

**UNIVERSITE MONTPELLIER 2**  
**SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

**THESE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER 2**

*Discipline : Nutrition et Sciences des aliments*

*Ecole doctorale : Sciences des Procédés – Sciences des Aliments*

présentée et soutenue publiquement

par

**Nguyen Van Hoan**

le 05 Décembre 2008

**Titre :**

**Conditions d'utilisation d'un «cuiseur-extrudeur  
à très faible coût» pour la fabrication de farines  
infantiles au Vietnam**

**JURY**

M. BOUNIE Dominique	Ecole Polytechnique Universitaire de Lille	Examineur
M. CAPORICCIO Bertrand	Université Montpellier 2	Président du jury
M. GRONGNET Jean-François	Agrocampus Ouest	Rapporteur
M. TRECHE Serge	IRD Madagascar	Directeur de Thèse
M. VAN CAMP John	Université de Ghent	Rapporteur

## Remerciements

Du fond du cœur, je tiens à exprimer ma particulière gratitude à M. Serge TRECHE pour avoir accepté de diriger mes travaux de recherche et de m'encadrer au cours de ma formation en DEA, puis en thèse ainsi que pour les recherches menées au sein du programme Fasevie. Ses précieux conseils, sa rigueur scientifique, sa sollicitude, sa gentillesse, sa détermination communicative, la pertinence de ses critiques, son indéfectible soutien sont quelques unes des qualités qui ont permis la réalisation de ces travaux. Sans lui, je n'aurais très probablement pas réalisé cette thèse.

Je tiens à dire combien je suis redevable à Mme Claire MOUQUET-RIVIER d'avoir bien voulu accepter d'être co-encadrante et pour m'avoir beaucoup conseillé et aidé au cours de la réalisation et de la rédaction de cette thèse.

Je remercie sincèrement MM. Jean-Marie NAVARRO et Bruno BLONDIN (*Université Montpellier 2*) pour avoir accepté mon inscription à l'école doctorale et MM. Francis DELPEUCH et Jacques BERGER (*UR106, IRD Montpellier*) pour m'avoir accueilli au sein de leur unité de recherche.

Je suis très reconnaissant à M. Jean-François GRONGNET (*Agrocampus Ouest*) et M. John VAN CAMP (*Université de Ghent, Belgique*) d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et à M. Bertrand CAPORICCIO (*Université Montpellier 2*) et M. Dominique BOUNIE (*Ecole Polytechnique Universitaire de Lille*) pour leur participation au jury.

Je voudrais remercier M. Pierre BESANÇON (*Université Montpellier 2*), M. Christian MESTRES (*CIRAD, Montpellier*) et Mme Christèle ICARD-VERNIERE (*UR106, IRD*) d'avoir accepté de faire partie de mon comité de thèse.

Mes remerciements vont à Bertrand SALVIGNOL et Pham Van PHU, qui m'ont toujours considéré comme leur « frère », pour leur aide, leur amitié ainsi que pour leur participation appréciée à une des études d'ingéré.

Je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à Mme Vu Thi THU, mon professeur à l'université d'Hanoi, mais aussi ma « tante » à qui je continuerai à témoigner mon respect, pour ses conseils, son soutien permanent. Je remercie vivement M. CAO Van Rang pour sa gentillesse, ses aides, son soutien permanent durant mes séjours à Montpellier.

J'adresse ma reconnaissance à M. Jacques BERGER, pour son amitié, ses encouragements, son soutien, sa participation à une étude d'ingéré ainsi que pour son aide efficace au moment de la finalisation des formalités de bourses et de stages auprès de l'Ambassade de France. Ma reconnaissance va aussi à M. Jean-Pierre GUYOT pour sa sympathie, sa gentillesse, ses conseils judicieux et le soutien qu'il m'a apporté.

Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans le financement du programme Fasevie mené par le GRET et l'IRD. Je tiens à remercier particulièrement Chantal MONVOIS et Olivier BRUYERON pour avoir permis que mes travaux s'inscrivent dans le programme Fasevie et pour les conseils, les encouragements, la confiance et la gentillesse qu'ils m'ont prodigués.

Mes remerciements vont également à Mme Christèle ICARD-VERNIERE pour son aide précieuse tout au long de ce travail ainsi qu'à Isabelle ROCHETTE et Christian PICQ pour leur aide efficace et généreuse lors de la réalisation des dosages au laboratoire et à Sabrina EYMARD-DUVERNAY pour son aide dans la réalisation des analyses statistiques des données.

Je voulais remercier l'ensemble des membres de l'UR 106 de l'IRD, M. Yves MARTIN-PREVEL, Mme Sylvie AVALONNE, M. Yves KAMELI, M. Pierre TRAISSAC, M. Bernard MAIRE, Mme Christèle HUMBLLOT, Mme Catherine PHILIBERT... pour leur gentillesse, leurs nombreux conseils et les échanges fructueux que nous avons eus.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble de l'équipe du GRET et de Fasevie, François GEAY, Jacques MONVOIS, Arnaud LAILLOU, Jean-Philippe FONTELLE, Damien THIBAUT, Patrice LAMBALLE, Eric, Olivier, Stéphane, Nathalie, Son, Hieu, Thang, Le Linh, Hoai Linh, Ninh, Agnès, Claire.... pour leur collaboration et le soutien qu'ils ont apporté aux activités de recherche du programme Fasevie. Un grand merci à l'équipe du CTC, de l'usine Nufavie et à celle du centre de santé préventive de Quang Nam pour la qualité des services qu'ils nous ont rendus durant la thèse.

Je n'oublierai pas non plus de remercier M. Biégo SAMSSONNA, M. Thinh, Issaka, Moctar, Mathieu, Claire, Peggy, Albane, et tous les ouvriers de la CTRAPA pour leur amitié et leur collaboration pendant mon séjour à Ouagadougou.

Une pensée particulière à M. Dao The Anh qui m'a aidé à finaliser les formalités des stages financés par la Bourse de Formation Continue de l'IRD. Un merci sincère à M. Vu Trong Binh et aux personnels du DSA pour leur amitié et leur sympathie.

Je remercie chaleureusement les enfants, les mères, les volontaires de la province de Quang Nam qui ont participé avec beaucoup de motivation aux études d'ingérés.

J'aimerais dire ici le plaisir que j'ai eu à rencontrer, que ce soit à Ouagadougou, à Montpellier ou à Hanoi, Laurencia, Fabienne, Mourad, Andréina, Isabelle, Youna, Hélène, Marie, Aracelli, Hassane, Thuy, Huong, Tuan, Duy, Minh, Son, Dong, Lan, Jinghong, David, Menja, Tahirou, Séverine, Ruben, Prosper ... quelles que soient leurs nationalités et leurs langues maternelles.

La réalisation de cette thèse qui a nécessité cinq séjours de 3 mois en France n'a été possible que grâce aux bourses qui m'ont été accordées par le Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France à Hanoi et par le Département Soutien et Formation de l'IRD. Je tiens à les remercier pour leur générosité. Mes remerciements vont aussi aux partenaires financiers du programme Fasevie qui a fourni le cadre indispensable à la réalisation de cette thèse : la région Nord-Pas de Calais, le Ministère français des Affaires étrangères, l'Union européenne et le Comité français pour l'Unicef.

Enfin, mes remerciements s'adressent tout particulièrement à l'ensemble de ma famille qui m'a beaucoup aidé pendant ma formation depuis 2003. Un remerciement spécial est réservé à ma femme, Huong, qui a dû accepter mes voyages tous les trois mois depuis le début de la thèse. Sans son aide, je n'aurais très probablement pas pu la mener au bout. Je ne peux pas terminer sans saluer mon bébé, Doan Nguyen, le fruit de notre couple, qui encourage son papa par ses gestes et sourires.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	1
<b>Chapitre I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	5
1. Définition, caractéristiques requises et modes de production pour les farines infantiles	6
2. Intérêts et contraintes de la cuisson-extrusion	20
3. Facteurs influant sur les niveaux d'ingéré des nourrissons et des jeunes enfants	45
<b>Chapitre II : MATÉRIÉLS ET MÉTHODES</b>	50
1. Matières premières	51
2. Équipements	53
3. Protocole des études réalisées	54
4. Détermination des teneurs en nutriments et facteurs anti-nutritionnels	65
5. Enregistrements de paramètres et déterminations physico-chimiques	67
<b>Chapitre III : EFFETS DE LA CONSOMMATION DE BOUILLIES FORTIFIÉES DE HAUTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE SUR LES INGÉRÉS DE NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM</b>	70
Effects of the consumption of high energy dense and fortified gruels on energy and nutrient intakes of 6-to-10-month-old Vietnamese infants. <i>Van Hoan N, Van Phu P, Salvignol B, Berger J, Trèche S. Projet d'article à soumettre à la revue Appetite</i>	73
<b>Chapitre IV : EFFETS DES MATIÈRES PREMIÈRES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES EXTRUDATS ET DES BOUILLIES</b>	88
IV-1. Effects of starch, lipid and moisture contents on extrusion behavior and extrudate characteristics of rice-based blends prepared with a very-low-cost-extruder. <i>Van Hoan N, Mouquet-Rivier C, Trèche S. Article accepté le 04/04/2008 par Journal of Food Process and Engineering</i>	92
IV-2: Effet de la nature de la source amyliacée utilisée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies. <i>Projet d'article</i>	113

<b>Chapitre V: EFFETS DE MODIFICATIONS DE LA VIS SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES EXTRUDATS ET DES BOUILLIES</b>	131
V-1: Effets de la longueur de la vis en fonction de la composition des mélanges <i>Projet d'article</i>	133
V-2: Effets du niveau d'usure de la vis en fonction de la composition des mélanges <i>Projet d'article</i>	152
<b>Chapitre VI : INFLUENCE DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DES FARINES INFANTILES SUR LES NIVEAUX D'INGÉRÉS EN ÉNERGIE ET EN NUTRIMENTS DES NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM</b>	162
Effect of the technology used to increase energy density of gruels on energy and nutrient intakes of 6-10-month-old Vietnamese infants. <i>Van Hoan N, Mouquet-Rivier C, Eymard-Duvernay S, Trèche S. Projet d'article</i>	165
<b>CONCLUSION</b>	178
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	184
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	202
<b>ANNEXE</b>	209

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

- Figure I/1:** Représentation schématique de la vis, du fourreau et de la filière de CE-TFC de 2<sup>nd</sup> génération (*coupe longitudinale*) 17
- Figure I/2:** Schéma général de préparation et des mesures effectuées pour la production d'une farine « à cuire » en utilisant le CE-TFC de seconde génération 19
- Figure I/3:** Schéma de principe d'un cuiseur-extrudeur mono-vis (*d'après Agassant et al., 1986; cité par Mercier, 1994*) 21
- Figure I/4:** Possibilités de montage des vis de cuiseurs-extrudeurs multi-vis (*d'après White, 1991*) 22
- Figure I/5:** Modèle explicatif du niveau d'ingéré en énergie et en nutriments à partir des bouillies (*d'après Trèche, 2002*) 45

## Chapitre III

- Figure III/1:** Contribution of different types of CFs to energy requirements 84

## Chapitre IV

- Figure IV-1/1:** Schematic representation of the screw of the VLCE EX800 96
- Figure IV-1/2:** Response surface and direct effects of starch, lipid and moisture content on expansion ration 101
- Figure IV-1/3:** Response surface and direct effects of starch, lipid and moisture content on the decrease in lipid content during extrusion 103
- Figure IV-1/4:** Response surface and direct effects of starch, lipid and moisture content on degree of starch gelatinisation 104
- Figure IV-1/5:** Response surface and direct effects of starch, lipid and moisture content on viscosity of gruel prepared by boiling with 16g/100g for 5 min 108
- Figure IV-2/1:** Activités antitrypsiques des mélanges avant et après la cuisson-extrusion 123
- Figure IV-2/2:** Taux de réduction de l'activité antitrypsique au cours de la cuisson-extrusion 123

## Chapitre V

<b>Figure V-1/1A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour température à la filière	142
<b>Figure V-1/2A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour la pression à la filière	143
<b>Figure V-1/3A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour la dégrée de gélatinisation	146
<b>Figure V-1/4A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour l'indice d'instantanéité	148
<b>Figure V-2/1A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour température à la filière	156
<b>Figure V-2/2A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour la pression à la filière	157
<b>Figure V-2/3A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour l'expansion des extrudats	157
<b>Figure V-2/4A et B:</b> Réponse surface et graphique de Pareto standardisé pour le gonflement des extrudats	158

## Chapitre VI

<b>Figure VI/1:</b> Effect of the canteen (from 1 to 9) on the characteristics of gruels	171
<b>Figure VI/2:</b> Effect of the age of the child on the day of consumption on the mean amount of gruel consumed per meal	172
<b>Figure VI/3:</b> Effect of the moment of meal consumption (morning or afternoon) on the amount of gruel consumed	173

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

<b>Tableau I/1:</b> Spécifications microbiologiques pour les farines infantiles vendues au Vietnam ( <i>Ministère de la Santé, 2001</i> )	6
<b>Tableau I/2:</b> Seuils de fortification autorisés pour les vitamines et minéraux dans les farines infantiles ( <i>Ministère de la Santé, 2003</i> )	7
<b>Tableau I/3:</b> Fiche technique du cuiseur-extrudeur à très faible coût de première génération	15
<b>Tableau I/4:</b> Composition de mélanges avant extrusion	16
<b>Tableau I/5:</b> Fiche technique du cuiseur-extrudeur	18
<b>Tableau I/6:</b> Synthèse des effets de variations de différents paramètres ( <i>en colonne</i> ) au cours de la production d'une farine infantile à base de riz (65,0%), sésame (7,4%) et soja (27,6%) sur certaines de ses caractéristiques physico-chimiques ( <i>en ligne</i> )	19
<b>Tableau I/7:</b> Avantages et inconvénients de la cuisson-extrusion à faible coût mise en œuvre dans les pays en développement	23
<b>Tableau I/8:</b> Effet de la diarrhée sur les ingérés énergétiques des jeunes enfants	47

## Chapitre II

<b>Tableau II/1:</b> Composition globale des matières premières utilisées dans le cadre des études réalisées au Vietnam	51
<b>Tableau II/2:</b> Composition des compléments minéraux et vitaminiques ( <i>pour 100g MS</i> )	52
<b>Tableau II/3:</b> Composition globale des matières premières utilisées pour les études au Burkina Faso	52
<b>Tableau II/4 :</b> Composition des 9 mélanges correspondant aux teneurs en amidon et en lipides souhaitées	57
<b>Tableau II/5:</b> Valeur des variables indépendantes ( <i>Plan factoriel 3<sup>x</sup>3</i> )	58
<b>Tableau II/ 6:</b> Composition en matières premières des quatre farines expérimentales ( <i>en g pour 100 g de MS de farine</i> )	63

## Chapitre III

<b>Tableau III/1:</b> Sample distribution by age and group	75
<b>Tableau III/2:</b> Composition of <i>Favina</i> and <i>Favilase</i> flours (g/100g)	75
<b>Tableau III/3:</b> Principal characteristics of infants	78
<b>Tableau III/4:</b> Physicochemical characteristics and feeding duration of gruels	79

<b>Tableau III/5:</b> Energy and nutrient contents and nutrient densities of daily average samples of gruels and other CFs	80
<b>Tableau III/6:</b> Daily frequencies of breastfeeding and meals with gruels or other CFs	81
<b>Tableau III/7:</b> Comparison of amounts of food consumed and of energy intakes by meal depending on the type of CFs	82
<b>Tableau III/8:</b> Comparison of total energy and macronutrients daily intakes from all CFs depending of the type of gruel proposed	82
<b>Tableau III/9:</b> Comparison of total micronutrient intakes ( <i>mg/day</i> ) per day from all CFs depending of the type of gruel proposed	83
<b>Tableau III/10:</b> Comparison of amounts of food consumed and of energy intakes by meal depending on the class age of infants	85

## Chapitre IV

<b>Tableau IV-1/1:</b> Composition of raw materials	95
<b>Tableau IV-1/2:</b> Values of independent variables (factorial 3 <sup>x</sup> 3 plan)	95
<b>Tableau IV-1/3:</b> Composition of blends prepared with different starch and lipid contents	98
<b>Tableau IV-1/4:</b> Coefficients of regression models for the response variables	100
<b>Tableau IV-1/5:</b> Water absorption and water solubility before and after extrusion	106
<b>Tableau IV-2/1:</b> Composition globale de différentes céréales et de soja testées en cuisson-extrusion au Burkina Faso	116
<b>Tableau IV-2/2:</b> Composition des mélanges préparés avec différentes teneurs en lipides et en amidon	117
<b>Tableau IV-2/3:</b> Indice d'expansion des extrudats préparés à partir de différentes sources amylacées	121
<b>Tableau IV-2/4:</b> Perte en lipides des extrudats pendant l'extrusion (g/100g MS)	122
<b>Tableau IV-2/5:</b> Taux de gélatinisation de l'amidon d'extrudats de mélanges à base de différentes sources amylacées	124
<b>Tableau IV-2/6:</b> Influence de la nature de la source amylacée et du couple teneurs en lipides et en amidon sur la viscosité apparente (Pa.s) de bouillies préparées par cuisson à une teneur en matière sèche de 16 g MS / 100 g de bouillie.	125
<b>Tableau IV-2/7:</b> Indice d'instantanéité des farines obtenues à partir d'extrudats de mélanges contenant différentes sources amylacées	126

## Chapitre V

<b>Tableau V-1/1:</b> Composition de matières premières	135
<b>Tableau V-1/2:</b> Composition des 9 mélanges correspondant aux teneurs en amidon et en lipides souhaitées	135
<b>Tableau V-1/3:</b> Valeurs des variables indépendantes (Plan factoriel 3 <sup>x</sup> 3)	139
<b>Tableau V-1/4:</b> Comportement en extrusion et caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies en fonction de la longueur de la vis et des teneurs en amidon et en lipides des mélanges ( <i>les valeurs données sont des moyennes calculées, pour chaque combinaison de longueur de vis et de teneur en amidon, à partir des 3 valeurs obtenues pour des teneurs en lipides différentes</i> )	140
<b>Tableau V-1/5:</b> Coefficients de régression ajustés aux données	141
<b>Tableau V-2/1 :</b> Comportement en extrusion et caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies en fonction de niveau d'usure de la vis et des teneurs en amidon et en lipides des mélanges ( <i>les valeurs données sont des moyennes calculées, pour chaque combinaison de niveau d'usure de la vis et de teneur en amidon, à partir des 3 valeurs obtenues pour des teneurs en lipides différentes</i> )	154
<b>Tableau V-2/2 :</b> Coefficients de régression ajustés aux données	155

## Chapitre VI

<b>Tableau VI/1:</b> Design of the study	167
<b>Tableau VI/2:</b> Composition of study flours after adjusting sugar content	168
<b>Tableau VI/3:</b> Energy content and main nutrient composition of study flours	169
<b>Tableau VI/4:</b> Main characteristics of infants	170
<b>Tableau VI/5:</b> Characteristics of the gruels distributed to the infants	171
<b>Tableau VI/6:</b> Mean amounts of gruel consumed and energy intakes in function of the canteen	172
<b>Tableau VI/7:</b> Mean amounts of gruel and energy intakes by type of gruel	174
<b>Tableau VI/8:</b> Nutrients intakes per day by type of gruels	175

## Conclusion

<b>Tableau VII/1:</b> Synthèse des effets des modifications étudiées au niveau des matières premières et de l'ensemble vis/fourreau sur le comportement en extrusion, sur les caractéristiques des extrudats et sur la consistance de bouillies.	181
--	-----

# LISTE DES PHOTOS

## Chapitre I

**Photo I/1:** Le cuiseur-extrudeur de 1<sup>ère</sup> génération 15

**Photo I/2:** Le cuiseur-extrudeur de 2<sup>nd</sup> génération (EX800) et ses principales composantes 17

## Chapitre II

**Photo II/1:** Le torrificateur à soja. 53

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AC: Aliment de Complément  
ADF: Acid Detergent Fiber  
AFNOR: Association Française de NORmalisation  
ANOVA: ANalyse Of VAriance  
AOAC: Association of Official Analytical Chemists  
CE-TFC/VLCE: Cuiseur-Extrudeur à Très Faible Coût/ Very-Low -Cost Extruder  
CTC: Center for Technology transfer and Consultancy on investment  
CTRAPA: Centrale de TRansformation des Produits Agricoles  
DG: Degree of Gelatinization  
EDTA: EthylèneDiamineTetraAcétate  
ET: Ecart-Type  
FAO: Food and Agriculture Organization  
FASEVIE: FARines de SEvrage au VIetnam  
GRET: Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques  
HAFREC, HAnoi Food and Research Experimentation Center  
IP5, IP4... *Myo*-Inositol 5-Phosphates, *Myo*-Inositol 4-Phosphates...  
IP6 *Myo*-Inositol 6-Phosphates  
IRD: Institut de Recherche pour le Développement  
LEC: Low-Cost Extruder  
MS, DM: Matière Sèche, Dry Matter  
MT: Millions de Tonnes  
NIN: Institut National de Nutrition  
TG: taux de Gélatinisation  
UNICEF: United Nation Children's Fund  
UR: Unité de Recherche  
USA: United States of America  
USAID: United States Agency for International Development  
USD: United States of America Dollar  
VLCE: Very-Low-Cost Extruder  
WAI: Water Absorption Index  
WHO, OMS: World Health Organisation, Organisation Mondiale de la Santé  
WSI: Water Solubility Index

# Introduction

## Générale

## Introduction générale

La malnutrition et la pauvreté ont pour conséquences la détérioration de l'état de santé et une forte mortalité chez les mères et leurs enfants dans les pays en développement (FAO, 2005). Dans la plupart des contextes, on considère que la malnutrition contribue pour environ la moitié aux causes de décès des enfants de moins de 5 ans (Pelletier *et al.*, 1993; 1995; WHO/UNICEF, 2006). De plus, la malnutrition se répercute sur la croissance physique et le développement psychomoteur des enfants ainsi que sur leurs capacités d'apprentissage et leur aptitude ultérieure au travail.

Dans les pays en développement, notamment en Asie du Sud, la malnutrition infantile est très répandue. Selon le rapport sur la situation des enfants dans le monde de l'UNICEF (2008), la prévalence de retard de croissance chez les enfants de moins de cinq ans pendant la période 2000-2006 atteignait 32% sur l'ensemble des pays en développement et 46 % en Asie du Sud. Au Vietnam, bien que la situation nutritionnelle des enfants de moins de 5 ans se soit considérablement améliorée depuis 1985, 36,5% d'entre eux étaient encore atteints de retard de croissance en 2000 (NIN, 2003) et on estime que 30% l'étaient encore pendant la période 2000-2006 (UNICEF, 2008).

Dans la plupart des contextes des pays en développement, une des principales raisons de cette situation est la mauvaise qualité de l'alimentation donnée aux enfants à partir de 6 mois en complément de l'allaitement maternel et, en particulier, la faible densité en énergie et en nutriments des premiers aliments proposés aux enfants. Ces aliments consistent généralement en des bouillies ou pseudo-bouillies généralement préparées à partir de farines de céréales, seules ou mélangées avec les légumineuses, qui ne subissent qu'une simple cuisson dans l'eau (Trèche et Mbome, 1999). Pendant la cuisson, la température élevée et la présence d'eau provoquent le gonflement des grains d'amidon et l'augmentation de la viscosité de la bouillie. Pour conférer aux bouillies une consistance suffisamment fluide, les mères limitent la proportion de farine et d'autres ingrédients (*légume, viande...*) par rapport à l'eau et préparent des bouillies dont la densité en énergie et en nutriments est insuffisante pour compléter les apports du lait maternel et permettre la couverture des besoins nutritionnels des enfants (WHO, 1998). Produire, à faible coût et à partir de matières premières disponibles localement, des farines infantiles de bonnes qualités sanitaire et nutritionnelle permettant de préparer des bouillies à haute densité en énergie et nutriments apparaît donc comme un élément important de toute stratégie visant à améliorer la situation nutritionnelle des jeunes enfants.

Le Vietnam est 2<sup>ème</sup> pays exportateur de riz dans le monde et cette céréale y est considérée comme un composant indispensable de chaque repas. Il est introduit très tôt dans l'alimentation de complément des enfants sous forme des bouillies (*bot*) ou pseudo-bouillies (*chao*), ou encore de gâteaux ou de snacks (Trèche *et al.*, 2000). Par ailleurs, on cultive au Vietnam une grande diversité de produits agricoles à hautes teneurs en lipides et protéines et pouvant être utilisés en alimentation infantile (*soja, arachide, sésame...*). Mais, malgré l'abondance des matières premières, la plupart des farines infantiles proposées au Vietnam sont des produits importés de prix inaccessible pour la plupart des mères des familles dont le niveau de vie reste très bas. En 2003, le prix d'un kilogramme de riz était de 3000 VN dôngs (soit ~20 centimes USD) tandis que celui d'une farine infantile importée était de 98000 VN dôngs (soit ~6,3 USD).

Parmi les procédés utilisables pour produire localement dans un contexte comme le Vietnam des farines infantiles ayant toutes les caractéristiques requises, la cuisson-extrusion apparaît comme particulièrement intéressante dans la mesure où elle permet d'obtenir aussi bien des farines instantanées que des farines à cuisson rapide (Del Valle *et al.*, 1981; Harper, 1981; Harper et Jansen, 1985; Mensa-Wilmot *et al.*, 2001) et qu'elle réduit les teneurs en certains facteurs anti-nutritionnels et la charge en microorganismes des matières premières (Cheftel, 1994; Alonso *et al.*, 2000; Abd El-Hady et Habiba, 2003). Toutefois, il y a une dizaine d'années, en raison du coût élevé de la plupart des équipements disponibles sur le marché et de l'utilisation encore limitée de la cuisson extrusion pour la transformation agro-alimentaire au Vietnam, aucune initiative visant à mettre au point des cuiseurs-extrudeurs de coût abordable pour la fabrication de farines infantiles n'avait été entreprise. C'est dans ce contexte que le programme Fasevie a mis au pont à partir de 1997, en collaboration avec des instituts vietnamiens spécialisés, des équipements et des procédés permettant de mettre sur le marché des farines infantiles produites localement à des prix abordables.

Le programme Fasevie est un des composants de Nutridev, programme visant à prévenir la malnutrition par l'amélioration de l'alimentation infantile, mené par le GRET (*Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques*) et l'IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) en Asie (Vietnam, Cambodge), à Madagascar et au Burkina Faso. Initié en 1994 au Vietnam (Berger *et al.*, 2004), le programme Fasevie s'était fixé comme premier objectif de définir des procédés et un mode de fonctionnement pour de petites unités de production de farines infantiles (*10 tonnes par unité et par mois*) à partir des matières premières agricoles disponibles au Vietnam. Un premier prototype de «cuiseur-extrudeur à très faible coût» (CE-TFC) a été mis au point et a permis de vérifier son aptitude à préparer, dans certaines conditions, des farines instantanées à base de riz, soja et sésame (Mouquet *et al.*, 2003). Un second prototype de plus grande capacité et permettant de faire subir aux matières premières, pendant un temps de séjour plus long, une température et une pression plus élevées a été proposé et a fait l'objet d'études visant à définir les conditions de son utilisation pour la fabrication de différents types de farines infantiles. Après des études préliminaires réalisées à l'occasion de mon stage de DEA (Van Hoan, 2004), ce CE-TFC de seconde génération a été utilisé pour réaliser des expérimentations menées, d'une part, dans l'unité pilote du programme Fasevie à Hanoi et, d'autre part, dans l'atelier de l'entreprise CTRAPA (*Centrale de Transformation des Produits Agricoles*) à Ouagadougou dans le cadre d'un transfert de technologie Sud-Sud organisé entre le Vietnam et le Burkina Faso. Les échantillons prélevés, avant et après cuisson-extrusion, au cours de ces expérimentations ont été analysés pendant les cinq séjours de trois mois que j'ai eu l'occasion de faire au Laboratoire de l'UR106 au centre IRD de Montpellier pour étudier l'effet de leurs modalités de préparation sur les caractéristiques physico-chimiques et nutritionnelles des produits. Enfin, les effets des différences de caractéristiques conférées aux farines par l'utilisation de procédés de préparation différents sur les niveaux d'ingérés à partir des bouillies préparées à partir de ces farines ont été mesurés au cours d'études menées en milieu rural au Vietnam avec des enfants de 6 à 10 mois.

L'objectif général de la thèse est donc de compléter les connaissances nécessaires à la maîtrise de l'utilisation et du transfert de «cuiseurs-extrudeurs à très faible coût» mis au point au Vietnam pour la production locale de farines infantiles à moindre coût à partir de matières agricoles disponibles. Le manuscrit comprend 8 parties à l'intérieur desquelles les résultats (*chapitres III à VI*) sont présentés sous forme d'articles (*accepté, soumis ou en cours de finalisation*):

- La première partie est une introduction générale présentant le contexte dans lequel la thèse a été initiée et réalisée;

- Le chapitre I est une étude bibliographique dont les objectifs sont de définir les caractéristiques à conférer aux farines infantiles, de passer en revue la nature et les effets des technologies pouvant être utilisées pour la fabrication de farines infantiles notamment la cuisson-extrusion, et de situer l'importance des certaines caractéristiques des bouillies parmi les facteurs pouvant influencer sur leurs niveaux d'ingérés par des jeunes enfants;
- Le chapitre II présente les matériels, matières premières, équipements, protocoles d'études et méthodes d'analyse utilisés dans le cadre de la thèse;
- Le chapitre III, correspond à un projet d'article en anglais, visant à vérifier l'intérêt nutritionnel des farines instantanées en comparant les niveaux d'apports nutritionnels de nourrissons de 6 à 10 mois, bénéficiant ou non de la distribution de bouillies préparées à partir de farines instantanées ou de bouillies préparées en rajoutant un complément alimentaire à de la farine de riz;
- Le chapitre IV est relatif à l'effet de la nature et des caractéristiques des matières premières utilisées sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies préparées à partir de ces extrudats. Une première partie s'intéresse aux effets de variations simultanées des teneurs en amidon, lipides et eau dans les mélanges. La seconde partie est relative à l'effet de la nature de la source amyliacée (*riz, maïs blanc, maïs jaune, mil, sorgho*) utilisée comme ingrédient principal des mélanges ;
- Le chapitre V concerne les effets de modifications de la vis et du fourreau du CE-TFC sur le comportement en cours d'extrusion et sur les caractéristiques physicochimiques et biochimiques des extrudats. Une première partie compare les effets de variation de la longueur de la vis. Une seconde s'attache à mesurer les effets de l'usure de la vis et du fourreau;
- Le chapitre VI a pour but de vérifier l'acceptabilité et le niveau d'ingéré par des enfants de 6 à 10 mois de bouillies obtenues à partir de farines de caractéristiques différentes: farines instantanées obtenues par cuisson-extrusion en conditions sévères; farines à cuisson rapide obtenue par cuisson-extrusion en conditions modérées et ajout d'amylases industrielles; farines à cuire avec ajout d'amylases; farines à cuire sans amylase;
- Enfin, la dernière partie correspond à une conclusion sur les résultats obtenus et donne des perspectives concernant l'utilisation du CE-TFC pour la fabrication de farines infantiles au Vietnam et dans les pays en développement dans lesquels son transfert est envisageable.

# Chapitre I

## ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

# Chapitre I:

## ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### 1. Définition, caractéristiques requises et modes de production pour les farines infantiles

#### 1.1. Définition des farines infantiles

Les farines infantiles sont des aliments à base de matières premières agricoles qui après avoir été réduites en farines sont préparées sous forme de bouillies pour être servies aux nourrissons de plus de 6 mois et aux jeunes enfants.

#### 1.2. Caractéristiques à conférer aux farines infantiles

Pour qu'elles soient effectivement consommées et avoir un intérêt nutritionnel, les farines infantiles doivent non seulement posséder un certain nombre de qualités (*sanitaire, nutritionnelle et organoleptique*), mais aussi être commodes d'usage, bon marché, présentées dans un emballage suffisamment attractif et faire l'objet de campagnes de promotion.

##### 1.2.1. Qualité sanitaire

Comme tous les aliments, les farines infantiles doivent tout d'abord être de bonne qualité hygiénique. Les agents pathogènes et les contaminants chimiques (pesticides, métaux lourds...) doivent être absents ou en quantité inférieure aux seuils de toxicité. Toutes les précautions doivent être prises au moment de leur fabrication et pendant leur stockage afin d'empêcher leur contamination biologique ou chimique et l'apparition de nouvelles substances toxiques. Les facteurs antinutritionnels doivent normalement être éliminés ou réduits en dessous d'un seuil acceptable.

La qualité sanitaire d'une farine doit être conforme aux les recommandations internationales et à la législation des pays où cette farine est fabriquée ou vendue. Au Vietnam, le Ministère de la Santé a sorti en 2001 un arrêté fixant les limites acceptables pour certains microorganismes dans des aliments (Tableau I/1)

**Tableau I/1:** Spécifications microbiologiques pour les farines infantiles vendues au Vietnam (Ministère de la Santé, 2001).

Microorganismes*	Farine à cuire	Farine instantanée
<i>Bactéries aérobies totales</i>	$<10^6$	$<10^4$
<i>Coliformes</i>	$<10^3$	$<10$
<i>Escherichia coli</i>	$<10^2$	$<3$
<i>Staphylococcus aureus</i>	$<10^2$	$<10$
<i>Clostridium perfringens</i>	$<10^2$	$<10$
<i>Bacillus cereus</i>	$<10^2$	$<10$
<i>Spores totales (levures et moisissures)</i>	$<10^3$	$<10^2$

\* Par g de farine

### 1.2.2. Composition en nutriments

La qualité nutritionnelle des farines infantiles dépend en grande partie de leur composition chimique. Les protéines, les lipides, les glucides, les vitamines et minéraux sont les nutriments les plus importants et doivent être présents dans des proportions équilibrées. Les fibres influent de façon importante sur la digestibilité des farines. D'autres substances peuvent jouer un rôle biologique important comme les antioxydants, les facteurs de protection, les peptides... (Besançon, 1999). La formule d'une farine complète doit permettre de couvrir tous les besoins nutritionnels ou apports recommandés des enfants. Par ailleurs, le choix des ingrédients entrant dans la formule des farines devrait tenir compte des habitudes alimentaires des populations.

La fortification en vitamines et minéraux des farines infantiles est une stratégie efficace dans la lutte contre les carences en vitamines et minéraux chez des jeunes enfants des pays en développement. Au Vietnam, le Ministère de la Santé a réglementé en 2003 les modalités de fortification des farines. Pour pouvoir être incorporés dans des farines, les minéraux et vitamines incorporés doivent satisfaire les conditions suivantes:

- ne pas modifier certaines caractéristiques du produit (*couleur, goût, odeur, consistance...*)
- ne pas raccourcir la période pendant laquelle la farine peut être conservée;
- être contrôlée au niveau national en terme de qualité, en particulier hygiénique.

