2004.** An *in vitro* digestion/Caco-2 cell culture system accurately predicts the effects of ascorbic acid and polyphenolic compounds on iron bioavailability in humans, *Journal of Nutrition*, 134:2717-2721.
- Zago MP, Verstraenten V, Oteiza PI. 2000.** Zinc in prevention of Fe²⁺-initiated lipid and protein oxidation. *Biological Research*; 33 :143–50.
- Zago MP, Oteiza PI. 2001.** The antioxidant properties of zinc: interactions with iron and antioxidants. *Free Radical Biology & Medicine*; 31:266–74
- Zagré NM; Delpeuch F; Traissac P; Delisle H. 2003.** Red palm oil as a source of vitamin A for mothers and children: impact of a pilot project in Burkina Faso. [L'huile de palme rouge utilisée comme source de vitamine A pour les mères et les enfants : l'impact d'un projet pilote au Burkina Faso] *Public Health Nutrition*. 6 (8):733-742.
- Zhang, W.X., Qiao, Z.W., Tang, Y.Q., Hu, C., Sun, Q., Morimura, S., Kida, K., 2007.** Analysis of the fungal community in zaopei during the production of Chinese luzhou-flavour liquor. *Journal of the Institute of Brewing*; 113, 21–27
- Zlotkin S.H, Cherian M.G. 1988.** Hepatic metallothionein as a source of zinc and cysteine during the first year of life. *Pediatric Research*; 24:326–9
- Zlotkin S., Arthur P., Antwi K.Y. & Yeung G. 2001.** Treatment of anemia with microencapsulated ferrous fumarate plus ascorbic acid supplied as Sprinkles to complementary (weaning) foods. *American Journal of Clinical Nutrition* 74, 791–795
- Zlotkin S., Antwi K.Y., Schauer C. & Yeung G. 2003a.** Use of microencapsulated iron (II) fumarate Sprinkles to prevent recurrence of anaemia in infants and young children at high risk. *Bulletin of the of the World Health Organization* 81, 108–115.
- Zlotkin S., Schauer C., Christofides A., Sharieff W., Tondeur M.C. & Hyder Z.S.M. 2005** Micronutrient sprinkles to control childhood anaemia. *PLoS Medicine* 2, e1. doi:10.1371/journal.pmed.0020001.
- Zimmermann M.B, Zeder C., Muthayya S., Winichagoon, N Chaouki, I Aeberli and R F Hurrell. 2008.** Adiposity in women and children from transition countries predicts decreased iron absorption, iron deficiency and a reduced response to iron fortification. *International Journal of Obesity (Lond)*; 32:1098–104

Zimmermann MB, Hurrell RF. 2002. Improving iron, zinc and vitamin A nutrition through plant biotechnology. *Current Opinion Biotechnology*; 13: 142–45

Zimmermann MB., Hurrell R. 2007. Nutritional iron deficiency. *Lancet*. 370: 511:20.

ANNEXES

Annexes 1

(Annexes du chapitre 1. Revue Bibliographique)

- Galettes de mil : Massa (Annexe 1-3)
- Bouillie de mil fermentée : *ben-saalga* (Annexe 1-2)
- Bouillie de mil fermentée avec granules : *ben-kida*
- Pâte de sorgho : Tô de sorgho (Annexe 1-1)
- Pâte de maïs blanc : Tô de maïs
- Boisson au mil cru : Zom-Kom

Galettes de mil (1) - Massa

Zone urbaine



Cuisson des galettes de mil

Description et utilisation

Pâte à base de mil frite dans de l'huile sous forme de petites crêpes. Les galettes sont généralement fabriquées dans le cadre de la restauration hors domicile et consommées soit seules, soit après addition dans de la bouillie de mil de type *ben-saai* ou *ben-kida*.

- **Date et lieu d'observation** : 2008 à Ouagadougou.
- **Nombre d'observations** : 10 observations dans des unités de production artisanales.
- **Teneur en matière sèche** de l'aliment tel que consommé : 59,2 %.
- **pH** : non déterminé.

Ingrédients

Pour 1000g de mil

Ingrédients	Poids brut (g)	%MS**
Farine de mil	1000	51
Farine de mil pour tô ou bouillie	161	4
Riz	112	3
Tô de maïs	44	0,8
Sucre	439 [177-844]*	22
Huile	390	20
Eau	908 [371-1337]	-

*[min - max]

**matière sèche

Description de la recette

Les galettes sont préparées à partir de farine de mil à laquelle on ajoute lors de la préparation de la pâte, un ingrédient céréalier cuit qui est soit du tô, soit du tô délayé, soit de la bouillie de mil, soit de la bouillie de riz. Ces « préparations intermédiaires » sont préparées spécifiquement pour la pâte à galette ou bien les préparatrices utilisent une partie d'un autre plat qu'elles fabriquent ce jour là.

- Obtention de la farine : les grains de mil sont généralement décortiqués, lavés, parfois trempés (3 observations sur 10) entreposés dans de l'eau (en moyenne pendant 4h15min) avant égouttage et mouture. La farine est tamisée dans la plupart des cas.

- Préparation de l'ingrédient céréalier cuit (selon les recettes) :

- Pour la bouillie de riz : faire cuire le riz dans un grand volume d'eau jusqu'à l'obtention d'une bouillie (durée de cuisson variant de 30 min à près de 2 h).
- Pour le tô délayé : délayer le tô déjà prêt dans environ 2 fois son volume d'eau puis homogénéiser.
- Pour le tô préparé spécifiquement : faire cuire environ 100 g de la farine de mil avec de l'eau. Transvaser éventuellement en fin de cuisson pour faciliter le refroidissement.
- Mélanger la farine (1000 g ou 900 g dans le cas où une partie a été réservée pour la préparation du tô) avec l'ingrédient céréalier cuit et environ 900 ml d'eau, et bien malaxer. La pâte obtenue est ensuite entreposée pendant environ 9 h pendant lesquelles se produit une fermentation (le pH moyen de la pâte en fin d'entreposage est de $4,6 \pm 0,6$). Puis le sucre est ajouté ainsi qu'environ 170 ml d'eau pour diluer et homogénéiser le tout. Enfin de petites louches de pâte sont cuites dans de l'huile de friture.
- La durée moyenne de fabrication de la pâte est de 17 h.

Fréquence d'observation des étapes unitaires

Etapes de préparation	Nombre d'observations (/10)
Décorticage des grains	2
Vannage des grains	3
Trempage des grains	3
Lavage des grains	8
Égouttage des grains	6
Entreposage	6
Mouture	10
Tamissage de la farine	8
Cuisson des préparations intermédiaires	10
Mélange	10
Entreposage / fermentation	10
Mélange avec sucre	10
Friture	10



Modes de consommation des galettes de mil

Bouillie de mil fermenté - Ben-saalga

Description et utilisations



Ben-saalga servi dans un bol accompagné de sucre

Le *ben-saalga* est une bouillie semi-liquide à base de mil fréquemment consommée par la population pour le petit-déjeuner et utilisée comme aliment de complément pour les enfants. Généralement fabriqué dans le cadre de la restauration hors domicile.

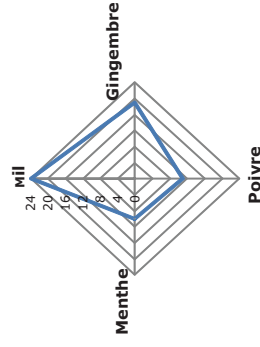
- **Date et lieu d'observation** : 2003 à Ouagadougou.
- **Nombre d'observations** : 24, dans des unités de transformation traditionnelles.
- **Teneur en matière sèche** moyenne de l'aliment : 7,1 % avant ajout de sucre et environ 10,7% après.
- **pH** : 3,9.

Ingrédients

Pour 1000g de mil

Ingrédients	Poids brut (g)	%MS
Grains de mil	1000 g	98,8
Gingembre	40	0,9
Poivre	2,9	0,3
Menthe	3,7	0,1
Lavage	2191	
Trempage	1471	
Pétrissage	5618	
Filtration	5176	
Décantation	5074	
Cuisson	2250	
Total	21779	

Nombre d'observations



Description de la recette

Cette bouillie est préparée à partir de grains de mil généralement lavés puis systématiquement mis à tremper dans de l'eau pendant 16 h en moyenne. Les grains sont ensuite égouttés avant d'être moulus. Des aromates et épices tels que le gingembre, le poivre et la menthe sont souvent ajoutés aux grains avant la mouture. La farine humide ainsi obtenue est ensuite mélangée avec de l'eau. La pâte est alors pétrie et filtrée à travers une toile ce qui permet d'éliminer une partie des enveloppes du grain (drèches).

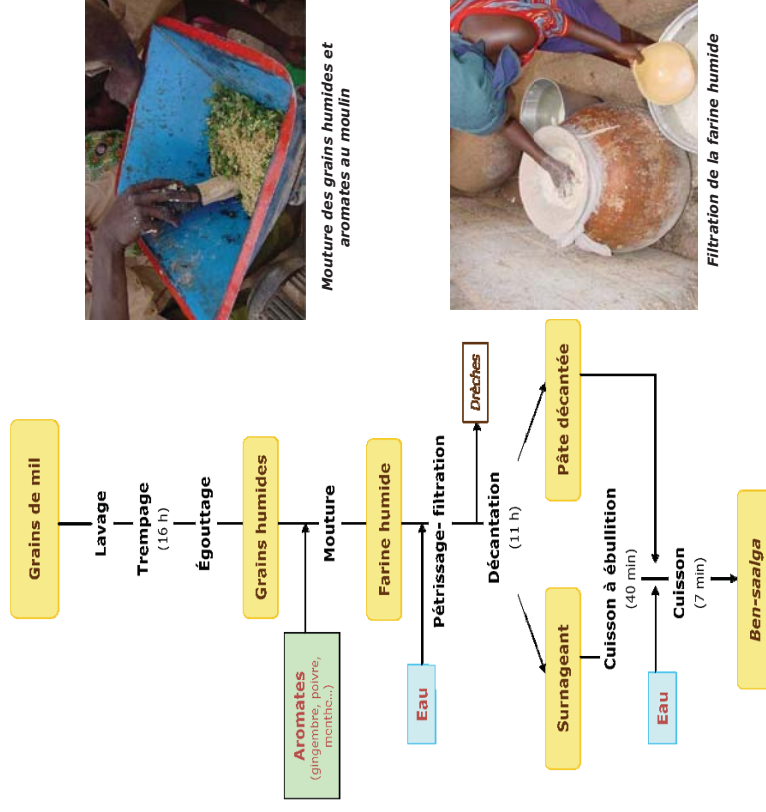
On laisse ensuite reposer la pâte pendant en moyenne 11 h (de 2 h à 20 h selon les observations) ce qui permet d'obtenir deux phases : une phase constituée de pâte épaisse déposée au fond du récipient et un « surnageant » correspondant à la phase la plus liquide. Ce surnageant est séparé de la phase inférieure et porté à ébullition. La phase inférieure

plus épaisse est alors ajoutée au surnageant bouillant ainsi que de l'eau. Le tout est mélangé et cuit pendant quelques minutes (7 min en moyenne).

Fréquences d'observation des étapes unitaires

Etapes de préparation	Nombre d'observations (/24)
Lavage	17
Trempage	24
Pétrissage	24
Décantation	24
Filtration	24
Fermentation	24
Cuisson	24

Diagramme de préparation



Mouture des grains humides et aromates au moulin



Filtration de la farine humide

Références

Tou EH, Guyot JP, Mouquet-Rivier C, Rochette I, Counil E, Traoré AS, Trèche S (2006) Study through surveys and fermentation kinetics of the traditional processing of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) into *ben-saalga*, a fermented gruel from Burkina Faso. *International Journal of Food Microbiology*, Vol 106: 52-60.

Mouquet-Rivier C, Icard-Vernière C, Guyot JP, Tou EH, Rochette I, Trèche S (2008). Consumption pattern, biochemical composition and nutritional value of fermented pearl millet gruels in Burkina Faso, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 59(7):716-729.



Préparation du *ben-saalga* :
Cuisson de la pâte fermentée



Marmite contenant le *ben-saalga* prêt à consommer

Bouillie de mil fermenté avec granules - Ben-kida



Ben-kida

Description et utilisation

Le *ben-kida* est une variante du *ben-saalga* contenant des granules de pâte fermentée. Fréquemment consommée par la population pour le petit-déjeuner, le *ben-kida* est plus rarement utilisé comme aliment de complément.

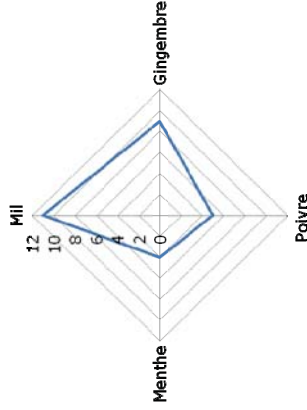
- **Date et lieu d'observation** : 2003 à Ouagadougou.
- **Nombre d'observations** : 11 observations dans des unités de transformation traditionnelles.
- **Teneur en matière sèche** : 6,5 % avant ajout de sucre et environ 10,7% après.
- **pH** : 4,0.

Ingrédients

Pour 1000 g de mil

Ingrédients	Poids brut (g)	%MS
Farine de mil	1000	98,8
Granules de mil	323	
Gingembre	40	0,9
Poivre	2,9	0,3
Menthe	3,7	0,1
Eau	Non déterminé	-

Nombre d'observations



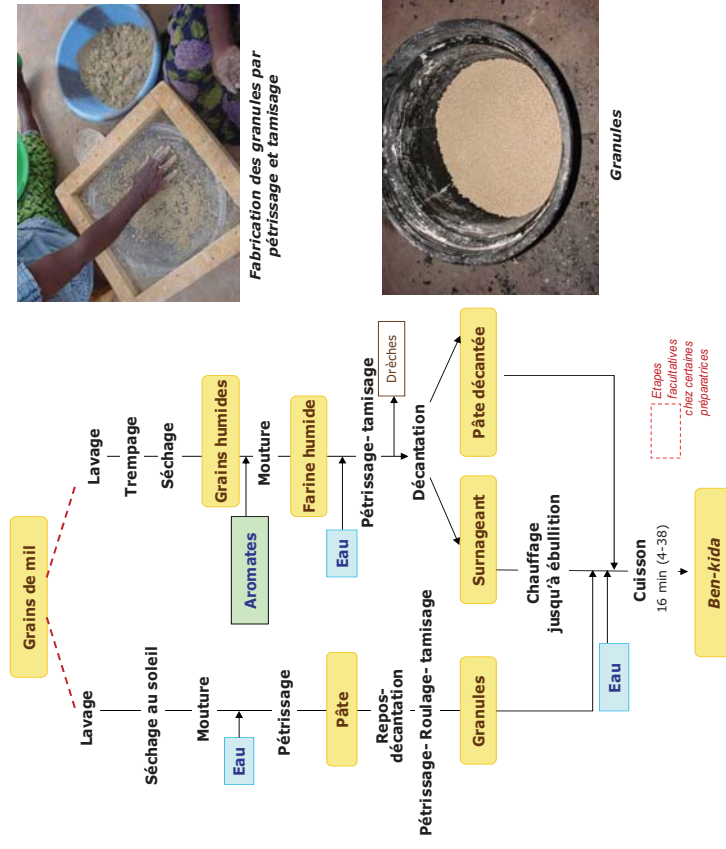
Description de la recette

- Préparation des granules : Les graines de mil sont généralement lavées avec de l'eau puis séchées au soleil. Les grains secs sont ensuite broyés à l'aide d'un moulin. La farine obtenue est mélangée avec de l'eau et l'ensemble est pétri jusqu'à obtenir des granules de farine humide. Il faut ensuite laisser reposer le mélange quelques heures. L'étape suivante consiste à mettre en forme les granules par des opérations successives : la pâte est d'abord malaxée et des morceaux sont roulés à la main pour former des granules qui sont ensuite tamisés.

- Préparation finale du *ben-kida* :

Les granules obtenus sont mélangés au surnageant issu de la préparation du *ben-saalga* (voir recette précédente) qui doit être porté à ébullition au préalable. De l'eau et la pâte décaillée sont ajoutées au mélange et le tout est cuit pendant en moyenne 16 min.

Diagramme de préparation



Références

- Cerefer (2003). Meeting consumer requirements for cereal based fermented foodstuffs with improved nutritional and sanitary quality and shelf-life in Africa. First annual report of the 381 Cerefer project, European Union, contract number ICA4-CT2002-10047.
- Mouquet-Rivier C, Icard-Vermière C, Guyot JP, Tou EH, Rochette I, Trèche S (2008). Consumption pattern, biochemical composition and nutritional value of fermented pearl millet gruels in Burkina Faso, International Journal of Food Sciences and Nutrition, 59(7):716-729.

Pâte de maïs blanc - Tô de maïs

Description et utilisations

Pâte très consistante le plus souvent acidifiée préparée à partir de farine de maïs cuite dans de l'eau, façonnée en boules, consommée quotidiennement par toute la population accompagnée d'une sauce. Le tô de maïs blanc (ou beaucoup plus rarement jaune) est plus fréquemment consommé en ville, tandis qu'en milieu rural le tô est préparé avec d'autres céréales : mil, sorgho blanc et plus rarement sorgho rouge.

- **Date et lieu d'observation** : 2008 à Ouagadougou.
- **Nombre d'observations** : 10 observations dans des ménages.
- **Teneur en matière sèche** du produit tel que consommé : 16,2 %.
- **pH** : 4,6.



Tô de maïs blanc accompagné de sauce feuille

Ingrédients

Pour 1000 g de maïs décortiqué

Ingrédients	Poids brut (g)
Farine de maïs	1000
Eau	3981

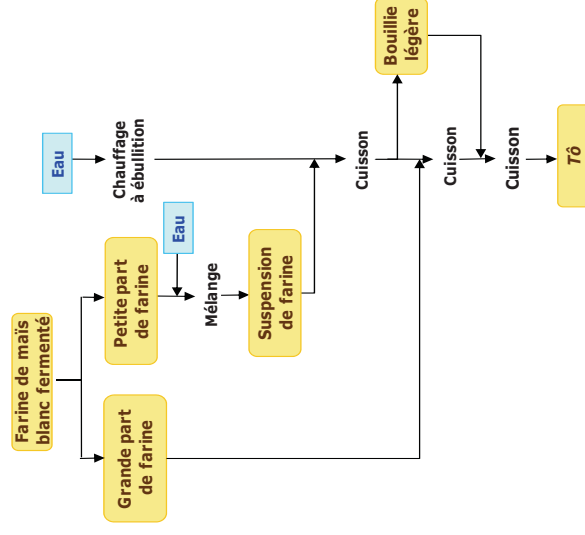
Description de la recette

- Les observations décrites ici ont été réalisées à partir de la farine dans 7 cas sur 10. Certains ingrédients qui confèrent au tô une saveur acide sont parfois ajoutés tels que des feuilles de tamarin trempées dans l'eau, du jus de citron ou du vinaigre.
- Avant la mouture, les grains de maïs sont souvent décortiqués et subissent généralement un trempage durant lequel débute une fermentation. Ils sont ensuite broyés pour obtenir de la farine préparée quelques jours à l'avance dans les ménages.
 - Sur la quantité totale de farine nécessaire, environ 2/3 sont réservés (« grande part de farine »). Pendant ce temps, le tiers restant ou « petite part » est délayée à froid avec environ 1/5 de l'eau, et le tout doit être bien mélangé pour obtenir « l'eau farineuse ».
 - Une grande partie de l'eau (environ les 4/5) est mise à chauffer dans une marmite jusqu'à l'ébullition. « L'eau farineuse » est alors versée dans la marmite et cuite pendant environ 15 min en mélangeant bien.
 - Une partie de la « bouillie légère » obtenue est ensuite réservée (environ 1/3) dans un récipient.
 - La « grande part de farine » est ajoutée immédiatement dans la marmite et cuite pendant environ 4 min tout en mélangeant énergiquement.
 - L'étape suivante consiste à réintroduire progressivement la « bouillie légère » réservée, tout en continuant à mélanger énergiquement et en poursuivant la cuisson pendant encore 7 minutes.
 - Des boules sont ensuite façonnées avec une louche.

Fréquences d'observation des étapes unitaires

Étapes unitaires	Nombre d'observations (/ 10)
Décortiquage des grains	3/10 avec 7 inconnus
Trempage	2/10 avec 7 inconnus
Broyage en farine	10
Cuisson	10

Diagramme de préparation



Bouillie légère



Mélange après l'addition de la « grande part » de farine

Références

Seogo J (2008) Caractérisation des procédés de fabrication de plats traditionnels à base de maïs et sorgho et de leurs sauces. Mémoire de Licence professionnelle Industrie agro-alimentaire - nutrition – santé, Lycée agro-environnemental Saint-Joseph du Breuil-sur-Couze / Université d'Auvergne.

Pâte de sorgho- Tô de sorgho

Description et utilisation



Tô de sorgho rouge

Le tô est une pâte consistante préparée à partir d'une variété de céréales et normalement mangée avec une sauce à base de feuilles ou de légumes frais ou séchés, de viande ou de poisson et d'ingrédients divers. C'est un plat populaire au Burkina Faso. Il est proposé aux jeunes enfants dès qu'ils commencent à manger le plat familial.