Les teneurs maximales et minimales autorisées dans les farines infantiles sont données dans le tableau I/2.

**Tableau I/2:** Seuils de fortification autorisés pour les vitamines et minéraux dans les farines infantiles (Ministère de la Santé, 2003).

Micronutriments	Quantités fixées pour 100 kcal	
	Minimum	Maximum
1. Vitamine A	250 IU	500 IU
2. Vitamine D	40 IU	80 IU
3. Vitamine C	8 mg	40 mg
4. Vitamine B1	40 µg	200 µg
5. Vitamine B2	60 µg	300 µg
6. Acide folique	4 µg	20 µg
7. Vitamine B12	0,15 µg	1,5 µg
8. Vitamine K	4 µg	40 µg
9. Calcium (Ca)	50 mg	250 mg
10. Fer (Fe)	0,5 mg	2,5 mg
11. Zinc (Zn)	0,3 mg	2,0 mg

### 1.2.3. Biodisponibilité des nutriments

La biodisponibilité des nutriments contenus dans les farines infantiles dépend principalement de la nature de ces nutriments, de leur environnement physicochimique dans la matrice alimentaire (*pH, facteurs anti-nutritionnels*) et des procédés technologiques subis par cette matrice (WHO, 1998; Besançon, 1999). Comme les systèmes enzymatiques et les capacités d'absorption des nutriments à travers la muqueuse intestinale sont encore très limités chez les jeunes enfants, les farines infantiles doivent être faciles à digérer. Un choix approprié de technologies est nécessaire pour la fabrication de farines infantiles afin de leur conférer toutes les caractéristiques requises (*solubilité des protéines, sensibilité des amidons aux amylases, biodisponibilité des minéraux...*).

Le choix des matières premières utilisées est très important dans la mesure où la teneur et la biodisponibilité d'un nutriment varient d'un produit à l'autre. Pour les micronutriments les plus importants (*rétinol, vitamines D et E, riboflavine, vitamine B12, calcium et zinc*), elles sont généralement beaucoup plus élevées dans les aliments d'origine animale que dans les produits végétaux. La biodisponibilité des minéraux dans la plupart des produits végétaux est particulièrement faible, en particulier celle du fer, du zinc et du calcium dans les céréales et les légumineuses en raison de leurs teneurs élevées en phytates (WHO, 1998). Lorsqu'on définit la formule d'une farine de bonne qualité nutritionnelle, il est nécessaire de prendre en compte les teneurs et la biodisponibilité des nutriments dans les aliments utilisés mais aussi les pertes éventuelles au cours de leur transformation et de leur stockage. Mais compte tenu des faibles teneurs et de la faible biodisponibilité de nombreux micronutriments dans les céréales et légumineuses, un ajout de micronutriments (fortification) est le plus souvent nécessaire pour obtenir des farines infantiles nutritionnellement équilibrées.

#### 1.2.4. Consistance et densité énergétique

A partir de l'âge de 6 mois, l'énergie et les nutriments contenus dans le lait maternel ne sont plus suffisants pour couvrir les besoins nutritionnels des enfants et l'introduction d'aliments de complément est indispensable. Il faut en particulier que les aliments donnés aux enfants en complément du lait maternel, le plus souvent des bouillies, leur permettent d'ingérer suffisamment d'énergie. Or, les bouillies préparées à partir de céréales par simple cuisson dans l'eau ont une densité énergétique beaucoup trop faible. Pour couvrir leurs besoins en énergie, les enfants qui les consomment devraient consommer des quantités très importantes de bouillies ce qui n'est pas possible en raison de leur faible capacité gastrique et du nombre limité de repas que leurs mères peuvent leur proposer compte tenu du peu de temps dont elles disposent (WHO, 1998). Il est donc indispensable d'utiliser des bouillies ayant une densité énergétique suffisante pour permettre aux enfants d'avoir des ingérés énergétiques leur permettant de compléter les apports du lait maternel pour la couverture de leurs besoins (Trèche, 1999). Pour cela il est nécessaire d'utiliser des procédés technologiques appropriés comme certains traitements thermiques (*cuisson-extrusion, soufflage, séchage sur rouleau...*) ou biologiques (*germination, fermentation, incorporation d'enzymes naturelles ou industrielles...*) qui permettent de réduire la viscosité des bouillies et ainsi de les préparer à des densités énergétiques suffisantes. Après ajout d' $\alpha$ -amylases dans des farines à base de petit mil et de maïs permettant, respectivement, d'améliorer la densité énergétique des bouillies de 33 à 102 et de 51 à 107 kcal/100g de bouillie, Vieu *et al.* (2001) au Burkina Faso et Moursi *et al.* (2003) au Congo ont observé des augmentations de, respectivement, 90 et 56% des ingérés énergétiques à partir des bouillies chez des enfants de 6 à 10 mois. L'effet très positif de l'utilisation d'aliments de complément de haute densité énergétique sur les ingérés énergétiques des enfants a également été observé par de nombreux autres auteurs (Trèche, 1996), en particulier Stephenson *et al.* (1994) et Islam *et al.* (2006; 2008).

La consistance optimale des bouillies a fait l'objet de plusieurs études en Afrique (Trèche, 1995; Trèche et Mbomé, 1999; Mouquet et Trèche, 2001; Mouquet *et al.*, 2006) qui ont montré qu'elle pouvait varier en fonction des contextes mais que généralement les jeunes enfants préfèrent des bouillies relativement fluides. La même constatation a été faite au Vietnam pour des bouillies à base de riz (Trinh Bao Ngoc *et al.*, 2006).

Néanmoins, la consistance optimale des bouillies semble varier d'un contexte à l'autre. Lorsqu'on la mesure avec un consistomètre de Bostwick, la distance d'écoulement des bouillies consommées par les enfants Burkinabè de 6 à 12 mois varie généralement entre 100 à 120 mm/s (Trèche, 2002; Traoré *et al.*, 2005) tandis que celle des bouillies consommées par

les enfants vietnamiens de la même classe d'âge est en moyenne de 50 mm/s (Pham Van Phu, 2007).

#### 1.2.5. Qualités organoleptiques

Les qualités organoleptiques (*goût, couleur, texture...*) des farines infantiles influent sur leur acceptabilité (Besançon, 1999). Dans la mesure où ce sont les mères qui décident d'acheter ou d'utiliser les farines pour nourrir leurs enfants, les matières premières utilisées pour leur fabrication doivent leur permettre d'avoir des qualités organoleptiques qui satisfassent non seulement les enfants mais aussi leurs mères. Avant de mettre des farines sur le marché, des tests d'analyse sensorielle auprès des mères ayant des jeunes enfants sont donc nécessaires.

#### 1.2.6. Modes de préparation

La plupart des bouillies utilisées par les enfants comme aliments de complément sont préparées par les mères. Mais avec les modifications des habitudes de vie, le rôle des mères dans les familles n'est plus seulement de nourrir leurs enfants. Elles participent de plus en plus aux activités dans différents secteurs (*agriculture, industrie, commerce...*) et leurs disponibilités en temps pour s'occuper de leurs enfants sont de moins en moins importantes. La préparation d'aliments de complément selon les méthodes traditionnelles, souvent longues et fastidieuses, est de moins en moins fréquente.

La commodité de préparation fait donc de plus en plus partie des qualités que doivent posséder les farines infantiles. Un mode de préparation compliqué limiterait son utilisation par les mères. Une préparation simple (*e.g.*, par simple ajout d'eau) n'utilisant que des ustensiles de cuisine largement répandus (bol, cuillère...) figure parmi les objectifs à prendre en compte lors de la définition de leur mode de fabrication.

#### 1.2.7. Prix

Un prix modéré est également considéré comme une des caractéristiques importantes que doivent avoir des farines infantiles. Le prix de vente d'une farine dépend de plusieurs facteurs: la gamme de produit, le type de clients, la cherté de la vie, la stratégie de marketing du fabricant, la concurrence... Pour les mères des pays pauvres, les farines infantiles ne doivent pas seulement avoir de bonnes qualités sanitaires, nutritionnelles et organoleptiques et être commodes d'usage, mais elles doivent aussi pouvoir être vendues à un prix abordable compte tenu du faible pouvoir d'achat des populations. La communication avec les mères et les communautés, qui nécessitent souvent des campagnes de marketing social, est très importante dans la mesure où la vente de produits à des prix peu élevés peut amener les mères à les considérer comme des produits de bas de gamme et de mauvaise qualité.

La fabrication locale de ces farines, à partir de matières premières localement disponibles en n'utilisant que des procédés technologiques et des emballages peu onéreux, permet généralement d'obtenir des produits qu'il est possible de vendre à des prix raisonnables.

#### 1.2.8. Emballage

L'emballage est un élément important d'une farine infantile au moment de sa mise sur le marché. Au delà de son rôle déterminant pour permettre une bonne conservation des farines, l'emballage est aussi important pour l'image qu'il donne aux clients potentiels. Les conditions que doivent remplir un bon emballage sont les suivantes:

- la matière utilisée doit permettre à l'emballage de préserver les qualités des farines lorsque le stockage est réalisé dans des conditions normales pendant une durée raisonnable;

- être facile d'emploi tant au moment de la fabrication que pendant la distribution et pendant le stockage chez les consommateurs;
- être de forme et de taille appropriée;
- être attractif pour le consommateur et pouvoir contenir toutes les informations requises sur l'étiquette.

Chaque étiquette d'un sachet ou d'une boîte de farine infantile, doit pouvoir contenir des informations sur le type de produit, le type de consommateurs visés, la nature des ingrédients contenus, la composition en nutriments, le mode de préparation, les conditions de stockage, les dates de fabrication et péremption ainsi que les coordonnées du fabricant.

Il est nécessaire d'emballer les farines infantiles sous des conditionnements de taille différente pour répondre aux besoins ou préférences différents des mères. Les farines peuvent être conditionnées dans des boîtes ou sachets de 400g pour les mères qui ont suffisamment d'argent pour en acheter des quantités relativement importantes lorsque les enfants en consomment régulièrement, mais elles doivent aussi être proposées sous des conditionnements plus petits (250 g, 100g, et parfois 35 g correspondant à un seul repas) pour les mères ayant un budget limité ou ayant des enfants ne consommant pas encore régulièrement de farine.

#### 1.2.9. Services accompagnant la vente

Pouvoir proposer de services d'accompagnement au moment de la vente est important pour développer la consommation de produits comme les farines infantiles. Les mères n'ont pas seulement besoin de farines, mais aussi de conseils ou de solutions pour les problèmes qu'elles sont susceptibles de rencontrer aux niveaux du mode de préparation, du stockage après première utilisation et des réactions des enfants. Toutes les précautions doivent être prises au niveau des messages transmis, tant par les fabricants que par les distributeurs, afin de préserver la santé des enfants.

### **1.3. Principaux procédés utilisables pour la production de farines infantiles**

Il peut s'agir de procédés mécaniques, de procédés thermiques mais aussi de procédés biologiques.

#### 1.3.1. Le broyage

Le broyage est un traitement mécanique qui permet de réduire les aliments en particules de taille plus fine. Dans la préparation des farines infantiles, il est considéré à la fois comme un traitement principal et comme un procédé complémentaire.

Sur des matières premières brutes, le broyage peut être utilisé pour réduire les grains de céréales, les graines de légumineuses et/ou les racines ou les tubercules séchés sous forme de farines. Ce traitement confère aux aliments une nouvelle texture et peut modifier légèrement la structure de l'amidon (Van Hoan, 2004). Au Vietnam, la plupart des mères des régions reculées se contentent de ce procédé pour préparer des farines simples à base de riz. Le riz et les autres ingrédients (*haricot à grains vert, soja...*) sont finement broyés en utilisant des broyeurs à meules ou à marteaux fabriqués localement. Comme ce type de broyage ne modifie pas les propriétés de l'amidon, son gonflement au cours de la préparation de bouillies par simple cuisson à ébullition pendant environ 5 minutes se traduit par l'obtention de bouillies ayant une viscosité élevée. De ce fait, les bouillies préparées à une consistance adéquate pour les jeunes enfants ont une très faible densité énergétique.

Dans le cas d'une fabrication utilisant des procédés plus élaborés, le broyage peut être utilisé à différentes étapes. Il peut tout d'abord être utilisé en pré-traitement de matières premières

destinées à subir d'autres traitements. Lors de la fabrication de farines infantiles par cuisson-extrusion, il peut être utilisé pour concasser les céréales avant extrusion (Chauhan et Bains, 1985; Desrumaux *et al.*, 1998; Gujral *et al.*, 2001; Gujral et Singh, 2002) afin d'améliorer les échanges de chaleur, de favoriser la dégradation des molécules constitutives de l'amidon et d'augmenter le degré de cuisson. Enfin, le broyage est souvent utilisé en fin de préparation des farines infantiles: broyage d'extrudats, de produits torrifiés, de produits préhydrolysés et séchés par passage sur un rouleau-sécheur.

### 1.3.2. Le grillage et la torréfaction

Le grillage et la torréfaction sont des traitements thermiques dont les effets dépendent de la température et de la durée du traitement. Pendant la torréfaction, les produits sont placés dans une circulation d'air chaud qui est à l'origine de plusieurs modifications physico-chimiques (*échanges de chaleur, réactions chimiques et séchage*).

La torréfaction réduit la teneur en eau (Abu-Dweih *et al.*, 2000) et modifie la structure de l'amidon et des protéines. Onimawo et Akpovwo (2006) ont montré que la torréfaction à 80 et 100°C entraîne une légère augmentation de l'adsorptivité dans l'eau de farine de pois d'Angole (*Cajanus cajan*). Par ailleurs, en réduisant radicalement les activités microbiennes, la torréfaction améliore la qualité hygiénique des aliments (Nout, 1993).

La torréfaction permet également de réduire considérablement l'activité de certains facteurs anti-nutritionnels. Au cours de la torréfaction à 100°C du pois d'Angole, on observe une diminution importante des teneurs en cyanures (de 68 à 23 mg/100g) et en acide phytique (de 120 à 100 mg/100g) (Onimawo et Akpovwo, 2006). La torréfaction des légumineuses permet une diminution ou la destruction des facteurs anti-trypsiniques (Jansen *et al.*, 1978; Besrat, 1981; Van Hoan, 2004) et améliore la disponibilité des protéines.

La température de torréfaction est un facteur décisif qui influe sur les qualités organoleptiques (*couleur, odeur, saveur, texture*) des produits torrifiés. La torréfaction est utilisée dans le but d'améliorer les qualités organoleptiques des farines infantiles (Nout, 1993). Cependant, elle peut réduire la solubilité de protéines et détruire certaines vitamines (Mensah et Tomkins, 2003). Yanez *et al.* (1986) ont démontré que le grillage de grains de lupin (*Lupinus albus* cv Multolupa) à 80-90°C pendant 20-40 min provoque une diminution de qualité de protéines. Par ailleurs, les températures élevées et les faibles teneurs en eau des aliments sont favorables à la survenue de réactions de Maillard au cours de la torréfaction. Guerra-Hernandez *et al.* (1999) ont montré que la torréfaction à 140°C et 150°C de blé, riz, et avoine se traduisait par l'apparition de furosine, un des produits dérivés des réactions de Maillard. L'optimisation des modalités de torréfaction de chaque produit apparaît donc comme indispensable (Saklar *et al.*, 2001).

La torréfaction influe aussi sur la consistance des bouillies. Selon Mensah et Tomkins (2003) la dextrinisation de l'amidon intervenant en cours de torréfaction serait responsable d'une diminution de la viscosité des bouillies.

La torréfaction est mentionnée depuis longtemps comme un procédé utilisable pour la fabrication de farine infantiles contenant du soja (Jansen *et al.*, 1978). Depuis longtemps en Espagne, des bouillies à base de céréales ont été préparées en utilisant principalement le grillage, le broyage et la cuisson à ébullition (Fernandez-Artigas *et al.*, 2001). Ces modalités de préparation sont encore utilisées au niveau familial dans de nombreux pays en développement. Au Vietnam, même si l'utilisation de farines commerciales est de plus en plus fréquente, ce type de préparation se retrouve encore dans certaines régions reculées.

### 1.3.3. Le séchage sur rouleau

Le séchage sur rouleau est un traitement thermique de courte durée et à haute température. Il permet l'obtention de produits sous forme de farine ou de flocons. Les produits qui sont séchés par application de ce procédé conservent la plus grande partie de leur saveur, de leur couleur et de leur valeur nutritionnelle. Le séchage sur rouleau permet d'augmenter la l'adsorptivité dans l'eau et d'améliorer la texture des farines (Abdel-Aal *et al.*, 1996). Il réduit l'activité de certains facteurs anti-nutritionnels et améliore la digestibilité des protéines (Occena *et al.*, 1997).

Cependant, certaines études ont mis en évidence des effets négatifs du séchage sur rouleau sur les qualités organoleptiques et nutritionnelles des produits. Comme la plupart des autres traitements thermiques, ce mode de séchage peut être à l'origine de réactions de Maillard (Guerra-Hernandez *et al.*, 1999). Des pertes en vitamines au cours du séchage de certains aliments ont également été observées (Sullivan *et al.*, 1985; Wang *et al.*, 1992; Desorbry *et al.*, 1997). En travaillant avec des mélanges de céréales et de poudre de lait dans différentes conditions, Abrahamsson *et al.* (1979) ont démontré que le séchage sur rouleau pouvait être à l'origine d'une diminution des quantités d'acides aminés réellement disponibles. L'optimisation des conditions de séchage sur rouleau est donc très importante pour l'obtention d'aliments de bonne qualité.

Le séchage sur rouleau est utilisé pour la transformation de la pomme de terre, du lait, des fruits et l'obtention de potage ou de purée. Livingstone *et al.* (1993) ont utilisé ce procédé pour la fabrication de farines infantiles à base de blé. Il peut être utilisé pour sécher des produits qui ont déjà subi un traitement en milieu liquide comme une hydrolyse enzymatique (Guerra-Hernandez *et al.*, 1999; Bernal *et al.*, 2002) ou une cuisson dans l'eau (Abrahamsson *et al.*, 1979; Abdel-Aal *et al.*, 1996) avant d'être transformés en farines infantiles.

### 1.3.4. Le soufflage (*popping*)

Le soufflage est un procédé apparu depuis plusieurs milliers d'année en Amérique du Nord pour la fabrication de maïs soufflé (*popcorn*). Actuellement, il est fréquemment utilisé pour fabriquer des snacks à partir de maïs, de sorgho ou de mil (Doudu *et al.*, 2001). Les grains de céréales traités par ce procédé ont une bonne expansion et une bonne texture (Singh et Singh, 1999; Gokmen, 2004; Goneli *et al.*, 2007). La chaleur et la pression qui se développent dans les grains de sorgho au cours du soufflage provoquent la dégradation de l'amidon (Lasekan et Lasekan, 2000), mais Parker *et al.* (1999) ont montré que le soufflage ne diminuait pas la digestibilité des protéines du maïs et du sorgho.

Le soufflage peut être utilisé pour transformer les matières premières agricoles, le plus souvent riches en amidon, qui sont ensuite mélangées avec les autres ingrédients entrant dans la composition des farines infantiles. Des études ont mis en évidence la possibilité d'utiliser le soufflage pour la fabrication de farines infantiles à base de sorgho (Singh et Srivastava, 1993; Srivastava, 1996; Parker *et al.*, 1999) ou de maïs (Parker *et al.*, 1999). Livingstone *et al.* (1993) ont utilisé ce procédé pour produire des farines de pois chiche qui sont incorporées dans une farine infantile à base de blé. De 1998 à 2002, l'atelier d'expérimental de l'Institut National de Nutrition (NIN) du Vietnam a utilisé de la farine de soja préparée par soufflage pour la fabrication de farines infantiles à base de riz destinées à des enfants de 6 à 24 mois.

### 1.3.5. La cuisson-extrusion

L'utilisation de la cuisson-extrusion pour fabriquer des farines infantiles est connue depuis longtemps. Ses caractéristiques (*cf.* 2.2) lui permettent de conférer aux farines de bonnes qualités sanitaire, organoleptique et nutritionnelle. Il existe plusieurs types de cuiseurs-

extrudeurs (cf. 2.4) se distinguant par leurs effets sur les caractéristiques des produits, leurs capacités de production et leurs coûts. Le choix de ces équipements dépend donc de l'investissement possible, du type de farine recherché, de la taille de marché ainsi que du prix auquel on envisage de vendre les farines. Dans les pays en développement, l'utilisation d'extrudeurs à faible ou à très faible coût pour dans la fabrication de farines infantiles apparaît comme une voie particulièrement intéressante (Del Valle *et al.*, 1981; Harper *et al.*, 1995; Mouquet *et al.*, 2003; Berger *et al.*, 2004; Bruyeron *et al.*, 2006).

### 1.3.6. La fermentation

La fermentation ou co-fermentation de céréales, de racines et tubercules et de légumineuses est un procédé nécessitant des équipements moins coûteux et pouvant être utilisé pour la fabrication d'aliments de complément à des échelles familiales ou artisanales. En Afrique, elle est traditionnellement utilisée dans de nombreux pays pour préparer au niveau familial des aliments consommés sous forme de bouillies: *ben-saalga* au Burkina Faso, *ogi* et *mawè* au Bénin, *kenke* au Ghana, *injera* en Ethiopie, *poto-poto* au Congo, *ogi-baba*, *fufu* et *kunu-zaki* au Nigeria, *uji* et *togwa* en Tanzanie, *kisra* au Soudan (Tetteh *et al.*, 2004, Tou *et al.*, 2006). Pour la fabrication d'aliments pour enfants, ce procédé est utilisé en combinaison avec d'autres procédés (*séchage*, *décorticage*, *broyage*...) pouvant être mis en œuvre à des échelles familiales ou artisanales. Mais il peut aussi être utilisé en combinaison avec des procédés plus sophistiqués comme l'atomisation (Nguyen, 2005; Nguyen *et al.*, 2007) ou la cuisson extrusion (Onyango *et al.*, 2004a; 2004b; 2004c; 2005).

La fermentation réduit les teneurs en certains facteurs anti-nutritionnels, en particulier les phytates et les  $\alpha$ -galactosides, dans des céréales et les légumineuses. En utilisant *Saccharomyces cerevisiae* et *Lactobacillus plantarum* pour démarrer la fermentation de mélanges céréale/soja, Sanni *et al.*, (1999) ont démontré que la fermentation confère aux produits un pH optimal pour que les phytases présentes dans le produit réduisent sensiblement les teneurs en phytates. Tou *et al.* (2006) ont montré que la fermentation permettait, au cours de la préparation du *ben-saalga*, de réduire de 75% la teneur en phytates et de 83% celle en raffinose,  $\alpha$ -galactoside le plus abondant dans le petit mil.

La fermentation peut aussi augmenter les teneurs en vitamines (*thiamine*, *riboflavine*, *niacine*, *acide ascorbique*), en protéines et en acide aminés (Sanni *et al.*, 1999) et, dans certains cas, augmenter la digestibilité des protéines.

Cependant, les bouillies préparées selon les procédés traditionnels de fermentation ont le plus souvent de faibles teneurs en macro- et micro nutriments et une faible densité énergétique qui ne leur permettent pas de répondre aux besoins nutritionnels des enfants (Tou *et al.*, 2006). L'amélioration des procédés traditionnels afin d'augmenter les qualités nutritionnelle et organoleptique des aliments destinés aux jeunes enfants et diversifier la gamme de produits qui leur sont proposés ont fait l'objet de plusieurs études récentes. Tou *et al.* (2007a; 2007b), en particulier, en introduisant une étape de cuisson supplémentaire et en incorporant du malt d'orge ou de petit mil et un complément minéral et vitaminique au cours de la préparation du *ben-saalga* ont proposé un ensemble de procédés permettant d'obtenir du *ben-songo*, une bouillie fermentée de haute densité énergétique ayant toutes les caractéristiques sanitaires, nutritionnelles et organoleptiques requises.

### 1.3.7. La germination

La germination est à l'origine de nombreuses modifications biochimiques dans les grains de céréales et les graines de légumineuses. Elle a notamment pour effet de: (i) diminuer leurs teneurs en phytates (Egeli *et al.*, 2002) et en tocophérols (Gimbi *et al.*, 1997), (ii) d'augmenter leur digestibilité après transformation en farines (Livingstone *et al.*, 1993), (iii) d'améliorer la

biodisponibilité de fer dans les produits germés (Tatala *et al.*, 2007), (iv) de réduire de 70% l'activité de la lipoxygénase chez le pois ailé (*Psophocarpus tetragonolobus*) après 120 heures de germination (King et Puwastien, 1987), (v) de réduire la viscosité des bouillies préparées à partir de farines de grains germés (Marero *et al.*, 1988; Gimbi *et al.*, 1997; Thathola et Srivastava, 2002) et, par conséquent, de permettre l'augmentation de leur densité énergétique (Asiedu *et al.*, 1993).

La germination des céréales et des légumineuses peut être utilisée pour la production de farines infantiles (Marero *et al.*, 1991; Asiedu *et al.*, 1993) en étant combinée au séchage et au broyage (Livingstone *et al.*, 1993). Selon Marero *et al.* (1991) des farines infantiles peuvent être préparées en utilisant 70% de maïs/riz germé et 30% de haricot mungo/niébé germé. Pour leur part, Egeli *et al.* (2002) ont démontré qu'une germination de 24 à 72H pouvait être utilisée pour la fabrication de farines infantiles à partir de céréales (*riz, blé, mil...*) et de légumes (*soja, niébé, petit pois...*).

#### 1.3.8. Les traitements enzymatiques

L'incorporation d'amylases qui permet de réduire la longueur des portions linéaires d'amylose et d'amylopectine est le procédé le plus efficace pour réduire la viscosité des bouillies et permettre leur préparation à des densités énergétiques suffisantes (WHO, 1998; Trèche et Mouquet-Rivier, 2008). Ce procédé est fréquemment utilisé en combinaison avec le broyage, la torréfaction et le séchage sur rouleau pour la fabrication de farines infantiles. Guerra-Hernandez *et al.* (1999) et Bernal *et al.* (2002) proposent d'utiliser les étapes suivantes (i) réduction des graines de céréales en farines, (ii) torréfaction des farines (iii) hydrolyse  $\alpha$ -amylasique, (iv) séchage sur rouleau, (v) incorporation d'autres ingrédients, comme du sucre ou des compléments minéraux et vitaminiques.

Pour mettre en œuvre ces traitements enzymatiques, on peut utiliser, soit des sources d'enzymes naturelles, soit des enzymes produites industriellement pour l'industrie agroalimentaire (Trèche et Mouquet-Rivier, 2008).

L'incorporation de sources naturelles d' $\alpha$ -amylases (*malt d'orge, malt de mil, malt de sorgho...*) est utilisée depuis longtemps pour diminuer la viscosité des bouillies et, par conséquent, permettre l'augmentation de leur densité énergétique (Livingstone *et al.*, 1993; Gopaldas et John, 1992; Rahman *et al.*, 1994; Darling *et al.*, 1995; Rahman *et al.*, 1997a; Rahman *et al.*, 1997b; den Besten *et al.*, 1998; Bennett *et al.*, 1999; Trèche, 1999; Badau *et al.*, 2006 ; Tou *et al.*, 2007a).

L'intérêt de l'incorporation d' $\alpha$ -amylases produites industriellement pour la préparation de farines à cuire a fait l'objet de nombreux travaux au cours des 15 dernières années qui ont montré, d'une part, la faisabilité du procédé dans de nombreux mélanges et dans des unités de production de taille variable (Trèche, 1999) et, d'autre part, son intérêt pour obtenir des bouillies de consistance et de densité énergétique appropriées qui permettent une augmentation substantielle des ingrédés énergétiques chez les jeunes enfants (Stephenson *et al.*, 1994; Vieu *et al.*, 2001; Moursi *et al.*, 2003; Traoré *et al.*, 2005; Owino *et al.*, 2007).

### **1.4. Equipements et procédés de fabrication mis au point dans le cadre du programme Fasevie**

Avant que ne soit entreprise cette thèse, des mises au point d'équipements et de procédés avaient été réalisées au sein du programme Fasevie. Dans la mesure où les travaux réalisés au cours de la thèse sont des approfondissements ou des compléments à ces travaux antérieurs, ils seront brièvement résumés ici.

1.4.1. Mise au point d'un «cuiseur-extrudeur à très faible coût» pour la préparation de farines instantanées (Mouquet *et al.*, 2003; Berger *et al.*, 2004; Bruyeron *et al.*, 2006)

La première génération de « cuiseur-extrudeur à très faible coût » (CE-TFC) mis au point de 1997 à 1999 dans le cadre du programme Fasevie, en collaboration avec des partenaires locaux (Hafrec, *Hanoi Food and Research Experimentation Center*;) est un extrudeur mono-vis autogène (Photo I/1). Le transport et la cuisson de la matière s'effectuent grâce aux forces de friction qui s'établissent entre la matière elle-même et la paroi du fourreau. Le fourreau est un tube cylindrique monobloc dans lequel s'ajuste précisément la vis. Le fourreau possède sur sa surface externe une résistance électrique permettant de préchauffer l'appareil pour faciliter le démarrage. Le fourreau utilisé sur ce type d'appareil possède une rainure interne de forme hélicoïdale à profondeur croissante (de 2 à 7 mm). La plaque avant se compose d'un support de filière qui se visse directement sur le porte-fourreau. Le support de filière permet l'adaptation de filières de 4, 5, 6 ou 8 mm de diamètre.



- 1: Trémie d'alimentation
- 2: Ensemble vis/fourreau/résistance chauffante
- 3: Plaque avant
- 4: Tableau de commande (*ampérage, température, M/A trémie d'alimentation, M/A extrudeur*)
- 5: Variateur de vitesse de la trémie d'alimentation

**Photo I/1:** le CE-TFC de 1<sup>ère</sup> génération

Les principales caractéristiques de ce CE-TFC de première génération sont données dans le tableau I/3.

**Tableau I/3:** Fiche technique du CE-TFC de première génération

Capacité	30-50kg/h
Type de moteur principal	Tris phrasé, 380V, 7,5 kW
Longueur de la vis	200 mm
Diamètre de la vis	40 mm
Diamètre de filière	De 4 à 8 mm
Longueur de filière	9 mm
Matière de la vis et du fourreau	Acier
Contrôle de la température	au niveau de la filière
Vitesse de rotation de la vis	500 tr/min
Alimentation	Multi vitesse
Consommation	~10,5 kWh
Poids net	500 kg
Encombrement de l'appareil (L*I*h)	1,2 m * 0,8 m * 1,0 m

L'alimentation en matières premières est assurée par une doseuse volumétrique. La trémie d'alimentation se déverse dans la gorge d'alimentation de l'extrudeur par l'intermédiaire d'une vis dont la vitesse est réglable grâce à un régulateur mécanique. Le débit d'alimentation est donc contrôlé par le volume d'ingrédients envoyé pas la vis d'alimentation. Le fonctionnement de la machine est assuré par un moteur électrique de puissance 7,5 kW triphasé dont la vitesse est de 1 500 t/min. Sa capacité est relativement faible: 30kg/heure.

#### 1.4.2. Vérification de la capacité du CE-TFC mis au point à produire des farines infantiles instantanées (Mouquet *et al.*, 2003)

L'aptitude de ce type d'extrudeur à produire des farines instantanées a été établie en travaillant sur différents mélanges de riz, sésame et soja. Quatre mélanges dont la composition est donnée dans le tableau I/4 ont été préparés.

**Tableau I/4:** Composition de mélanges avant extrusion.

Mélange	Composition en ingrédients (g/100g MS)			Composition en nutriments (g/100gMS)	
	<i>Riz</i>	<i>Soja</i>	<i>Sésame</i>	<i>Lipides</i>	<i>Protéines</i>
A	64,6	28,1	7,4	11,18	18,25
B	64,9	35,1	0	8,61	19,78
C	65,0	32,0	3,0	9,60	19,09
D	91,4	0	8,6	5,47	8,82

L'effet du passage dans le CE-TFC a été principalement mesuré sur des caractéristiques physico-chimiques des extrudats (*degré de gélatinisation, activité anti-trypsiques*) et sur la consistance (*viscosité et écoulement*) de bouillies préparées à partir de ces extrudats.

Les extrudats préparés à partir des mélanges contenant le soja ne sont que partiellement gélatinisés (de 57 à 83%). L'augmentation de teneurs en lipides dans les mélanges s'accompagne d'une diminution du degré de gélatinisation des extrudats et d'un effet négatif sur la destruction des facteurs anti-trypsiques. Cependant, l'équipement est capable de transformer des mélanges riz/sésame contenant environ 10% d'humidité et moins de 6% de lipides en farine instantanée (avec gélatinisation totale de l'amidon).

L'augmentation de teneur en eau des mélanges (*par ajout d'eau avant extrusion*) provoque une diminution de la température au niveau de la vis (de 156 à 108°C), du degré de gélatinisation (de 79 à 65%) et du taux de destruction des facteurs anti-trypsiques (de 82 à 53%).

Les résultats de cette première étude ont permis de conclure que le CE-TFC de première génération mis au point permettait de fabriquer des farine infantiles instantanées (dont l'amidon était totalement gélatinisé) à partir de mélanges riz/soja/sésame ayant une faible teneur en eau (10%) et en lipides  $\leq 6\text{g}/100\text{g MS}$ . Les amidons contenus dans les extrudats préparés de cette manière étaient partiellement dextrinisés ce qui permettait de réduire la viscosité de bouillies préparées à partir de ces extrudats. L'incorporation, après extrusion, de farine de soja torréfié, de sucre et de complément minéraux et vitaminiques permettait d'obtenir des farines infantiles appropriées.

### 1.4.3. Mis au point d'un CE-TFC de seconde génération (Berger *et al.*, 2004; Bruyeron *et al.*, 2006)

A partir des résultats de cette première étude, des améliorations ont été apportées au CE-TFC de première génération et ont abouti à un équipement de seconde génération avec lequel les études ultérieures ont été réalisées.

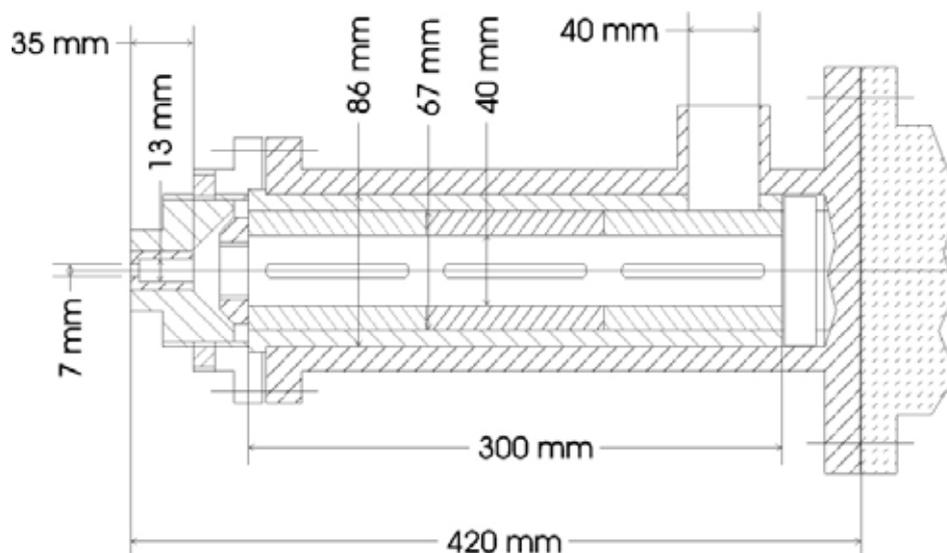
Le CE-TFC de seconde génération (EX800) (photo I/2) a été mis au point grâce à la collaboration entre le programme Fasevie et le CTC (*Center for Technology Transfer And Consultancy on Investment*). Comme le CE-TFC de première génération, il s'agit d'un cuiseur-extrudeur mono-vis autogène.