- **Date et lieu d'observation** : 2009 à Dori.
- **Nombre d'observations** : 5 dans les ménages.
- **Teneur en matière sèche moyenne** de l'aliment tel que consommé: 22,9 %.

Ingrédients

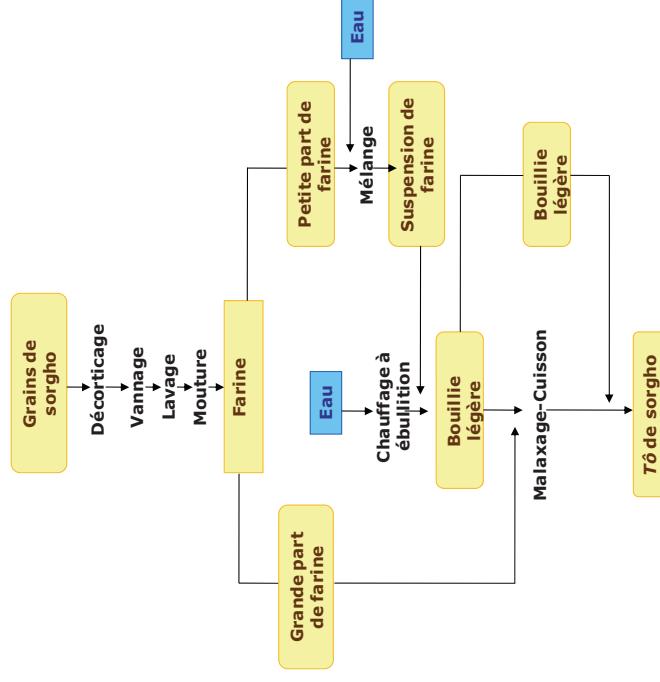
Pour 1000 g de sorgho

Ingrédients	Poids brut (g)
Farine de sorgho	1000
Eau	2251

Description de la recette

Le tô de sorgho est préparé à partir de farine de sorgho, d'eau et parfois d'autres ingrédients de nature acidifiante. La farine est obtenue par mouture ou pilage des grains de sorgho préalablement décortiqués, vannés, lavés et séchés. Pour la préparation du tô de sorgho, de l'eau est mise à chauffer dans une marmite généralement en métal jusqu'à ébullition. Une petite part de la farine (environ 1/3 de la quantité totale) est mise en suspension dans un volume d'eau froide soit 1/4 pour donner un « lait de farine » ou suspension de farine. Ce lait de farine est additionné à l'eau bouillante tout en remuant jusqu'à l'obtention d'une bouillie légère de consistance homogène. Après une cuisson d'environ 5 à 10 min, une partie de la bouillie est prélevée de la marmite et mise dans un récipient. Le reste de la farine, soit les 2/3, est ensuite ajouté par dispersion à la bouillie contenue dans la marmite. L'ensemble est malaxé vigoureusement pendant 15 min environ jusqu'à ce que la pâte s'épaississe. La bouillie contenue dans le récipient est ajoutée par petite quantité (environ 2 à 3 fois) tout en poursuivant le malaxage et la cuisson pendant environ 15 à 20 min. Lorsque la pâte devient homogène et très épaisse, le tô est servi dans un plat à l'aide d'une louche en bois.

Diagramme de préparation



Cuisson du tô de sorgho

Boisson au mil cru - Zom-kom



Ingrédients et ustensiles pour la préparation du zom-kom

Description et utilisation

Boisson sucrée à base de mil cru, fréquemment aromatisée, très consommée par toute la population (selon les saisons) et à l'occasion de fêtes. Souvent préparée dans le cadre de la restauration hors domicile.

- **Date et lieu d'observation** : 2008, à Ouagadougou.
- **Nombre d'observations** : 9 observations dans de petites unités de production et 1 dans un ménage.
- **Teneur en matière sèche** du produit tel que consommé : 14,4 %.
- **pH** : 3,5.

Ingrédients

Pour 1000 g de mil

Ingrédients	Poids brut (g)	%MS
Mil	1000	24
Sucre	2633	73
Gingembre	165	0,8
Menthe	70	0,3
Tamarin	228	0,6
	233	0,8
Poudre d'ananas	8	<0,1
Canafra ¹	6	<0,1
Eau	nd	-

¹épice non identifiée

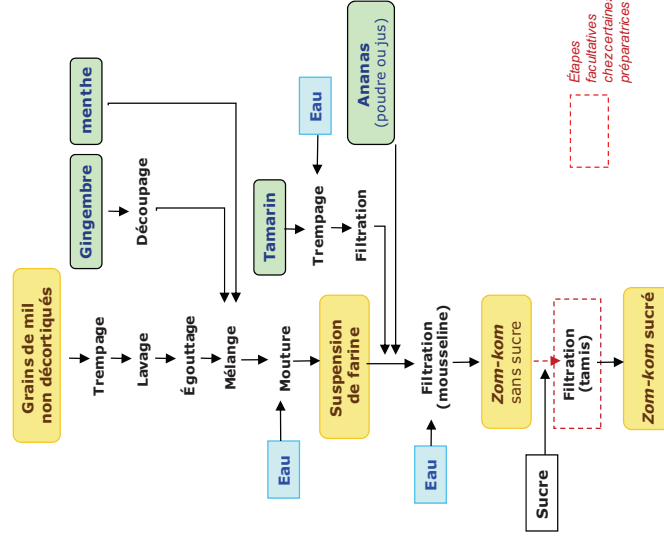
Description de la recette

- Le tamarin est mis à tremper pendant environ 1 h 15 pour les fruits ou 45 min pour les feuilles. L'eau est ensuite filtrée et réservée. Les grains de mil entiers sont lavés et mis à tremper pendant environ 14 h puis égouttés. Les aromates (gingembre, menthe, etc.) sont lavés, éventuellement épluchés puis mélangés aux grains de mil.
- Ce mélange est ensuite broyé en ajoutant de l'eau ainsi que l'eau de tamarin filtrée. Les drèches sont ensuite éliminées par filtration sur mousseline du mélange liquide. On peut alors ajouter le sucre et les éventuels autres ingrédients aromatiques et éventuellement filtrer le tout une seconde fois.
- Le produit obtenu peut être dilué avec de l'eau froide pour obtenir la consistance souhaitée.

Fréquences d'observation des étapes unitaires

Étapes de préparation	Nombre d'observations (/10)
Lavage des grains	10
Trempage des grains	10
Égouttage des grains	10
Mouture grains+ingrédients	10
Filtration 1	10
Décantation	1
Filtration 2	7
Filtration 3	1
Dilution de la pâte	10

Diagramme de préparation



Références

Sedogo S (2008) Caractérisation des procédés de fabrication de plats traditionnels à base de maïs et sorgho et de leurs sauces. Mémoire de Licence professionnelle Industrie agro-alimentaire - nutrition - santé, Lycée agro-environnemental Saint-Joseph du Breuil-sur-Couze / Université d'Auvergne.

ANNEXE 2

(Annexes du Chapitre 2. Matériel et Méthodes)

Fiche d'éligibilité de l'enfant

NOM et prénom de l'enfant:

N° d'identifiant : |_|_2_|_|_2_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Nom de l'enquêtrice : _____

Date de l'enquête :

Heure de début d'enquête :

L'enfant répond-il aux différents critères de sélection :

Critère n°1 :

La personne qui nourrit/s'occupe de l'enfant accepte t-elle d'être interrogée ?

1.oui

2.non |_|_|

Critère n°2 :

Date de naissance de l'enfant : __/__/____

Si la date de naissance n'est pas disponible, se référer au calendrier d'événements locaux.

Est-il compris dans la tranche d'âge 6- 35 mois durant l'enquête (2/02/06-01/08/08) ?

6-11 mois : 02/02/2008-01/08/2008 1.oui 2.non |_|_|

12-23 mois : 02/02/2007-01/02/2008 1.oui 2.non |_|_|

24-35 mois : 02/02/2006-01/02/2007 1.oui 2.non |_|_|

Si non, l'enfant n'est pas éligible.

Année	Événements								
	Élection présidentielle	Ramadan	Tabaski	Zomben dé	Mouloud (Ganné)	Pâques	Noël	Assomption	Nouvel an
2005	13 nov.		20 janv.	19 fév.	20 avril	27 mars	25 déc.	15 août	1 ^{er} janv.
2006		23 oct.	10 janv.		10 avril	16 avril	25 déc.	15 août	1 ^{er} janv.
2007		12 oct.	19 déc.		30 mars	8 avril	25 déc.	15 août	1 ^{er} janv.

Critère n°3 :

L'enfant consomme t-il d'autres aliments que le lait maternel ? 1.oui 2.non |__|

Si l'enfant est allaité et ne consomme pas d'autres aliments que l'eau, il ne répond pas aux critères de sélection.

Critère n°4 :

L'enfant va t-il à l'école (ou pouponnière) durant la journée ? 1.oui 2.non |__|

Si oui, à quel moment pourrait-il être enquêté (vacances scolaires, 2 ou 3 jours consécutifs) ?

N° de tel : _____

L'enfant répond-il aux critères de sélection ? 1.oui 2.non |__|

Remarques servant à identifier le ménage (à côté de, en face de, ...) :

Annexe 2.3

Questionnaire de mesures d'ingérés par pesées

Identifiant |__||__||__||__||__|

Nom de l'enquêtrice _____

Date de l'enquête :

Heure de début d'enquête :

Jour d'aujourd'hui :

1=lundi 2=mardi 3=mercredi 4=jeudi 5=vendredi 6=samedi 7=dimanche |__|

Tableau 1

L'enfant a t-il mangé quelque chose depuis son coucher hier soir? oui non

Si oui, qu'a t-il mangé (décrire précisément): _____

quantité :

L'enfant est-il toujours allaité ?

1.oui |__|

2. non |__|

Si l'enquêtrice doit partir avant que l'enfant ne soit couché :

L'enfant mangera t-il après le départ de l'enquêtrice et avant de se coucher?

Si oui, quoi ?

Tétées	N°	Durée
	1.	
	2.	
	3.	
	4.	
	5.	
	6.	
	7.	
	8.	
	9.	
	10.	
11.		

N° ligne	N° de prise alim	Lieu de prépa 1.maison 2.RHD 3.autre	Préparation					
			Plat consommé (séparer le tô/riz et la sauce ; par ex. : tô, sauce, riz gras, zom-kom, galettes, ...)	Code du plat	Ingrédients constitutifs et description* (ex. : farine de maïs jaune décortiqué, tomate fraîche, ...)	Code de l'ingrédient	Quantité de chaque ingrédient décortiqué /épluché** (g)	Type 1.bouilli 2.frit 3.vapeur 4.poêle 5.four
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								

sauter une ligne entre chaque repas

*pour les céréales, précisez : décortilage, trempage, mouture (au moulin), pilage ex. : farine de mil décortiqué

**si le plat consommé a été préparé la veille remplir le tableau 3, sinon passer au 4

	Description des aliments préparés la veille					
	Volume		Pesée		Prix	
1	Poids d'eau (g)	Tare eau (g)	Poids aliment (g)	Tare aliment (g)	Prix (CFA)	Lieu d'achat 1.marché 2.magasin 4.autre
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

ligne	N°	Quantité de plat préparé (g) (si possible)	Heure début de repas	Heure de fin de repas	Quantité ingérée							
					Poids bol plein+cuillère (g)	Poids bol+cuillère+p lat restant (g)	Poids serviette propre	Poids serviette sale (g)	L'enfant a t il vomi ?		La préparatrice a t-elle goûté au plat ?	
1									1.oui 2.non	Si 1, quantité (g)	1.oui 2.non	Si 1, quantité (g)
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												

C. Autres aliments

a. L'enfant a-t-il consommé d'autres aliments que la bouillie hier? 1=oui 2=non

b. Si oui, à quel âge (en mois) a-t-il commencé à consommer des aliments solides ?

|__| |__|

c. Quels plats l'enfant aime-t-il particulièrement consommer ?

1. _____

2. _____

d. Y a-t-il un (des) plat(s) que l'enfant aime mais que vous ne pouvez pas lui donner ?

1=oui 2=non

|__|

e. Si oui, le(s)quel(s) ?

1. _____

2. _____

f. Pour quelle raison vous est-il impossible de lui donner ce(s) plat(s)?

1=le coût 2=la disponibilité d'un ingrédient 3=autre, préciser _____

|__|

g. Si 2, précisez quel(s) ingrédient(s)

h. Y a-t-il des plats consommés par le ménage mais que l'enfant ne mange pas ?

1=oui 2=non

|__|

i. Si oui, le(s)quel(s) ?

1. _____

Pourquoi? 1=il n'aime pas ça 2=ça n'est pas bon pour lui 3=autre, préciser _____

|__|

2. _____

Pourquoi? 1=il n'aime pas ça 2=ça n'est pas bon pour lui 3=autre, préciser _____

|__|

j. Y a-t-il des aliments que l'enfant ne consomme pas en raison d'un interdit religieux ?

1=oui 2=non

|__|

k. Si oui, le(s)quel(s) ?

1. _____

2. _____

l. Y a-t-il des aliments que l'enfant ne consomme pas en raison d'un interdit culturel ?

1=oui 2=non

|__|

m. Si oui, le(s)quel(s) ?

1. _____

2. _____

n. Parmi les plats/ingrédients suivants, quels sont ceux que votre enfant ne consomme jamais?

Indiquez dans la première case : 1= jamais consommé 2= consommé

si (1), indiquez dans la seconde case la principale raison : 1= trop cher 2= interdit culturel

3=interdit religieux 4= l'enfant n'aime pas 5= mauvais pour la santé de l'enfant 6= autre, précisez

babenda

feuille de morelle noire

Spiruline

feuille de moringa

huile de palme rouge

Foie

o. Y a-t-il des plats ou ingrédients que vous donnez à votre enfant parce que vous pensez qu'ils sont bons pour sa santé ?

1. _____

2. _____

D. Attitude face à d'éventuels changements dans les habitudes alimentaires

a. Seriez-vous disposé à modifier le mode de préparation de la bouillie de votre enfant avec une technologie traditionnelle améliorée ?

1= oui 2= non

b. Seriez-vous prêt à acheter pour votre enfant des aliments de complément issus d'une technologie traditionnelle améliorée à partir des céréales locales disponibles ?

1= oui 2= non

c. Seriez-vous disposé à donner une bouillie fortifiée à vos enfants?

1= oui 2= non

d. Seriez-vous disposé à donner une bouillie biofortifiée à vos enfants?

1= oui 2= non

Annexe 2-5

Questionnaire de fréquence de consommation d'aliments riches en vitamine

A

Identifiant : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Nom de l'enquêtrice : _____

Date :

Heure de début d'enquête :

1. Votre enfant a-t-il reçu une capsule de vitamine A au cours de l'année dernière? |_|_|

1=oui 2=non

a. Si oui, combien de fois? |_|_|

Combien de fois votre enfant a-t-il mangé l'un de ces aliments au cours de la semaine dernière ?

	Produits animaux	Jamais	1 fois dans la semaine	2-4 fois dans la semaine	5-6 fois dans la semaine	1 fois par jour	2-3 fois par jour	+ de 4 fois par jour	Sous quelle forme ?	
		A	B	C	D	E	F	G	1 = crue 2 = cuite 3 = les deux	Nom des aliments*
	Foie de volaille									
	Foie de bœuf ou veau									
	Foie de mouton ou d'agneau									
	Oeuf									

* indiquer le nom des aliments correspondants : sauce, ragout, omelette, brochette, etc.

N°	Produits végétaux	Jamais A	1 fois dans la semaine B	2-4 fois dans la semaine C	5-6 fois dans la semaine D	1 fois par jour E	2-3 fois par jour F	+ de 4 fois par jour G	Sous quelle forme ?	
									1 = crue 2 = cuite 3 = les deux	Nom des aliments*
	Carotte									
	Mangue									
	Potiron ou Citrouille <i>yogré</i>									
	Papaye									
	Melon									
	Patate douce à chair orange <i>nayoui</i>									
	Aubergine amère/sauvage <i>kumbavado</i>									
	Pastèque									
	Concentrée de tomate									
	Feuille de patate douce									
	Feuille Aubergine									
	Feuille épinard									

Annexe 2-6

Questionnaire de fréquence de consommation d'aliments riches en Fer

Identifiant : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Nom de l'enquêtrice : _____

Date :

Heure de début d'enquête :

N°	Produits végétaux	Jamais A	1 fois dans la semaine B	2-4 fois dans la semaine C	5-6 fois dans la semaine D	1 fois par jour E	2-3 fois par jour F	+ de 4 fois par jour G	Sous quelle forme ?	
									1 =cru 2 =cuite 3 = les deux	Nom des aliments*
1	Viande (de toute origine)									
2	Poisson (de toute sorte, frais, fumé, séché, etc.)									
3	Phosphatine									
4	Blédina									
5	Vitaline									
6	Nutrilac									
7	Farinor									
8	Plumpynut									
9	Natavie									
10	Cérélac									
11	Spiruline									
12	Autres aliments enrichis en fer (précisez)									

Annexe 2-7

**Questionnaire de fréquence de consommation de plats à base de mil, maïs,
sorgho**

Identifiant : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Nom de l'enquêtrice : _____

Date de l'enquête :

Heure de début d'enquête :

Heure de fin d'enquête :

A Votre enfant a t-il mangé des aliments contenant du **petit mil** au cours de la semaine dernière ?

1=oui |_|

2=non |_|

Nom de la variété locale que vous consommez :

- | | | |
|--|---------------------------|---|
| 1. Si oui, sous quelle(s) forme(s) ? | 2. Sous quelle forme | 3. Le petit mil a- |
| t-il | | acheté ? |
| 0 = jamais | 4. Où l'avez-vous | été décortiqué ? |
| | l'avez-vous acheté ? | acheté ? |
| 1 = au moins une fois | 1 =grains entiers | 1 =oui 2 =non 3 =nsp 1 =marché |
| 2 = 2 à 3 fois | 3 =4 à 5 fois | 2 =grains décortiqués si 1 , |
| précisez : 2 =magasin 3 =aut | | |
| 4 = tous les jours | 3 =farine | 1 =moulin 2 = pilon si 2 ou 3 , |
| | 4 =prêt à consommé | précisez quelle |
| | 5 =autre, précisez | entreprise, épicerie, |

a. tô	__	__ __	__ _____	__
b. babenda	__	__ __	__ _____	__
c. zom-kom	__	__ __	__ _____	__
d. bouillie RHD	__	__ __	__ _____	__
e. bouillie faite maison	__	__ __	__ _____	__
f. couscous	__	__ __	__ _____	__
g. boule d'akassa	__	__ __	__ _____	__
h. dégué	__	__ __	__ _____	__
i. galette	__	__ __	__	__
j. autre, précisez :				
1_____	__	__ __	__ _____	__

2_____	__	__ __	__ _____	__

3_____	__	__ __	__ _____	__

4_____	__	__ __	__ _____	__

5_____	__	__ __	__ _____	__

k. Description des recettes « autres » (indiquez le mode de préparation, les ingrédients utilisés)

B Votre enfant a-t-il mangé des aliments contenant du **sorgho blanc** au cours de la semaine dernière ?

1=oui |__|

2=non

1. Si oui, sous quelle(s) forme(s) ?

2. Sous quelle forme

3. Le **sorgho blanc**

4. Où l'avez-vous

0 = jamais

l'avez-vous acheté ?

a-t-il été décortiqué ?

acheté ?

1 = au moins une fois

1=grains entiers

1=oui **2**=non **3**=nsp **1**=marché

2 = 2 à 3 fois **3** =4 à 5 fois

2=grains décortiqués

si **1**, précisez : **2**=magasin **3**=autre

4 = tous les jours

3=farine

1=moulin **2**= pilon si **2** ou **3**,

4=prêt à consommé précisez quelle

5=autre, précisez

entreprise, épicerie,...

a. tô	__	__	__ _____	__
b. ran-noodo	__	__	__	__
c. dolo	__	__	__	__
d. bouillie RHD	__	__	__	__
e. bouillie faite maison	__	__	__	__
f. couscous	__	__	__	__
g. autre, précisez :				
1 _____	__	__ _____	__ _____	__
2 _____	__	__ _____	__ _____	__
3 _____	__	__ _____	__ _____	__
4 _____	__	__ _____	__ _____	__
5 _____	__	__ _____	__ _____	__

h. Description des recettes « autres » (indiquez le mode de préparation, les ingrédients utilisés)

C Votre enfant a-t-il mangé des aliments contenant du **sorgho rouge** au cours de la semaine dernière ?

1=oui |__|

2=non |__|

1. Si oui, sous quelle(s) forme(s) ?

0 = jamais

1 = au moins une fois

2 = 2 à 3 fois 3 = 4 à 5 fois

4 = tous les jours

2. Sous quelle forme

l'avez-vous acheté ?

1=grains entiers

2=grains décortiqués

3=farine

4=prêt à consommé

5=autre, précisez

3. Le **sorgho rouge**

a-t-il été décortiqué ?

1=oui 2=non 3=nspp 1=marché

si 1, précisez : 2=magasin 3=autre

1=moulin 2= pilon si 2 ou 3,

précisez quelle

entreprise, épicerie,...