1. Moteur principal
2. Tableau de commande et de contrôle
3. Trémie d'alimentation
4. Vis et fourreau
5. Moteur pour la découpe de l'extrudat
6. Caisson de réception de l'extrudat

**Photo I/2:** Le CE-TFC de 2<sup>nd</sup> génération (EX800) et ses principales composantes.

La longueur et le diamètre de la vis du CE-TFC de seconde génération (Figure I/1) sont plus grands que ceux du CE-CFC de première génération. La capacité de l'appareil dépend des matières premières utilisées. Elle est de 150 kg/h pour un mélange de riz/soja dans des proportions 70/30. La température mesurée en sortie de filière varie de 140 à 180°C. Elle dépend de la teneur en eau, en lipides et en amidon du mélange extrudé. La rotation de la vis (500 t/min) est assurée par un moteur électrique triphasé de puissance 18,5 kW dont la vitesse constante est de 1 500 t/min.



**Figure I/1:** Représentation schématique de la vis, du fourreau et de la filière du CE-TFC de 2<sup>nd</sup> génération (*coupe longitudinale*).

Les principales caractéristiques du EX-800 sont données dans le tableau I/5

**Tableau I/5:** Fiche technique du CE-TFC de 2<sup>ème</sup> génération.

Série	<b>EX-800</b>
Capacité	80-150kg/h ( <i>variable selon les matières premières utilisées</i> )
Type de moteur principal	Tris phrasé, 380V, 18,5 kW
Longueur de la vis	280 mm
Diamètre de la vis	78 mm
Matière de la vis et du fourreau	Acier
Contrôle de la température	Au niveau de la filière
Vitesse de rotation de la vis	500 tr/min
Alimentation	Multi vitesse
Consommation	~21 kWh
Poids net	750 kg
Encombrement de l'appareil (L*I*h)	1,6 m * 1,1 m * 1,4 m

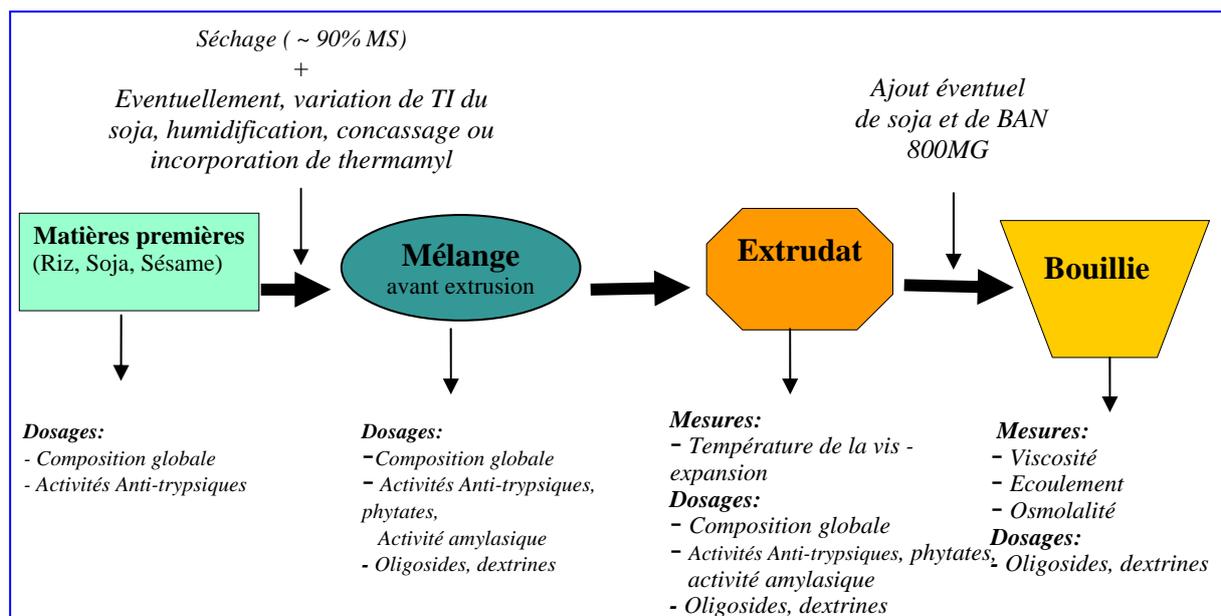
#### 1.4.4. Conditions d'utilisation d'un CE-TFC et de traitements enzymatiques pour la production d'une farine infantile à cuire à base de riz (Van Hoan, 2004; 2006)

Suite aux travaux menés de 1997 à 2003, les CE-TFC de première et seconde génération ont été utilisés pour la fabrication de farines infantiles instantanées (Favilo et Favina) (Bruyeron *et al.*, 2006). A partir de 1999, ces produits ont été rendus accessibles et ont été bien acceptés par les mères dans les sites du programme situés dans des provinces du centre du Vietnam. Mais, bien que ces farines soient les moins chères du marché vietnamien, seulement environ 30% de mères ayant des enfants de 6 à 24 mois se sont révélées avoir suffisamment d'argent pour les acheter régulièrement. De plus, la plupart des habitants des régions de montagne n'ont pas d'habitude d'utiliser de l'eau préalablement bouillie ce qui rendait dangereux la promotion de farines instantanées. Pour ces raisons, la mise au point de procédés de fabrication de farines infantiles « à cuire » de prix moins élevé et devant obligatoirement subir une cuisson à ébullition au moment de leur préparation a été entreprise à partir des équipements existants déjà dans les unités de production travaillant en relation avec le programme Fasevie.

La farine infantile étudiée est obtenue à partir d'un mélange riz (65,0%), sésame (7,4%), soja (27,6%). Les modalités de préparation des échantillons ainsi que les mesures et dosages effectués sont résumées sur la figure I/2.

Les effets du taux d'incorporation (TI) du soja (0 / 9,2 / 18,4 / 26,7%) et de l'humidité (10, 13 et 16%) des mélanges, du concassage préalable des grains de riz et de soja ainsi que de l'incorporation d'amylases industrielles avant (thermamyl 120L) ou après (Ban 800 MG) extrusion ont été mesurés sur les caractéristiques physico-chimiques des extrudats (*T° atteinte, expansion, perte en eau, taux d'endommagement de l'amidon*), leur composition globale et glucidique ainsi que la consistance (*viscosité et écoulement*) et l'osmolalité de bouillies préparées à partir de ces extrudats.

Les résultats de cette étude sont résumés dans le tableau I/6.



**Figure I/2:** Schéma général de préparation et des mesures effectuées pour la production d'une farine « à cuire » en utilisant le CE-TFC de seconde génération.

**Tableau I/6:** Synthèse des effets de variations de différents paramètres (*en colonne*) au cours de la production d'une farine infantile à base de riz (65,0%), sésame (7,4%) et soja (27,6%) sur certaines de ses caractéristiques physico-chimiques (*en ligne*).

		↑ TI du soja dans les mélanges	↑ Humidité	↓ Granulométrie	↑ TI de la Thermamyl	↑ TI de la BAN
Caractéristiques physiques des extrudats	Température	↘	↘	↔	↔	-
	Expansion	↘	↘	↔	↔	-
	Perte en eau au cours de la CE	↔	↗	↔	↔	-
Composition chimique des extrudats	Taux d'endom- magement de l'amidon	↘	↗	↔	↔	-
	Teneur en oligosides et dextrines solubles	↔	↔	↔	↗	-
Caractéristiques physico- chimiques des bouillies	Viscosité	↗	↘	↔	↘	↘
	Écoulement	↘	↗	↔	↗	↗
	Osmolalité	↔	↔	↔	↔	↔
	Dextrines	↔	↔	↔	↗	↗

L'augmentation de la teneur en lipides des mélanges, consécutive à celle du TI du soja, entraîne une diminution de l'expansion et de la température atteinte par les extrudats qui se traduit par une baisse du taux d'endommagement de l'amidon et une augmentation de la viscosité des bouillies préparés par cuisson à ébullition à partir de ces extrudats. L'augmentation du degré d'humidité des mélanges (*de 10 à 16%*) se traduit également par une diminution de l'expansion et de la température atteinte par les extrudats mais elle s'accompagne d'une augmentation du taux d'endommagement de l'amidon et d'une diminution de la viscosité des bouillies. Le concassage avant mélange des grains de riz et de soja est sans effet sur les caractéristiques étudiées.

L'incorporation de faibles quantités de thermamyl (3 à 5 unités Novo dans 100 g de mélange) permet d'obtenir des extrudats dont la teneur en oligosides et en dextrines solubles est légèrement augmentée, dans lesquels l'activité amylasique résiduelle, bien qu'augmentant avec le TI du soja, reste faible et à partir desquels on peut préparer des bouillies de viscosité réduite. L'incorporation d'une quantité très faible de BAN 800 MG aux extrudats (3 unités/100g) permet d'obtenir par cuisson à ébullition (5 min) des bouillies de consistance et de densité énergétique appropriées.

D'un point de vue opérationnel, cette étude a montré qu'il était possible d'utiliser le CE-TFC mis au point dans le cadre du programme Fasevie au Vietnam pour préparer des farines «à cuire» à partir d'un mélange de grains entiers de riz, sésame et soja, humidifié à 13%, contenant jusqu'à 27,6% de soja à condition d'incorporer de très faibles quantités d'amylases avant (thermamyl 120L) ou après (BAN 800 MG) cuisson-extrusion. Les résultats de cette étude ont été transférés à l'Institut National de Nutrition au Vietnam: en choisissant l'incorporation de BAN à la farine extrudé, l'unité de production de cette Institut a mis en route, à partir de 2004, la production d'une farine dénommée Nufavie qui est actuellement utilisée dans le cadre du programme national de lutte contre la malnutrition protéinique (PEM) du Vietnam.

## **2. Intérêts et contraintes de la cuisson-extrusion**

### **2.1. Principe et application**

Utilisés pour la première fois en 1869 pour la transformation des aliments ([Jansen et al., 1978](#); [Harper, 1981](#)), les extrudeurs ont permis le développement d'une technologie alimentaire largement répandue: la cuisson-extrusion. Il s'agit d'un traitement de type Haute Température-Temps Court (ou High Temperature-Short Time- HTST en Anglais) qui combine des procédés comme le malaxage continu, le pétrissage, la cuisson, l'extrusion et la mise en forme. Grâce aux réactions chimiques et biochimiques qui se produisent au passage des produits soumis à une cisaillement important dans la, ou les vis, pendant un temps très court (de 10 s à 2 min) et à haute température (100 à 200°C) et qui se traduisent par des modifications importantes de l'amidon et des protéines ainsi que, éventuellement par la détoxification, la pasteurisation, la stérilisation des produits ([Mercier, 1994](#)), la cuisson-extrusion confère aux produits extrudés des qualités nutritionnelles et organoleptiques particulières.

L'application de cette technologie à la transformation des produits amyliques permet de modifier les caractéristiques physico-chimiques des produits et d'en améliorer un certain nombre de propriétés (*gélatinisation, dextrinisation, susceptibilité enzymatique des amidons, digestibilité, diminution et inactivation des facteurs antinutritionnels*) et caractéristiques organoleptiques (*texture, couleur, saveur*). La cuisson-extrusion est abondamment utilisée pour la fabrication d'aliments et d'ingrédients alimentaires comme les farines infantiles, les

snacks, les produits céréaliers pour le petit déjeuner, la viande et le fromage (Anderson *et al.*, 1969; Harper, 1981; Harper et Jansen, 1985; Cheftel, 1986; Mouquet *et al.*, 2003).

A partir des années 60, l'utilisation de cuiseur-extrudeur à faible coût a été proposée pour la fabrication de farine infantile dans les pays en développement (Harper et Jansen, 1985).

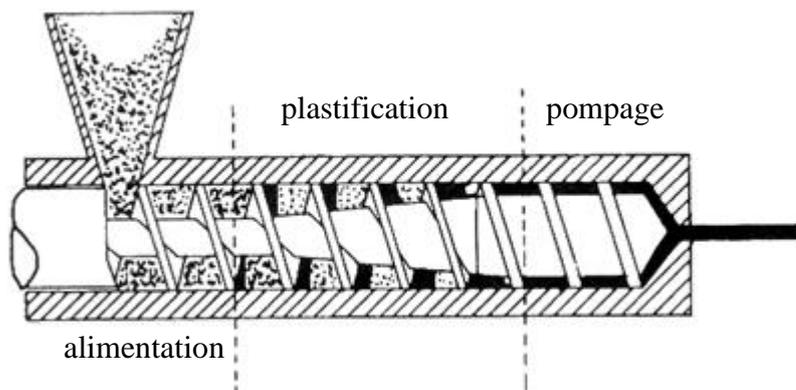
## 2.2. Les différents types de cuiseur-extrudeur

### 2.2.1. Nombre de vis

Parmi ceux qui sont utilisés en agroalimentaire, on peut distinguer trois principaux types d'extrudeurs en fonction de leur nombre de vis: les mono-vis, les bi-vis et les multi-vis.

#### \* *Mono-vis*

Développés à partir de 1930, ce sont les extrudeurs les plus simples (Harper, 1981). Les vis d'extrudeurs mono-vis sont en général monobloc. Ce sont des vis de type Archimède pouvant avoir un pas constant et un chenal de profondeur variable ou un pas variable et un chenal de profondeur constant (Figure I/3) (Mercier, 1994). La rotation de la vis dans le fourreau permet de mélanger les matières premières pulvérulentes, puis de les transporter, de les comprimer, de les fondre et de forcer leur passage au travers d'une ou plusieurs filières.



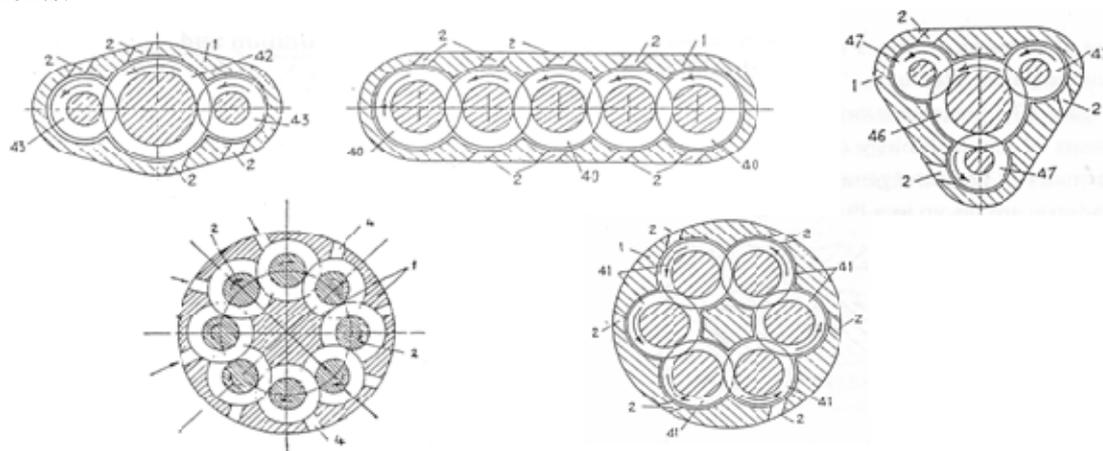
**Figure I/3:** Schéma de principe d'un cuiseur-extrudeur mono-vis (d'après Agassant *et al.*, 1986; cité par Mercier, 1994).

#### \* *Bi-vis*

Les extrudeurs bi-vis sont des équipements plus onéreux mais ils présentent plusieurs avantages par rapport aux mono-vis. Le couplage de deux vis d'Archimède diminue les reflux dans la zone d'alimentation et la qualité des produits est améliorée car la matière passe plus vite dans l'extrudeur qui a généralement un fourreau plus court et une vitesse de rotation plus faible. Selon Mercier (1994), l'utilisation de bi-vis permet également de résoudre les problèmes de nettoyage des vis car une des vis balaye en permanence le chenal de l'autre. Par ailleurs, les bi-vis permettent d'extruder une plus grande variété de matières et des produits ayant une plus grande diversité de granulométrie, de comportements rhéologiques et de teneurs en eau (10 à 95% contre 10 à 30% pour les mono-vis). Grâce à des systèmes de réglage plus sophistiqués, il est plus facile de modifier de manière indépendante certains paramètres d'extrusion comme le débit d'alimentation, la vitesse de rotation des vis et la teneur en eau. Enfin, des systèmes de chauffage ou de refroidissement du fourreau permettent d'augmenter ou de diminuer le niveau de cuisson et de fixer une température spécifique au moment de l'extrusion d'un aliment.

### \*Multi-vis

Les extrudeurs multi-vis sont plus complexes que les mono-vis et les bi-vis. Ils sont constitués d'au moins trois vis d'Archimède de caractéristiques identiques ou différentes et qui peuvent être alignées, superposées, arrangées en forme de V, en cercle, etc. (Figure I/4). Ces équipements offrent de nombreuses possibilités d'application pour la transformation des aliments.



**Figure I/4:** Possibilités de montage des vis de cuiseurs-extrudeurs multi-vis (d'après [White, 1991](#)).

#### 2.2.2. Coût

On peut également classer les cuiseurs-extrudeurs selon leurs prix. [Harper \(1981\)](#) a proposé le terme de cuisson-extrusion à faible coût (*Low-cost extrusion cooking*) qui désigne un type de cuiseur-extrudeur coûtant, à l'époque, moins de 55 000 USD/tonne/heure de capacité. Le nombre de vis peut également influencer sur le coût d'équipement. Pour une même capacité de production, les mono-vis coûtent deux fois moins cher que les bi-vis ([Mercier 1994](#)).

### 2.3. La cuisson-extrusion à faible coût et la cuisson-extrusion à très faible coût

#### 2.3.1 La cuisson-extrusion à faible coût

La cuisson-extrusion à faible coût ou LEC (*Low-cost Extrusion Cooking*) a pris son essor dans les années 70 sous l'impulsion de la coopération américaine (USAID) qui souhaitait valoriser les surplus américains de céréales et de soja pour les transformer en aliments pour jeunes enfants des pays en développement ([Harper, 1981](#)). Le concept de la cuisson-extrusion à faible coût repose non seulement sur la transformation des aliments, mais également sur la formation des entrepreneurs locaux, la possibilité de développer l'emploi local, l'opportunité de formuler des produits adaptés aux goûts des populations qui recevaient le produit. La production locale permettait de réduire les coûts de transport des produits finis, et donc de favoriser la préservation de leurs nutriments, arômes, etc., et de réduire les coûts d'emballage et de suremballage dans la mesure où les produits étaient distribués dans un rayon proche de l'usine. Son avantage majeur était de produire des farines infantiles pouvant subvenir à des programmes de lutte contre la malnutrition infantile. Ces extrudeurs coûtent en général moins de 150 000 USD pour une capacité maximale de 1 000 kg/heure.

[Harper et Jansen \(1985\)](#) ont contribué, dans le cadre de programmes de recherche menés par l'Université de l'Etat du Colorado aux Etats-Unis, à la diffusion et à la mise au point de la cuisson-extrusion à faible coût. L'installation d'usines de cuisson-extrusion à faible coût a pu être faite au Sri Lanka dès 1976, puis en Tanzanie, au Costa Rica, au Mexique où la farine produite à base de soja et d'avoine a été récompensée en 1983 par un prix au salon

International des Technologies Alimentaires. De nombreuses autres usines ont vu le jour à travers le monde, en Thaïlande, en Indonésie, en Inde, aux Philippines, au Kenya, en Côte d'Ivoire et en Afrique du Sud. La plupart de ces usines fabriquent des farines infantiles précuites ou instantanées. Leurs spécificités résident essentiellement dans la capacité à extruder des produits à faible humidité (souvent <20%) et à utiliser l'énergie d'auto-échauffement pour accomplir la cuisson des matières premières. De plus, cette technologie nécessite de relativement faibles investissements par rapport à la cuisson-extrusion classique et aux autres technologies utilisables pour la fabrication de produits équivalents.

Le succès de certaines usines utilisant la cuisson-extrusion à faible coût est indéniable (Tableau I/7) mais les capitaux requis pour la mise en place de ce type d'unité est souvent très important et limite la diffusion de cette technologie. En 1985, Harper a chiffré le coût d'une unité de production de farine infantile par cuisson-extrusion à faible coût d'une capacité de 500 kg/h à environ 1,4 millions de dollars américains. Seuls de gros investisseurs, des groupements d'entreprises ou des bailleurs de fonds internationaux (Agences des Nations Unies, Organisations Non Gouvernementales Internationales, Coopération bilatérale, etc.) peuvent se permettre la réalisation de tels investissements. De plus, même si elle est faible par rapport à la cuisson-extrusion classique, la capacité de production de ces usines est relativement élevée et il est très important, avant l'installation de telles unités de se soucier de l'existence d'un marché en rapport avec leur capacité de production. Le plus souvent le marché de lancement de telles unités est l'émergence d'un besoin humanitaire (aide d'urgence pour lutter contre d'éventuelles famines, des catastrophes naturelles, venir en aide à des réfugiés, etc.). Enfin la dernière limite à la cuisson-extrusion à faible coût est la difficulté d'appropriation par les entrepreneurs de la technologie, en termes d'utilisation, d'entretien, de réparation, etc.

**Tableau I/7:** Avantages et inconvénients de la cuisson-extrusion à faible coût mise en œuvre dans les pays en développement.

Avantages	Inconvénients
Formulation et fabrication de produits adaptés aux goûts des consommateurs locaux	Capacités de production relativement élevées par rapport aux marchés commerciaux existants dans les pays en développement ( <i>nécessité d'investir dans l'élargissement de gamme de produits, dans le marketing, etc.</i> )
Bonnes propriétés nutritionnelles des produits extrudés	
Stabilité de la saveur du produit et de sa teneur en nutriments favorisée par l'écoulement et la diffusion rapide des produits	
Favorise le développement de l'économie locale (emploi, écoulement des productions agricoles locales, marketing)	
Prix de vente du produit final bas grâce aux faibles coûts de fabrication, de transport et de distribution	
	Investissements de départ relativement lourds pour un investisseur de pays en développement
	Coûts de maintenance élevés quand la technologie n'est pas disponible dans les pays en développement

### 2.3.2. La cuisson-extrusion à très faible coût

La cuisson-extrusion à faible coût appliquée à la production d'aliments infantiles dans les pays en développement a déjà prouvé son efficacité sous certaines conditions, essentiellement quand sa mise en œuvre bénéficie du soutien de bailleurs de fonds ou de l'implication des

états concernés pour la mobilisation des fonds nécessaires à la construction des unités de production et de la mise en place d'un marché humanitaire favorisant le lancement de ces unités. Dans certains pays où les conditions précédemment évoquées ne sont pas remplies la mise en œuvre d'une telle technologie s'avère difficile. Afin de diffuser plus largement cette technologie et surtout les applications très intéressantes qui en découlent, il est souhaitable de repenser le concept en vue de le rendre accessible et appropriable par n'importe quel entrepreneur de pays en développement. La cuisson-extrusion à très faible coût, ou plutôt de faible capacité, a pour objectif essentiel de venir compléter les nombreux avantages de son aînée tout en dépassant ses limites.

Les principaux objectifs que doit atteindre la cuisson-extrusion à très faible coût et faible capacité sont donc de produire des farines infantiles précuites ou instantanées, de bonnes qualités nutritionnelles, microbiologique et organoleptique, avec une capacité de production ne dépassant pas 100 kg/h et un coût d'équipement proche de 2000 USD. L'appareil doit être fabriqué localement ou pouvoir être importé facilement, sa maintenance devant être réalisable dans le pays de production des aliments infantiles.

C'est dans cette optique que le programme Fasevie a mis au point un procédé et des équipements de cuisson-extrusion à très faible coût pour la fabrication de farines infantiles à partir de matières premières locales. Le procédé mis au point fait appel à des extrudeurs mono-vis autogènes fonctionnant avec des matières premières de faible humidité (<15%), atteignant des températures supérieures à 150°C et permettant d'obtenir des produits expansés. La cuisson-extrusion à très faible coût ou de faible capacité se distingue donc par des capacités de production qui n'excèdent pas 100 kg/h et par un coût des machines le plus souvent inférieur à 2000 USD, soit un investissement d'environ 20 000 USD/tonne/heure de capacité, bien inférieur au 55 000 USD/tonne/heure de capacité correspondant à la cuisson-extrusion à faible coût.

## **2.4. Effets de la cuisson-extrusion sur certaines caractéristiques des produits**

### **2.4.1. Sur l'activité des facteurs antinutritionnels**

L'extrusion permet de diminuer l'activité de certains facteurs anti-nutritionnels ou toxiques, d'inactiver plus ou moins complètement des enzymes et de détruire les microorganismes (Cheftel, 1986). Cette capacité à diminuer ou à détruire les activités antinutritionnelles est particulièrement intéressante pour les mélanges contenant des graines de légumineuses. Njoki et Faller (2001) pour des mélanges à base de plantain, soja et maïs et Mouquet *et al.* (2003) pour des mélanges à base de riz, soja et sésame ont montré que la cuisson-extrusion permettait de réduire les activités anti-trypsiques dans les extrudats. Nwabueze (2007) a montré que l'extrusion permet de réduire de 91% l'activité des inhibiteurs de la trypsine, de 44% la teneur en acide phytique et de 92% la teneur en tannins dans un mélange fruit de l'arbre à pain/maïs/soja. Onyango *et al.* (2005) ont également trouvé que le teneur en tannins de la farine *uji* (préparée par fermentation à partir de mélange maïs/mil) diminue après extrusion à 180°C. Toutefois, en réalisant des essais à faible température (120°C), Marsmasn *et al.* (1995) n'ont observé qu'une baisse de 25 à 41% des activités antitrypsiques dans des extrudats à base de soja/maïs. L'extrusion à température moyenne (140°C) permet de réduire ces facteurs de 82-100% (El-Habashy *et al.*, 1997). En réalisant des extrusions à 140-180°C, Abd El-Hady et Habiba (2003) ont observé une diminution des teneurs en la plupart des facteurs anti-nutritionnels (acide phytique, composés phénoliques, inhibiteurs d' $\alpha$ -amylases et inhibiteur trypsiques) dans des extrudats de petit pois, pois chiche, fève (*Vicia faba L.*), haricot commun (*Phaseolus vulgaris L.*). Ces auteurs ont également observé que l'extrusion à haute température (180°C) peut détruire complètement les facteurs anti-trypsiques.

Alonso *et al.*, (2000) ont constaté que l'extrusion est la meilleure méthode pour détruire les inhibiteurs de la trypsine, de la chymotrypsine et des  $\alpha$ -amylases ainsi que les activités des hémagglutinines sans modifier notablement le contenu en protéines.

Dans la littérature, l'effet de la cuisson-extrusion sur les phytates est contradictoire. Les résultats des travaux de différents auteurs s'accordent à montrer que la cuisson-extrusion ne modifie pas les teneurs en phytates d'extrudats de son de riz, blé et avoine (Gualberto *et al.*, 1997), de pois chiche (Poltronieri *et al.*, 2000), de mélange riz/soja/sésame (Hoan, 2004) et de mélanges maïs/pois chiche/avoine (Ainsworth *et al.*, 2007). Cependant, certaines études ont mis en évidence des variations de teneurs de quelques formes de dégradation des phytates au cours de l'extrusion. Sandberg *et al.* (1986, cité par Champ, 1994) ont montré que les phytases (EC 3.1.2.26) étaient détruites au cours de l'extrusion. Alonso *et al.* (2001) ont observé une diminution de teneur en acide phytique dans des extrudats de pois gourmand et de haricot commun. Poltronieri *et al.* (2000) ont constaté, après extrusion de pois chiche, une petite augmentation de teneurs en inositol pentaphosphate (IP5), mais sans modification de la teneur en inositol hexaphosphate (IP6) et de la biodisponibilité de fer. En revanche, Zielinski *et al.*, (2001) ont observé une perte de 4 à 50%, selon la matière première considérée, de la teneur en IP6 dans des extrudats de blé, orge, seigle et avoine.

#### 2.4.2. Sur les protéines

Les protéines sont formées de chaînes d'acides aminés de longueur, de forme, de composition et de fonctions diverses et distinctes. En plus de fournir aux organismes de l'azote et du carbone nécessaire à leur métabolisme, les protéines maintiennent le système immunitaire, digestif, sexuel et permettent la croissance et la réparation des tissus. Il est donc obligatoire d'en consommer suffisamment pour se maintenir en bonne santé. Il existe en total 22 acides aminés donc 8 sont reconnus comme étant essentiels: Valine, Leucine, Isoleucine, Thréonine, Méthionine, Phénylalanine, Tryptophane, Lysine. La valeur nutritionnelle de protéines dépend de la proportion, de la digestibilité et de la disponibilité des acides aminés essentiels

L'extrusion, par l'inactivation ou destruction des facteurs anti-nutritionnels, permet d'améliorer la digestibilité des protéines (Cheftel, 1986; Arija *et al.*, 2006). La solubilité des protéines de légumineuses ayant subi une cuisson-extrusion est améliorée et les tests *in vitro* et *in vivo* montrent également une augmentation significative de la digestibilité des protéines. Ce phénomène a été observé par plusieurs chercheurs sur différentes matières premières. Marsman *et al.* (1995), par des tests *in vitro*, ont indiqué que l'extrusion permet d'augmenter de 60 à 81% la digestibilité des protéines. Cheng et Hardy (2003), par des tests *in vivo* réalisés sur des poissons, ont également démontré que l'extrusion augmente la digestibilité des protéines. Rémond *et al.* (2003) ont mis en évidence que des températures d'extrusion élevées permettent d'augmenter la valeur nutritionnelle des protéines du lupin. Mensa-Wilmot *et al.* (2001) ont vérifié au cours d'essais de digestibilité réalisés avec des rats que le coefficient d'efficacité protéique et la digestibilité réelle de protéines de farines extrudées préparées à base d'un mélange de maïs (50%), niébé (35%), soja (10%) et huile de soja (5%) étaient proches de celle de la caséine. Onyango *et al.* (2004c) ont montré que l'extrusion améliore nettement la digestibilité des protéines dans des extrudats préparés à partir de farine de *uji* (aliment fermenté à partir de petit mil, sorgho, manioc..). Abd El-Hady et Habiba (2003), par des tests *in vitro*, ont montré que la digestibilité des protéines de quatre espèces de légumineuses (petit pois, pois chiches, fève et haricot commun) est améliorée par l'extrusion. En comparant les effets de différents traitements sur la digestibilité de protéines de fève et de haricot commun, Alonso *et al.* (2000) ont constaté que l'extrusion est un traitement plus efficace que le décorticage, le trempage et la germination pour augmenter la digestibilité des

protéines. Beaucoup d'autres études ont également mis en évidence l'effet positif de la cuisson-extrusion (Ainsworth *et al.*, 1999; Arija *et al.*, 2006; Chivas-Vega *et al.*, 2006; Lichovnikova *et al.*, 2004; Malleshi *et al.*, 1996; Milan-Carrillo *et al.*, 2002; Su *et al.*, 2006; Zamora, 2003).

Les variations de teneurs en protéines et en acides aminés sont rarement citées dans la littérature. Néanmoins, Obatolu *et al.* (2000) ont constaté que les teneurs en acides aminés et en protéines augmentaient après extrusion dans un mélange à base de haricot et de maïs.

Cependant, d'autres études sur certaines caractéristiques des produits extrudés ont mis en évidence des effets néfastes de la cuisson-extrusion sur la digestibilité des protéines et des acides aminés. L'extrusion dénature les protéines par endommagement de leurs structures quaternaire et tertiaire et peut provoquer des polymérisations. L'extrusion réalisée à haute température et/ou à faible teneur en eau peut augmenter le nombre de ponts disulfures au sein des protéines et cette augmentation provoquer une diminution de digestibilité des protéines (Ljokjel *et al.*, 2000). L'effet néfaste de la cuisson-extrusion sur les acides aminés a été vérifié par Ilo et Berghofer (2003) à l'occasion d'essais d'extrusion de maïs concassé et fortifié avec de la lysine. Après extrusion réalisée avec un bi-vis (*longueur de vis*, 875mm; *T° de 150 à 180°C*; *vitesse de rotation de la vis*, 57 à 81 tr/min; *débit d'alimentation*, 45kg/h; *quantité d'eau ajoutée*, 13 à 17% MB), ils ont observé une diminution de la teneur en lysine (de 11 à 49%), en arginine (de 8 à 6%), en cystéine (de 8 à 15%), en méthionine (14%) et en tryptophane (14%). L'extrusion peut aussi provoquer une perte d'acides aminés lorsqu'elle intervient dans la fabrication de l'*uji* (Onyango *et al.*, 2004c; Onyango *et al.*, 2005). Une perte importante de lysine (50 à 80%) au cours d'extrusion a été mise en évidence par De Cindio *et al.* (2002) que l'on peut attribuer à des réactions de Maillard (Björck et Asp, 1983). La cuisson-extrusion peut aussi augmenter la teneur en GABA (acide gamma-aminobutyrique) et provoquer une diminution de teneur en acide glutamique, glycine et alanine dans des extrudats de riz germé (Otshubo *et al.*, 2005).

Par ailleurs, d'autres chercheurs n'ont pas observé d'effet de la cuisson-extrusion sur les protéines. Au cours d'essais d'extrusion d'amarante (*Amaranthus caudatus* L.) réalisés avec un extrudeur mono-vis (*diamètre de 20mm*; *LD = 20/1*; *T° 135-171°C*; *vitesse de rotation de la vis*, 200 tr/min; *débit d'alimentation*, 70g/minute; *teneur en eau*, 13 à 17 %; *diamètre de la filière*, 3mm) pour la fabrication de snack, Chavez-Jauregui *et al.* (2000) n'ont montré pas constaté de modifications de teneurs en acide aspartique, acide glutamique, glycine et lysine au cours de l'extrusion. Zamora (2003) a montré que la teneur en protéines de *Canavalia ensiformis* reste intacte après extrusion à 155°C. Ce résultat a également été observé par Van Hoan (2004) dans le cas d'extrusion de mélanges riz/sésame/soja.