4. Où l'avez-vous

acheté ?

a. tô	__	__	__	__
b. ran-noodo	__	__	__	__
c. dolo	__	__	__	__
d. bouillie RHD	__	__	__	__
e. bouillie faite maison	__	__	__	__
f. autre, précisez :				
1 _____	__	__ _____	__ _____	__
2 _____	__	__ _____	__ _____	__
3 _____	__	__ _____	__ _____	__
4 _____	__	__ _____	__ _____	__
5 _____	__	__ _____	__ _____	__

*précisez quelle entreprise, épicerie....

g. Description des recettes « autres » (indiquez le mode de préparation, les ingrédients utilisés)

1 :

D Votre enfant a-t-il mangé des aliments contenant du **maïs** au cours de la semaine dernière ?

1=oui |__|

2=non |__|

1. Si oui, sous quelle(s) forme(s) ?

0 = jamais

1 = au moins une fois

2 = 2 à 3 fois **3** = 4 à 5 fois

4 = tous les jours

2. Sous quelle forme

l'avez-vous acheté ?

1=grains entiers

2=grains décortiqués

3=farine

4=prêt à consommé

5=autre, précisez

3. Le **maïs**

a-t-il été décortiqué ?

1=oui **2**=non **3**=nsp **1**=marché

si **1** précisez : **2**=magasin **3**=autre

1=moulin **2**= pilon si 2 ou 3,

précisez quelle

entreprise, épicerie,...

4. Où l'avez-vous

acheté ?

a. tô de maïs blanc	__	__ _____	__ _____	__
b. tô de maïs jaune	__	__ _____	__ _____	__
c. tô de maïs blanc+jaune	__	__ _____	__ _____	__
d. donkounou	__	__ _____	__ _____	__
e. couscous, semoule	__	__ _____	__ _____	__
f. babenda	__	__ _____	__ _____	__
g. épi grillé	__	__ _____	__ _____	__
h. pop corn	__	__ _____	__ _____	__
h. autre, précisez :				
1 _____	__	__ _____	__ _____	__
2 _____	__	__ _____	__ _____	__
3 _____	__	__ _____	__ _____	__
4 _____	__	__ _____	__ _____	__
5 _____	__	__ _____	__ _____	__

h. Description des recettes « autres » (indiquez le mode de préparation, les ingrédients utilisés)

1 :

B. Anthropométrie (faire des mesures jusqu'à trouver 3 valeurs égales ou très proches : à 100g ou 1mm près)

1. Poids

Première mesure	Deuxième mesure	Troisième mesure
_ _ _ . _ kg	_ kg	_ . _ kg

2. Taille

Première mesure	Deuxième mesure	Troisième mesure
_ _ _ . _ cm	_ _ _ . _ cm	_ _ _ . _ cm

C Suivi sanitaire

1. La mère a-t-elle été suivie dans un centre de santé pendant sa grossesse ?

1=oui 2=non 3=nsp
|_|

2. Lieu d'accouchement de la mère :

1= au centre de santé 2=dans sa cour 3=autre, précisez _____ |_|

3. Depuis sa naissance, l'enfant a-t-il été suivi dans un centre de santé ? 1=oui 2=non |_|

a. Si oui, fréquence des visites : 1= >1 fois/ mois 2= 1 fois/ mois
3= entre <1 fois/mois et 1 fois/6 mois 4=<1 fois/ 6 mois

4. Si vérifié sur le carnet de santé, notez le poids de naissance (en kg):

|_|,|_|_|_|_|

5. Morbidité :

a. L'enfant a-t-il eu la diarrhée au cours des 2 dernières semaines ? 1=oui
2=non |_|

b. L'enfant a-t-il toussé au cours des 2 dernières semaines ? 1=oui 2=non |_|

c. L'enfant a-t-il eu de la fièvre au cours des 2 dernières semaines ? 1=oui
2=non |_|

6. La personne s'occupant de l'enfant a-t-elle reçu des conseils pour l'alimentation de l'enfant?

1=oui 2=non

|__|

a. Si oui, auprès de qui ? 1=centre de santé 2=voisine, amis 3=famille, précisez
|__|

E. Caractéristiques de la personne s'occupant de l'enfant

1. Lien de parenté avec l'enfant:

1=mère 2=grand-mère 3= sœur 4= tante 5=autre |__|

Si (5), préciser : _____

2. Age: |__| |__|

3. Ethnie :1=Mossi 2=Peuhl 3= Bissa 4= Bobo 5= Dagari 6=Gourounsi

7=Gourmantché 8=Samo 9= Autre, préciser _____ |__|

4. Lieu où elle a grandi : 1=milieu urbain 2=milieu rural |__|

5. Niveau d'éducation: 1= jamais scolarisée 2=jamais scolarisée mais alphabétisée 3= primaire |__|

4= 1er cycle du secondaire 5= 2d cycle du secondaire 6= supérieur

6. Religion : 1= catholique 2=protestante 3=musulmane 4= animiste 5= autre |__|

7. Activités: mère au foyer 1=oui 2=non |__|

employée de maison 1=oui 2=non |__|

agricultrice 1=oui 2=non |__|

commerçante 1=oui 2=non |__|

artisane 1=oui 2=non |__|

élève 1=oui 2=non |__|

restauratrice 1=oui 2=non |__|

autre (préciser) 1=oui 2=non |__|

F. Caractéristiques de la mère (si différente de la personne s'occupant de l'enfant)

1. Pourquoi ne s'occupe t'elle pas de l'enfant ?

1= Travaille ailleurs 2= à l'hôpital 3=décédé 4= Autre |__|

2. Age (si différent de 2): |__| |__|

3. Ethnie : 1=Mossi 2=Peuhl 3= Bissa 4= Bobo 5=Dagari 6=Gourounsi
7=Gourmantché 8=Samo 9= Autre |__|

4. Lieu où elle a grandi : 1=milieu urbain 2=milieu rural |__|

5. Niveau d'éducation: 1= jamais scolarisée 2=jamais scolarisée mais alphabétisée |__|

3= primaire 4= 1er cycle du secondaire 5= 2d cycle du secondaire 6= supérieur

6. Religion :

1= catholique 2=protestante 3=musulmane 4= animiste 5= autre |__|

7. Activité: mère au foyer 1=oui 2=non |__|

employée de maison 1=oui 2=non |__|

agricultrice 1=oui 2=non |__|

commerçante 1=oui 2=non |__|

artisane 1=oui 2=non |__|

élève 1=oui 2=non |__|

restauratrice 1=oui 2=non |__| autre (*préciser*) 1=oui
2=non |__|

G. Caractéristique du chef de ménage

1. Le chef de ménage habite-t-il dans la cour ? 1=oui 2=non |__|

a. Si non, pourquoi ? 1=travaille dans une autre ville ou un autre village au Burkina

2=travaille à l'étranger 3= est à l'hôpital |__|

2. Activité professionnelle :

Agriculteur 1=oui 2=non |__|

Eleveur 1=oui 2=non |__|

Fonctionnaire 1=oui 2=non |__|

Commerçant 1=oui 2=non |__|

Artisan 1=oui 2=non |__|

Elève, étudiant 1=oui 2=non |__| Service (mécanicien, chauffeur, ...) 1=oui
2=non |__|

Autre (*préciser*) 1=oui 2=non |__|

3. Le chef de ménage est-il le père? 1=oui 2=non |__|

H. Statut économique

1. Logement :

Statut de l'occupant :

1=propriétaire 2=locataire 3= hébergé gratuitement 4=autre *précisez* |__|

Nombre de pièces : |__| |__|

Approvisionnement en eau (de boisson) :

1=robinet dans le logement 2=robinet dans la parcelle

3=fontaine publique 4=puits/forage |__|

Electricité : 1=oui 2=non |__|

2.Équipement du ménage :

cuisinière ou réchaud à gaz : oui=1 non=2 |__|

réfrigérateur : oui=1 non=2 |__|

congélateur oui=1 non=2 |__|

radio ou radiocassette : oui=1 non=2 |__|

télévision : oui=1 non=2 |__|

vélo : oui=1 non=2 |__|

mobylette : oui=1 non=2 |__|

moto (*l'enquêtrice précise la différence entre moto et mobylette*)

oui=1 non=2 |__|

voiture oui=1 non=2 |__|

3. L'état de l'habitat :

Les murs sont en : 1= paille, banco 2=ciment 3=parpaing 4=autre(*précisez*) |__|

Le toit est en:

1= paille 2=ciment 3=tôle, sans plafond 4=tôle, avec un plafond 5=autre(*précisez*) |__|

Le sol est en : 1= terre battue 2=ciment non carrelé 3= ciment carrelé 4=autre(*précisez*) |__|

Annexe 2-9

Table de composition des aliments

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
kaga (dankh, cola)	88,90	365,1	7,4	0,0	92,24	2,02	7,42	5,51	
Biscuit sucre	97,00	475,2	0,0	0,0	1,13	0,82	4,33	7,22	192
Cramcram, grains entiers	96,90	414,0	0,0	0,0	0,00	6,71	0,00	22,81	
Macaroni, bouilli	40,00	381,2	0,0	0,0	1,50	1,45	0,50	11,75	290
Macaroni, seche	91,00	390,8	0,0	0,0	1,10	1,54	4,62	13,08	290
Maïs, blanc, noyau entier, seche	88,00	416,5	0,0	0,0	4,09	2,05	2,16	10,68	710
Maïs, farine blanche	88,00	401,1	0,0	0,0	1,25	2,05	0,68	9,09	84
Maïs, jaune, noyau entier, seche (farine maïs jaune non decort.)	90,00	415,9	11,6	4,4	5,44	1,63	2,22	11,11	480
farine de maïs jaune decort. (=maïs, farine blanche)	88,00	401,1	0,0	0,0	1,25	2,05	0,68	9,09	240
Riz, indigene, grain entier moulu, rouge	88,60	403,7	0,0	0,0	1,92	0,00	0,23	7,11	577
Riz, moulu, poli	88,00	405,3	0,0	0,0	1,93	1,42	0,46	7,96	880
Sorgho, grain entier donc non decortique (pour le fer: valeur du WP2 INSTAPA, presentation kenya)	90,00	404,7	1,9	0,0	3,33	2,06	2,67	12,22	830
Igname, tubercule, frais	31,00	383,1	4,0	19,4	2,58	1,61	2,58	6,13	291
Manioc doux seche	91,30	386,6	7,7	78,9	2,08	0,77	1,97	1,42	85
Patate douce, blanche, crue	31,00	392,3	9,4	119,4	6,45	0,00	3,23	5,16	17
Patate douce, jaune fonce, crue	31,20	396,2	641,0	118,6	6,41	0,00	3,21	5,13	316
Patate douce, jaune, crue	31,00	392,3	483,9	119,4	6,45	0,00	3,23	5,16	17
Pomme de terre, crue	22,00	366,5	4,5	95,5	5,00	1,36	2,73	7,73	401
Pois bambara, frais, decortique	90,00	402,6	0,9	0,0	13,33	0,00	5,33	21,11	
Arachide grillee, salee, ecorcee	93,00	613,6	0,7	1,1	4,09	3,55	3,12	24,73	440
Arachide, fraiche, ecorcee	77,70	702,2	0,2	0,0	5,02	2,70	3,12	17,38	550