#### 2.4.3. Sur les lipides

Les acides gras qui composent les lipides se divisent en trois catégories principales: les acides gras saturés, les acides gras mono insaturés et les acides gras poly-insaturés.

Les essais d'extrusion de matières ayant de faibles teneurs en lipides (<5%) ont démontré que ces lipides sont difficiles à extraire au cours d'extrusion (Berset, 1994). Il existe des interactions entre les lipides et les amidons notamment entre l'amylose et les acides gras et les monoglycérides qui sont plus ou moins affectées en fonction des modalités d'extrusion (*T°*, *teneur en eau* et *vitesse de rotation de la vis*). En travaillant avec de l'amidon de maïs additionné de 4% de lipides (acide myristique, acide stéarique, acide béhénique, monoglycérides de type Dimodan PV et tristéarine), Bhatnagar *et al.* (1994a) ont obtenu une complexation maximale de l'amylose de amidon de maïs par l'acide stéarique à 110-140°C, 19% humidité et 140 tr/min. L'intérêt technologique de ces interactions est de réduire les

fractions solubles de l'amidon qui confèrent les caractères collants aux produits extrudés (Berset, 1994). Plus la complexation de l'amylose par des acides gras est importante, plus les teneurs en fractions solubles des amidons sont faibles (Swcheizer *et al.*, 1996).

L'extrusion est une bonne méthode d'extraction des lipides des graines oléagineuses qui renferment de 17 à 50% d'huile. Normalement, cette extraction a besoin un chauffage prolongé des graines de 115 à 130°C suivi d'un floconnage. Mais grâce à la pression, l'extrusion permet d'obtenir de l'huile à la sortie de la filière et les tourteaux ne contiennent généralement plus que 1 à 3 % d'huile (Berset, 1994).

L'extrusion peut avoir des effets positifs sur la digestibilité des matières grasses (Lichovnikova *et al.*, 2004). Le problème majeur rencontré lors de l'extrusion de matières riches en lipides réside dans l'oxydation des acides gras qui entraîne l'apparition de produits de scission et la détérioration des qualités organoleptiques des produits extrudés (Berset, 1994). Les réactions d'oxydation peuvent se produire spontanément ou être initiées par la lipoxygénase qui catalyse la formation de peroxydes d'acides gras. Elles sont favorisées par certaines modalités d'extrusion ou de conservation (hautes températures, exposition à l'air, présence d'ions métalliques). Les oxydations des lipides (rancissement) ont des effets néfastes sur les qualités organoleptiques et la valeur nutritionnelle des produits extrudés. L'expansion des extrudats favorise les échanges avec l'oxygène et peut conduire à un changement rapide de flaveur.

Il est probable que les réactions d'oxydation ne puissent pas avoir lieu au cours d'extrusions réalisées dans un temps très court et dans des conditions défavorables (haute température, fort cisaillement, haute pression). La réduction de l'humidité des produits au cours de l'extrusion permet de retarder l'oxydation des lipides. De plus, les complexations entre lipides et amidon qui apparaissent en cours d'extrusion masquent les sites d'interaction de l'oxygène. Par ailleurs, la haute température de la vis et du fourreau inactive ou détruit les enzymes au cours du passage des produits dans l'extrudeur. Carmire *et al.* (1990) ont démontré que l'extrusion peut diminuer la libération des acides gras libres par dénaturation des enzymes hydrolytiques. L'augmentation de température s'accompagne une diminution de teneur en lipase qui permet de réduire les proportions d'acides gras libres (de 33% des acides gras totaux dans le son de riz à 3% dans le son extrudé) (Sayre *et al.*, 1985). Cependant, l'augmentation de teneurs en métaux, notamment le fer, dans des extrudats à cause de l'usure de la vis et du fourreau favorise l'oxydation. La teneur en fer et les taux de peroxydes sont plus importants dans les extrudats de riz et lentille que dans les matières premières correspondantes (Semwal *et al.*, 1994).

#### 2.4.4. Sur les fibres

Les fibres alimentaires sont la partie non digestible des plantes et elles jouent un rôle essentiel pour la santé. En raison de leur capacité à retenir d'eau, les fibres alimentaires gonflent et ramollissent le bol intestinal, ce qui facilite et augmente la vitesse du transit intestinal et l'évacuation des selles. Les fibres alimentaires sont présentes sous deux formes: les fibres solubles et les fibres insolubles.

Selon les modalités d'extrusion, on observe différents changements sur les composants des fibres. Au cours de l'extrusion de cosse de petit pois, on observe une diminution du poids moléculaire des pectines et des molécules hémicelluloses (Ralet *et al.*, 1993). L'extrusion en conditions sévères (à 163°C avec une vitesse de rotation de la vis de 225 à 450 tr/min) se traduit par une baisse de teneur de fibres alimentaires insolubles pour le son d'avoine et de riz et par une augmentation de teneurs en fibres solubles pour le son d'avoine, de riz et de blé (Gualberto *et al.*, 1997). En utilisant un extrudeur double-vis (90-140°C, vitesse de rotation de

la vis de 50 tr/min), [Vasanthan et al. \(2002\)](#) ont également mis en évidence un effet positif de l'extrusion sur les teneurs en fibres solubles des extrudats d'avoine. [Malleshi et al. \(1996\)](#) ont observé que la cuisson-extrusion à l'aide d'un mono-vis de mélanges à base de sorgho, petit mil et éléusine (*Eleusine coracana*) entraîne une augmentation de 10% de la teneur en fibres alimentaires solubles.

L'extrusion (130°C) et la cuisson à haute pression (0,1Mpa, 120°C, 25min) produisent un effet similaire sur le pois chiche ([Poltronieri et al., 2000](#)). Elles entraînent une augmentation significative de teneur en fibres alimentaires solubles et des diminutions de teneurs en fibres insolubles, en fibres totales et en amidon résistant. L'effet de l'extrusion est plus important sur la diminution de teneurs en fibres insolubles, en fibres totales et en amidon résistant que la cuisson à haute pression.

L'extrusion de matières riches en fibres comme les fruits confirme aussi ces effets. [Larrea et al. \(2005\)](#), par extrusion de pulpe d'orange entre 83 et 167°C (vitesse de rotation de la vis, 126 à 190 tr/min; débit d'alimentation de 70 g/min) dans un extrudeur de laboratoire, ont constaté que l'extrusion produit une diminution de 39% de fibres insolubles et une augmentation de 80% des fibres solubles. [Ohtsubo et al. \(2005\)](#) ont également observé ce phénomène à l'occasion de l'extrusion (150°C, vitesse de rotation de la vis, 150 tr/min, débit d'alimentation, 100g/min) de riz germé. Cependant, [Esposito et al. \(2005\)](#) ont indiqué que l'extrusion (140°C, vitesse de rotation de la vis: 400 tr/min) est responsable d'une augmentation de la teneur en fibres alimentaires insolubles dans des extrudats de son de blé. Des différences de matières premières et de méthodes d'analyses pourraient expliquer ces résultats contradictoires.

#### 2.4.5. Sur les vitamines et les anti-oxydants

Les vitamines sont des substances organiques relativement simples présentes dans les aliments et qui ont une action physiologique indispensable à la vie. Ces substances ne sont pas des sources d'énergie, mais elles agissent comme des catalyseurs et jouent un rôle essentiel pour l'homéostasie de l'organisme. Elles permettent d'accélérer des processus chimiques et physiologiques de l'organisme.

L'extrusion est considérée comme un traitement agressif qui entraîne des endommagements des vitamines et des caroténoïdes contenus dans les matières au cours de leurs passages dans l'extrudeur. En raison des conditions de hausse température, de fort cisaillement et de haute pression, elle peut influencer sur les vitamines des produits extrudés. En fonction de la sévérité de ses conditions de réalisation, l'extrusion peut réduire ou détruire totalement les vitamines disponibles dans des matières premières ou ajoutées dans des mélanges avant extrusion ([Björck et Asp, 1983](#); [Guzman-Tello et Cheftel, 1987](#); [Mercier, 1993](#)). En fonction de leur structure chimique et donc de leur sensibilité à chaleur, les vitamines peuvent subir des pertes plus ou moins importantes au cours de l'extrusion.

La vitamine A et ses dérivées sont très sensibles à chaleur. [De Muelenaere et Buzzard \(1969\)](#) ont constaté une perte de 50% de vitamine A pendant l'extrusion de mélange à base de maïs. La teneur en  $\beta$ -carotène dans les extrudats diminue lorsque la température d'extrusion augmente (de 100°C à 220°C) et ou que la teneur en eau des produits diminue (de 24% à 14%) ([Guzman-Tello et Cheftel, 1990](#)). Dans le cas de la fabrication de snacks à base de céréales par un bi-vis (70 à 140°C; vitesse de rotation de la vis, 700 tr/min), [WeiGuo et al. \(2004\)](#) ont observé une perte de vitamine A de plus de 30%.

Les pertes en vitamines du groupe B pendant la cuisson extrusion sont variables et dépendent des conditions d'extrusion. [Harper et al. \(1977, cité par Harper 1981\)](#) ont constaté que les pertes en thiamine après extrusion de mélanges maïs/soja à 154 et 171°C étaient,

respectivement, de 5 à 10%. [Ohtsubo et al. \(2005\)](#), par extrusion de riz germé (150°C; vitesse de rotation de la vis de 150 tr/min), ont montré que la perte en biotine est de 6%. [WeiGuo et al. \(2004\)](#) ont observé des pertes variables en fonction des conditions d'extrusion, mais restant modérées (<15%), pour les vitamines du groupe B (B1, B2, B6) et pour la vitamine D. Une perte de 17 à 30% de la thiamine a été observée dans le cas de l'extrusion de blé (155,5-167°C; vitesse de rotation de la vis, 100 à 300 tr/min; teneur en eau des produits, 25%) ([Cha et al., 2003](#)). La rétention des vitamines groupe B dans des snacks à base de différents matières (maïs, avoine et mélange maïs/petit pois) a été également étudiée par [Athar et al. \(2006\)](#): Ils ont retrouvé de 44 à 62% des vitamines après extrusion à 130-160°C et ont observé que la riboflavine et la niacine étaient plus stables que la pyridoxine et la thiamine, cette dernière étant la plus sensible des 4 vitamines étudiées. L'extrusion à faible teneur en eau peut même provoquer une destruction totale de la thiamine. [Ilo et Berghofer \(1998\)](#) ont montré que l'extrusion avec des temps de séjour relativement long (85 et à 131s) dans des conditions relativement sévères (140 à 200°C; teneur en eau ajoutée, 11,8 à 14,2% de la MB; vitesse de rotation de la vis, 65 à 81 tr/min; débit d'alimentation, 37 à 51kg/h) se traduisait par une destruction de 67 à 100% de la thiamine ajoutée (9-93 mg/kg) avant extrusion dans du maïs concassé. Plus la température est élevée, plus le taux destruction est important. La destruction totale a été obtenue à la température la plus haute (200°C). Cependant, l'extrusion réalisée dans des conditions modérées ne provoque pas de changement sur les vitamines groupe B. [Ibanoglu et al., \(1997\)](#), en réalisant une extrusion à haute teneur en eau (43%) et à 60-120°C, ont démontré que la teneur en thiamine et riboflavine de Tarhana (mélange à bas de yoghourt et de farine de blé) reste intacte après extrusion. Le séchage des extrudats à 55°C pendant 48h ne produit pas non plus d'endommagement de la riboflavine. Les diminutions de vitesse de rotation de la vis et de teneur en eau ajoutée s'accompagnent d'une augmentation de la perte en thiamine. [Suparno et al. \(2005\)](#), en extrudant de la farine de blé, ont également confirmé l'effet de la teneur en eau sur la destruction de thiamine que [Ilo et Berghofer \(1998\)](#) avaient précédemment observé.

L'effet de la cuisson extrusion dans des conditions sévères (haute température, haute cisaillement) sur la vitamine C ne sont pas encore reporté dans littérature. Cependant, certain auteurs ont mis en évident la perte de cette vitamine avec des essais à une température inférieur de 100°C. [Plunkett et Ainsworth \(2007\)](#) ont étudié la rétention d'acide L-ascorbique dans des extrudats de riz préparés à des températures variant de 75°C à 100°C et avec des vitesses de rotation de la vis de 100 à 300 tr/min. Les résultats de cette étude donnent des taux de rétention variant de 56 à 79%. [Anderson et Sunderland \(2002\)](#) ont montré que la vitamine C et l'astaxanthine sont assez stables et que leur rétention, après extrusion dans des conditions relativement peu sévères (80°C) est de 93% et 86%, respectivement.

La vitamine E est davantage sensible à chaleur. L'extrusion dans des conditions sévères (120-200°C; vitesse de rotation de la vis, 500 tr/min; humidité, 20%; débit d'alimentation, 225g/min) provoque une perte de 63 à 94% du tocophérol et du tocotrienol dans des extrudats de blé, orge et seigle ([Zielinski et al., 2001](#)). Dans des conditions moins sévères (135°C; vitesse de rotation de la vis; 150-300 tr/min; teneur en eau ajoutée, 23%), [Pansawat et al. \(2004\)](#) ont observé des pertes de 24 à 46% de la vitamine E au cours de l'extrusion de snacks à base de riz. L'extrusion à faible température ne se traduit que par une perte de 33% de la vitamine E dans un aliment pour poissons à base de blé et maïs ([Anderson et Sunderland, 2002](#)).

L'extrusion peut améliorer la biodisponibilité de certaines vitamines ([Ng et al., 1998](#)): réalisé à 150°C, l'extrusion peut augmenter de 57% la biodisponibilité de la niacine dans des extrudats de maïs, c'est-à-dire nettement plus que ne peuvent le faire des traitements de cuisson au four ou de cuisson classique ([Carter et Carpenter, 1982, cité par Ng et al., 1998](#)).

En résumé, l'augmentation de température d'extrusion, celle de la vitesse de rotation de la vis ainsi que la diminution de la teneur en eau ou celle du débit d'alimentation augmentent les pertes en vitamines. L'extrusion dans des conditions moins sévères permet de minimiser les pertes de vitamines.

Les anti-oxydants de la plupart des aliments sont des composés phénoliques comme la proanthocyanidine ou les flavonols. Ils jouent un rôle important dans la protection contre les dégradations dues aux oxydations dans les cellules. L'extrusion provoque une diminution de 24% à 46% des composés phénoliques totaux dans des extrudats d'avoine (Viscidi *et al.*, 2004). En extrudant un mélange de pois chiche/farine de maïs/farine d'avoine/amidon de maïs/farine de carotte/farine de noisette (3/2/2/1,5/1/0,5), Ozer *et al.* (2006) ont observé qu'une augmentation de la vitesse de rotation de la vis et une diminution de teneur en eau des matières premières provoquaient une diminution des activités totales des antioxydants.

#### 2.4.6. Sur les minéraux

Les minéraux, comme les vitamines, ne sont pas des sources d'énergie mais, en association avec d'autres nutriments, ils sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme. Les minéraux ne peuvent pas être synthétisés ou décomposés par des réactions chimiques.

Il n'y a pas de perte de minéraux au cours de l'extrusion car ils ne sont pas volatilisables. En revanche, la teneur en fer peut augmenter en raison de l'usure de la vis et du fourreau. Alonso *et al.* (2001) ont montré que l'extrusion est à l'origine d'une augmentation significative de teneur en fer dans des extrudats de petit pois et de haricot commun.

L'extrusion est connue comme un traitement permettant d'améliorer la biodisponibilité des minéraux. A l'issue de tests *in vitro*, Hazell et Johnson (1989, cité par Champ, 1994) ont conclu que l'extrusion (130°C; humidité: 24%; débit de l'alimentation: 25kg/h, vitesse de vis: 200tr/min) améliore la biodisponibilité de fer dans les snacks à base de maïs. A partir des résultats de tests *in vivo*, Alonso *et al.* (2001) ont montré que l'extrusion de pois gourmand et de haricot commun augmentait l'absorptivité du Ca, Mg, Zn et P chez des rats. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la diminution de teneurs en facteurs anti-nutritionnels (phytates, tanins et lectines). L'extrusion permet, dans certaines conditions, d'hydrolyser les phytates, et par conséquent, de libérer des atomes de phosphore. La biodisponibilité du fer dans le pois chiche extrudé a été évaluée par Poltronieri *et al.* (2000) lors d'un test réalisé sur des rats: ils ont conclu que l'extrusion et la cuisson-extrusion (130°C) confèrent une biodisponibilité identique que la cuisson à haute pression (0,1MPa, 120°C, 25min).

En outre, certaines études ont mis en évidence un effet négatif de l'extrusion sur la biodisponibilité des minéraux. L'extrusion de mélanges à base de soja diminue l'absorptivité du Mg et du P chez des saumons (Cheng et Hardy, 2003).

#### 2.4.7. Sur les caractéristiques des amidons

##### 2.4.7.1. *Généralités*

Les effets de la cuisson-extrusion sur l'amidon ont fait l'objet de nombreuses études visant à conférer aux extrudats de nouvelles propriétés fonctionnelles et nutritionnelles. Ces études ont été faites à trois niveaux: moléculaire, cristallin et granulaire (Colonna et Buléon, 1994).

Deux polymères composent l'amidon: l'amylose et l'amylopectine. La modification moléculaire de l'amidon au cours de l'extrusion se traduit par une diminution du degré de polymérisation. Dans des matières où les enzymes sont inactivées, la dégradation des molécules constitutives de l'amidon se traduit par l'apparition de glucose et de fructose. Vergnes *et al.* (1987, cité par Colonna et Buléon, 1994) ont proposé de prendre la viscosité intrinsèque comme indicateur de l'effet de la cuisson-extrusion sur le degré de

polymérisation. Ils ont démontré que la cuisson-extrusion entraîne une baisse de viscosité intrinsèque qui s'explique par une baisse de masse moléculaire. La solubilité dans l'eau et le taux de gonflement des amidons sont deux autres indices du degré de polymérisation. L'amidon natif est complètement insoluble dans l'eau à température ambiante. En revanche, les amidons extrudés sont partiellement solubles comme le montre la détermination du WSI (Water solubility index) qui mesure la quantité de matière sèche solubilisée dans le surnageant (Anderson *et al.*, 1969). Les amidons extrudés sont aussi partiellement hydratés et le taux de gonflement, qui est déterminé par la quantité d'eau fixée à l'amidon (WAI, exprimé en g d'eau par g d'amidon) est fréquemment utilisé pour évaluer le niveau de dégradation moléculaire de l'amidon après extrusion.

Par ailleurs, l'observation des spectres de diffraction des rayons X qui permettent d'étudier l'effet de la cuisson-extrusion sur les phases cristallines de l'amidon (Charbonnière *et al.*, 1973, cité par Colonna et Buléon, 1994), montre que l'extrusion à plus de 70°C provoque une disparition totale de la structure cristalline de l'amidon. Les granules d'amidon sont comprimés et transformés en un matériau dense par le cisaillement (Colonna et Buléon, 1994).

#### 2.4.7.2. Gélatinisation, dextrinisation, gonflement (WAI) et solubilité (WSI) dans l'eau

La gélatinisation de l'amidon se traduit par une absorption d'eau et un gonflement des granules quand l'amidon est chauffé après avoir été mélangé à de l'eau. La température à laquelle l'absorption d'eau et le gonflement démarrent est appelée température de gélatinisation. La température de gélatinisation dépend de l'origine botanique des amidons (Harper, 1981). Généralement, elle est plus élevée pour les amidons de tubercules que pour les amidons de racines et que pour les amidons de céréales. Pour mesurer le taux de gélatinisation, on peut observer ou mesurer différentes modifications (Chiang et Johnson, 1977): détermination en microscopie électronique de la température à laquelle les grains perdent leur biréfringence; taux de gonflement; taux de solubilité; mesure de la viscosité; spectre de diffraction aux rayons X; susceptibilité enzymatique.

La dextrinisation a lieu quand l'amidon faiblement hydraté est soumis à une haute température. En extrudant du maïs concassé ayant une teneur en eau inférieure à 22%, Williams et Baer (1966, cité par Harper, 1981) ont observé une dextrinisation de 20 à 25% de l'amidon.

Le WAI et le WSI traduisent des propriétés fonctionnelles de l'amidon. Le WAI est d'autant plus élevé que la proportion d'amidon natif est faible: il augmente avec le niveau d'endommagement et de dextrinisation des molécules d'amidon.

Le WAI et le WSI des extrudats préparés à partir de matières premières à forte teneur en amidon dépendent des prétraitements avant extrusion. En réalisant des extrusions en conditions standardisées (*mono-vis*,  $L/D = 25:1$ ;  $T^\circ$  au niveau de la filière, 130-140°C; vitesse de rotation de la vis, 200 tr/min; débit d'alimentation, 33,4 à 50,1 g/min), Allen *et al.* (2007) ont observé que les extrudats de maïs normal avaient un WAI plus élevée et un WSI moins élevée que les extrudats de maïs cireux pré-gélatinisés.

#### 2.4.7.3. Viscosité et écoulement des bouillies

En raison de la gélatinisation et de la dextrinisation de l'amidon qui surviennent lors du passage des matières premières dans l'extrudeur, l'extrusion est connue comme un procédé efficace pour réduire la viscosité de bouillies préparées à partir d'extrudats à forte teneur en amidon. Onyango *et al.* (2004a) ont constaté que la fermentation d'un mélange de maïs, mil, sorgho et manioc (*uji*) ne suffisait pas à elle seule pour modifier la viscosité de bouillies

préparée à partir de l'*uji*, mais que l'extrusion de l'*uji* à 150-180°C permettait de réduire la viscosité des bouillies. En utilisant un extrudeur mono-vis et en travaillant avec différents mélanges (*sorgho/haricot mungo/lait en poudre*; *petit mil/haricot mungo/lait en poudre*; *éleusine /haricot mungo/lait en poudre*), [Malleshi et al. \(1996\)](#) ont montré que la viscosité de bouillies préparées à partir des mélanges non extrudés était plus importante que celle de bouillies préparées à partir des mélanges extrudés. [Mercier et Feillet \(1975, cité par Harper, 1981\)](#) pour le riz, le maïs et le blé, [Mosqueda et al. \(1986\)](#) pour la farine de riz, [Njoki et Faller \(2001\)](#) pour des mélanges à base de plantain, soja et maïs et [Mouquet et al. \(2003\)](#) pour des mélanges à base de riz, soja et sésame ont confirmé cet effet de la cuisson-extrusion sur la viscosité des bouillies.

La gélatinisation endommage les granules d'amidon diminuant ainsi leur capacité de gonflement dans l'eau sous l'effet d'un traitement thermique. Le niveau d'endommagement dépend de la nature de l'amidon, du niveau de cisaillement mécanique, de la température et des produits chimiques présents au moment de la gélatinisation. [Guha et al. \(1998\)](#) ont montré que l'extrusion réduit la viscosité de bouillie préparée à partir de farine de riz extrudé et qu'une augmentation de vitesse de rotation de la vis (de 200 tr/min à 400 tr/min) se traduit par une diminution de la viscosité des bouillies préparées à partir des extrudats.

La réduction de viscosité des bouillies serait due à une réduction, au cours de l'extrusion, de la taille des macromolécules constituant l'amidon, en particulier l'amylopectine ([Fayard et al., 2004](#)).

#### 2.4.7.4. Caractère instantané des farines

Dans littérature, il n'existe pas de définition reconnue par tout le monde du caractère instantané des farines, c'est-à-dire de leur aptitude à être préparées sous forme de bouillies par simple mélange avec de l'eau tiède. On peut, néanmoins considérer que le degré de gélatinisation est un indicateur de l'instantanéité d'une farine. Il est connu que l'amidon cru n'est que très lentement hydrolysé par les enzymes et que la cuisson améliore sa digestibilité. La gélatinisation de l'amidon obtenue au cours de l'extrusion est donc un facteur déterminant de la digestibilité de l'amidon contenu dans les extrudats ([Holm et al., 1988](#)). La cuisson-extrusion réalisée en conditions sévères permet d'obtenir des extrudats dont l'amidon est presque totalement gélatinisé ([Mouquet et al., 2003](#)) et que l'on peut considérer être instantanés.

#### 2.4.7.5. Expansion des extrudats

L'expansion des extrudats à la sortie de la filière influe de manière très importante sur l'apparence et la dimension des produits extrudés. [Colonna et Buléon \(1994\)](#) ont indiqué que l'expansion des produits riches en amidon ne se produit que si les produits dépassent la température de 100°C dans la filière. Comme l'expansion des extrudats influe de manière directe sur la texture de produits extrudés, [Bouvier \(1997\)](#) insiste sur l'importance de son optimisation.

L'expansion des extrudats est difficile à contrôler ([Launay, 1994](#)). Elle dépend de plusieurs facteurs comme la teneur en eau ([Faubion et Houseney, 1982a](#); [Iwe et Ngoddy, 1998](#); [Ryu et Ng, 2001](#); [Bhattacharya, 1997](#); [Ding et al., 2005](#); [Guha et Ali, 2006](#); [Singh et al., 2007a](#)), la teneur en amidon ([Iwe et Ngoddy, 1998](#)), la teneur en amylose ([Charbonnière et al., 1973](#); [Iwe et Ngoddy, 1998](#)), la teneur en lipides ([Faubion et Houseney, 1982a](#), [Bhatnagar et al., 1994a](#); [1994b](#)), la taille des matières premières ([Garber et al., 1997](#); [Desrumaux et al., 1998](#), [Mathew et al., 1999](#)), la température ([Mercier et Feillet, 1975](#); [Baik et al., 2004](#); [Altan et al., 2007](#)), le débit de l'alimentation ([Baik et al., 2004](#); [Ding et al., 2005](#)), la vitesse de rotation de

la vis (Ali *et al.*, 1996; Bhattacharya, 1997; Baik *et al.*, 2004; Ainsworth *et al.*, 2007) ainsi que du diamètre de la filière (Sokhey *et al.*, 1997; Choudhury et Gautam, 1998).

#### 2.4.7.6. Digestibilité de l'amidon

En général, la cuisson-extrusion augmente la digestibilité de l'amidon des produits extrudés (Cheftel, 1986). Ce changement résulte de dégradations de l'amidon au cours de l'extrusion (Hagenimama *et al.*, 2006). L'augmentation du degré de gélatinisation s'accompagne d'une augmentation de la digestibilité de l'amidon (Holm *et al.*, 1988). Onyango *et al.* (2005), en réalisant des tests *in vitro* et *in vivo*, ont montré que l'extrusion peut multiplier par 10 la digestibilité de l'amidon. L'amidon de niébé extrudé à 180°C possède une meilleure digestibilité que celui de niébé cru (Rivas-Vega, 2006).

L'extrusion diminue la teneur en amidon résistant et augmente la teneur en amidon digestible pour l'orge, le petit pois et des mélanges amidon de pomme de terre/son de blé (Sun *et al.*, 2006). En comparant les effets de l'extrusion, du décorticage, du trempage et de la germination, Alonso *et al.* (2000) ont montré que l'extrusion était plus efficace que les 3 autres procédés pour améliorer la digestibilité des amidons.

#### 2.4.8. Sur la qualité sanitaire

En fonction des conditions plus ou moins sévères de sa réalisation et de la nature des matières premières, la cuisson-extrusion peut être utilisée pour détruire les micro-organismes, décontaminer les produits, réduire leur charge microbienne totale, les pasteuriser ou les stériliser.

L'extrusion à faible teneur en eau (2-15%) et à une température supérieure à 100°C provoque une destruction totale des espèces pathogènes et une réduction des spores bactériennes. Il est généralement considéré que l'extrusion confère aux différents aliments une bonne qualité bactériologique (Seiler et Seibel, 1978, *cité par* Cheftel, 1994). Une destruction importante de flore totale (de  $10^5$  bactéries/g avant extrusion à moins de 10 bactéries/g dans les extrudats) a été observée par Noguchi (1986, *cité par* Cheftel, 1994) à l'occasion de l'extrusion de blanc d'œuf à 150°C avec un temps de séjour d'environ 30 secondes. L'extrusion de son de riz (150°C; vitesse de rotation de la vis, 60 à 240 tr/min; débit d'alimentation, 10 à 30kg/h) permet non seulement de détruire totalement les coliformes, les levures et moisissures et les bactéries thermorésistantes, mais aussi de réduire de  $10^7$  à moins de  $3.10^2$  par g le nombre total de microorganismes. Par ailleurs, Noguchi (1986) a montré que le temps de séjour et la teneur en eau sont deux facteurs importants de la destruction ou de la réduction du nombre des bactéries: la destruction est d'autant plus importante que la durée de séjour dans l'extrudeur est longue et que la teneur en eau des matières premières est faible. L'extrusion réalisée dans certaines conditions (150°C; vitesse de rotation de la vis, 400 tr/min; débit d'alimentation, 10 à 20kg/h; longueur de vis, 1317mm) permet la décontamination des épices (poivre noir et paprika) en réduisant le nombre de micro-organismes à moins de  $10^3$  spores bactériennes par g (Gry *et al.*, 1984; Gry et Holm, 1987, *cités par* Cheftel, 1994). Cette méthode de décontamination a été également utilisée par Givaudan et Cie SA (Brevet Européen 0012813) et par Bayusik et Chen (1978, *cité par* Cheftel, 1994). En général, le temps nécessaire pour décontaminer des épices par extrusion à 120-145°C est de 45 à 120 secondes dont 10 secondes dans la zone la plus chaude (Cheftel, 1994) à condition que le mélange contienne moins de 10% d'huiles essentielles et moins de 14% d'eau afin d'assurer une bon échauffement par friction et d'obtenir des extrudats ayant une faible teneur en eau pour faciliter leur conservation

Quéguiner *et al.* (1989, *cité par* Cheftel, 1994) ont confirmé l'efficacité de cette méthode en étudiant l'effet de l'extrusion sur la réduction du nombre de cellules végétatives et de spores

bactériennes ajoutés dans les aliments avant extrusion. Une bactérie thermorésistante, *Streptococcus thermophilus*, a été choisie comme micro-organisme indicateur. Un charge d'environ  $5 \times 10^5$  micro-organismes par g de cette bactérie a été ajoutée dans un isolat protéinique de lactosérum (4-5% d'eau, 85% de protéines par rapport à la matière sèche, <1% de lactose ou de lipides). Les essais d'extrusion ont été réalisés avec un extrudeur bi-vis avec des vis de longueur 500 mm et un temps de séjour de 20-25 s ou des vis de longueur 1000 mm et un temps de séjour de 35 à 40 s, en l'absence de filière, à des températures variant entre 80 et 204°C, avec une vitesse de rotation de la vis de 50 tr/min et un débit d'alimentation de 10kg/H. Ces conditions expérimentales ont permis d'obtenir des réductions du nombre de *Streptococcus thermophilus* de  $10^{4.2}$  avec la vis de 500 mm de longueur à la température de 143°C et de  $10^{4.9}$  avec la vis de 1000 mm de longueur à la température de 133°C sans provoquer de dénaturation des protéines pouvant modifier leur solubilité et leur pouvoir gélifiant ni modifier les autres caractéristiques physicochimiques des extrudats. Ces résultats montrent que la cuisson-extrusion peut être utilisée pour la pasteurisation des ingrédients alimentaires pulvérulents thermosensibles sans aucun changement apparent de leurs propriétés fonctionnelles, sensorielles ou nutritionnelles (Cheftel, 1994).

Pour vérifier les effets stérilisateur de la cuisson-extrusion, *Bacillus thermophilus* FS1518, une des spores bactériennes les plus thermorésistantes trouvées dans les aliments, a également été introduite dans un mélange alimentaire de type biscuit contenant de la farine de blé, de l'amidon de maïs, du caséinate de sodium et du saccharose (Bouversesse *et al.*, 1982; Van de Velde *et al.*, 1984; Van de Velde-Mary, 1985, cité par Cheftel, 1994). Trois millilitres d'inoculum liquide contenant  $10^{10}$  ou  $10^{11}$  spores ont été ajoutés (en moins d'une seconde) dans l'orifice d'alimentation en cours d'extrusion. L'extrusion a été réalisée à la température de 165°C ou de 182°C, avec une vitesse de rotation de la vis de 80 tr/min, un débit d'alimentation de 40kg/h et une teneur en eau de 14%. Des déterminations du nombre de spores vivantes dans des biscuits ont permis de mettre en évidence des taux de réduction du nombre de *Bacillus thermophilus* variables en fonction des conditions d'extrusion et du moment choisi pour réaliser les prélèvements d'échantillons. Malgré l'ajout des spores permettant d'obtenir un niveau de contamination au moins  $10^8$  fois supérieur à celui correspondant à la contamination habituelle des ingrédients alimentaires (environ 10 spores thermorésistante par g), aucune spore n'a été retrouvée vivante dans les biscuits collectés 75s (extrusion réalisée à 165°C) et 30s (extrusion réalisée à 182°C) après l'introduction des spores dans l'extrudeur. Pour des durées de séjour inférieures, des spores survivantes ont été retrouvées. Les taux de réduction des spores (nombre de spores après extrusion/nombre de spores avant extrusion) sont de  $2,9 \times 10^{-5}$  pour l'extrusion réalisée à 165°C et de  $7,4 \times 10^{-8}$  pour celle réalisée à 182°C. Cheftel (1994) a supposé qu'une extrusion à 150°C avec un temps de séjour égal ou supérieur à 40s peut stériliser la plupart des aliments.

Par ailleurs, Ohtsubo *et al.* (2005) ont étudié les effets de l'extrusion sur la destruction des colonies d'*Escherichia coli* dans du riz poli, du riz non poli et du riz non poli germé en utilisant un extrudeur bi-vis (150°C; diamètre de la vis, 30 mm; rapport L/D, 18,5; vitesse de rotation de la vis, 150 tr/min; débit d'alimentation, 100g/min; pression, 4,2 à 6, 0 Mpa). Le nombre de colonies avant extrusion dans les trois riz était de  $2,3 \cdot 10^3$ ,  $8,8 \cdot 10^4$  et  $9,6 \cdot 10^5$ , respectivement. Après extrusion, aucune colonie n'était survivante ce qui confirme que l'extrusion réalisée dans les conditions décrites permet une destruction totale des micro-organismes.

La réduction du nombre de microorganismes (coliformes totaux, coliformes fécaux, entérocoques, bactéries hétérotrophes, bactéries aérobiques et aérobiques facultatives) dans des aliments pour bétail a été étudiée par Kelley et Walker (1999) sur un mélange alimentaire de type pâte contenant des déchets d'aliments issus de cafétéria (40%), de cosses de soja

(55%) et de maïs (5%). L'extrusion a été réalisée par un mono-vis à la température de 110 à 135°C, avec un diamètre d'orifice de 0,79 cm et une teneur en eau de 31 à 41%. Les auteurs ont mis en évidence des diminutions importantes du nombre de bactéries après extrusion: de  $4,02 \times 10^3$  à  $2 \times 10^0$ /g pour les coliformes totaux; de  $4,37 \times 10^3$  à  $2 \times 10^0$ /g pour les coliformes fécaux; de  $193 \times 10^3$  à  $2 \times 10^0$ /g pour les entérocoques; de  $1,16 \times 10^3$  à  $2 \times 10^0$ /g pour les staphylocoques; de  $1,73 \times 10^4$  à  $4,96 \times 10^3$ /g pour les bactéries hétérotrophes. L'augmentation de température (de 110°C à 130°C) se traduit par une diminution encore plus importante du nombre de bactéries. En remplaçant les déchets d'aliments par des déchets d'élevage porcin, [Kelley et Walker \(2000\)](#) ont obtenu les mêmes résultats.

#### 2.4.9. Sur les caractéristiques organoleptiques

En plus de ses effets sur l'expansion, une des caractéristiques organoleptiques importantes des produits extrudés, l'extrusion est également à l'origine de changements de couleur dans les extrudats.

Dans le cas de la fabrication de farines infantiles, la couleur est un facteur important qui peut considérablement influencer sur leur acceptabilité organoleptique par les mères. [Iwe et Ngoddy \(1998\)](#) ont obtenu des extrudats ayant une couleur plus sombre que les matières premières en extrudant un mélange plantain/maïs/soja. D'autres études ont confirmé les effets des conditions d'extrusion sur les changements de couleur. [Bhattacharya et al. \(1997\)](#) ont étudié le changement de couleur au cours d'essais d'extrusion (*100 à 170°C; vitesse de rotation de la vis entre 100 et 400 tr/min; teneur en eau de 18%*) d'un mélange riz/haricot mungo présentant avant extrusion des indices de couleur blanche, jaune et rouge (mesuré par un UV visible Spectrophotomètre), respectivement de 91,8, 14,8 et 2,2. Les extrudats possédaient un indice de couleur blanche allant de 70,6 à 82,7 indiquant une couleur plus sombre, un indice de couleur jaune compris entre 19,0 et -33,8 d'autant plus élevé que l'extrusion se faisait à haute température et à une vitesse élevée de rotation de la vis tandis que l'indice de couleur rouge ne variait pas. Des évolutions comparables de l'intensité de couleur blanche et jaune ainsi qu'une augmentation de l'intensité de couleur rouge ont été également observées par [Ilo et Berghofer, \(1999\)](#) après extrusion de maïs à différentes températures (140-180°C), vitesses de rotation de la vis (60-80 tr/min), teneurs en eau ajoutée (13-17% p/r MB) et vitesses d'alimentation (38-52 kg/h). [Onyango et al. \(2004\)](#) ont montré que l'ajout de sucre aux mélanges pouvait amplifier les variations de couleur qui s'observent généralement après extrusion. L'ajout de fructose, de saccharose et de maltose aux mélanges avant extrusion permet d'augmenter l'intensité de la couleur blanche dans les extrudats tandis que l'ajout de glucose produit l'effet inverse. Les indices de couleur jaune et rouge augmentent de manière plus importante avec l'ajout de monosaccharides qu'avec celui de disaccharides ce qui peut s'expliquer par la sensibilité plus importante des monosaccharides aux réactions de Maillard. Des changements de couleur ont également été rapportés à l'issue d'autres études ([Ilo et al., 1999; Milan-Carrillo et al., 2002](#)).

D'une façon générale, les réactions Maillard et la diffusion de fer en raison de l'usure de la vis sont les raisons principales des changements de couleur dans les produits extrudés. Une bonne maîtrise de conditions d'extrusion (*température, vitesse de rotation de la vis, teneur en eau, débit d'alimentation*) est nécessaire pour optimiser la couleur des extrudats.

## 2.5. Facteurs modifiant les effets de la cuisson-extrusion

### 2.5.1. Température

La température d'extrusion est obtenue par auto-échauffement de la matière au cours de son passage entre la vis et le fourreau par dissipation visqueuse de l'énergie mécanique transmise au produit dans les zones de cisaillement intense et/ou par la chaleur fournie soit par injection de vapeur, soit par des résistances électriques, soit par induction magnétique, soit par la circulation de fluides (eau, huile) caloporteurs. La température dépend des matières premières et des systèmes de régulation de température utilisés.

Des différences de température d'extrusion peuvent se traduire par des effets différents sur les caractéristiques des extrudats préparés à partir de matières amylacées. Une augmentation de la température d'extrusion s'accompagne d'une augmentation de l'expansion des extrudats à base de maïs (Ali *et al.*, 1996; Thymi *et al.*, 2005), de riz (Bhattacharya, 1997; Ding *et al.*, 2005; Guha et Ali, 2006; Singh *et al.*, 2007a) et de ceux à partir de mélanges blé/maïs (Ryu et Ng, 2001). Mais, certains chercheurs ont observé des résultats inverses: Atlan *et al.* (2008) ont montré qu'une augmentation de température de 140 à 160°C entraîne une diminution de l'expansion de snacks à base d'orge et de tomate; Ilo *et al.* (1999) et Mendonça *et al.* (2000), ont observé le même phénomène avec des mélanges riz/amarante et maïs/son de maïs extrudés à 150 et 190°C.

En outre, la température est un paramètre important qui influence les caractéristiques rhéologiques des extrudats (Akdogan, 1996). Plus les températures atteintes au cours de l'extrusion sont importantes, moins leur viscosité après préparation sous forme de bouillies est élevée (Mercier et Feillet, 1975; Guha *et al.*, 1998; Gutkoski et El-Dash, 1999; Guha *et al.*, 2003; Kadan *et al.*, 2003). En étudiant des mélanges à base de riz et de châtaigne, Sacchetti *et al.* (2004) ont montré que l'extrusion à haute température produit des extrudats fortement gélatinisés ce qui pourrait expliquer l'effet positif de la température sur les caractéristiques rhéologiques des bouillies.

Le gonflement (WAI) et la solubilité (WSI) dans l'eau des extrudats dépendent de la température d'extrusion. A faible température (60-110°C), Reyes-Moreno *et al.* (2003) ont observé un effet positif d'une augmentation de température sur le WAI des extrudats de maïs. Guha et Ali (2006), en extrudant du riz à des températures variant entre 80 et 120°C, ont montré que le WSI croît avec la température. Les effets de la température sur le WAI et le WSI à des températures plus élevées (>100°C) ont été abondamment étudiés. Plus les températures au cours de l'extrusion sont importantes, plus le WAI et le WSI des extrudats de riz sont élevés (Guha *et al.*, 2003; Kadan *et al.*, 2003). Ce phénomène a été également observé pour des mélanges riz/châtaigne (Sacchetti *et al.*, 2004) et riz/petit pois (Singh *et al.*, 2007a). En revanche, Altan *et al.* (2008) ont démontré que l'augmentation de température (de 140°C à 160°C au cours de la préparation de snacks à base d'orge et de tomate se traduit par une baisse de leur WAI et de leur WSI. De plus, dans certains cas, des variations de température d'extrusion ne font pas varier le WAI et le WSI dans le même sens: l'augmentation de température d'extrusion s'accompagne d'une augmentation de WAI et d'une diminution de WSI dans le cas de l'extrusion de l'avoine (Gutkoski et El-Dash, 1999) et de pois chiches (Milan-Carrillo *et al.*, 2002); en revanche, lorsqu'on fait varier la température d'extrusion d'un mélange sorgho/niébé entre 130 et 165 °C (Pelembé *et al.*, 2002) et celle du riz entre 100 et 140°C (Ding *et al.*, 2006), le WAI est diminuée tandis que la WSI est augmentée.

La température d'extrusion peut avoir un effet sur les teneurs en fibres des produits extrudés beaucoup plus important que les effets des modifications de la vitesse de rotation de la vis ou

de la teneur en eau des produits. A vitesse constante (192 t/min), l'augmentation de température (de 83-167°C) s'accompagne d'une diminution de la teneur en fibres alimentaires insolubles et d'une augmentation de la teneur en fibres totales (Larrea *et al.*, 2005). La diminution de la teneur en fibres alimentaires insolubles peut s'expliquer par des ruptures de liaisons covalentes et non-covalentes entre les glucides et les protéines associés dans les fibres alimentaires.

L'augmentation de température provoque normalement des pertes importantes en vitamines thermolabiles (Zielinski *et al.*, 2001). En comparant les effets de variations de la température sur la destruction de la thiamine à ceux de variations de teneur en eau, de vitesse de rotation de la vis ou de débit d'alimentation, Ilo et Berghofer (1998) ont démontré que, au cours de l'extrusion du maïs, les effets des variations de température sont les plus importants. Ils ont notamment enregistré des pertes de 67% et 100% de la thiamine pour des températures de 140°C et 200°C. A des températures d'extrusion plus faibles (de 155 à 167°C) et à teneur en eau de 25%, Cha *et al.* (2003) ont observé des pertes en thiamine moins élevées (de 17 à 30%) lors de l'extrusion de farine de blé fortifiée avec 0,3% de thiamine. Par ailleurs, Guzman-Tello et Cheftel (1990) ont démontré que l'augmentation de température de 100°C à 220°C entraîne une diminution drastique des teneurs en carotène et de l'intensité de la couleur dans des extrudats de blé.

Des augmentations de température de 130 à 160°C pour le pois chiche (Milan-Carrillo *et al.*, 2002), de 60 à 110°C (Reyes-Moreno *et al.*, 2003) et de 140 à 180°C (Ilo et Berghofer, 1999) pour le maïs; de 150°C à 190°C pour des mélanges maïs/amarante (Ilo *et al.*, 1999) et de 140°C à 160°C pour des mélanges orge/tomate (Altan *et al.*, 2008) se traduisent par des couleurs plus foncées dans les extrudats.

L'augmentation de la température d'extrusion confère aux protéines des extrudats une meilleure digestibilité (Ainsworth *et al.*, 1999; Milan-Carrillo *et al.*, 2002; Reyes-Moreno *et al.*, 2003). Cependant, selon Ilo et Berghofer (2003) une augmentation de la température d'extrusion de 150°C à 180°C, se traduit par des diminutions de teneurs en lysine, arginine, cystéine, méthionine et tryptophane dans des extrudats de maïs.

Fan *et al.* (1996) ont montré que l'effet de la température (106-174°C) sur l'expansion des extrudats est négligeable dans le cas d'extrusion d'un mélange à base de maïs concassé contenant 6,8 à 33,6% de saccharose. Des variations de température (100-150°C) n'ont pas eu d'effet sur la digestibilité des protéines, des acides aminés et de l'énergie d'un extrudat à base de blé/poisson (Sorensent *et al.*, 2002) ce qui peut s'expliquer par la brièveté du temps de séjour dans l'extrudeur et la forte teneur en eau des produits. Pour Ibanoglu *et al.* (1997), avec des produits à forte teneur en eau, les variations de température entre 60 et 120°C n'influent ni sur la digestibilité des protéines ni sur les teneurs en thiamine et riboflavine.

### 2.5.2. Vitesse de la vis

Dans la littérature, la vitesse de rotation de la vis est mentionnée comme un facteur qui peut influencer sur certaines caractéristiques des extrudats. Son augmentation de 80 à 200 tr/min et de 100 à 400 tr/min s'accompagne d'une augmentation de l'expansion d'extrudats préparés à partir de maïs (Ali *et al.*, 1996) et de riz (Bhattacharya, 1997). Baik *et al.* (2004) ont montré que l'augmentation de vitesse de la vis de 50 à 150 tr/min produit une augmentation d'expansion des extrudats d'orge. Au cours d'une étude relative à la fabrication de snacks, Ainsworth *et al.* (2007) ont mis en évidence l'effet positif d'une augmentation de la vitesse de rotation de la vis sur l'expansion des extrudats. Mais d'autres études Thymi *et al.* (2005) ont indiqué que des variations de vitesse entre 150 et 250 tr/min ne modifiaient pas l'expansion d'extrudats préparés à partir de maïs.

Une variation de la vitesse de rotation de la vis peut modifier le WAI et le WSI des extrudats. A l'issue d'essais d'extrusion (*mono-vis; température à 150°C; teneur en eau des produits 15%*) réalisés sur du maïs (*hard red corn, dent corn, pop corn*) et du riz poli, [Gonzalez et al. \(2006\)](#) ont constaté que le WSI augmente lorsque la vitesse de rotation augmente de 77 à 173 tr/min. Les mêmes tendances sont apparues au cours d'études réalisées avec d'autres matières premières. [Jin et al. \(1995\)](#) ont montré qu'une augmentation de vitesse de rotation de 150 à 350 tr/min se traduisait par une augmentation du WSI et une diminution du WAI d'extrudats préparés à partir de maïs. En travaillant sur des mélanges orge/pomme de terre, [Altan et al. \(2008\)](#) ont observé qu'une augmentation de vitesse de rotation de 150 à 200 tr/min entraînait une augmentation du WSI des extrudats mais que leur WAI restait identique. A l'inverse, [Baik et al. \(2004\)](#) ont trouvé qu'une augmentation de vitesse de la vis de 50 à 150 tr/min s'accompagnait une augmentation du WAI. [Ainsworth et al. \(2007\)](#) ont constaté que le WAI et le WSI de snacks correspondant à des extrudats préparés à partir d'un mélange maïs/avoine/ pois chiche/ oignon/ orge augmentaient tous les deux lorsque la vitesse de rotation de la vis variait de 100 à 300 tr/min.

Les variations de vitesse de rotation de la vis sont également en relation avec des changements de couleur des produits extrudés. L'augmentation de vitesse de 150 à 200 tr/min se traduit par une couleur moins blanche des extrudats de pois chiche ([Milan-Carrillo et al., 2002](#)). Ce résultat a été observé dans plusieurs études avec différentes matières premières, en particulier le maïs ([Reyes-Moreno et al., 2003](#)), des mélanges maïs/mil ([Onyango et al., 2004b](#)), des mélanges riz/amarante ([Ilo et al., 1999](#)), ou des mélanges riz/haricot mungo ([Bhattacharya et al., 1997](#)). L'augmentation de teneur en fer des produits liés à l'usure plus importante de la vis lorsque sa vitesse de rotation est augmentée pourrait expliquer ces changements de couleur. Par ailleurs, l'augmentation de vitesse produit une augmentation de l'intensité de la couleur jaune ([Bhattacharya et al., 1997](#); [Ilo et Berghofer, 1999](#); [Onyango et al., 2004b](#))

Les effets de variations de la vitesse de rotation de la vis sur certaines caractéristiques nutritionnelles des produits extrudés ont fait l'objet d'études récentes. [Nwabueze \(2007\)](#) a constaté qu'une augmentation de la vitesse de la vis (de 140 à 180 tr/min) diminuait les teneurs en tannins et en acide phytique dans des extrudats préparés à partir de mélanges de fruit de l'arbre à pain, de maïs et de soja. [Ainsworth et al., \(2007\)](#) ont mis en évidence qu'une augmentation de vitesse s'accompagnait d'une amélioration de la digestibilité des protéines de snacks préparés à partir de mélanges maïs/avoine/pois chiche/oignon. [Reyes-Moreno et al. \(2003\)](#) ont également constaté cet effet lors de variations se situant dans un intervalle de vitesses beaucoup plus faible (30 à 80 tr/min). Cependant, certains auteurs ont observé des effets négatifs de l'augmentation de la vitesse de rotation sur la digestibilité des protéines et les teneurs en vitamines. [Milan-Carrillo et al. \(2002\)](#) ont constaté sur du maïs une diminution de la digestibilité des protéines lorsque la vitesse de rotation augmente de 150 à 200 tr/min. Par ailleurs, [De Cindio et al., \(2002\)](#) ont observé qu'une augmentation de vitesse de rotation de la vis entraînait une perte importante (50-80%) de la lysine disponible dans des extrudats à base d'avoine et de blé. Ce phénomène a également été observé par [Bjock et al. \(1984\)](#) dans une étude de la valeur nutritionnelle des extrudats de blé. Au cours d'essais d'extrusion réalisés à 75-100°C, [Plunkett et Ainsworth \(2007\)](#) ont mis en évidence que les teneurs en acide ascorbique diminuaient dans les snacks à base de riz lorsque la vitesse de rotation de la vis augmentait de 100 à 200 tr/min, probablement en raison d'une intensité plus importante du cisaillement. [Ilo et Berghofer \(1998\)](#) ont observé des pertes moins importantes en thiamine dans le maïs quand la vitesse de la vis diminuait de 81 à 61 tr/min. [Cha et al. \(2003\)](#) ont également montré qu'une l'augmentation de vitesse de rotation de la vis (de 200 à 300 tr/min) entraîne une diminution de teneur en thiamine dans les extrudats de blé. Les anti-oxydants

sont également affectés par la vitesse de rotation de la vis. Leurs activités totales dans des extrudats préparés à partir d'un mélange pois chiche/farine de maïs/farine d'avoine/amidon de maïs/farine de carotte/farine de noisette dans des proportions 3/2/2/1,5/1/0,5 diminuent lorsque la vitesse de la vis augmente de 220 à 340 tr/min (Ozer *et al.*, 2006).

Les variations de vitesse de rotation de la vis influent également sur le niveau d'hydrolyse des molécules constitutives de l'amidon. Une augmentation de la vitesse de rotation entraîne une augmentation de degré de gélatinisation qui lui-même influe négativement sur le gonflement de l'amidon. Guha *et al.* (1998), au cours d'essais d'extrusion de riz à l'aide d'un extrudeur bi-vis, ont observé que la viscosité des bouillies décroissait quand la vitesse de rotation de la vis augmentait de 200 à 400 tr/min.

### 2.5.3. Débit d'alimentation

Le débit d'alimentation est un facteur qui influe directement sur le rendement d'un cuiseur-extrudeur, mais l'effet de ce facteur sur les caractéristiques des extrudats a été rarement étudié. Une étude de Ding *et al.* (2005) a montré que l'augmentation de débit d'alimentation s'accompagnait d'une augmentation de l'expansion et de la dureté d'extrudats de riz ainsi que d'une diminution de leur WSI. Baik *et al.* (2003) ont rapporté que l'augmentation de débit d'alimentation de 89 à 96 g/min provoque une diminution de 3,20 à 2,78 de l'indice d'expansion des extrudats d'orge. Ces auteurs ont également montré que la dureté des extrudats devient plus importante quand le débit d'alimentation augmente. Par ailleurs, un effet négatif de l'augmentation du débit d'alimentation sur les pertes en lysine a été trouvé par Bjock *et al.* (1984). En évaluant la valeur nutritionnelle d'extrudats préparés à partir d'un mélange pois chiche/farine de maïs/farine d'avoine/amidon de maïs/farine de carotte/farine de noisette, Ozer *et al.* (2006) ont observé qu'une diminution de débit d'alimentation entraînait une diminution des activités totales des anti-oxydants.

### 2.5.4. Configuration de la vis

Un changement de configuration de l'ensemble vis/fourreau peut également modifier les caractéristiques des extrudats. Choudhury et Gautam (1998) ont observé que l'expansion des extrudats de riz dépend de la largeur de l'entrefer entre la vis et le fourreau: l'expansion maximale est obtenue avec un entrefer de 200 mm. Une augmentation de diamètre de la filière s'accompagne d'une diminution de l'expansion des extrudats de maïs (Sokhey *et al.*, 1997).

Les changements de configuration de la vis produisent également des modifications du WAI et du WSI des produits extrudés. L'augmentation de la sévérité du cisaillement par ajout d'éléments à pas négatifs ou contre-filets et de disques de malaxage s'accompagnent d'une augmentation du WAI et du WSI d'extrudats de riz (Choudhy et Gautam, 1998; Guha *et al.*, 2003) et d'une augmentation de la viscosité de bouillies préparées à partir d'extrudats de riz (Guha *et al.*, 2003).

La qualité nutritionnelle des produits extrudés est influencée par la longueur de la vis. Plus la vis est longue, plus les vitamines, notamment les vitamines groupe B, sont détruites en cours d'extrusion (Athar *et al.*, 2006).

### 2.5.5. Composition des matières premières

#### 2.5.5.1. *Teneur en eau*

La teneur en eau des matières premières dépend de leur teneur en eau initiale et de la quantité d'eau ajoutée avant, ou au cours, de l'extrusion. Trois niveaux d'humidité sont généralement distingués: un niveau faible d'humidité (<15%); un niveau moyen (15 à 40%) et un niveau élevé (>40%).

Dans la littérature, l'extrusion à haute humidité n'est mentionnée que depuis une dizaine d'années. Elle est souvent combinée avec le trempage et la fermentation (Akdogan, 1996; Akdogan *et al.*, 1997; Akdogan, 1999; Faraj *et al.*, 2004; Onyango *et al.*, 2004; Seker, 2005). Une humidité élevée des mélanges diminue la friction des particules à l'intérieur de la vis et donc l'énergie nécessaire pour l'actionner ainsi que la température atteinte en fin d'extrusion (Akodan, 1996).

L'extrusion de matières ayant une humidité moyenne (15-40%), qui est celle la plus fréquemment rencontrée, a été étudiée par de nombreux auteurs (Harper, 1981; Ali *et al.*, 1996; Della Valle *et al.*, 1997; Lin *et al.*, 1998; Njoki et Faller, 2001; Onwulata *et al.*, 2001; de Cindio *et al.*, 2002; Milan-Carrillo *et al.*, 2002; Kadan, 2003; Faraj *et al.*, 2004; Seker, 2005; Sacchetti *et al.*, 2004; Ding *et al.*, 2005).

L'extrusion à faible humidité est souvent utilisée pour la fabrication de produits qui possèdent une grande expansion et une teneur élevée en matière sèche comme les farines infantiles et les snacks. Elle est utilisée pour des matières premières riches en amidon comme les céréales et les mélanges céréales/légumineuses (Della Valle *et al.*, 1997; Ilo et Berghofer, 1999; Onwulata *et al.*, 2001; Mouquet *et al.*, 2003).

L'humidité des matières premières avant extrusion est un facteur très important qui influe sur les caractéristiques physiques et chimiques des extrudats. L'augmentation de la teneur en eau du riz avant extrusion s'accompagne d'une augmentation de la densité et de la dureté (Ding *et al.*, 2005; Onwulata *et al.*, 2001) ainsi que d'une diminution de l'expansion des extrudats (Ding *et al.*, 2005; Iwe et Ngoddy, 1998; Onwulata *et al.*, 2001; Pansawat *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2007a). L'effet négatif d'une augmentation de la teneur en eau sur l'expansion des extrudats a été également observé sur des extrudats préparés à partir de maïs concassé (Ilo *et al.*, 1996; Thymi *et al.*, 2005) et de mélanges maïs/graine de lin (Wu *et al.*, 2007), maïs/protéines laitières (Onwulata *et al.*, 2001), maïs/blé (Hashimoto *et al.*, 2002), maïs fermenté/mil (Onyango *et al.*, 2004b) et maïs/soja (Li *et al.*, 2005). En extrudant un mélange maïs/son de maïs, Mendonça *et al.* (2000), ont montré qu'une variation de teneur en eau entre 16 et 22% n'entraîne pas seulement une baisse de l'expansion, mais aussi une diminution de masse volumique. Onwulata *et al.* (2001) ont confirmé cet effet en extrudant un mélange pomme de terre/protéines laitières. Par ailleurs, en comparant les relations existant entre la teneur en eau des matières premières, le poids moléculaire moyen des extrudats, la température atteinte au cours de l'extrusion et l'expansion d'extrudats d'amidon de maïs. Brümmer *et al.* (2002) ont montré que l'humidité des matières premières était le facteur le plus influant sur l'expansion des extrudats.

Le WAI et WSI sont affectés par les variations de teneur en eau des matières avant extrusion. Une augmentation de 18 à 26% de la teneur en eau d'une mélange blé/maïs s'accompagne d'une augmentation de WAI et une diminution de WSI (Hashimoto *et al.*, 2002). L'effet négatif de la teneur en eau sur le WSI a aussi été confirmé par Singh *et al.* (2007a) en travaillant sur le riz. D'autres auteurs ont montré que le degré de gélatinisation de l'amidon diminue quand la teneur en eau du mélange maïs/soja augmente de 16 à 20% (Lin *et al.*, 1998). Ce phénomène avait été précédemment observé sur du maïs par Fan *et al.* (1996) et par Ilo *et al.* (1996).

Le degré d'humidité des matières premières apparaît dans tous les cas comme un facteur très influent sur les caractéristiques rhéologiques des extrudats. Ilo et Berghofer (1999) ont indiqué qu'une augmentation de la teneur en eau de 13 à 17% augmentait la viscosité de bouillies préparées à partir de farines extrudées de maïs. Njoki *et al.* (2001) ont observé le même effet en extrudant un mélange banane plantain/maïs/soja. Ces auteurs ont également constaté que l'augmentation de la teneur en eau des matières premières était à l'origine d'une

diminution de la température d'extrusion et de la dégradation des facteurs anti-trypsiques. Une diminution de la dégradation des facteurs anti-trypsiques a été également observée par [Nwabueze \(2007\)](#) lors de l'extrusion de mélanges fruit de l'arbre à pain/maïs/soja.

Le niveau de destruction des vitamines est également lié à la teneur en eau initiale des matières premières ou à la quantité d'eau ajoutée au cours d'extrusion. L'extrusion de produits à faible teneur en eau (<15%) provoque une destruction très élevée (de 67 à 100%) des vitamines dans le maïs ([Ilo et Berghofer, 1998](#)). Une augmentation de la teneur en eau s'accompagne d'une diminution du taux de destruction de la thiamine lors de l'extrusion de blé à des températures variant entre 142 et 172°C ([Suparno et al., 2005](#)). La teneur en  $\beta$ -carotène décroît dans des extrudats de blé lorsque la teneur en eau initiale des produits diminue de 24% à 14% ([Guzman-Tello et Cheftel, 1990](#)).

Les caractéristiques des protéines sont également influencées par la teneur en eau des matières premières ou par les quantités d'eau injectée en cours d'extrusion. La solubilité des protéines diminue quand la teneur en eau augmente ([Njoki et Faller, 2001](#)). Une augmentation de teneur en eau de 13 à 17% en cours d'extrusion réduit les pertes en lysine, arginine, cystéine, méthionine et tryptophane dans des extrudats de maïs ([Ilo et Berghofer, 2003](#)). L'ajout d'eau (de 13 à 25% de la matière brute) dans un mélange maïs/mil fermenté au cours d'extrusion modifie la couleur des extrudats et les incorporations croissantes d'eau se traduisent par une diminution de l'intensité de la couleur jaune de la farine ([Onyango et al., 2004b](#)). Cependant, une augmentation de teneur en eau de 16 à 20% provoque une augmentation de l'intensité de la couleur rouge et de la couleur jaune d'extrudats d'un mélange graine de lin/ maïs ([Wu et al., 2007](#)). Ces auteurs ont indiqué que l'augmentation de teneur en eau entraîne une diminution de l'expansion et de la masse volumique des extrudats et se traduit par l'obtention d'extrudats de couleur plus foncée.

L'effet de la teneur en eau des produits au moment de l'extrusion sur les teneurs en fibres alimentaires a été abordé dans plusieurs publications. Une diminution de teneur en eau des matières premières se traduit par des conditions d'extrusion plus sévères qui sont à l'origine d'une diminution des teneurs en fibres alimentaires totales dans des extrudats de pulpe d'orange séché ([Larrea et al., 2005](#)). Au cours d'essais à une vitesse de rotation de la vis de 160 tr/min, ces chercheurs ont observé que la diminution de teneur en eau s'accompagne d'une augmentation de teneur en pectines solubles.

#### *2.5.5.2. Teneur en amidon*

L'amidon est le principal composant responsable de l'expansion des produits. De ce fait l'expansion des extrudats augmente avec la teneur en amidon des matières premières. Ce phénomène a été observé au cours de plusieurs études ([Suknark et al., 1997](#); [Desrumaux et al., 1999](#); [Hashimoto et al., 2002](#), [Yang et al., 2008](#)). Par ailleurs, [Iwe et Ngoddy \(1998\)](#) ont montré que l'augmentation de teneur en amidon obtenu par augmentation du taux d'incorporation de patate douce dans un mélange patate douce/soja s'accompagne d'une augmentation du taux de gélatinisation et du WAI des extrudats. Il a également été montré que la dureté des extrudats est diminuée quand la teneur en amidon des matières premières augmente ([Stojaska et al., 2008](#)).

#### *2.5.5.3. Teneur en lipides*

En présence de lipides, la réduction de la taille des molécules constitutives de l'amidon généralement observée au cours de l'extrusion est moins importante ([Fayard et al., 2004](#)). Les lipides ont une fonction lubrifiante dans l'extrudeur qui réduit l'énergie mécanique à fournir à la masse extrudée. Au cours de l'extrusion, l'amyllose peut également se complexer avec des lipides, natifs ou ajoutés, type acide oléique ou monoglycérides. Cette complexation peut

également avoir une influence sur le degré de la gélatinisation (Lin *et al.*, 1998; Desrumaux *et al.*, 1999). L'ajout d'acide stéarique à de l'amidon de maïs avant extrusion a pour effets une diminution de l'expansion des produits, une diminution de WSI des extrudats (Bhatnagar *et al.*, 1994a,b). Selon ces chercheurs, les complexations amylose-lipides qui s'établissent au cours de l'extrusion peuvent expliquer la diminution de teneur en molécules solubles et la diminution de WSI qui sont probablement des conséquences d'une diminution de la dégradation de l'amylopectine en raison de l'effet lubrifiant des lipides ajoutés.

Cependant, l'ajout d'une petite quantité de lipides (0,2 à 0,8%) peut augmenter l'expansion et diminuer le WAI des extrudats de maïs (Desrumaux *et al.*, 1999). Dans la mesure où l'ajout d'une si petite quantité n'est probablement pas suffisante pour obtenir un effet lubrifiant, il est possible que les lipides jouent plutôt un rôle de liant et d'agent de texture au cours de l'extrusion.

L'ajout de lipides avant extrusion provoque également une diminution de la viscosité des bouillies préparées à partir de farines extrudées (Schweizer *et al.*, 1986)

#### 2.5.5.4. Teneur en protéines

L'expansion des extrudats est influencée par la teneur en protéines des matières premières. Plus le taux d'incorporation de gluten dans le mélange blé/maïs est important, moins l'expansion des extrudats est importante (Hashimoto *et al.*, 2002). En extrudant des mélanges farine de manioc/soja et manioc/huile de soja, Badrie et Mellowes (1992) ont montré que l'augmentation du taux d'incorporation du soja s'accompagne d'une augmentation de teneur en protéines dans des mélanges et d'une diminution de l'expansion des extrudats. Ce phénomène a également été observé dans le cas de l'extrusion d'un mélange protéines laitières/maïs/riz/pomme de terre (Onwulata *et al.*, 2001) et de mélanges protéines laitières/maïs (Allen *et al.*, 2007). Il est probable que la diminution de l'expansion soit principalement due à la diminution passive de teneur en amidon dans les mélanges.

Hashimoto *et al.*, (2002) ont reporté qu'une augmentation de teneur en protéines s'accompagne également d'une augmentation du WAI et d'une diminution du WSI d'extrudats de manioc/gluten de blé. Badrie et Mellowes (1992) ont également mis en évidence un effet négatif de la teneur en protéines sur le WSI. En revanche, Allen *et al.* (2007) ont montré, au cours d'essais d'extrusion de mélanges réalisés à partir de différents types de maïs (normal, cireux, pré-gélatinisé) et de protéines laitières, que le WAI décroît quand le taux d'incorporation des protéines laitières augmente.

#### 2.5.5.5. Teneur en fibres

Dans la littérature, l'effet de la teneur en fibre des matières premières sur les caractéristiques des extrudats est rarement étudié. Jin *et al.* (1995) ont constaté qu'une augmentation de teneur en fibres (de 0 à 20%) s'accompagne d'une augmentation de WSI et d'une diminution de WAI. Yanniotis *et al.* (2007) ont montré que la teneur en fibres de mélanges maïs/fibres/pectine a un effet négatif sur l'expansion des extrudats. Mendonça *et al.* (2000) ont mis en évidence que l'ajout de son de maïs s'accompagne d'une diminution de l'expansion de snacks à base de maïs. Badrie et Mellowes (1992) ont rapporté que l'ajout de son de blé dans le manioc augmente la teneur en fibres dans le mélange et provoque une diminution de l'expansion. Selon Singh et Smith (1997), les teneurs plus importantes de fibre et de protéines sont la cause de la faible expansion des extrudats de grain de blé par rapport à celle des extrudats d'amidon de blé. L'augmentation des teneurs en fibres par ajout de drèches de brasserie dans des mélanges à base de blé pour la fabrication de snacks s'accompagne d'une diminution de l'expansion et du WAI (Stojceska *et al.*, 2008). De plus, l'ajout de quantités

importantes de drèches de brasserie est à l'origine d'une baisse de l'intensité des couleurs blanche et jaune et d'une augmentation de l'intensité de couleur rouge des extrudats.

#### 2.5.6. La taille des particules à l'entrée de l'extrudeur

La taille des particules et leur état physique jouent un rôle très important au niveau des effets du procédé de cuisson-extrusion. Les particules de céréales sont hydratées, chauffées, compressées, mélangées, cisaillées avant d'être fondues et que les polymères des granules d'amidon soient partiellement hydrolysés. Lorsque plusieurs tailles de particules ou lorsque différents types de céréales de dureté différente sont présents dans le mélange, les particules les plus petites et les plus tendres vont s'hydrater, s'échauffer et fondre avant les autres (Fayard *et al.*, 2004). Les caractéristiques de la pâte et, par conséquent du produit fini, sont donc en partie conditionnées par la taille et la nature des particules de céréales présentes dans le mélange. La présence de particules d'endosperme opaque, non vitreux, est défavorable à l'expansion car les particules opaques ont une structure poreuse qui, par capillarité devient très compétitive pour l'eau ce qui a pour effet de priver les particules vitreuses de quantités d'eau suffisantes pour fondre. Gujral *et al.* (2001) ont montré que les extrudats de grains de maïs concassés ont une expansion et une WSI plus importantes que les extrudats de grains entiers. Gujral et Singh (2002) ont observé pour le concassage des effets similaires lors de l'extrusion de riz. Chauhan et Bains (1985) ont comparé les caractéristiques de snacks préparés à partir de farines de riz de granulométries différentes (<30 mesh, 30-50 mesh et 50-80 mesh): la diminution de taille des particules de la farine s'accompagne d'une augmentation de l'expansion (de 1,4 à 2,6), du WAI (de 4,91 à 7,16) et du WSI (de 0,016 à 0,027) des extrudats et d'une diminution du taux de gélatinisation de l'amidon (de 55,1 à 36,1%). Les effets de la taille des particules sur les caractéristiques des extrudats de maïs concassé ont également été étudiés par Desrumaux *et al.* (1998) au cours d'essais réalisés avec un extrudeur bi-vis (*vis de 500 mm de longueur, à 150 °C, à un débit d'alimentation de 30-40kg/h*) sur des mélanges ayant une teneur en eau de 18,4%: l'augmentation de la taille des particules provoque une diminution de l'expansion des extrudats. De même, Mathew *et al.* (1999) ont observé que l'expansion des extrudats de maïs et de petit mil est plus faible quand la taille des particules est plus importante.