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
Arachide, sechee, entiere ecorcee	93,00	613,6	0,7	1,1	4,09	3,55	3,12	24,73	550
Farine d'arachide, degreaissee	95,00	423,4	0,0	0,0	9,47	0,00	3,26	44,74	830
Haricot a oeil noir, cosse mure, sechee	89,00	377,8	1,4	2,2	5,62	3,82	5,39	25,84	660
Nere graines, sechees	93,00	469,0	0,0	6,5	0,00	0,00	4,41	34,73	340
Noix de cola, crue	37,10	386,0	5,6	145,6	5,39	1,62	3,77	5,93	
Pain de singe, graines sechees	92,20	509,0	0,0	227,8	15,08	0,33	3,47	32,54	
Pate d arachide	92,80	629,2	0,0	0,0	6,47	3,56	1,62	26,94	440
Sesame, graines entieres sechees	94,20	606,2	2,7	0,0	8,60	8,23	4,78	19,00	1710
Carpe d'Afrique bouillie	20,80	388,6	13,5	6,3	3,99	6,15	0,00	81,43	0
Carpe d'Afrique, crue	18,70	364,6	37,4	10,7	6,95	8,02	0,00	83,89	0
Sardine, crue	22,50	379,2	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	83,89	0
Silure; poisson-chat cru	23,50	469,3	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	69,42	0
Poisson cru maigre	20,30	379,4	49,3	0,0	6,08	4,43	0,00	82,88	0
Poisson fume	94,20	401,3	37,2	0,0	17,76	3,88	0,00	80,72	0
Poisson-chien, seche, petit	95,50	408,2	0,0	0,0	11,62	4,19	0,00	69,37	0
Sardines a l huile, conserve	47,00	602,3	243,3	0,0	5,96	4,26	0,00	51,06	0
Silure; poisson-chat seche entier	79,40	388,6	0,0	0,0	4,53	1,26	0,00	78,72	0
Carpe bouillie	21,40	402,2	15,4	3,0	7,85	3,55	0,00	82,36	0
Carpe fumee	92,60	369,0	78,2	0,0	7,97	4,94	0,00	86,39	0
Lait concentre sucre	67,80	438,0	91,4	1,5	0,00	1,33	0,00	11,95	0
Lait entier caille, vache	11,90	580,6	352,9	8,4	0,31	2,67	0,00	31,93	0
Lait vache, poudre, enrichie	97,00	517,7	556,7	30,9	10,31	4,64	0,00	26,50	0
Lait entier frais, vache	15,00	519,5	224,4	6,7	0,31	2,67	0,00	25,33	0
Boeuf estomac, cru	28,00	385,8	0,0	10,7	14,29	2,50	0,00	56,43	0
Oeuf de poule, cru	25,00	563,0	700,0	0,0	8,00	5,60	0,00	48,00	0
Poulet, cru	28,00	493,7	285,7	0,0	3,93	3,93	0,00	71,43	0

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
Viande de boeuf, tres maigre, crue	25,40	460,2	0,0	0,0	18,11	9,06	0,00	81,10	0
Viande de boeuf, un peu grasse, crue	37,00	625,6	66,0	0,0	9,73	7,30	0,00	48,65	0
Viande de chevre, un peu grasse, crue	32,00	530,6	0,0	0,0	7,19	12,50	0,00	56,25	0
Viande de mouton, un peu grasse, crue	39,00	650,9	25,6	0,0	5,13	5,90	0,00	43,59	0
Viande de porc, un peu grasse, crue	54,00	742,7	0,0	0,0	3,33	2,96	0,00	22,22	0
Ail	36,00	375,7	0,0	47,2	5,28	2,78	4,17	21,94	
Aubergine, crue	10,00	317,2	14,2	90,0	13,00	2,00	13,00	10,00	
Aubergine, indigene crue	11,00	370,9	59,1	181,8	1,82	0,91	14,46	12,73	
Avocat, crue	20,00	600,0	166,7	90,0	7,00	2,00	9,00	7,00	3
Banane plantain, mure, crue	35,00	391,6	92,9	57,1	1,71	0,40	1,43	3,43	95
Banane mure crue	23,00	382,3	32,6	39,1	1,30	0,87	3,91	6,52	
Carotte, crue	11,00	342,9	4545,5	72,7	6,36	2,73	12,73	8,18	76
Chou, cru	10,00	276,0	55,0	540,0	3,00	2,00	26,00	14,00	128
Choufleur, cru	8,00	264,9	11,5	725,0	5,00	3,75	28,75	23,75	5
Citron, lime, cru	10,00	418,7	6,7	450,0	7,00	1,00	7,00	6,00	
Concombre, cru	5,00	325,3	0,0	280,0	10,00	2,40	16,00	16,00	62
Courge/citrouille, cru	7,00	359,6	1428,6	114,3	20,00	0,00	11,43	14,29	
Epinards crus	8,00	273,6	3437,5	675,0	56,25	13,75	23,75	32,50	4
Finsan	30,80	677,3	150,2	84,4	8,77	0,32	5,20	16,23	
Gingembre, racine, frais	19,10	351,0	17,5	31,4	13,61	24,71	12,57	12,04	
Gombo, cosse cru	11,00	350,9	143,9	427,3	10,91	3,64	15,46	19,09	286
Jakato (aubergine locale africaine)	9,00	180,7	0,0	88,9	0,00	2,22	25,56	14,44	
Jus d'orange, en conserve	11,20	355,2	33,5	348,2	2,14	0,45	0,89	6,25	0
Jus d'orange frais non sucre	10,70	357,0	54,5	411,2	3,74	0,37	0,94	6,54	
Jus de citron en conserve	7,50	191,8	10,0	266,7	1,73	0,80	1,33	5,33	0
Jus de citron frais	9,20	185,6	10,9	402,2	1,52	0,54	1,09	4,35	0

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
Mandarine, orange, crues	12,00	387,0	159,7	383,3	0,83	0,83	5,00	5,00	0
Mangue mure crue epluchee	17,00	381,9	1176,5	247,1	7,06	0,59	5,29	3,53	
Mangue non mure crue epluchee	16,00	372,4	31,3	537,5	8,75	0,63	4,38	3,13	
Oignon, echalote, crus	12,00	338,0	0,0	91,7	6,67	1,67	8,33	10,00	
Oignon seche	95,50	349,7	7,4	34,6	2,72	1,78	13,61	10,68	
Papaye, crue	9,00	342,7	277,8	577,8	6,67	1,11	10,00	4,44	
Pasteque crue	6,40	368,0	325,5	125,0	4,69	1,56	6,25	7,81	
Piment doux rouge cru	14,00	339,5	381,0	1000,0	18,57	2,86	18,57	14,29	
Piment doux vert cru	14,00	339,5	434,5	1000,0	18,57	2,86	18,57	14,29	
Piment fort cru	12,60	341,2	218,3	317,5	9,52	0,79	11,11	8,73	
Piment seche	89,80	373,2	98,4	200,4	8,69	2,78	18,26	15,37	
Salade crue	6,00	380,2	2708,3	166,7	11,67	5,00	10,00	20,00	0
Baobab poudre, pain de singe	91,36	349,5	40,5	76,6	9,85	1,03	6,24	2,52	
Baobab pulpe, pain de singe	84,00	355,9	6,9	321,4	8,81	0,36	8,10	6,24	
Feuille d'amarante crue	16,00	304,5	1197,9	312,5	55,62	3,13	11,25	28,75	0
Feuille de haricot (niebe), crue	15,00	306,4	388,9	373,3	38,00	2,67	13,33	31,33	0
feuille de gynandro (kenebdo)	20,00	306,7	1375,0	400,0	36,00	2,00	6,00	22,50	
Feuille d'oignon sechee	95,40	285,5	90,0	18,9	45,07	9,64	10,48	14,47	0
Feuille d'Oseille de Guinee (dah), crue	40,00	217,6	315,0	295,0	4,82	3,80	0,00	22,00	0
Feuille de baobab, crue	23,00	307,2	1128,3	226,1	4,78	1,74	12,17	16,52	0
Feuille de patate, douce, crue	17,00	310,4	1284,3	411,8	36,47	0,00	14,12	27,06	0
Feuille de jute, crue	19,60	321,3	2725,3	408,2	36,73	2,04	10,20	22,96	0
Feuille de tamarin, crue	22,00	317,3	27,3	0,0	94,69	2,81	18,64	14,09	0
Feuille de tamarin, séchée	96,10	322,2	27,3	2,7	94,69	2,81	18,73	14,57	0
Fleur de kapok, crue (valeurs fer et zn = celle du 230)	18,00	345,1	0,0	0,0	14,27	2,68	13,33	6,67	7
Fleur de kapok, séchée	93,20	316,9	48,8	15,0	14,27	2,68	13,31	5,26	7

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
Fruit d'Oseille de Guinee (dah), rouge, cru	15,50	324,3	161,3	90,3	18,71	2,58	14,84	12,26	
Fruit d'Oseille de Guinee (dah), rouge, séché	82,40	278,3	18,3	0,0	18,81	2,58	20,75	11,65	
Fruit de tamarin seche	79,00	298,8	4,7	11,4	2,78	0,38	22,79	6,33	
Fruit de tamarin seche	95,00	321,4	0,0	3,2	3,16	2,42	22,79	8,63	
Graine d'Oseille de Guinée(datou)rouge,séchée (sumbala d'oseille)	93,00	417,2	19,6	3,5	4,52	0,65	11,83	18,07	340
Farine de jujube	82,60	375,0	0,0	20,6	3,63	0,00	4,12	5,21	
Feuille laurier, séchée	94,60	318,8	326,8	0,0	45,45	3,91	27,80	8,03	0
Menthe fraiche	15,10	284,8	408,4	205,3	62,91	5,96	37,09	25,17	0
Feuille de moringa, crue	13,10	198,3	1413,0	916,0	40,46	0,00	36,64	19,08	0
Néré farine, fruit	86,80	334,8	233,3	278,8	4,15	0,69	14,52	3,92	
Néré farine de cosse	94,10	284,2	167,9	3,2	18,81	1,54	0,00	3,51	340
Oignon et feuille d'oignon, non murs	7,10	308,9	676,1	239,4	9,86	2,82	14,09	18,31	0
Beurre de karite	100,00	880,3	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Huile d'arachide (b)	100,00	881,2	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Huile de coton (b)	100,00	881,2	0,0	0,0	0,03	0,01	0,00	0,00	0
Huile de palme rouge, eventee	99,00	881,2	1010,1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Sucre	100,00	404,9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Bonbon	97,00	405,7	0,0	0,0	1,13	0,10	0,00	3,09	0
Chewing gum	97,00	388,6	0,0	0,0	7,63	0,10	0,00	0,41	0
Cube maggi/Jumbo	96,70	176,3	15,5	0,0	2,31	0,22	0,00	17,89	0
Eau	0,00	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Epices	91,54	334,0	2272,8	83,0	7,65	1,10	23,60	6,65	
Levure, sec (rabilé)	95,00	293,1	0,0	0,0	21,05	8,42	20,74	nér	0
Mayonnaise, 80% graisse	84,00	857,0	50,9	0,0	0,60	0,12	0,00	1,43	0
Nescafe, sec	96,90	227,2	0,0	0,0	4,54	0,36	0,00	12,59	37

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
Poivre noir	89,50	255,0	10,6	23,5	32,29	1,56	29,61	12,18	0
Poivre noir	89,50	255,0	10,6	23,5	32,29	1,56	0,00	12,18	0
Potassium, liquide	0,10	0,0	0,0	0,0	70,00	10,00	0,00	0,00	0
Potassium, solide (de maïs)	91,40	2,3	0,0	0,0	4,87	0,48	0,00	0,56	0
Sel, région de Kayes	99,00	0,0	0,0	0,0	0,10	0,00	0,00	0,00	0
Sucrerie, cola, fanta	10,00	404,9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
The noir, lipton sans sucre	1,00	121,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Tomate, concentré	28,00	344,6	375,0	14,3	12,50	2,50	12,86	16,07	49
Vedan/MSG (monosodium glutamate)	100,00	350,2	15,0	0,0	2,23	0,21	0,00	0,00	0
Vinaigre	6,20	385,3	0,0	0,0	96,77	0,00	0,00	0,00	0
Mais, jaune, écrasé	89,00	373,9	10,1	0,0	6,57	1,66	5,20	8,55	480
farine de maïs blanc non décortiqué	90,50	361,3	0,0	0,0	0,99	0,48	0,00	9,70	480
Mil chandelle, grain entier avec son = non décortiqué	88,00	391,4	0,3	0,0	8,52	3,30	8,98	10,80	460
Mil chandelle, farine (sans son) = décortiqué	88,00	355,8	0,0	0,0	6,59	3,30	7,01	9,05	414
Farine d'arachide, avec graisse	95,70	576,1	0,7	0,0	6,37	4,17	10,35	27,84	550
Riz, blanc, poli	89,00	388,0	0,0	0,0	0,42	1,42	1,21	6,85	880
Sorgho, farine (blanc) (pour le fer, valeur du WP2 INSTAPA, présentation Kenya, valeurs sorgho décortiqué)	89,00	392,4	0,0	0,0	1,80	1,12	5,24	11,65	106
Ble, farine, blanc	88,39	387,2	0,4	0,0	5,14	1,21	3,39	11,65	320
Fonio, grains écorchés	88,00	387,0	0,0	0,0	2,39	1,70	2,50	8,18	
Feuille de baobab, séchée	92,70	150,0	524,3	1,9	72,00	2,03	46,28	17,90	3
Feuille de fakouhoye, séchée	92,70	200,2	1015,1	3,2	63,00	3,04	37,59	24,51	0
Gombo, cosse, séchée poudre	93,30	175,6	25,7	0,5	83,79	5,09	47,91	15,58	6
Soumbala; nere, graine, fermentée;	82,80	498,1	20,3	3,6	84,06	6,10	20,23	36,93	340
Feuille d'oignon, crue	9,00	298,3	6362,0	455,6	45,56	1,78	10,48	20,78	0
Feuille d'haricot, crue	13,80	320,8	3105,1	181,2	38,33	3,48	0,00	29,44	0

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
Haricot, blanc seche	91,10	317,7	16,5	0,0	6,29	4,22	11,31	24,29	684
Celeri, cru	5,40	225,3	55,6	129,6	7,41	2,41	31,48	13,89	
Sel sans iode	99,00	2,0	0,0	0,0	0,30	0,10	0,00	0,00	0
farine de manioc	91,30	391,0	0,0	0,0	0,00	0,00	1,97	1,42	100
sorgho rouge (pour le fer: valeur du WP2 INSTAPA, presentation kenya)	88,50	383,1	0,0	13,6	3,33	2,06	2,67	12,20	810
farine de sorgho rouge (pour le fer, valeur du WP2 INSTAPA , presentation Kenya: valeurs sorgho décortiqué)	88,50	383,1	0,0	13,6	1,80	1,12	2,60	11,07	830
arachides sucrees (valeurs fer zn fibre =1/2 de 561)	100,00	460,0	0,0	0,0	2,51	1,35	0,00	11,50	275
Arachide, fraiche, ecorcee (arachide bouillie)	77,70	702,2	0,2	0,0	5,02	2,70	3,12	17,38	440
crevette seche	87,50	376,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	6,86	0
misola	93,30	0,0	0,0	0,0	9,86	3,86	2,14	19,29	
tô de maïs	88,00	401,1	0,0	0,0	1,25	2,05	0,68	10,68	78
riz fume (=riz)	89,00	388,0	0,0	0,0	0,42	1,42	0,46	6,85	
Couscous cuit nature	27,43	408,3	0,0	0,0	1,39	0,95	0,00	13,82	320
bouillie de petit mil RHD (valeurs de la bouillie de petit mil fermenté, Mouquet et al, 2008)	6,61	407,5	0,0	4,5	8,33	2,05	2,14	8,22	220
poisson frais synchar	11,90	445,4	58,8	8,4	2,52	2,52	0,00	95,80	0
phosphatine	100,00	84,0	0,0	0,0	8,00	0,30	0,00	2,40	809
bledina	100,00	78,0	0,0	0,0	8,00	0,40	0,00	6,50	809
cerelac	94,90	449,9	0,0	32,7	4,00	6,53	1,05	14,54	809
Pomme de terre bouillie	22,54	381,5	0,7	32,8	1,38	1,20	2,73	7,73	401
benga (haricot au riz)	95,36	150,2	0,3	0,5	1,43	1,14	5,24	7,56	770
bouillie de maïs	16,00	374,6	0,0	0,7	10,12	1,69	0,68	8,55	78
porc au four	39,69	534,1	5,0	0,8	2,77	7,48	0,00	26,69	0
foie braise avec huile (voire oignon)	37,99	460,6	20384,3	1,8	16,24	13,77	0,00	70,36	0
bouillie de maïs	16,00	374,6	0,0	0,7	10,12	1,69	0,68	8,55	78

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
poulet televise	32,15	475,9	24,9	0,0	3,36	2,43	0,00	71,43	0
couscous de mil	46,97	355,8	0,0	0,0	6,59	3,30	7,01	9,05	414
Pommes frites	29,40	492,1	3,1	64,7	3,39	0,00	1,85	5,23	181
Poisson frit	51,25	721,2	0,0	0,0	2,02	2,02	0,00	20,26	0
Pain de ble	58,43	377,1	0,0	0,0	5,07	1,26	3,43	11,54	24
Cafe avec sucre	16,97	393,8	0,0	0,0	0,29	0,03	0,00	0,79	9,25
Cafe avec sucre et lait	15,67	433,9	213,6	11,9	4,32	1,81	0,00	11,18	3,7
Citronnelle bouilli + sucre	10,26	405,4	0,3	11,4	0,18	0,03	0,18		
Oseille de Guinee bouillie + sucre	14,02	393,2	23,2	13,0	2,69	0,00	2,13	1,76	
Gingembre + sucre	17,37	401,4	1,1	2,1	0,91	0,00	0,84	0,81	
Jus de tamarin + sucre	31,43	388,1	0,0	3,6	0,00	0,00	3,82	0,91	
The vert avec sucre	17,60	405,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,14	33,3
Boisson du pain de singe, d'eau + sucre	33,35	377,8	4,0	178,0	4,88	0,00	4,48	1,45	0
Jus de tamarin sans sucre	2,83	218,7	0,0	57,1	0,00	0,00	106,11	25,27	
jus de graines d'oseille (datou, soumbala) sans sucre	0,00								
boeuf, tres maigre + un peu grasse	31,20	558,3	39,1	0,0	13,14	8,01	0,00	57,69	
Cafe au lait concentre	22,77	436,3	0,0	1,5	0,04	0,00	0,00	11,95	3,7
Lait, reconstitue de poudre, Nido	13,98	489,3	417,3	23,2	7,73	3,48	0,00	19,86	
Feuilles aubergine locale, vert clair, crue	9,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	2
courgette (fibre = souci 6th)	10,09	150,6	94,2	160,1	3,27	2,78	15,43	16,28	
kaolin (argil)		0,0	0,0	0,0	0,00	0,00		0,00	0
médicaments (actapulgate/vogalene)		0,0	0,0	0,0	0,00	0,00		11,65	0
Tomates, crues	6,00	366,8	527,8	433,3	10,00	1,67	10,00	16,00	95
tomate verte/peu mure	7,00	328,6	457,1	334,3	7,29	1,00	10,00	17,14	95
farine de maïs jaune+blanc d.cort.	88,00	401,1	0,0	0,0	1,25	2,05	0,68	9,09	
farine de maïs blanc decort + sorgho rouge	47,50	395,7	33,7	24,6	1,69	1,97	0,00	18,95	

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
feuille Badkoudi sec, meme valeurs que gombo sec (Ouaga rural)	9,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	
oseille feuilles seches	100,00	306,6	4300,3	273,0	4,47	3,80	11,53	33,04	190
oseille, feuilles fraiche	11,20	330,4	4633,9	295,0	4,82	3,80	11,53	33,04	190
feuille de jute (boulvaka) seche	100,00	321,3	2725,3	408,2	36,73	2,04	11,53	4,50	3
feuilles de kirikiri seches	100,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	3
feuille de kirikiri (cassia tora) fraîche (feuille verte clair)	9,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	3
feuilles de kakalga (feuille sauvages, semblales aux feuilles d'oseille)	9,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	
feuille de peperera fraiche (Pterocarpus lucens)	9,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	0
feuille de banougou fraiche (Sida Cordifolia)	9,00	311,2	69,4	600,0	7,78	4,44	11,53	18,89	0
dolo de sorgho rouge	9,00	430,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	4,44	240
eau fermentee	0,00	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
persil, frais	11,20	330,4	2317,0	294,6	27,68	3,57	11,53	33,04	0
persil/celeri	8,30	296,2	1581,3	241,0	21,08	3,19	11,53	26,81	0
the sec	1,00	121,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	21,29	333
biscuits emballes	93,90	358,9	0,0	10,8	3,14	3,19	0,00	8,46	192
boeuf, brochette	39,95	503,1	0,0	0,0	7,48	17,02	0,00	48,65	0
yaourt, fan (sucre)	12,10	504,1	226,4	4,1	0,41	4,88	0,00	28,68	0
pop corn	95,90	398,3	10,4	0,0	2,77	3,59	2,04	13,38	640
caramel avec lait et sucre	93,34	428,5	0,0	0,0	0,00	1,32	0,00	1,08	0
farine de mil enrichie au tourteaux et sumabala	96,00	430,4	0,0	0,3	5,27	2,09	3,50	14,58	436
farine de mil enrichie	96,00	430,4	0,0	0,3	5,27	2,09	3,50	14,58	207
Foie sec	100,00	140,6	11871,8	17,5	8,09	4,33	0,00	35,00	
jus de fruit industriel, indefini	12,10	388,4	16,5	525,6	2,81	0,25	0,00	1,45	0
dolo	9,00	430,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	4,44	240
jus de quinquelib (the vert sucre)	17,60	405,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00		