En revanche, dans le cas de l'utilisation d'un CE-TFC, Van Hoan (2004) n'a pas observé d'effets du concassage de mélanges riz/sésame/soja sur les caractéristiques des extrudats et de bouillies.

#### 2.5.7. Ajout d'autres ingrédients

##### *2.5.7.1. Ajout de sucre*

L'ajout de sucre dans les matières premières avant extrusion peut changer certaines caractéristiques des extrudats.

L'incorporation avant extrusion de saccharose [de 6,8 à 33, 6% (Fan *et al.*, 1996); 20% (Carvalho *et al.*, 2000); de 5 à 20% (Onyango *et al.*, 2004b); de 5,0 à 12,5% (Mezreb *et al.*, 2006)] dans des mélanges à base de maïs s'accompagne d'une diminution de l'expansion des extrudats. Onyango *et al.* (2004b) ont constaté que l'ajout avant extrusion de glucose, de fructose, de saccharose et de maltose dans un mélange de mil et de maïs fermenté s'accompagnait également d'autres effets: plus le taux d'incorporation de ces sucres augmente, plus la teneur en eau et le WAI des extrudats diminue tandis que leur WSI augmente. L'effet positif de l'incorporation de sucre dans des matières premières avant extrusion sur le WSI avait également été mis en évidence par Jin *et al.*, (1995). A l'inverse, Mezreb *et al.* (2006) ont observé qu'une augmentation du taux d'incorporation de saccharose (de 5,0 à 12,5%) dans le maïs avant extrusion était à l'origine d'une diminution du WSI des

extrudats et [Carvalho et al. \(2000\)](#) avaient précédemment observé le même phénomène avec un taux d'incorporation de saccharose plus important (20%). Ces auteurs ont également mis en évidence une viscosité plus faible dans des bouillies préparées à partir de maïs extrudé lorsque le maïs avait été extrudé après incorporation de sucre.

De plus, [Onyango et al., \(2004b\)](#) ont observé que la couleur des extrudats devient plus sombre lorsque la quantité de sucres ajoutées augmente; des réactions de Maillard se produisant au cours de l'extrusion sont probablement à l'origine de ce phénomène ([Sacchetti et al., 2004](#)).

#### *2.5.7.2. Ajout de matières riches en minéraux*

En incorporant de 1 à 8% de coquille d'œuf (composée à 98% de carbonate de calcium) dans du riz avant extrusion en vue d'augmenter la teneur en calcium des extrudats, [Su \(2007\)](#) a observé une augmentation du WSI et une diminution de l'expansion des extrudats.

Des essais d'incorporation de fer en cours d'extrusion ont également été réalisés avec du riz en vue d'améliorer la qualité nutritionnelle d'extrudats de riz. [Moretti et al. \(2005\)](#) ont utilisé des formes chimiques de biodisponibilité relatives variables (sulfate ferreux, fer EDTA et pyrophosphate ferrique) à des taux d'incorporation variant entre 0,5 et 1,0g de fer par 100g de riz. Dans les conditions d'extrusion utilisées (*vis de 19 mm, rapport L/D égal à 3; T° de 30-70°C*) l'incorporation des différentes sources de fer n'a pas modifié la texture des extrudats. L'extrudat de riz fortifié avec le pyrophosphate ferrique a présenté d'excellentes caractéristiques sensorielles sans modification de couleur. Cependant, les deux autres formes chimiques ont été à l'origine d'une diminution de l'intensité de couleur blanche et d'une augmentation de l'intensité des couleurs jaune et rouge dans des extrudats.

#### *2.5.7.3. Ajout d'autres agents en vue d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques des produits extrudés*

[Njoki et Faller \(2001\)](#) ont ajouté de l'EDTA et de l'acide citrique aux mélanges avant extrusion pour limiter le changement de couleur (plus sombre) d'extrudats préparés à partir d'un mélange plantain/maïs/soja.

Dans le but d'améliorer les propriétés des extrudats de riz, [Su et Kong \(2007\)](#) ont ajouté de l'huile de soja (de 2% à 8%), de la cellulose et de la silice dans le riz avant extrusion. Ils ont montré que l'ajout de 3% d'huile de soja avec ou sans cellulose et silice diminuait le débit d'alimentation. La présence de cellulose et silice augmente le WAI et le WSI des extrudats mais diminue leur expansion, leur teneur en eau et leur masse volumique.

L'expansion des extrudats peut être modifiée par l'incorporation de certains additifs avant extrusion. [De Pilli et al. \(2007\)](#) ont observé que l'ajout d'ester de saccharose (émulsifiant) provoque une diminution de l'expansion des extrudats. De plus, l'incorporation de cet émulsifiant peut réduire la perte en lipides pendant extrusion et améliorer la structure des produits extrudés. Pour leur part, [Sriburi et Hill \(2000\)](#) ont utilisé de l'acide ascorbique pour améliorer l'expansion des extrudats: l'ajout avant extrusion dans un extrudeur bi-vis (*à 110°C, à la vitesse de 200 tr/min, et avec un débit d'alimentation de 5 kg/H*) de 0,1 à 1,0% d'acide L-ascorbique à l'amidon de manioc (de teneur en eau 37,5% MB) a permis de mettre en évidence que plus le taux d'incorporation d'acide ascorbique est élevé plus l'expansion et le WSI des extrudats augmente et plus le WAI et la viscosité de bouillie préparées à partir de ces extrudats diminuent.

[Taylor et al. \(2006\)](#) ont montré que l'ajout de sulfite de sodium permet d'augmenter l'expansion d'extrudats préparés entre 160 et 170°C à partir de mélanges d'amidon de maïs et de protéines laitières.

Selon [Viscidi et al. \(2004\)](#), l'oxydation des lipides est un problème souvent rencontré dans les produits extrudés, notamment lorsque les extrudats ont subi une forte expansion. Des études

ont mis en évidence que l'ajout d'anti-oxydants avant extrusion peut retarder les réactions d'oxydation. L'incorporation de benjoin, de catéchine, d'acide chlorogénique, d'acide férulique dans des mélanges avoine/saccharose/quercétine retarde la formation d'hexanal dans les extrudats conservés durant 12 semaines à 35°C après extrusion (Viscidi *et al.*, 2004). Le même résultat a été observé par Camire *et al.* (2005) après ajout d'acide ascorbique ou de quercétine. L'ajout des anti-oxydants naturels contenus dans les matières premières agricoles pourrait aussi empêcher l'oxydation de lipides dans les extrudats mais il est moins efficace que l'ajout d'anti-oxydants de synthèse (Camire *et al.*, 2007).

### 3. Facteurs influents sur les niveaux d'ingéré des nourrissons et des jeunes enfants

Il est généralement reconnu que les niveaux d'ingéré des nourrissons et des jeunes enfants à partir des aliments de complément, et en particulier des bouillies, sont influencés par des facteurs relatifs aux enfants eux-mêmes (*âge, état de santé, état nutritionnel..*), par des facteurs intrinsèques à l'aliment (*composition en nutriments, qualité organoleptique, consistance...*) et par les pratiques alimentaires dont ils sont l'objet (WHO, 1998).

#### 3.1. Les trois niveaux de facteurs déterminants

Un modèle explicatif (Figure I/5) de l'ingéré en énergie et en nutriments à partir des bouillies a été proposé par Trèche (1998; 2002). Il distingue 3 niveaux de facteurs déterminants: des facteurs immédiats, des facteurs sous-jacents et des causes fondamentales.

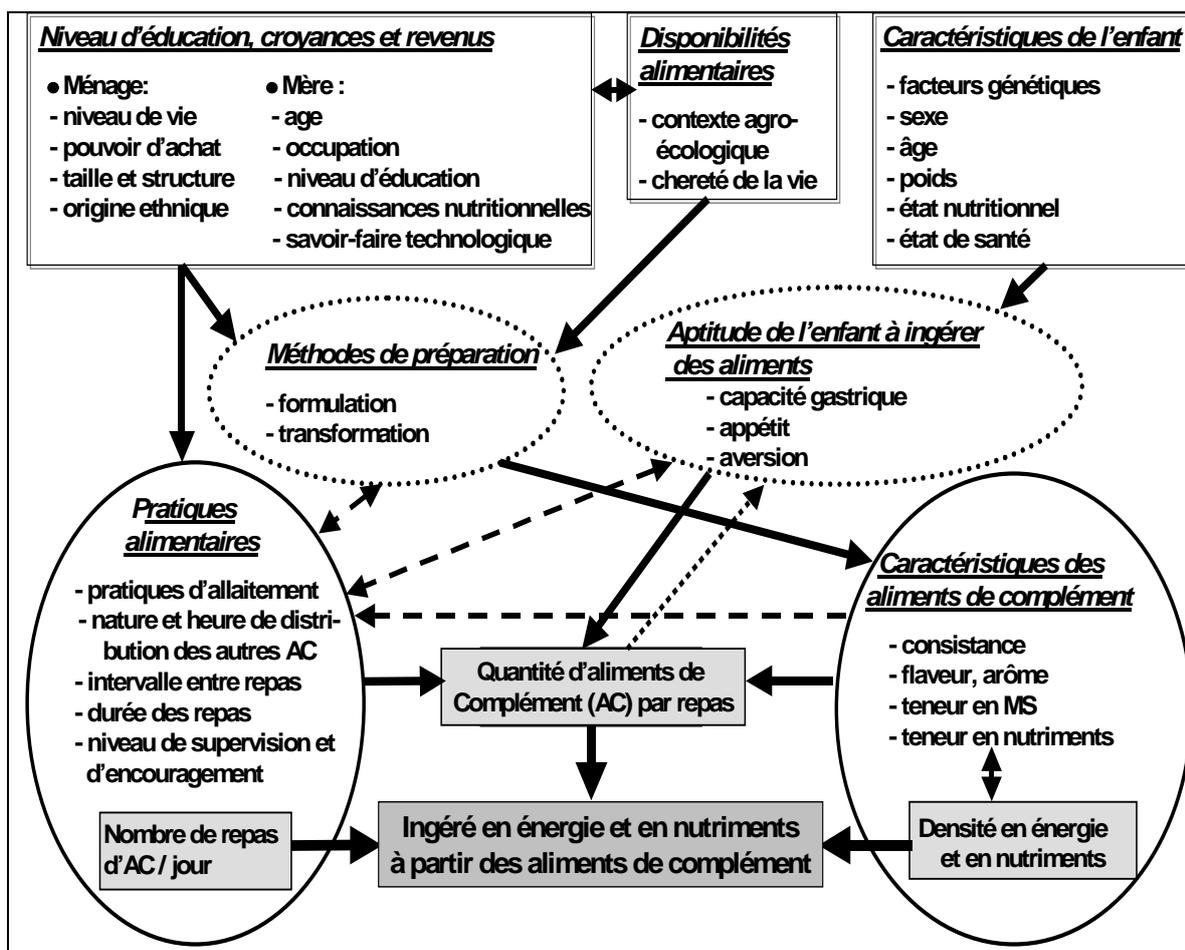


Figure I/5: Modèle explicatif du niveau d'ingéré en énergie et en nutriments à partir des bouillies (d'après Trèche, 2002).

### 3.1.1. Les déterminants immédiats

L'ingéré énergétique à partir des bouillies dépend de 3 déterminants immédiats (Trèche, 1998; 2001): le nombre de repas de bouillie par jour, la quantité de bouillie consommée par repas et la densité énergétique de chacune des bouillies selon la formule

$$EI_d = \sum_{i=1}^n Ca_i \times ED_i$$

avec:	$EI_d$	=	Ingéré énergétique (kcal/j)
	$i$	=	Rang de la bouillie
	$Ca_i$	=	Quantité consommée (g) de la $i^{ème}$ bouillie
	$ED_i$	=	Densité énergétique (kcal/g) de la $i^{ème}$ bouillie

Dans la plupart des pays en développement, le nombre de repas donnés quotidiennement aux enfants ne dépasse généralement pas deux ou trois et peut difficilement être augmenté du fait de la charge de travail élevée des donneurs de soins. La densité énergétique dépend principalement de la nature des aliments et des transformations utilisées pour les préparer. Les quantités d'aliments consommées par repas dépendent de l'ensemble des facteurs sous-jacents.

### 3.1.2. Les facteurs sous jacents

Parmi ces facteurs, on peut distinguer les caractéristiques des bouillies, des caractéristiques des personnes prenant soin de l'enfant et des facteurs liés à l'enfant.

Parmi les caractéristiques des bouillies, on peut identifier celles qui influent principalement sur leur acceptabilité (*consistance, saveur et arôme*) et qui jouent davantage sur les quantités de bouillie ingérées à chaque repas et celles comme la teneur en matière sèche et la composition en nutriments qui déterminent directement la densité en énergie et en nutriments des bouillies.

Les facteurs liés aux personnes prenant soin de l'enfant peuvent être subdivisés entre ceux qui déterminent les méthodes de préparation des bouillies et ceux qui correspondent aux pratiques alimentaires. En plus de la fréquence journalière de distribution des aliments, ces facteurs comprennent les pratiques d'allaitement, les intervalles entre les repas, la durée des repas et le niveau de supervision et d'encouragement développé pendant la consommation des repas.

La troisième catégorie de facteurs sous-jacents correspond à l'aptitude de l'enfant à ingérer les aliments qui inclut principalement son appétit et sa capacité gastrique, elle même dépendante de son poids.

### 3.1.3. Les causes fondamentales

Ces causes peuvent également être regroupées en trois catégories: celles liées au niveau socioculturels et économiques des familles (*pouvoir d'achat, taille et structure du ménage, croyances particulières*) et, en particulier, de la personne principale donneuse de soins (*niveau d'éducation, âge, occupation professionnelle, connaissances nutritionnelles, savoir-faire culinaire...*), celles qui déterminent les disponibilités alimentaires au niveau des ménages (*contexte agro-écologique en milieu rural, cherté de la vie en milieu urbain...*) et les caractéristiques des enfants (*sexe, facteurs génétiques, état sanitaire et nutritionnel etc.*).

## 3.2. Les principaux facteurs à prendre en compte

Nous reviendrons ici sur les principaux facteurs à prendre en compte lorsqu'on veut comparer les niveaux d'ingérés de bouillies de façon à ce que certains facteurs de variation interfèrent le moins possible avec les facteurs dont on veut mesurer les effets.

### 3.2.1. Facteurs liés à l'enfant

#### 3.2.1.1 Etat de santé

Les quantités d'aliments consommées par les enfants en bon état de santé sont généralement plus importantes que celles prises par les enfants malades. Des troubles de santé ou des maladies comme la fièvre (Brown *et al.*, 1985; Neuman *et al.*, 1994), la diarrhée, la malaria, la rougeole, les infections parasitaires, des plaies aux lèvres (Dettwyler, 1986,1987) se manifestent par une perte d'appétit qui elle même se traduit par une diminution des quantités d'aliments consommées. De nombreuses études ont, en particulier, mis en évidence un effet négatif de la diarrhée sur l'ingéré énergétique des enfants (Tableau I/8). L'effet observé est généralement plus important chez les enfants hospitalisés et chez les enfants déjà sevrés.

**Tableau I/8:** Effet de la diarrhée sur les ingérés énergétiques des jeunes enfants.

Pays	Age (mois)	Aliments	Réduction de l'ingéré énergétique (%)	Référence
<i>Etudes menées en milieu hospitalier</i>				
Bangladesh	11-24	LM + différentes AC	98% (AC) /32% (total)	Sarker <i>et al.</i> , 1983
Bangladesh	12-47	LM + différentes AC	35%	Sarker <i>et al.</i> , 1982
Bangladesh	6-35	LM +bouillie	42% (total)	Hoyle <i>et al.</i> , 1980
<i>Etudes longitudinales menées au domicile des enfants</i>				
Bangladesh	5-30	LM + différentes AC	3%	Brown <i>et al.</i> , 1995
Pérou	6-11	LM + différentes AC	0% (LM) / 23% (AC)	Brown <i>et al.</i> , 1990
Guatemala	15-23	AC de faible énergie	19%	Martorell <i>et al.</i> , 1980
<i>Etudes menées au domicile des enfants pendant des périodes de maladie</i>				
Pérou	9-20	LM + Bouillie + autres AC	0% (LM) / 25% (bouillie)	Marquis <i>et al.</i> , 1993
Nigeria	5-28	LM + Bouillie + autres AC	0% (LM) / 48% (total)	Dickin <i>et al.</i> , 1990

LM: Lait maternel; AC: Aliment de complément

#### 3.2.1.2. Etat nutritionnel

A l'occasion d'une étude réalisée au Zaïre avec des enfants hospitalisés de 3 mois à 2 ans, Donnen *et al.* (1996) ont observé que l'ingéré énergétique (*en kcal par kg de poids corporel*) à partir de bouillies des enfants ayant un Z-score poids-pour-âge < -2 ET était de 16 à 60% plus important, selon le type de bouillie, que celui d'enfants ayant un Z score ≥ -2. Bennett *et al.* (1999), à l'occasion d'une étude des ingérés énergétiques de 18 enfants de 8 à 17 mois au Pérou, ont également montré que l'ingéré énergétique variait en sens inverse du Z-score poids-pour-taille des enfants. Il semblerait donc que, quand ils se voient proposer des aliments appropriés, les enfants malnutris en ingèrent plus que les enfants non malnutris.

#### 3.2.1.3 Age

L'effet de l'âge sur les ingérés énergétiques n'a pas fait l'objet de beaucoup de publications, mais l'analyse de données correspondant à des mesures faites dans différents contextes des pays du sud montre néanmoins que les ingérés des enfants de 6-23 mois varient peu quand ils sont calculés par kg de poids corporel (Trèche, 1998; 2002).

Toutefois, [Pearcey et De Castro \(1997\)](#), en mesurant l'ingéré en nutriments et les caractéristiques des aliments consommés par 29 enfants américains de 8,6 à 15,6 mois, ont observé que les quantités consommées et l'ingéré énergétique par repas augmentent en fonction de l'âge de l'enfant.

### 3.2.2. Caractéristiques des aliments

#### 3.2.2.1. *Densité énergétique et consistance des bouillies*

L'effet de la densité énergétique et de la consistance des bouillies sur les ingérés énergétiques des jeunes enfants ont fait l'objet de nombreuses publications qui ont longtemps donné lieu à des controverses.

Les publications parues avant 1996 ont fait l'objet d'une synthèse ([Trèche, 1996](#)) qui a établi que les études expérimentales réalisées jusqu'alors ne permettaient pas de conclure de manière définitive sur l'effet de la densité énergétique et de la viscosité des bouillies sur l'ingéré énergétique des nourrissons et des jeunes enfants. Pour les enfants sains, les essais réalisés mettaient en évidence, dans la quasi-totalité des cas, des effets favorables de l'augmentation de la densité énergétique et de la réduction de la viscosité sur l'ingéré énergétique à l'occasion d'un repas isolé de bouillie. Mais aucune étude n'apportait d'informations relatives aux effets sur l'ingéré énergétique journalier à partir des bouillies lorsque les bouillies sont distribuées plusieurs fois par jour et sur l'ingéré énergétique total des enfants en tenant compte des apports en lait maternel.

Depuis, plusieurs publications ([Darling et al., 1995](#); [Den Besten et al., 1998](#); [Vieu et al., 2001](#); [Moursi et al., 2003](#); [Hossain et al., 2005](#); [Traoré et al., 2005](#); [Islam et al., 2006](#)) ont pu établir sans contestation possible que la consommation de bouillies de haute densité énergétique permettait aux enfants d'avoir des ingérés énergétiques plus importants que celle de bouillies de faible densité énergétique même si les quantités de bouillies consommées étaient souvent plus faibles. Les travaux ont, par ailleurs, montré que la consistance des bouillies devait être adaptée aux préférences des populations et que la préparation de bouillies de densité énergétique suffisante nécessitait donc la mise en oeuvre de procédés biologiques ou thermomécaniques qui permettent de réduire suffisamment la viscosité des bouillies pour qu'elles puissent avoir à la fois une densité énergétique et une consistance appropriées.

#### 3.2.2.2. *Saveur*

Différents auteurs ont montré que l'intensité de la saveur sucrée influait sur le niveau d'ingéré des bouillies par de jeunes enfants ([Brown et al., 1994](#); [Vieu et al., 2001](#))

Les matières grasses peuvent augmenter la palatabilité des aliments et, par conséquent, les niveaux d'ingérés ([Sanchez-Grinan et al. 1995](#); [Brown \(1997\)](#))

### 3.2.3. Pratiques alimentaires

#### 3.2.3.1. *Fréquence de consommation*

L'effet de la fréquence journalière de consommation des bouillies sur le niveau d'ingéré des enfants a été mis en évidence par [Brown et al. \(1995\)](#) à l'occasion d'une étude réalisée auprès d'enfant déjà sevrés âgés de 6 à 18 mois. Des bouillies préparées à des densités énergétiques différentes à partir d'une farine à base de riz/lait en poudre leur ont été distribuées 3, 4 ou 5 fois/j ce qui a permis de constater une augmentation de 16% et de 7% de l'ingéré énergétique journalier quand le nombre de repas augmente de 3 à 4 et de 4 à 5, respectivement.

### 3.2.3.2. *Comportement des donneurs de soins*

Les effets des modes d'alimentation pratiqués par les mères ou les donneurs de soins sur le niveau de consommation et les réactions des enfants ont fait l'objet d'une étude réalisée au Vietnam auprès de 40 mères d'enfants de 12-17 (Ha *et al.*, 2002). Les auteurs ont observé que les enfants avaient un niveau de consommation plus élevé quand leurs mères ou leurs donneurs de soins les encourageaient physiquement et verbalement à manger et que tout comportement négatif se traduisait rapidement par un refus de manger de l'enfant.

Des observations comparables ont été faites au Bangladesh sur 54 enfants de 8 à 24 mois, (Moore *et al.*, 2006). Un emplacement favorable, l'encouragement par des paroles ou des chansons permettent d'augmenter les quantités ingérées. L'encouragement apparaît d'autant plus nécessaire si l'enfant est malade ou atteint d'anorexie. Il est maintenant bien établi qu'une relation étroite entre les enfants et leurs mères permet d'augmenter les niveaux d'ingérés chez les enfants (Engle *et al.*, 1999).

Par ailleurs, des campagnes d'éducation nutritionnelle en milieu rural ont permis d'améliorer les pratiques des mères ou des donneurs de soins pour la distribution des repas (Guldan *et al.*, 1993) ce qui s'est traduit au Malawi par une augmentation des quantités de bouillies consommées (Hotz et Gibson, 2005).

Enfin, dans la mesure où la monotonie de l'alimentation peut se traduire par une réduction de l'ingéré des enfants (Neuman *et al.*, 1994), l'utilisation de bouillies qui ont des arômes, des saveurs et des consistances différentes permettent d'augmenter l'ingéré des enfants (WHO, 1998).

# Chapitre I I

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

# Chapitre II

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 1. Matières premières

#### 1.1. Matières premières utilisées au Vietnam

##### 1.1.1. Grains de céréales et graines de légumineuses

Les matières premières utilisées pour les études sur la composition chimique et les effets de la longueur et de l'usure de la vis proviennent de lots uniques. Le riz 'Tap Giao' (*Oriza sativa*), a été acheté sur le marché de céréales My Hao de la province de Hung Yen. La variété de soja 'DT12' (*Glycine hispida maxim.*), largement cultivée au Vietnam, est une variété importée et acclimatée par le département de recherche sur les légumineuses de l'Institut National de Science Agronomique du Vietnam (VASI). Le riz et soja ont été conservés à 25°C dans une salle climatisée avant être utilisés pour les différents essais.

Les céréales et légumineuses utilisées dans des deux études d'ingérés ont été achetées sur les marchés de Tam Ky pour le riz (cultivar 'Dong Thap'), cultivé sur les plateaux du centre Vietnam pour le sésame (*Sesamum indicum*) et importés de Chine pour le soja.

Les résultats des analyses de composition chimique des matières premières sont présentés dans le tableau II/1.

**Tableau II/1:** Composition globale des matières premières utilisées dans le cadre des études réalisées au Vietnam.

	Matière sèche (g/100g MB)	Amidon (g/100g MS)	Protéines (g/100g MS)	Lipides (g/100g MS)	Fibres ADF (g/100g MS)
Riz 'Tap Giao'	87,1	82,3	7,3	0,6	1,1
Riz 'Dong Thap'	88,0	ND	8,8	0,7	ND
Soja 'DT12'	92,5	0	45	21,1	4,0
Soja importé	94,0	ND	41,8	22,7	ND
Sésame	94,0	ND	28,1	50,6	ND

ND : Non Déterminé

##### 1.1.2. Autres ingrédients des farines infantiles étudiées

L'huile de soja (99,7% de lipides) est fabriquée par la compagnie « huile de Cai Lan » de la province de Quang Ninh. Le sel, le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), la poudre de lait, la vanille ont été achetés chez des grossistes fournisseurs de l'unité de production de la ville de Tam Ky.

Des enzymes industrielles (BAN 800 MG produites par Novozymes, Bagsvaerd, Danemark) ont été utilisées pour réduire la viscosité des bouillies et, par conséquent, permettre l'augmentation de leur densité énergétique. Cette  $\alpha$ -amylase d'origine bactérienne, qui se présente sous forme de microgranulés facilement mélangeables à la farine, a une activité optimale à la température de 72°C.

### 1.1.3. Complément minéral et vitaminique

Deux formules de complément minéral et vitaminique ont été utilisées. La première (Code: F012000001), produite par Hoffman La Roche, a été utilisée pour la première étude d'ingéré (cf. Ch III). La seconde (Code: FT051375), produite par Fortitech, Danemark, a été utilisée pour la seconde étude d'ingéré (cf. Ch VI). La composition des deux compléments minéraux et vitaminiques est donnée dans le tableau II/2.

**Tableau II/2:** Composition des compléments minéraux et vitaminiques

	Premix Roche	Premix Fortitech
<b>Vitamines</b>		
Vitamine A (µgER)	28 000	183 750
Nicotinamide (µg)	70 000	1 767 917
Acide pantothénique (µg)	90 000	0
Vitamine B2 (µg)	49 000	91 667
Thiamine (µg)	24 000	80 833
Vitamine B12 (µg)	29	188
Vitamine B6 (µg)	0	93 333
Vitamine C (mg)	16 000	9 750
Vitamine D (IU)	95 000	40 500
Vitamine E (µg)	0	7 083
Acide folique (µg)	0	15 417
<b>Minéraux</b>		
Iode (µg)	31 250	77 917
Fer (µg)	346 8750	9 875
Cuivre (µg)	0	72 917
Manganèse (µg)	318 7500	131 667
Sélénium (µg)	0	6 250
Magnésium (µg)	0	10 833
Zinc (µg)	543 750	2 996 667

## 1.2. Matières premières utilisées au Burkina Faso

Le riz (importé de Thaïlande), les deux variétés de maïs (blanc 'SR21' et jaune 'Espoir'), le petit mil (*Pennisetum glaucum*), le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le soja qui ont servi à l'étude de l'effet de la nature de la source amylicée (cf. Ch IV-2) ont été achetés au marché de *Sankariaré* à Ouagadougou, Burkina Faso. Les résultats de la détermination de leur composition globale sont donnés dans le tableau II/3.

**Tableau II/3:** Composition globale des matières premières utilisées pour les études au Burkina Faso.

	Matière sèche (g/100g MB)	Amidon (g/100g MS)	Protéines (g/100g MS)	Lipides (g/100g MS)	Fibres ADF (g/100g MS)	Cendres (g/100g MS)
Riz Thai	90,7	88,9	6,7	0,1	1,1	0,3
Maïs blanc SR21	91,7	70,5	8,6	4,9	3,3	1,4
Maïs jaune 'Espoir'	91,7	72,8	9,4	5,3	3,3	1,4
Mil	91,9	68,9	8,7	5,6	3,3	1,6
Sorgho	91,6	71,0	10,3	5,2	4,7	1,7
Soja entier	94,5	0	45,15	21,0	7,86	4,7

## 2. Equipements

### 2.1. Cuiseur extrudeur

Les échantillons analysés dans le cadre des études détaillées dans les chapitres IV-1 et V ont été préparés à Hanoi avec un «cuiseur-extrudeur à très faible coût» (CE-TFC) de seconde génération (EX-800) fabriqué par le CTC. Ceux préparés dans le cadre de l'étude réalisée au Burkina Faso (*cf. Ch IV-2*), proviennent d'un équipement identique envoyé au Burkina Faso dans le cadre d'une opération de transfert de technologie Sud-Sud.

Les farines utilisées pour la première étude d'ingéré (*cf. Ch III*) ont été préparées avec un (CE-TFC) de première génération tandis que celles utilisées dans la seconde étude d'ingéré sont issues d'un CE-TFC de seconde génération.

Les caractéristiques de ces deux types de CE-TFC, mis au point dans le cadre du programme Fasevie mené par le GRET, l'IRD et le NIN en collaboration avec l'Hafrec et le CTC sont données, respectivement, pour le CE-TFC de 1<sup>ère</sup> et de 2<sup>ème</sup> génération en I-1.4.1 en I-1.4.3.

### 2.2. Torréfacteur

Le torréfacteur utilisé pour traiter le soja destiné à être incorporé, sous forme de farine, dans la farine instantanée a été mis au point dans le cadre d'une collaboration entre le programme Fasevie et l'atelier mécanique N° 147, PhanChuTrinh, Danang. Le soja est séché par l'air chaud fourni par 6 rampes de brûleurs à gaz positionnés au dessous d'un rouleau de longueur 1500 cm et de diamètre 80cm. La rotation du rouleau (20 t/min est assurée par un moteur électrique triphasé de puissance 1,5kW.



- |  |
|--|
| 1: Valve à gaz                                   |
| 2: Rampe de brûleur                              |
| 3: Cylindre                                      |
| 4: Tableau de commande<br>(Température, Vitesse) |

Photo II/1: Le torréfacteur à soja

### 2.3. Séchage

Le séchoir DR50 a été acheté chez CTC. L'air chaud est produit par des résistances de 4kW positionnées au dessus du séchage. La capacité de cet équipement est de 20 kg de soja par séchage.

### 2.4. Décortiqueuse

Le décortiqueur a été mis au point dans le cadre d'une collaboration entre le programme Fasevie et le «Hanoi Food Research and Exchange Center». Il a une capacité de 25kg/h et consiste en deux meules espacées de 5 à 7 mm de façon à ne pas réduire les graines en farine.

Une des deux meules est immobile tandis que la rotation de la seconde est assurée par un moteur de 0,5kW. Les cosses de soja sont rejetées dans un sac grâce à un aspirateur de 300W.

## **2.5. Dégermeur à maïs**

Le maïs a été passé pendant 5 minutes dans une dégermeuse de conception et de fabrication brésiliennes (Maquina d'Andrea), qui permet d'enlever à la fois le germe et la pellicule.

## **2.6. Broyeur**

Les extrudats et le soja torréfié ont été réduits en farine dans un broyeur à marteau (DSM 500, Electra, France) muni d'un tamis en acier inoxydable de qualité alimentaire ayant des fentes longitudinales de 0,5 mm de largeur et 5 mm de longueur.

## **2.7. Mélangeur**

Deux mélangeurs, conçus par le CTC pour des volumes différents, ont été utilisés pour mélanger les différents composants des farines. Le petit mélangeur (capacité de 0,5 à 3,5 kg) a servi à mélanger les ingrédients (*vitamines, minéraux, arômes, sel*) entant dans la formule en faible proportion (0,25-7,0%). Le plus grand mélangeur a été utilisé pour le mélange et l'homogénéisation des ingrédients entrant dans la composition du mélange en proportion importante (*farine d'extrudats, farine de soja torréfié, sucre*).

# **3. Protocole des études réalisées**

Les six études qui constituent cette thèse sont présentées sous forme de six articles ou projets d'articles dans lesquels les méthodologies sont décrites en anglais (*cf. Ch III, Ch IV-1, Ch VI*) ou en français (*cf. Ch IV-2, Ch V-1, Ch V-2*) en suivant les conventions habituelles des journaux scientifiques. Les différents protocoles suivis sont présentés ici, en français, d'une manière résumée mais plus libre et plus chronologique que dans les chapitres III à VI.

## **3.1. Etude des effets de la consommation de bouillies de haute densité énergétique et nutritionnelle sur le niveau de couverture des besoins nutritionnels des nourrissons de 6 à 10 mois au Vietnam (Chapitre III)**

Dans la période 1998 à 2003, le CE-TFC de première génération mis au point dans le cadre du programme Fasevie a été utilisé pour la production d'une farine infantile instantanée à base de riz «*Favina*». Parallèlement, un complément alimentaire à base de soja «*Favilase*», contenant non seulement des minéraux et vitamines mais aussi une amylase industrielle (BAN de Novo S.A.) et destiné à être rajouté à du riz pour donner des bouillies ou pseudo-bouillies fortifiées et de haute densité énergétique a été mis au point.

La présente étude d'ingéré chez des enfants de 6 à 10 mois a eu pour objectif de comparer les ingérés en énergie et en nutriments d'un groupe d'enfants (*Groupe Témoin*) continuant à consommer les aliments habituellement préparés par leurs mères dans la province de Quang Nam à ceux de deux groupes d'enfants consommant chaque jour au moins deux repas préparés à partir de *Favina* (*Groupe Favina*) ou en utilisant *Favilase* (*Groupe Favilase*)

### **3.1.1. Sujets**

En 2002 et 2003, les produits (*Favina et Favilase*) mis au point dans le cadre du programme Fasevie ont fait l'objet d'une étude d'efficacité biologique dans la province Quang Nam au centre du Vietnam (Berger *et al.*, 2004a; 2004b; Bruyeron *et al.*, 2006; Pham Van Phu, 2007). Les 426 enfants ayant participé à cette étude provenaient de 29 villages répartis en trois groupes: Groupe *Favina* (157 enfants); Groupe *Favilase* (135 enfants) et Groupe témoin (134

enfants). Les enfants des groupes *Favina* et *Favilase* devaient venir entre l'âge de 6 et de 12 mois prendre au moins 2 fois par jour des bouillies correspondant à leur groupe d'appartenance dans des cantines situées au centre de leur village.

Sur 426 enfants de l'étude d'efficacité, 144 enfants de 6-9 mois (*48 enfants par groupe d'aliment, dont 12 de 6, de 7 de 8 et de 9 mois*) ont été sélectionnés par tirage au sort pour participer à l'étude d'ingéré. Pour chaque groupe d'enfants, les observations ont été réalisées chez 12 enfants âgés de 6 mois±1 semaine, 12 de 7 mois±1 semaine, 12 de 8 mois±1 semaine et 12 de 9 mois±1 semaine. Les enfants ayant souffert de maladies au cours des 7 jours précédant la date prévue pour les observations n'étaient pas éligibles. Ils étaient pesés au début de la journée d'observation de façon à pouvoir calculer les quantités consommées par kg de poids corporel.

### 3.1.2. Caractéristiques des farines et bouillies distribuées dans les cantines

Le groupe *Favina* a reçu des bouillies préparées à partir de la farine fabriquée à Quang Nam selon les procédés mis au point dans le cadre du programme Fasevie (*cf. 1.4*). La farine *Favina* était composée de riz (51,3%), de soja (20,8%), de sésame (5,0%) de sucre (15,0%), de lait entier en poudre (5,0%), de sels [0,70% de NaCl; 1,17% de Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)%], de complément minéral et vitaminique (0,80%) et d'arome vanille (0,25%). Les bouillies servies dans les cantines étaient obtenues en mélangeant la farine à de l'eau tiède préalablement bouillie pendant au moins 5 minutes.

Les bouillies distribuées au groupe *Favilase* étaient obtenues en mélangeant dans les cantines un volume de *Favilase* à deux volumes de farine de riz et en rajoutant la quantité d'eau nécessaire pour obtenir après cuisson à ébullition pendant au moins 10 minutes une bouillie ayant une teneur en MS d'environ 25 g/100g. La farine *Favilase* provenait de la même unité et contenait de la farine de soja décortiqué et torréfié (87,67%), des sels [3,10% de NaCl; 6,10% de Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)%], du complément minéral et vitaminique (3,10%) et 0,03% d'amylase (BAN 800 MG de Novo S.A.). Les préparatrices de la bouillie pouvaient, à la demande des mères, rajouter du sucre ou d'autres ingrédients mineurs.

### 3.1.3. Observations et échantillons récoltés

Pour chaque enfant retenu, l'étude a consisté à faire observer par deux enquêtrices pendant une journée (de 6H30 à 19H) ses activités et à mesurer ses ingérés. Les différentes activités ont été chronométrées pour en déterminer les durées. Le nombre et la durée des tétées ont fait l'objet de relevés minutieux.

Les quantités de bouillies et d'autres aliments consommés par les enfants ont été déterminées en pesant, avant et après consommation, les récipients (bol, boîte, verre...) dans lesquels étaient disposés les aliments et en tenant compte des éventuelles pertes.

A chaque préparation de bouillie *Favina* et *Favilase* dans les cantines des prélèvements ont été réalisés pour en déterminer la teneur en matière sèche tandis qu'un échantillon de bouillie *Favilase* était également prélevé pour analyses compte tenu d'une variabilité possible dans les proportions des ingrédients au moment de leur préparation. Pour chaque aliment autre que les bouillies *Favina* et *Favilase*, les modes de préparation ont été soigneusement observés dans les ménages. Lorsque cela était possible, des prélèvements représentatifs des plats ou composants de plats correspondants à environ 30 g de matière sèche ont été réalisés sur place. Lorsque les quantités préparées n'étaient pas suffisantes, les plats ont été répliqués le lendemain de l'enquête. Pour chaque enfant, à partir des échantillons prélevés dans les ménages et/ou des répliques faites ultérieurement, il a été réalisé des échantillons moyens des aliments consommés dans la journée en distinguant quatre types d'aliments: les bouillies

*Favina*, les bouillies *Favilase*, les autres bouillies préparées par les mères et les aliments autres que les bouillies (*riz, légume, lait, snack...*). L'échantillon moyen de chaque type d'aliment était constitué en mélangeant des quantités de chaque aliment correspondant au type considéré proportionnellement aux prises alimentaires observées.

Pour chaque bouillie préparée dans les cantines et pour chaque échantillon moyen, les prélèvements ont été conservés au congélateur puis lyophilisés. Les échantillons lyophilisés ont été conservés au réfrigérateur après avoir été emballés dans des sachets en aluminium, puis expédiés au Laboratoire de l'UR106 de l'IRD à Montpellier pour faire l'objet de déterminations de teneurs en protéines, lipides et minéraux (*Calcium, Fer, Zinc, Phosphore*).

#### 3.1.4. Traitement des données

Les données recueillies ont été saisies en utilisant le logiciel Epi Info version 6.04d (Center for disease control and prevention, Atlanta, GA, USA). Elles ont fait l'objet d'analyses de variance (*Statgraphics plus 5.1; Virginia, USA*) pour comparer entre les trois groupes les caractéristiques des enfants et des aliments distribués et les niveaux d'ingérés. Les variables pour lesquelles les variances calculées pour les différents groupes étaient significativement différentes sont représentées par leur médiane avec indication de l'intervalle entre le 25<sup>ème</sup> et le 75<sup>ème</sup> percentile. Le niveau de signification statistique des différences a été testé en utilisant le test F de Fisher suivi du test de Newman-Keuls pour les moyennes et le test de Kruskal-Wallis suivi du test de Mann-Whitney pour les médianes.

### **3.2. Effets des teneurs en amidon, en lipides et en eau des matières premières sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Chapitre IV-1)**

Bien que la cuisson extrusion et les cuiseurs-extrudeurs aient fait l'objet de nombreuses études depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les différences aux niveaux des équipements et des matières premières utilisés font que les résultats sont souvent contradictoires. Par ailleurs, les effets de certaines caractéristiques des matières premières sur celles des extrudats dans le cas de l'utilisation d'un CE-TFC n'avaient pas encore été étudiés de manière systématique.

#### 3.2.1. Origine et conservation des matières premières

Un même lot de riz (variété « *Tap Giao* », récolte 2005, 5% de brisure) et de soja (variété *DT12*, récolte 2005) a été utilisé pour cette étude ainsi que pour celles sur les modifications de la vis (*cf. Ch IV-1&2*). Ces matières premières ont été conditionnées dans des sachets en polyéthylène et stockés à une température d'environ 25°C dans un local du VASI. L'huile de soja a été achetée à un producteur de Cai Lan, Quang Ninh, Vietnam.

#### 3.2.2. Préparation des mélanges

Les graines de soja ont été séchées dans un séchoir électrique à 35°C pendant 24H en disposant les graines en fines couches sur des plateaux en inox. Elles ont ensuite été passées dans un décortiqueur DH25 (*CTC, Vietnam*) de capacité 25kg/h consistant en deux meules espacées de 5 à 7 mm.

Neuf combinaisons de trois matières premières (*riz, soja et huile de soja*) ont été formulées afin de disposer de mélanges ayant différentes teneurs en amidon (60 à 70 g/100g MS) et en lipides (6,2 à 10,2 g/100g MS) (Tableau II/4). Dans la mesure où les mélanges de matières premières avaient une teneur en eau initiale supérieure à 10 %, les matières premières ont été séchées dans un four à gaz à 35°C en disposant les graines en fines couches sur des plateaux inox afin d'obtenir des mélanges ayant une teneur en eau de 10g/100g avant cuisson extrusion.

**Tableau II/4:** Composition des 9 mélanges correspondant aux teneurs en amidon et en lipides souhaitées.

N °	Teneur (g/100g MS)		Composition du mélange (g/100g MS)		
	Amidon	Lipides	Riz	Soja	Huile de soja
1	60	6,2	72,9	27,0	0,1
2	60	8,2	72,9	24,4	2,7
3	60	10,2	72,9	21,9	5,2
4	65	6,2	79,0	19,3	1,7
5	65	8,2	79,0	16,8	4,2
6	65	10,2	79,0	14,2	6,8
7	70	6,2	85,1	11,6	3,3
8	70	8,2	85,1	4,1	5,8
9	70	10,2	85,1	3,0	8,4

Pour amener ensuite les mélanges au taux d'humidité souhaités, un pulvérisateur à main a été utilisé pour les asperger de fines gouttelettes d'eau. La quantité d'eau ajoutée était calculée, en tenant compte de la teneur en matière sèche initiale des produits, de manière à obtenir des mélanges de teneurs en eau différentes (10g, 13g et 16g d'eau/100g de produit). Après pulvérisation, les mélanges ont été laissés pendant 120 minutes dans une bassine en plastique recouverte d'un couvercle afin de faciliter la diffusion de l'eau rajoutée avant le passage dans le CE-TFC.

### 3.2.3. Obtention et broyage des extrudats

L'extrusion a été réalisée en utilisant le CE-TFC de 2<sup>nd</sup> génération (EX800, CTC, Vietnam, cf. Ch II-2). Pour chaque formule, au mois 10 kg de mélange étaient passés dans l'extrudeur avec un débit d'alimentation de 100 kg/h.

A leur sortie de la filière, les extrudats étaient refroidis jusqu'à température ambiante dans un panier métallique. Les échantillons étaient prélevés dans les extrudats correspondant aux cinq derniers kg de matières premières passés dans l'extrudeur. Après refroidissement, les extrudats étaient réduits en farine à l'aide d'un broyeur à marteau (DSM 500, Electra, France) équipé d'un tamis en acier inoxydable ayant des fentes longitudinales de 0,5 mm de largeur et 7 mm de longueur.

Tous les essais ont été réalisés à l'atelier de fabrication des produits nutritionnels Nufavie du NIN au Vietnam. Les échantillons ont été emballés dans des sachets en aluminium et stockés à 4°C avant d'être expédiés pour analyses au laboratoire de l'UR106 de l'IRD à Montpellier.

### 3.2.4. Plan d'expérience et analyse statistique

Le plan d'expérience utilisé pour cette étude prend en compte trois variables à trois niveaux (3<sup>3</sup>). Les variables indépendantes sont la teneur en eau (10g, 13g et 16g d'eau/100g de produit), la teneur en lipides (6,2 / 8,2 / 10,2 g/100g MS) et la teneur en amidon (60 / 65 / 70 g/100g MS) des mélanges. Au total, 29 préparations correspondant à 27 combinaisons de niveaux pour les variables indépendantes, et à deux points centraux ont été réalisées (Tableau II/5). Les paramètres étudiés sont la température et la pression dans la filière, l'expansion des extrudats, les pertes en lipides, le taux de gélatinisation, le gonflement (WAI) et la solubilité (WSI) dans l'eau des extrudats, la viscosité des bouillies préparées à la concentration de 16g MS/100g de bouillie et le caractère instantané des farines.

**Tableau II/5:** Valeur des variables indépendantes (*Plan factoriel 3<sup>x</sup>3*).

Variables	Variables		Niveau	
	Codé	Réel	Codé	Réel
Teneur en amidon (g/100 g MS)	X <sub>1</sub>	AMI	-1	60
			0	65
			1	70
Teneur en lipides (g/100 g MS)	X <sub>2</sub>	LIP	-1	6,2
			0	8,2
			1	10,2
Teneur en eau (g/100g MB)	X <sub>1</sub>	UV	-1	10
			0	13
			1	16

Le niveau de signification des effets des variables a été testé par analyse de variance en utilisant le logiciel Statgraphics Plus 5.1 (*Virginia, USA*). Le modèle polynomial de second degré a été utilisé pour prédire les effets des variables indépendantes:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} X_i X_j$$

$b_0$ : la valeur constante,

$b_i$ ,  $b_{ii}$  et  $b_{ij}$ : coefficients des effets linéaires, quadratiques et interactifs, respectivement

$X_i$  et  $X_j$ : variables indépendantes codées.

La validité des modèles de régression est vérifiée par un calcul de coefficients de corrélation  $R^2$ . Les résultats sont analysés par la méthode des surfaces de réponse. Les surfaces de réponse des modèles obtenus sont établies en fixant une variable à un niveau optimal et en faisant varier les deux autres.

### 3.2.5. Mesures et analyses physicochimiques réalisées

Sur les extrudats ont été déterminés l'indice d'expansion, les teneurs en matière sèche, en lipides et en amidon total, le WAI, le WSI ainsi que le taux de gélatinisation de leur amidon. Sur les bouillies préparées à partir de ces extrudats, on a mesuré la viscosité en utilisant les méthodes décrites aux chapitres II-4.

## 3.3. Effets de la nature de la source amyliacée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (*Chapitre IV-2*)

Les premiers travaux réalisés avec le CE-TFC avaient montré la possibilité de l'utiliser pour la fabrication de farines infantiles à base de riz, une source d'amidon très abondante au Vietnam ([Mouquet et al., 2003](#); [Berger et al., 2004](#); [Bruyeron et al., 2006](#)). Cependant, l'utilisation de cet équipement avec d'autres matières premières, notamment d'autres céréales que le riz, n'avait pas encore été testée. Une étude des effets de la nature de la source amyliacée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies a donc été entreprise dans le cadre d'un essai de transfert d'un CE-TFC de modèle EX800 au Burkina Faso.

### 3.3.1. Matières premières

Les céréales utilisées, au nombre de 5, ont été du maïs (blanc et jaune), du mil, du sorgho et du riz, en mélange avec du soja. Elles ont été achetées sur la marche *Sankariaré* de

Ouagadougou, Burkina Faso. Les matières premières ont été triées manuellement pour enlever les déchets (*caillou, feuille morte...*) par des ouvriers de l'atelier de production dans lequel les essais ont été réalisés à la CTRAPA (*Centrale de Transformation des Produits Agricoles*) à Ouagadougou, Burkina Faso.

### 3.3.2. Préparation des mélanges et extrudats

Des déterminations de teneurs en amidon, lipides, protéines, fibres ont été effectuées sur les matières premières. En tenant compte de leur composition, des mélanges ayant les trois couples de teneurs en lipides et en amidon souhaités (6,2/67,0: 8,2/59,0 et 10,2/51,0) ont été préparés. La teneur en eau de tous les mélanges a été ajustée à 14% par pulvérisation. Après humidification, le mélange était laissé pendant 120 minutes dans un sachet en plastique fermé avant d'être passé dans le CE-TFC.

L'extrusion des mélanges a été réalisée dans un CE-TFC de seconde génération (*EX800, CTC, Vietnam*) possédant une vis de 28cm avec un rapport L/D de 3,5. Pour chaque essai, 10 kg de mélange ont été préparés. Le débit d'alimentation de l'extrudeur était fixé à 90 kg/h. Après refroidissement jusqu'à température ambiante dans une bassine métallique, les échantillons étaient prélevés dans les extrudats correspondant aux 5 derniers kilos de mélanges passés dans la machine. La mesure de l'expansion des extrudats a été réalisée juste après refroidissement. Pour chaque mélange étudié, trois essais de cuisson-extrusion ont été réalisés lors de 3 jours différents.

Les extrudats ont été réduits en farine à l'aide d'un broyeur à marteau (DSM 500, Electra, France) équipé d'un tamis en acier inoxydable ayant des fentes longitudinales de 0,5 mm de largeur et 7 mm de longueur. Les échantillons ont été emballés dans des sachets en aluminium et stockés à 4°C avant d'être expédiés pour analyses au laboratoire de l'UR106 de l'IRD à Montpellier.

### 3.3.3. Mesures et analyses physicochimiques réalisées

Sur les extrudats ont été déterminés l'indice d'expansion, les teneurs en matière sèche, en lipides et amidon total, l'activité antitrypsique ainsi que le taux de gélatinisation de leur amidon. Sur les bouillies préparées à partir de ces extrudats, on a mesuré la viscosité et évalué le caractère instantané des farines en utilisant les méthodes décrites aux chapitres II-4 et II-5.

### 3.3.4. Analyse des données

Les moyennes obtenues ont été comparées par analyse de variance (ANOVA) en utilisant le test de Fisher au niveau de signification de 0,05. Toutes les analyses statistiques sont réalisées à l'aide du logiciel Statgraphics Plus 5.1 (*Virginia, USA*).

## **3.4. Effet de la longueur de la vis sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies** (*Chapitre V-1*)

La configuration de la vis des cuiseurs-extrudeurs est reconnue comme un des facteurs déterminants des caractéristiques des extrudats. Même si l'étude préliminaire réalisée avec le CE-TFC de première génération ([Mouquet et al., 2003](#)) avait démontré la faisabilité de la fabrication de farines infantiles instantanées avec un équipement rudimentaire (*vis de 200 mm de longueur et de 40 mm de diamètre*), il est apparu intéressant d'étudier les effets de l'utilisation de vis plus longues sur les caractéristiques des extrudats.

#### 3.4.1. Matériels et matières première

Des vis de trois longueurs différentes ont été utilisées: 28 cm (longueur initiale de la vis du CE-TFC de seconde génération), 37cm et 46 cm.

Les matières premières utilisées sont identiques à celles qui ont servies à l'étude des effets des teneurs en amidon, en lipides et en eau des matières premières (*cf. Ch II-3.2*).

#### 3.4.2. Préparation des mélanges et des extrudats

Neuf combinaisons des trois matières premières (*riz, soja et huile de soja*) ont été formulées afin de disposer de mélanges ayant différentes teneurs en amidon (60 à 70 g/100g MS) et en lipides (6,2 à 10,2 g/100g MS). La teneur en eau de ces mélanges a été ajustée à 13% par pulvérisation en tenant compte de la teneur en eau initiale des matières premières. Après pulvérisation, les mélanges étaient laissés pendant 120 minutes dans un sachet en plastique fermé avant d'être passés dans le CE-TFC.

Les modes de préparation des matières premières et des mélanges sont décrits ci-dessus (*Cf. Ch II-3.2*). Les échantillons ont été emballés dans des sachets en aluminium et stockés à 4°C avant d'être expédiés pour analyses au laboratoire de l'UR106 de l'IRD à Montpellier.

#### 3.4.3. Plan d'expérience et analyse statistique

Le plan d'expérience est identique à celui de l'«étude des effets des teneurs en amidon, en lipides et en eau des matières premières» (*Cf. 3.2.*) sauf que le facteur teneur en eau est remplacé par le facteur longueur de la vis

#### 3.4.4. Mesures et analyses physicochimiques réalisées

Comme pour l'«étude des effets des teneurs en amidon, en lipides et en eau des matières premières» (*Cf. 3.2.*), on a déterminé sur les extrudats l'indice d'expansion, les teneurs en matière sèche, lipides, et amidon total, le WAI, le WSI, ainsi que le taux de gélatinisation de leur amidon. Sur les bouillies préparées à partir de ces extrudats, on a mesuré la viscosité et évalué le caractère instantané des farines en utilisant les méthodes décrites aux chapitres II-4 et II-5.

### **3.5. Effets de l'usure de la vis sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies** (Chapitre V-2)

Les premiers travaux réalisés avec le CE-TFC avaient montré la possibilité de l'utiliser pour la fabrication de farines infantiles instantanées à base de riz ([Mouquet et al., 2003](#); [Berger et al., 2004](#); [Bruyeron et al., 2006](#)). Cependant, il avait été observé une augmentation de la dureté et une diminution de l'expansion des extrudats après qu'une même vis ait servi pour la préparation de plus de deux tonnes de farines infantiles. Comme les conditions d'extrusion et les matières premières utilisées étaient les mêmes, l'hypothèse a été émise que l'usure de vis pouvait être à l'origine des changements de caractéristiques observés au niveau extrudats. Des essais ont donc été réalisés pour comparer les effets de la vis après différentes durées d'utilisation sur certains paramètres en cours d'extrusion et sur les caractéristiques des extrudats et la consistance de bouillies afin d'évaluer la durabilité de la vis actuellement utilisée dans le CE-TFC.

#### 3.5.1. Matériel et matières premières

Trois paires de vis/fourreaux identiques de longueur 28 cm et de rapport L/D 3.5, fabriquées à partir du même type d'acier ont été commandées au fabricant (CTC, Vietnam) du CE-TFC. L'effet du niveau d'usure de la vis a été étudié en comparant les caractéristiques des extrudats

et des bouillies préparés avec une vis neuve et avec deux vis ayant déjà servi à la préparation, soit de 3,5, soit de 7,0 tonnes, de farines à partir d'un mélange riz/sésame dans les proportions 91,3/8,7.

Les matières premières utilisées sont identiques à celles ayant servi aux essais précédents (*cf. Ch II-3.2.1.*).

### 3.5.2. Préparation des mélanges et extrudats

Les modes de préparation des mélanges et extrudats sont décrits auparavant (*cf. Ch II-3.2.2.*). Tous les essais ont été réalisés dans l'atelier de production Nufavie de l'Institut National de Nutrition (NIN) du Vietnam. Les échantillons ont été emballés dans des sachets en aluminium et stockés à 4°C avant d'être expédiés pour analyses au laboratoire de l'UR106 de l'IRD à Montpellier.

### 3.5.3. Plan d'expérience et analyse statistique

Le plan d'expérience est identique à celui de l'étude de l'«effet de la longueur de la vis» (*Cf. 3.4*) sauf que le facteur longueur de la vis est remplacé par le facteur usure de la vis

### 3.5.4. Mesures et analyses physicochimiques réalisées

Comme pour l'étude l'«effet de la longueur de la vis» (*Cf. 3.4*), on a déterminé sur les extrudats l'indice d'expansion, les teneurs en matière sèche, lipides, et amidon total, le WAI, le WSI, ainsi que le taux de gélatinisation de leur amidon. Sur les bouillies préparées à partir de ces extrudats, on a mesuré la viscosité et évalué le caractère instantané des farines en utilisant les méthodes décrites aux chapitres II-4 et II-5.

## **3.6. Influence des procédés technologiques utilisés pour la fabrication des farines infantiles sur le niveau des ingérés en énergie et en nutriments de nourrissons de 6 à 10 mois (*Chapitre VI*)**

Les différentes études et expérimentations réalisées au cours de cette thèse ont permis de définir deux types de farines infantiles: une farine extrudée instantanée (FEI) et une farine extrudée à cuisson rapide (FCR) toutes les deux préparées en utilisant le CE-TFC mis au point dans le cadre du programme Fasevie. Une farine de même composition mais obtenue sans passer par le CE-TFC, uniquement par torréfaction, broyage et incorporation d'amylases (FAA) pourrait également être proposée pour répondre, dans certains contextes, aux contraintes des populations en terme de coût et d'hygiène.

L'objectif de cette étude est de voir dans quelles mesures les différences de caractéristiques physicochimiques et organoleptiques entre ces trois farines, de même composition en matières premières et qui diffèrent donc essentiellement par les procédés technologiques utilisés pour leur préparation, se répercutent sur les quantités de bouillies et de nutriments que les nourrissons après 6 mois sont capables d'ingérer. Une quatrième farine a été introduite dans la comparaison comme témoin: il s'agit d'une farine préparée uniquement par torréfaction et broyage sans incorporation d'amylases (FSA)

Le choix a été fait de comparer sur les mêmes enfants les quantités ingérées de bouillies préparées à partir des quatre farines en les leur faisant consommer au cours de 4 périodes de 4 jours successives dans des cantines installées à proximité de leur domicile.

### 3.6.1. Sujets et localisation

L'effectif d'enfants nécessaire a été estimé à partir de données obtenues dans le cadre de la première étude d'ingéré (*Cf. Ch III*) au cours de laquelle l'ingéré énergétique moyen à partir

des bouillies des enfants de 6 à 10 mois qui consommaient au moins deux fois par jour des bouillies de haute densité énergétique (Favina) était de  $39,4 \pm 19,7$  kcal/kg de poids corporel. Compte tenu de la variabilité observée, il a été calculé qu'un effectif de 65 enfants était suffisant pour détecter des différences de  $\pm 8$  kcal/kg lors de la comparaison deux à deux des ingérés énergétiques journaliers moyens à partir des 4 types de bouillie avec un niveau de confiance de 5% et une puissance de 95%. En estimant le taux d'abandon à 20%, on a pu établir que 78 enfants au minimum devaient être recrutés.

L'étude a été lieu dans 6 communes rurales proches de la ville de Tam Ky dans la province de Quang Nam. Avant de lancer l'étude dans chacune des communes, une réunion a été organisée par les coordinateurs de l'étude pour présenter les objectifs et le déroulement de l'étude aux responsables communaux concernés (*chef de la commune, chef du centre de santé, représentante de l'union des femmes*).

Un recensement des enfants âgés de 6 à 10 mois pendant la période prévue pour l'étude a été réalisé sur les six communes et a permis de recenser 82 enfants éligibles. Les conditions d'éligibilité étaient que les enfants soient âgés de 6 (182 jours) à 10 mois (304 jours) au début de l'étude, qu'ils soient encore allaités par leurs mères, qu'ils ne soient pas sévèrement malnutris (Z-scores poids-pour-taille et taille-pour-âge  $> -3$ ), qu'ils ne soient pas atteints de handicaps sévères, qu'ils ne soient pas jumeaux et que leurs parents acceptent de les emmener deux fois par jour pendant toute la durée de l'étude à la cantine la plus proche de leur domicile. Une lettre expliquant les objectifs de l'étude a été adressée aux parents qui devaient notifier par écrit leur accord.

Pour que l'ensemble des enfants résident à moins de 15 minutes à pied des cantines, 9 cantines desservant en moyenne chacune 8 enfants ont été installées. Les cantines étaient ouvertes chaque jour de 7H à 10H et de 15H à 18H pour que les parents puissent y emmener leurs enfants aux heures qui leur convenaient le mieux.

En définitive, l'étude a été réalisée sur 67 enfants dans la mesure où les données de 15 enfants sur 82 n'ont pas été retenues, soit parce qu'ils ont été malades (5), soit parce que leurs mères ou donneurs de soins étaient trop occupés, soit parce que les familles se sont absentes de leur domicile pendant plusieurs jours (7).

### 3.6.2. Organisation de l'étude

Les quatre types de farines ont été distribués sous forme de bouillies successivement aux enfants pendant 4 périodes distinctes de 4 jours.

L'ordre dans lequel les bouillies ont été distribuées était différent selon les cantines:

- FEI, FAA, FCR et FSA dans les cantines 1 et 2
- FCR, FEI, FSA et FAA dans les cantines 3 et 4
- FAA, FSA, FEI et FCR dans les cantines 5 et 6
- FSA, FCR, FAA et FEI pour les cantines 7, 8 et 9.

La préparation des bouillies était réalisée par des cantinières préalablement formées et affectées à chaque cantine. Des enquêtrices sélectionnées parmi les volontaires communales du programme de nutrition ont également été formées pendant une semaine pour mesurer les quantités de bouillies consommées, peser les enfants, réaliser des prélèvements de bouillies et pouvoir, si nécessaire, intervenir en cas d'étouffement de l'enfant par les bouillies.

### 3.6.3. Composition des farines expérimentales

La formule et les procédés de fabrication de chaque farine ont été définis de façon à conférer aux farines et aux bouillies les caractéristiques suivantes:

- la première farine (FEI) est une farine *Favina* telle que distribuée dans le cadre du programme Fasevie. Les bouillies préparées par ajout de l'eau à 75°C sont prévues pour avoir une teneur en matière sèche de 22g/100g, une densité énergétique de 94 kcal/100g et un écoulement Bostwick de 65 mm/30s;
- la seconde (FCR) est une farine à cuisson rapide contenant une amylase (BAN 800 MG) en quantité suffisante (0,001%) pour que la bouillie puisse être préparée à la concentration de 29 g de MS pour 100 g de bouillie, à la densité énergétique de 125 kcal/100g avec un écoulement Bostwick moyen de 95mm/30s;
- la troisième (FAA) est un mélange de farines non extrudées de même formule que la précédente contenant de la BAN en quantité suffisante (0,006%) pour que la bouillie puisse être préparée aux mêmes concentration, densité énergétique et écoulement Bostwick que la seconde;
- la quatrième (FSA) est un mélange de farines non extrudées ne contenant pas d'amylases destinée à être préparée sous forme de bouilles ayant un écoulement Bostwick identique (65 mm/30s) à la première correspondant à une concentration d'environ 14 g MS/100g de bouillie et à une densité énergétique d'environ 60 kcal/100g.

Les compositions en matières premières des 4 farines avant éventuels ajouts de sucre et/ou d'amylases sont identiques. Mais de façon à conférer aux bouillies une même intensité de goût sucrée supposée pouvoir influencer leur acceptabilité (Vieu *et al.*, 2001), les proportions de sucre sur la base de la matière sèche ont été choisies de façon à que les quatre types de bouillies aient la même concentration en sucre sur la base de la matière brute (3,23 g de sucre/100g de bouillie) que les bouillies *Favina*. La composition des quatre farines est donnée dans le tableau II/6.

**Tableau II/6:** Composition en matières premières des quatre farines expérimentales (*en g pour 100 g de MS de farine*)

<b>Matières premières</b>	<i>Formule des 4 farines avant ajout de sucre</i>	Farine extrudée instantanée (FEI)	Farine extrudée à cuisson rapide (FCR)	Farine non extrudée avec ajout d'amylases (FAA)	Farine non extrudée sans amylase (FSA)
Riz	62,19	53,04	54,73	54,73	45,42
Soja	18,49	15,77	16,29	16,29	13,52
Sésame	5,94	5,07	5,23	5,23	4,34
Lait en poudre	11,48	9,79	10,10	10,10	8,38
Sel	0,82	0,70	0,72	0,72	0,60
CaCO <sub>3</sub>	0,47	0,40	0,41	0,41	0,34
CMV	0,29	0,25	0,26	0,26	0,21
Arome	0,30	0,26	0,27	0,27	0,22
Sucre	-	14,69	11,98	11,98	26,95
BAN	-	-	0,001	0,006	-
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

#### 3.6.4. Préparation des farines expérimentales

Les quatre farines expérimentales, dont les formules sont données dans le tableau 2, ont été préparées de la manière suivante:

- la farine extrudée instantanée (FEI) en suivant le mode de préparation utilisé dans les unités de production du programme Fasevie pour produire *Favina*. Le riz et le sésame sont mélangés avant d'être extrudés et réduits en farine. Le soja subit une torrification à 121°C

- pendant 75 min avant d'être décortiqué et réduit en farine. Les farines d'extrudat, de soja décortiqué et torréfié et les autres ingrédients sont mélangés dans un gros mélangeur;
- *la farine extrudée à cuisson rapide (FCR)* est obtenue en faisant passer simultanément dans le CE-TFC le riz, le sésame et le soja décortiqué. Les extrudats sont ensuite broyés et mélangés avec l'amylase (BAN 800MG) et les autres ingrédients de la formule;
  - pour obtenir *la farine avec amylase (FAA)*, le riz et le sésame sont broyés en farine tandis que le soja est torréfié à 121°C pendant 60 minutes avant d'être décortiqué et broyé. Les farines de riz/sésame et de soja sont ensuite mélangées avec les amylases (BAN 800 MG) et les autres ingrédients de la formule;
  - *la farine sans amylase (FSA)* est préparée de la même manière que la farine précédente (FAA) mais sans ajout d'amylases et en tenant compte des différences de taux d'incorporation de sucre prévue dans la formule.

En fin de préparation, chacune des 4 farines a été emballée dans des sachets en aluminium contenant des quantités suffisantes de farine (720g pour FEI, 880g pour FCR et FAA et 410 g pour FSA) pour préparer un bol de bouillie de 300g à 10 enfants. Les sachets ont été stockés dans des cartons conservés dans une salle climatisée.

### 3.6.5. Préparation et distribution des bouillies

La préparation des bouillies dans les cantines est réalisée en même temps pour tous les enfants présents en mélangeant un nombre de sachets suffisant pour le nombre d'enfants présents à une quantité appropriée d'eau de la manière suivante:

- *Bouillies préparées à partir de la farine FEI*: l'eau utilisée (2390 ml pour un sachet de 720 g de farine) est de l'eau potable préalablement bouillie pendant au moins 5 minutes. L'ensemble est remué jusqu'à l'obtention d'une bouillie bien homogène.
- *Bouillies préparées à partir de la farine FCR*: Le mélange de farine et d'eau potable (1950 ml pour un sachet de 880 g de farine), réalisé à température ambiante dans une casserole en aluminium, est porté à 85°C sur un feu doux, puis maintenu à ébullition pendant 5 minutes tout en remuant. Après cuisson, la bouillie est laissée refroidir pendant environ 10 minutes.
- *Bouillies préparées à partir de la farine FAA*: Après mélange de 880 g de farine dans 2010 ml d'eau, les autres étapes de la préparation de ces bouillies sont quasiment identiques à celles des bouillies préparées à partir des farines FCR. La seule différence consiste dans le fait qu'elles ne sont maintenues à ébullition que pendant 10 minutes au lieu de 5 minutes.
- *Bouillies préparées à partir de la farine FSA*: La préparation de ce type de bouillie se fait de manière comparable à la précédente. La seule différence est que la proportion de farine par rapport à l'eau est beaucoup plus faible (2950 ml d'eau pour un sachet de 410 g de farine).

A chaque préparation de bouillie, un prélèvement était effectué pour en déterminer la teneur en matière sèche tandis qu'une mesure d'écoulement Bostwick était également réalisée. Quel que soit le type de bouillies préparé, les cantinières versaient ensuite environ 300 g de bouillie dans les bols codés et préalablement pesés qui étaient ensuite repesés avant d'être servis de façon à connaître la quantité exacte de bouillie versée.

Avec chaque bol de bouillie, les enfants recevaient une serviette préalablement pesée par les enquêtrices. Les mères devaient l'utiliser pour recueillir les régurgitations des enfants et les éventuelles pertes. A la fin du repas, les enquêtrices repesaient individuellement les bols et les serviettes afin de calculer les quantités de bouillie effectivement consommées par chaque enfant. Si les enfants terminaient leur premier bol de bouillie, les enquêtrices devaient leur servir un second bol de bouillie en répétant les opérations précédentes

### 3.6.6. Traitement des données

L'analyse des données a été réalisée sur SAS (version 9.1; SAS Institute, Cary, NC, USA). L'effet de la nature de la cantine de distribution (1 à 9) sur les teneurs en matière sèche et la distance d'écoulement des bouillies a été étudié par ANOVA. Concernant les ingérés, les moyennes obtenues ont été comparées en utilisant un «SAS Mixed Model» dans lequel les facteurs principaux sont le type de bouillie (*FEI, FAA, FCR ou FSA*), le rang du jour de distribution à l'intérieur d'une même période (*de 1 à 4*), l'âge de l'enfant (*en mois*), le numéro de code de la cantine (*de 1 à 9*) et (*seulement pour l'analyse des résultats relatifs aux observations faites par repas*) le moment du repas (*matin ou après-midi*), le tout étant ajusté sur une variable correspondant au rang de la période de distribution (*de 1 à 4*). Les interactions entre les effets du type de bouillies, du rang du jour de distribution, de l'âge des enfants et du moment du repas ont également été prises en compte mais n'étaient pas significatives. Les principales variables réponses analysées ont été la quantité de bouillie (*en g/kg de poids corporel*) et l'ingéré énergétique (*en kcal/kg de poids corporel*) par repas ou par jour. Les ingérés en différents nutriments ont également été calculés et analysés. Quand cela était approprié le test de Tukey a été utilisé pour des analyses *post hoc*. Pour chaque comparaison, les différences ont été considérées comme significatives pour  $p < 0,05$ .

## 4. Détermination des teneurs en nutriments et facteurs antinutritionnels

### 4.1. Détermination des teneurs en nutriments

#### 4.1.1. Protéines totales

Les teneurs en protéines totales ont été déterminées par la méthode Kjeldhal telle qu'elle est décrite dans la 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 libre, 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 facteur de conversion de l'azote en protéines.