NOM	Teneur en MS	NRJ-TMS	VITA-TMS	Vitamine C-TMS	FER-TMS	ZINC-TMS	FIBRE-TMS	Protéines-TMS	phytate (µg/100g MS)
PLUMPYNUT	97,50	548,7	974,0	0,0	11,82	14,38	0,00	12,9	
lait en poudre	97,53	508,6	263,5	8,8	0,48	3,42	0,00	26,99	0
graine de palme	27,50	738,2	1821,8	14,5	0,73	0,36		2,18	0
chou prepare	6,40	343,8	109,4	314,1	2,66	1,41	26,00	14,00	128
viande de mouton preparee	46,00	508,7	19,6	0,0	10,35	12,89	0,00	43,59	0
viande de boeuf preparee	49,65	617,0	0,0	0,0	6,30	15,13	0,00	48,65	0
viande chevre preparee	31,79	449,8	0,0	0,0	11,73	16,58	0,00	56,62	0
igname, bouilli	29,87	388,3	20,1	40,5	1,74	0,67	0,00	4,99	291
patate pelee bouillie	22,54	381,5	0,7	32,8	1,38	1,20	0,00	3,23	401
chenille seche	90,90	473,0	0,0	0,0	2,30	0,00	5,50	58,20	0
charognard (=perdrix)	30,00	432,6	0,0	0,0	1,35	6,33	0,00	88,00	
beurre indefini/margarine	82,50	871,5	992,7	0,1	0,00	0,00	0,00	0,61	0
beurre de lait	82,06	873,8	833,5	0,0	0,02	0,11	0,00	1,04	0
levure chimique	92,40	319,3	0,0	0,3	17,97	6,93	0,00	0,00	0
jus d'ananas	14,47	387,0	1,7	73,9	1,80	0,76	0,00	2,64	
chocolat en poudre sucre	98,90	404,4	0,0	27,6	0,00	6,90	0,00	3,33	1960
graines de coton, sechees, poudre	95,35	530,7	23,1	9,4	5,66	6,29	0,00	43,71	
huile de palme	100,00	884,0	0,0	0,0	0,01	0,00	0,00	0,00	0

Annexe 2-10

Recommandations et composition du lait maternel

Quantités de lait maternel ingéré et apports en énergie du lait maternel dans les pays en développement (OMS, 1998)

Age	Quantités de lait maternel ingéré (l/jour)		Apport en énergie du lait maternel (kcal/kg de poids corporel/jour)	
	Niveau moyen	Niveau bas* (moy-2ET)	Niveau moyen	Niveau bas (moy-2ET)
Age < 9	0,660	0,354	67	35
9 < Age < 12	0,616	0,272	56	28
Age ≥ 12	0,549	0,175	39	3

Source : Tableau réalisé dans le cadre du WP4 (INSTAPA) à partir des données de l'OMS (1998).

Composition du lait maternel en nutriments

Nutriments	Protine	Lipide	lactose	Folate	Vit.B12	Vit.C	Vit. A	Fer	Zinc
Unités	g/l	g/l	g/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg ER/l	mg/l	mg/l
Teneurs	10,5	39,0	72	85	0,97	40	500	0,3	1,2

Source OMS (1998)

Annexes 2-11

Les besoins moyens énergétiques et les besoins moyens et apports journaliers recommandés par la FAO et l'OMS pour les jeunes enfants (6 à 35 mois)

Age (mois)	Energie (kcal/kg PC/j)	Protéines (g/kg PC/j)		Fer* (mg/j)		Zinc** (mg/j)		Vit C (mg/j)		Vit A (µg ER/j)		Vit B12 (µg/j)		Vit B9 (µg/j)	
Sources	FAO 2001	FAO/WHO 2007		FAO/WHO 2004		FAO/WHO 2004		FAO/WHO 2004		FAO/WHO 2004		FAO/WHO 2004		FAO/WHO 2004	
	Besoins moyens	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI	Besoins moyens	Apport de sécurité RNI
6-9	77	1,12	1,31	14,4	18,6	5,59	8,4	8	30	190	400	0,6	0,7	65	80
10-11	F :77 M :79														
12-17	F :80,1 M :82,4	0,95	1,14												
18-23	F :80,1 M :82,4	0,85	1,03												
24-35	F : 80,6 M :83,6	0,79	0,97	9,2	11,6	5,97	8,3	8	30	200	400	0,7	0,9	120	150

*pour un regime alimentaire avec faible biodisponibilité du fer (5%)

**pour un regime alimentaire avec faible biodiponibilité du zinc (15%)

Annexe 2-12

FICHE DE SUIVI DE PREPARATION DU TÔ/PRODUCTION

N°Fiche :

Nom et Prénom de l'observateur :.....

Date d'observation :

Type de céréale :

Code de la céréale :

Quantité fournie :

A. Identification de la productrice

Nom et Prénom :.....

Nationalité :.....

Ethnie :.....

Identification du lieu :.....

Heure de début :

B. INGREDIENTS

N°	Nom	Lieu d'achat	Si liquide pH	Type de traitement	

Commentaire :

Annexe 2-13

Plat de tô de sorgho blanc Tiéblé



Plat de galettes de mil GB8735



Bouillie *benkida* de mil Gampèla



Galettes issues des 3 variétés de mil



Annexe 2-14

Fiche d'évaluation pour un test d'acceptabilité et d'appréciation

J2

EPREUVE HEDONIQUE**Produits: Tô**

Noms/Prénoms:

Date

Ages: 15ans-20ans

Sexe

21ans-26ans

27ans-32ans

Plus de 32ans

Instruction:

Veillez goûter ces trois (03) Tô dans l'ordre indiqué et cochez le degré de plaisir qui correspond à votre appréciation.

Echantillons:**396****765****174**

Très agréable

Agréable

Passable

Désagréable

Très désagréable

Observations:

Titre : Rétention et biodisponibilité du fer et du zinc au cours des procédés de préparation des plats traditionnels à base de céréales locales ou biofortifiées, consommés par les jeunes enfants burkinabé

Résumé

Dans un contexte où les carences en micronutriments constituent un problème majeur de santé publique touchant particulièrement les jeunes enfants, l'étude de la rétention et de la biodisponibilité du fer et du zinc dans les plats les plus fréquemment consommés peut constituer une stratégie de lutte contre les carences en ces minéraux. Une enquête de consommation alimentaire par pesées auprès de 630 enfants de 6 à 36 mois au Burkina Faso a permis de dégager les principales caractéristiques de l'alimentation de complément des jeunes enfants. Les résultats mettent en évidence une couverture des apports recommandés en fer et en zinc très faible, des apports élevés en fibres et en phytates. Le jour de l'enquête, plus de 90% des enfants avaient consommé du mil, du sorgho ou du maïs, essentiellement sous forme de tô, une pâte très consistante, de bouillie ou de galettes. Des suivis de préparation de ces plats dans les ménages ont permis d'identifier les principales opérations unitaires susceptibles d'avoir un effet sur les teneurs en fer et en zinc et leur biodisponibilité. Le décorticage traditionnel, manuel ou mécanique, entraîne d'importantes pertes en fer (50% dans le mil pour 10% de perte de MS) et en zinc (23% dans le sorgho pour 7% de perte de MS). Les variétés biofortifiées présentent un comportement similaire, mais permettent tout de même une amélioration significative du rapport molaire phytate/zinc. La mouture, lorsqu'elle est réalisée à l'aide d'un moulin à meules, entraîne une contamination en fer, allant jusqu'à tripler la teneur en fer initiale des grains. Mais la bioaccessibilité de ce fer est extrêmement faible. L'acceptabilité des variétés de mil biofortifiées, testées sur différents plats, reste inférieure à celle de la variété locale. L'amélioration des procédés combinée à l'utilisation de variétés biofortifiées pourrait être promue afin de contribuer à la lutte contre les carences en fer et zinc.

Title : Retention and bioavailability of iron and zinc during processing of traditional dishes prepared from local and biofortified cereals and consumed by young children in Burkina Faso

Abstract

In contexts where micronutrient deficiencies are a major public health concern, the improvement of the retention and bioavailability of iron and zinc in dishes frequently consumed by young children could be part of a food-based strategy to combat these deficiencies. A food consumption survey using weighing records was carried out on 630 children from 6 to 36 months in Burkina Faso. This permitted to highlight the main characteristics of the children diet. Iron and zinc intakes were far below the recommended intakes. High fibre and phytate intakes were also observed. More than 90% of the young children consumed millet, sorghum or maize in the day of the survey. A detailed monitoring of the traditional processing of the cereal dishes permitted the identification of the main unit operations that could have an effect on iron and zinc content and bioavailability. Important losses in iron content (50% in millet for 10% DM loss) and zinc (23% in sorghum for 7% DM loss) were observed after traditional dehulling, either manual or mechanical. Biofortified varieties showed similar behaviour but their phytate/zinc molar ratio was still improved. During milling in local mill with grindstones, iron contamination occurred, and tripled the initial iron content. But the bioaccessibility of this contaminant iron was very low. The acceptability of the biofortified varieties of millet, tested on various dishes, was lower than that of the local variety. The improvement of the processing methods combined with the use of biofortified varieties could be advantageously promoted to contribute to alleviate iron and zinc deficiencies.

Key words: micronutrient, bioaccessibility, millet, sorghum, dehulling, grinding, biofortification

Discipline: Nutrition et Sciences des Aliments

Mots-clés : micronutriments, bioaccessibilité, mil, sorgho, mouture, décorticage, biofortification.

Intitulé du laboratoire : UMR204 NUTRIPASS, IRD (Institut de Recherche pour le Développement) Montpellier