#### 4.1.2. Lipides totaux

Les lipides ont été extraits à l'éther de pétrole par le système HT Soxtec de Tecator ([note d'application n°3144 selon la méthode AOAC 2003.06](#)). Le solvant est ensuite évaporé afin de déterminer la teneur en lipides par gravimétrie.

#### 4.1.3. Amidon total

Le dosage de l'ensemble des sucres consistant en des polymères du glucose a été réalisé par la méthode enzymatique de [Batey \(1982\)](#) et [Holmes et al. \(1986\)](#). Les échantillons ont été traités par des enzymes ( $\alpha$ -amylase puis amyloglucosidase) afin d'hydrolyser les polymères sous forme de glucose. La concentration en glucose de l'hydrolysat est déterminée par colorimétrie à 560 nm avec un facteur de conversion de 0,9.

#### 4.1.4. Teneurs en cendres et en minéraux

Les teneurs en cendres ont été déterminées par calcination complète de la matière organique par passage de l'échantillon dans un four à 530°C pendant 6 heures.

Le dosage du calcium, du fer et du zinc a été réalisé par spectrométrie d'absorption atomique (SpectrAA 200, Varian, Victoria, Australie) après calcination à sec comme indiqué par [Laporte et al. \(1980\)](#). Pour cela, 2 g d'échantillon sont minéralisés par voie sèche pendant 3 h à 530°C dans une capsule en silice. Les cendres sont ensuite fixées par ajout de 3 ml de

solution de HNO<sub>3</sub> 7 N qui est ensuite évaporée sur plaque chauffante, puis solubilisées dans 25 ml d'HCl 0,5 N.

La teneur en phosphore a été déterminée par la méthode colorimétrique (430 nm) au phosphovanadomolybdate d'ammonium de [Stuffins \(1967\)](#).

#### 4.1.5. Teneur en matière sèche

La teneur en matière sèche des échantillons a été déterminée par séchage en étuve à 105°C jusqu'à poids constant (minimum 24H) de prises d'essai de 2g à 5g pour les graines et farines et de 5 à 10 g pour les bouillies.

### 4.2. Détermination de la composition des fractions glucidiques<sup>1</sup>

#### 4.2.1. Teneur en oligosides

*Extraction:* Les sucres solubles ont été extraits à partir de 80 mg d'échantillon par solubilisation dans de l'éthanol à 80°GL dans un bain marie agité à 90°C pendant 30 minutes. La solution est ensuite centrifugée à 4000 g à 4°C pendant 10 minutes. Le surnageant est alors recueilli et conservé. L'opération précédente est renouvelée sur le culot précédent et le second culot obtenu est rincé une troisième fois à l'alcool avant d'être centrifugé. Les 3 surnageants cumulés sont alors évaporés à sec à l'aide d'un évaporateur centrifuge (modèle RC 10-10, Jouan, St Herblain, France) pendant une nuit à température ambiante. L'extrait sec est stocké à 4°C.

*Dosage (HPIC Dionex):* L'extrait sec est repris dans 2 ml d'eau milliQ, filtré à 0,2µm, et dilué au 50<sup>ème</sup> ou au 20<sup>ème</sup> suivant l'échantillon. Une aliquote de 25 µl est alors injectée sur la précolonne et la colonne Carbo PAC PA1 (DIONEX: Sunnyvale, USA), colonne échangeuse d'anions séparant les sucres ayant un degré de polymérisation inférieur à 8. L'éluant utilisé est un gradient 1 mL par minute d'eau milliQ, de soude 300mM et d'acétate 600mM. La détection se fait par ampérométrie pulsée.

#### 4.2.2. Teneur en dextrines solubles

*Extraction:* 1g de farine finement broyée (<500µm) est suspendu dans 8ml d'eau ultra pure dans une tube Nalgène de 20ml. Le tube est agité au vortex pendant 10 s puis à 250 t/min à température ambiante par un agitateur magnétique (Dataplate 729-2, PMC Industry, USA). La solution est ensuite centrifugée à 12000 g à 4°C pendant 20 minutes. Le surnageant est alors recueilli et congelé immédiatement à -20°C.

*Dosage (GPC):* L'échantillon est décongelé juste avant l'injection. Une aliquote de 50 µl est alors injectée sur une colonne Sephadex 75, 10/300GL (Amersham Bioscience, Orsay, France) fonctionnant avec un débit isocratique 0,5mL par minute de KOH 0,05M. La détection se fait par réfractométrie (Waters, Milford, USA).

### 4.3. Dosage de l'activité α-amylasique

L'activité α-amylasique a été déterminée par une méthode colorimétrique utilisant le kit Amylzyme (société Megazyme, Wicklaw, Irlande). Un substrat spécifique (Azurine cross linked ou AZCL-amylose) est hydrolysé à 60 °C (température limite pour la stabilité des solvants) par l'alpha amylase extraite selon le protocole accompagnant le kit à partir de 0,5g d'échantillon finement broyé et tamisé à 500 µm. La coloration produite est mesurée par

---

<sup>1</sup> Ces méthodes qui avaient été auparavant utilisées pour des échantillons similaires (Van Hoan, 2004) ont été réutilisées sur des échantillons recueillis pour l'étude des effets de la nature de la source amylacée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Chapitre IV-2) mais les résultats obtenus ne sont pas repris dans le projet d'article correspondant.

absorbance à 590 nm et est reliée à l'activité enzymatique. L'activité est exprimée en unités *Ceralpha* correspondant à la quantité d'enzymes nécessaire pour libérer ~0,94 micromole de glucose par minute.

#### **4.4. Détermination des teneurs en facteurs antinutritionnels**

##### **4.4.1. Activités anti-trypsiques**

L'activité antitrypsique a été déterminée par mesure de la trypsine réagissant avec le Benzoyl D L-Arginine p-Nitroanilide (BAPNA) (*AFNOR V18-202 modifiée*).

Après une éventuelle délipidation (pour les échantillons riches en lipides), une prise d'essai finement broyée (<500µm) est mise en suspension dans de l'acide chlorhydrique 0,0025N à 2,8<pH<3,0 sous agitation pendant 30 min.

Des quantités croissantes de cette suspension sont ensuite mises en contact avec un excès de trypsine. Les tubes sont plongés au bain-marie 37°C. Après 10 min, 2ml de trypsine est ajouté sauf dans un tube témoin To où on rajoute 2ml d'HCl 0,001N. La trypsine réagit avec le chlorhydrate de N α-benzoyl D L arginine p-Nitroanalide pour former un composé de coloration jaune qui est le p-nitroaniline. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de complexe dans le milieu réactionnel. Après blocage de la réaction par de l'acide acétique, la coloration est mesurée au spectrophotomètre à 410nm. Les résultats sont exprimés en UI/g de MS

##### **4.4.2. Teneur en phytates<sup>1</sup>**

Le dosage de phytates consiste en une détermination de la teneur en *myo*-inositol hexaphosphate (IP6) par chromatographie ionique HPLC Dionex selon la méthode de *Talamond et al. (1998)* légèrement modifiée.

200 mg de farine additionnés de 10 ml d'HCl 0,5 M sont mis à agiter 6 min au bain marie à ébullition, puis centrifugés à 4500 g pendant 20 min à 4°C. Le surnageant est amené à une concentration en HCl équivalente à 2 M en ajoutant 1,5 ml d'HCl 12 N. Les échantillons sont ensuite évaporés à sec à l'aide d'un évaporateur centrifuge (modèle RC 10-10, Jouan, Saint Herblain, France), puis stockés à 4°C jusqu'au dosage.

Dans les 10 min précédant l'injection, le culot est repris dans 2 ml d'eau millipore et filtré (Acrodisc de 0,2 µm). Le filtrat obtenu est dilué avant injection dans 2 ml d'eau ionisée.

50 µl de filtrat sont passés sur une colonne échangeuse d'anions Ion Pac AS11 (4 x 250 mm, Dionex) équipée d'une pré-colonne Ion Pac AG11 (4 x 50 mm) et d'un suppresseur d'anion (AMMS-III 4 mm). La séparation est assurée par un gradient d'élution composé de NaOH et d'eau.

##### **4.4.3. Teneur en fibres (ADF)**

Les fibres ADF, qui correspondent approximativement à la cellulose et la lignine, ont été dosées par la méthode gravimétrique de *Van Soest (1963)*. Les déterminations ont été réalisées à l'aide d'un Dosi-fiber (Selecta, Barcelone, Espagne). Lorsque la teneur en lipides des échantillons était supérieure à 5g/100g MS, ils étaient préalablement dégraissés à l'acétone.

## **5. Enregistrements de paramètres et déterminations physico-chimiques**

### **5.1. Mesure de la température d'extrusion**

La température de la vis est mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde thermocouple NiCr-Ni MF 72 (SKG – Corée) positionné sur le fourreau du CE-TFC, 10cm avant la filière.

## 5.2. Mesure de la pression

La pression de dans la vis a été mesurée à l'aide d'un baromètre CYB2 (Hongqi Instrument Co., Ltd, Chine) positionné sur la filière.

## 5.3. Caractérisation des extrudats

### 5.3.1. Indice d'expansion des extrudats

Le diamètre des extrudats est mesuré après refroidissement à température ambiante avec un pied à coulisse. Les valeurs retenues sont des moyennes d'au moins 5 mesures faites sur des portions différentes d'un même extrudat. A partir de ce diamètre, est calculé un indice d'expansion à l'aide de la formule suivante (Brümer *et al.*, 2002):

$$\text{Indice d'expansion} = (D_e/D_f)^2$$

Avec:  $D_e$ : Diamètre d'extrudat (mm)

$D_f$ : Diamètre de filière, soit 7mm

### 5.3.2. Mesure du gonflement et la solubilité

Le gonflement (WAI, Water absorption index) et la solubilité (WSI, Water solubility index) ont été mesurés par la méthode de Anderson *et al.* (1969) légèrement modifiée. Les échantillons sont finement broyés pour obtenir une taille de particule <500µm. Environ 0,8 g de farine est dispersé dans 10ml d'eau à 45°C. Après agitation à 45°C pendant 30 minutes, la suspension est centrifugée à 3000 g pour 10 minutes. La surnageant est décanté et le culot est pesé. Le WAI et le WSI sont calculées à l'aide des formules suivantes :

WAI (g/g) = poids de culot (g) / prise d'essai (g MS);

WSI (%) = Quantité de matière sèche dans le surnageant (g) x 100 / prise d'essai (g MS).

### 5.3.3. Teneur en Amidon endommagé

La détermination de la teneur en amidon endommagé a été réalisée selon les méthodes proposées par Chiang et Johnson (1977) et Kainuma (1981). Le taux d'endommagement de l'amidon (en %) correspond au rapport de la teneur en amidon endommagé et de la teneur en amidon total (Mouquet *et al.*, 2003).

## 5.4. Caractéristiques rhéologiques des bouillies

### 5.4.1. Modes de préparation des bouillies

#### 5.4.1.1. *Par cuisson à ébullition*

Des quantités de farine et d'eau calculées en fonction de la teneur finale en matière sèche souhaitée pour la bouillie sont mélangées dans une casserole en acier de 15 cm de diamètre. Cette casserole est ensuite posée sur une plaque chauffante (Ceran®, Schott, Type CK112) réglée en position 7. Le mélange est porté à 85°C correspondant à l'apparition des premières bulles, puis maintenu à ébullition pendant 5 minutes tout en remuant. Après cuisson, la bouillie est laissée refroidir jusqu'à 45°C, température à laquelle sont effectuées les mesures de viscosité, d'écoulement et de teneur en matière sèche.

#### 5.4.1.2. *Par ajout d'eau à 75°C*

La farine et l'eau, préalablement préchauffée à 75°C, sont mélangées dans une casserole dans des proportions calculées en fonction de la teneur finale en matière sèche souhaitée pour la bouillie. La bouillie ainsi obtenue est remuée et laissée à refroidir jusqu'à 45°C, température à

laquelle sont effectuées les mêmes mesures que pour les bouillies préparées par cuisson à ébullition.

#### 5.4.2. Evaluation de la consistance

##### 5.4.2.1 *Principe des mesures*

Les caractéristiques rhéologiques des bouillies étudiées ont été la viscosité apparente et l'écoulement Bostwick mesurés en conditions standardisées sur des bouillies préparées à la concentration de 16 g MS pour 100g de bouillie lorsque aucune amylase n'était incorporée et à celle de 20 g MS pour 100g de bouillie lorsque de la Thermamyl 120L ou de la BAN 800 MG avaient été incorporées. Etant donné qu'il est très difficile, voire impossible, d'obtenir des bouillies ayant exactement la concentration en matière sèche choisie, plusieurs bouillies (au moins 2) étaient préparées à partir de chaque farine en modifiant légèrement les proportions d'eau et de farine de façon à ce que les bouillies obtenues aient des teneurs en matière sèche entourant les valeurs de 16 ou 20 g MS/100g. La viscosité et l'écoulement correspondant à une concentration d'exactly 16 ou 20 g MS/100g était ensuite obtenue par interpolation.

##### 5.4.2.2. *Mesure de la viscosité*

La viscosité des bouillies a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre rotatif HAAKE VISCOTESTER VT 550 (Rheo, Champlan, France), équipé d'un dispositif de mesure SV-DIN. Pendant la mesure, la température de la bouillie est maintenue à 45°C grâce à une enceinte thermostatée. La viscosité est enregistrée après 10 minutes de rotation du mobile à une vitesse de cisaillement de  $83s^{-1}$ .

##### 5.4.2.3. *Mesure de l'écoulement*

La mesure est réalisée quand la bouillie atteint 45°C à l'aide d'un consistomètre de Bostwick semi automatisé (Polyvisc Kinematica). Le compartiment prévu à cet effet est rempli avec 100 ml de bouillie. La bouillie est libérée en retirant la séparation délimitant le compartiment et la distance (en mm) parcourue en 30 secondes par le front de la bouillie s'affiche sur l'écran du Polyvisc.

# Chapitre III

EFFETS DE LA CONSOMMATION  
DE BOUILLIES FORTIFIÉES DE  
HAUTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE  
SUR LES INGÉRÉS DE  
NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS  
AU VIETNAM

## INTRODUCTION

Avant le début de nos travaux, une farine instantanée à base de riz (*Favina*) produite avec «un cuiseur extrudeur à très faible coût» et un complément alimentaire à base de soja torréfié avec incorporation d'enzymes et d'un complément minéral et vitaminique (*Favilase*) destiné à être ajouté à de la farine de riz au moment de la préparation des bouillies au niveau des ménages avaient été mis au point dans le cadre du programme Fasevie.

La première étape de nos travaux a consisté à vérifier que la consommation régulière des ces deux produits, après préparation sous forme de bouillies de haute densité énergétique, était bien acceptée et que leur niveau de consommation était suffisant pour contribuer efficacement à la couverture des besoins des enfants après 6 mois.

L'étude s'est déroulée en milieu rural dans la province de Quang Nam et a consisté en une comparaison des ingérés de trois groupes de 48 enfants de 6 à 10 mois. Les deux premiers groupes recevaient au moins deux fois par jour des bouillies préparées, soit avec *Favina*, soit avec *Favilase*, tout en ayant la possibilité de continuer à consommer des aliments de leur régime alimentaire habituel tandis que le troisième était un groupe témoin d'enfants continuant à consommer les aliments habituellement préparés par leurs mères

Ce chapitre fera l'objet d'un article qui sera soumis à la revue *Appetite*.

# EFFETS DE LA CONSOMMATION DE BOUILLIE FORTIFIÉE DE HAUTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE SUR LES INGÉRÉS DE NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM

VAN HOAN Nguyen, Pham Van PHU, SALVIGNOL Bertrand,  
BERGER Jacques et TRÈCHE Serge

## RÉSUMÉ

Cette étude a été réalisée dans une zone rurale du Vietnam avec pour objectif de vérifier l'efficacité de deux nouveaux produits alimentaires à augmenter les ingérés en énergie et nutriments d'enfants après l'âge de 6 mois. Le premier produit est une farine infantile instantanée produite localement par « *cuisson extrusion à très faible coût* ». Le second est un complément alimentaire contenant des amylases et un complément minéral et vitaminique conçu pour être ajouté dans de la farine de riz au moment de sa préparation en bouillie au niveau des ménages.

144 nourrissons de 6 à 10 mois ont été sélectionnés aléatoirement parmi des enfants enrôlés dans le protocole principal d'une autre étude de manière à constituer 3 groupes de 48 nourrissons. Les enfants des groupes 1 et 2 devaient consommer au moins deux fois par jour dans des cantines spécialement aménagées des bouillies préparées, soit à partir de la farine instantanée (G1), soit à l'aide du complément alimentaire (G2) pendant que le groupe témoin était constitué d'enfants recevant les aliments de complément habituellement utilisés dans la zone d'étude. Chaque enfant a été enquêté pendant une journée entière dans le but d'observer ou de mesurer les fréquences de tétées et les fréquences de consommation des différents types d'aliment de complément (AC), certaines caractéristiques (*consistance, densité énergétique, composition en nutriments après analyses ultérieures réalisées sur des échantillons représentatifs*) des différents types d'AC identifiés et enfin les quantités de chacun de ces aliments qu'ils ont consommés.

Les aliments consommés par les enfants des deux groupes expérimentaux étaient très différents des AC du groupe témoin préparés au niveau des ménages en ce qui concerne leur densité en énergie et en nutriments et leur consistance. Ces différences de caractéristiques se sont traduites par des différences importantes de niveau d'ingérés en énergie ( $p < 0,001$ ) et en nutriments ( $p < 0,0001$ ) entre les groupes expérimentaux et le groupe témoin.

La présence d'amylases dans le complément alimentaire a eu pour conséquence que les bouillies du groupe 2 avaient une densité énergétique plus élevée et une consistance plus appropriée que celles du groupe 1 ce qui s'est traduit par des ingérés énergétiques par repas plus élevés.

Par rapport aux AC préparés au niveau du ménage du groupe témoin, les deux types de produit étudiés sont apparus efficaces pour augmenter suffisamment les ingérés en énergie et en nutriments des AC afin de leur permettre de compléter les apports du lait maternel dans la couverture des besoins nutritionnels des enfants.

**Mots clés:** Farine instantanée, complément alimentaire, fortification,  $\alpha$ -amylase, densité énergétique, ingéré énergétique, fréquence des tétées, Vietnam.

# EFFECTS OF THE CONSUMPTION OF HIGH ENERGY DENSE AND FORTIFIED GRUELS ON ENERGY AND NUTRIENT INTAKES OF 6-10-MONTH-OLD VIETNAMESE INFANTS

VAN HOAN Nguyen<sup>1,2,3</sup>, PHU Pham Van<sup>4</sup>, SALVIGNOL Bertrand<sup>5</sup>,  
BERGER Jacques<sup>1</sup>, and TRÈCHE Serge<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research unit 106 "Nutrition, Alimentation, Sociétés", Institut de Recherche pour le Développement, BP 64501, F-34394 Montpellier cedex 5, France.

<sup>2</sup> Fasevie Programme in Vietnam - Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques-GRET, 223B, National Institute of Nutrition, 48B, Tang Bat Ho, Hanoi, Vietnam.

<sup>3</sup> Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier, France.

<sup>4</sup> Hanoi Medical University, N°1 Ton That Tung, Dong Da, Hanoi, Vietnam

<sup>5</sup> World Food Programme, Wave Place Building 7th floor, Wireless road 55, Bangkok 10330, Thailand

## Abstract

The present study was carried out in a rural area of central Vietnam with the aim of testing the ability of two new products to increase energy and micronutrient intakes of infants aged 6 months or more. The first product was an instant flour locally produced by “*very-low-cost extrusion-cooking*”. The second was a food supplement containing amylases and a mineral and vitamin premix designed to be incorporated into gruel made from rice flour prepared at home.

A total of 144 6-10-month-old infants were randomly chosen among children enrolled in the main protocol of another study in such way to constitute three groups of 48 infants. Infants in groups 1 and 2 consumed porridge at least twice a day in specially equipped canteens. The porridge was gruel made from either instant flour (G1) or a food supplement (G2), while the control group comprised infants receiving home-made complementary foods (CFs) prepared in the traditional way. Each infant had been surveyed during a whole day (12 h) in order to observe, or measure, feeding frequencies (*breastmilk and different types of CF*), and the different characteristics (*consistency, energy density, nutrient composition after analysis of representative samples*) of the different types of CF and amounts of these CFs consumed.

Foods consumed by infants in the two experimental groups differed considerably in energy and micronutrient density and in consistency from the home-made CF consumed by the control group. Significant differences in energy ( $p < 0.001$ ) and nutrient ( $p < 0.0001$ ) intakes were observed between the experimental and control groups. Due to the incorporation of amylases in the food supplement, G2 gruels had a higher energy density and more appropriate consistency than G1 gruels. Consequently energy intakes per meal were higher for G2 than for G1 gruels.

In comparison with home-made CFs, both experimental products appeared to sufficiently increase energy and nutrient intakes of infants to complement breastmilk intake.

**Keywords:** Instant flour, food complement, fortification,  $\alpha$ -amylase, energy density, energy intake, breastfeeding frequency, Vietnam.

**Corresponding author:** [nguyen\\_vanhoan@yahoo.fr](mailto:nguyen_vanhoan@yahoo.fr)

## Introduction

Undernutrition and micro-nutrient deficiencies are considered as very serious health problems in many developing countries including Vietnam. This is because of their high prevalence, severity and consequences for mortality and morbidity of infants and young children, particularly in poor rural settings. One of their principal causes is the low energy and nutrient densities of home-made gruels used as complementary foods (CFs) (Owino *et al.*, 2007). These gruels are generally prepared from rice flour or a mixture of rice and leguminous flours simply cooked in water. Once gelatinization temperature is reached, the starch swells and gruel viscosity increases (Trèche and Mbomé, 1999). Because of the large quantity of water needed to prepare gruels at a spoonable consistency, the amount of flour is too small to allow infants and young children to meet their energy requirements (WHO, 1998). In addition, cereal-based gruels are often characterized by the low density and the low bioavailability of micronutrients such as vitamin A, iron, and zinc. Consequently, increasing the energy and nutrient densities of gruels is a key objective of many health programs (WHO, 1992; Harper and Jansen, 1985; Stephenson *et al.*, 1994; Trèche, 1995; Bennett *et al.*, 1999; Owino *et al.*, 2007). The Fasevie program started in Vietnam in 1997 (Berger *et al.*, 2004; Bruyeron *et al.*, 2006), a locally manufactured “Very Low Cost Extruder” (VLCE) was used for the production of instant infant flour (Mouquet *et al.*, 2003). Two types of product were designed: *Favina*, a rice-based instant flour, and *Favilase*, a soybean-based food supplement. The present study is a cross-sectional food consumption survey to compare daily energy and nutrient intakes from gruels and other CFs of 6-10-month-old infants receiving either *Favina* or *Favilase* gruels or home-made CFs at least twice a day. In addition, we measured the nutritional value and consistency of gruels and other CFs usually consumed by 6-10-month-old infants as well as possible changes in breastfeeding and in the frequency of other meals resulting from the consumption of experimental gruels.

## Materials and methods

### Context and setting

The study was carried out from April 2002 to October 2002. The present study is a sub-study of a randomized control trial (*main study*) aiming at testing the efficacy of *Favina* and *Favilase* to prevent stunting and micronutrient deficiencies in breastfed infants. Infants from 29 villages in a rural area (Tam Ky district, Quang Nam Province) in central Vietnam took part in the study. Villages were randomly allocated to three groups, all infants from one village belonging to the same group. Infants from groups 1 and 2 received respectively *Favina* and *Favilase* gruels for a period of 6 months from the age of 5.5 months ( $\pm 15$  days), in canteens located in the center of the villages, while group 3 followed usual feeding practices in free living conditions. The food consumption of each infant was measured at the age of 6 months  $\pm 1$  week, 7 months  $\pm 1$  week, 8 months  $\pm 1$  week, and 9 months  $\pm 1$  week.

### Infants

Previous studies (Vieu *et al.*, 2001; Moursi *et al.*, 2003) showed that 35 is a sufficient sample size to reveal a significant difference ( $\alpha=0.05$ ;  $\beta=0.80$ ) in energy intake per kg of body-weight between groups of infants consuming homemade and energy dense gruels. To examine a possible effect of age and interaction between type of gruels and age, we examined a sub-sample of 144 infants (48 by food group and 36 by age group) included in the main study. Table 1 shows the distribution of infants by age and group.

Table 1  
Sample distribution by age and group.

Age of infants	<i>Favina</i> group	<i>Favilase</i> group	Control group
6 months	12	12	12
7 months	12	12	12
8 months	12	12	12
9 months	12	12	12

To be enrolled in the main study at the age of 5 months  $\pm$  15 days, infants had to be single born, exempt of apparent congenital abnormalities, still breastfed and to have already started to consume CFs (*at the time of the study the Vietnamese recommendation relative to the age of introduction of CF was “4 to 6 month”*) and to have an height-for-age Z-score  $>$  -2.5 and a weight-for-height Z-score  $>$  -2. In addition, parents or permanent caregivers of infants of groups 1 and 2 had to agree to bring their children to the canteen at least twice a day. Infants who had suffered from disease (as identified in the morbidity follow-up of the main study) in the seven days preceding food consumption survey were not eligible.

### Experimental flour

Table 2 shows the composition of *Favina*. Mixtures of rice, soybean, and sesame seeds were extruded by the VLCE designed as part of the Fasevie program (Mouquet *et al.*, 2003; Bruyeron *et al.*, 2006). A mineral and vitamin premix was formulated to ensure the gruels had nutrient densities that met the most recent international recommendations for 6-24-month-old children at the time of the study (e.g., 125, 7.7 and 1.6 mg/100 kcal, respectively for calcium, iron and zinc) (WHO, 1998). When prepared at the appropriate concentration (25 g Dry Matter Content (DMC)/100 g of gruel), *Favina* gruel has an appropriate viscosity of  $\sim$ 2 Pa.s measured with the Haake viscometer VT550 and a fluidity of 50 mm/30s measured with a Bostwick consistometer following the procedures proposed by Mouquet and Trèche (2001) and Mouquet *et al.* (2006).

*Favilase* consists of a mineral and vitamin premix incorporated into a roasted soybean flour (Table 2). This food supplement is designed to allow the preparation of gruels with similar nutrient composition to *Favina* gruel when added to rice flour (25.6 g of *Favilase* with 74.4g of rice flour). *Favilase* also includes industrial  $\alpha$ -Amylase (BAN 800G; Novo SA, Bagsvaerd, Denmark) to give the gruel the appropriate consistency. When prepared in a standardized way, the dry matter contents of both *Favina* and *Favilase* gruels were about 25 g per 100 g which corresponds to an energy density of about 100 kcal/100 g.

Table 2  
Composition of *Favina* and *Favilase* flours (g/100g).

	<i>Favina</i>	<i>Favilase</i>
Rice	51.32	-
Soybean	20.76	87.67
Sesame	5.00	-
Sugar	15.00	-
Milk	5.00	
Salt	0.70	3.10
Ca3(PO4)2	1.17	6.10
Vitamin-and mineral premix	0.80	3.10
Vanilla	0.25	-
Amylase (BAN 800 MG)	-	0.03

## **Organization of the study and field logistics**

Two teams of surveyors were recruited and trained. During six 4-week periods, each of the two teams had to measure the daily intakes from gruels and other CFs of 12 infants (4 in each group). To do so, the surveyor had to remain in the home of the surveyed child from waking up time until bedtime.

Just before each 4-week period, lists were drawn up of eligible infants in the three groups who would reach the age of 6, 7, 8 or 9 months during the period concerned. From each list, two to eight infants were randomly selected and assigned to one of the two teams of surveyors in such a way that each team surveyed an equal number of infants of each group in each age class during the whole survey. Infants surveyed in a previous period were not included in the following period and they had to have reached the desired age  $\pm 7$  days at the time of the survey. If a special meal was scheduled (e.g., birthday of a family member) or the child had been sick during preceding seven days, or the child was absent on the day of the food consumption survey, the surveyor had to choose another day. Parents or caregivers were allowed to give to their infants other types of CF in addition to at least two meals per day of *Favina* or *Favilase* gruels prepared by the fieldworkers in the canteens,

Fieldworkers remained in the canteens from around 6:30 am to 7 pm every day so that the infants in groups 1 and 2 could be fed their gruel at any time during this period. The *Favina* gruel was prepared just after the arrival of each infant at the canteen by simply mixing the flour with warm water. *Favilase* gruel was made by cooking a blend of rice flour and *Favilase* for at least 10 minutes with an appropriate volume of water (*the three ingredients were measured using a special spoon for rice or Favilase flour and plastic bowl for water*). Taking into account that the preparation of *Favilase* gruel lasted at least 30 minutes, field workers were encouraged to anticipate the arrival of infants in order to avoid a long waiting time for the infants and their accompanying adult. The amount of *Favina* or *Favilase* gruels given to the infants was not limited in quantity.

## **Data collection**

The following data were collected from waking up time to bedtime at home or in the canteen by the two trained surveyors (one surveying the infant and the other surveying the caregiver):

- Nature and duration of infant and mother's activities, in particular number and duration of breastfeeds and meals of home-made gruels and CFs;
- *Favina* and *Favilase* frequency and amount of gruel consumed (determined by weighing the bowl given to the infant before and after consumption and taking losses into account);
- The way the home-made gruels and other CFs given to the infant were prepared. An electronic scale (1,000g  $\pm 0.1$ g) was used to measure the quantity of each ingredient or beverage used to prepare the meal.
- The quantity of homemade gruels and other CFs actually swallowed by the infants using the weighed food record methodology and taking leftovers into account. The electronic scale used for intake measurement was the same as the one used to weigh the ingredients used to prepare the meal.
- Infant morbidity on the day of the survey

## **Food sample collection and analysis**

To compare the characteristics and intakes of the different CFs used in this study, food samples were taken by different methods depending on their nature and place of preparation.

For each gruel distributed to infants in the three groups in the canteen or at home, surveyors had to:

- half fill two 50-ml pre-weighed flasks with a representative portion of the gruel sampled at the beginning of consumption to measure dry matter content.
- measure their flow rate using a Bostwick consistometer when the gruel reached a temperature of 45°C according to [Mouquet et al. \(2006\)](#) and to measure its temperature using a digital thermometer ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) at the beginning of consumption. For groups 1 and 2, canteen staff was asked to prepare extra gruel to enable the consistency to be measured. For gruel consumed at home, the same measurements were made of the gruel prepared by the mother when the quantity was sufficient or using a gruel prepared later by surveyors using the same recipe as the mother.

In addition, each day at the time of the first preparation of *Favina* gruel in the canteen, surveyors had to put 10 g of *Favina* flour into two pre-weighed flasks for dry matter determination and 30 g of *Favina* flour into another flask. The 126 flasks collected in the *Favina* canteens over the whole experimental period were used to prepare four composite samples corresponding to the four different batches used during the study.

For *Favilase* gruels, as the relative proportion of rice and *Favilase* varied depending on the fieldworker's ability to sample the correct amounts and as mothers were allowed to add sugar or other ingredients to the gruels, surveyors had to fill a 250 ml flask with a representative portion (about 200 g) of gruel. The flasks were stored overnight in an icebox until constitution of an average sample in which all the *Favilase* gruels consumed by the surveyed child during the day were represented in the same proportion as they were consumed.

The same sampling method was used for *Favilase* gruels and for home-made gruels. When the quantity of gruel prepared by the mother was not sufficient for sample collection, a gruel was prepared later by surveyors using the same recipe as the mother.

For other CFs than gruel, when possible, surveyors had to take a representative portion (at least 30 g) of the food eaten by the child. When not possible, they had to replicate the recipe on the following day to obtain a similar sample. The daily average sample of other CFs was made as described above for *Favilase* and home-made gruels and stored in a freezer.

The dry matter content of individual or average samples of gruels or other CFs was determined by oven drying at 105°C to constant weight.

All the frozen average samples were lyophilized before being used for the following chemical determinations:

- Crude protein content according to the NFV03-050 ([AFNOR, France, 1970](#)) standard method (nitrogen content determination by the Kjeldahl method) with 6.25 as conversion factor.
- Crude lipid content by HT6 Soxtec system (Tecator, Hoganas, Sweden), following the Tecator No. 3144 instructions.
- Ash content by dry mineralization for 6H at 530°C.
- Calcium, iron and zinc contents by atomic absorption spectrophotometry (Varian SpectrAA 200, Victoria, Australia).

Carbohydrate content was estimated by difference. Energy content was estimated by using, 4, 4 and 9 kcal/g as specific energy factors for carbohydrate, protein and lipid, respectively.

## Data analysis

All statistical analyses were carried out using Statgraphics plus 5.1 (Virginia, USA). The homogeneity of the variances was checked using Bartlett's test. Results of the study were assessed using analysis of variance (ANOVA). When variances obtained for different groups were significantly different, data are presented as medians (with interquartile range). The statistical significance of difference was assessed using Fisher F tests followed by Newman-

Keul's test for means and Kruskal-Wallis test followed by Mann-Whitney test for medians. To test for a possible effect of age and interaction between type of gruels and age, a two-way ANOVAs was applied using groups (three groups;  $df = 2$ ) and age (6, 7, 8 and 9 months;  $df = 3$ ) as factors.

### Ethical consideration

The written consent was obtained from the parents of each infant who had been informed of the purpose and organization of the study. Parents of the infants were advised to continue breastfeeding after the introduction of CFs. The ethical committee of the National Institute of Nutrition, Hanoi, Vietnam approved the study protocol.

## Results

### Characteristics of infants

Table 3 shows the general characteristics of the infants.

Table 3

Main characteristics of infants.

	Favina group	Favilase group	Control group
Gender ( $n=48$ )			
Male	16 (33%)	18 (37%)	18 (37%)
Female	32 (67%)	30 (63%)	30 (63%)
Weight (kg) <sup>1</sup>			
At 5 months ( $n=48$ )	6.83 ± 0,83	6.81 ± 0,81	6.89 ± 0,74
At 6 months ( $n=12$ )	6.71 ± 0.72	6.99 ± 0.59	7.12 ± 0.96
At 7 months ( $n=12$ )	7.39 ± 1.13	7.00 ± 0.62	7.08 ± 0.88
At 8 months ( $n=12$ )	7.74 ± 0.71	7.65 ± 1.10	7.92 ± 0.77
At 9 months ( $n=12$ )	7.68 ± 0.68	8.47 ± 1,37	7.63 ± 0.59
Morbidity during the survey (Number of cases and %) ( $n=48$ )	4 (8%)	4 (8%)	4 (8%)
Time at the beginning of observations <sup>2</sup> ( $n=48$ )	6H15 (0H25) <sup>a</sup>	6H25 (0H15) <sup>b</sup>	6H30 (0H08) <sup>b</sup>
Wake up time of infant <sup>2</sup> ( $n=48$ )	5H30 (1H00)	5H30 (1H00)	5H30 (1H00)
Length of observation period <sup>1</sup> ( $n=48$ )	12H04 ± 00H39	11H59 ± 00H45	12H02 ± 00H38

<sup>1</sup>  $\bar{X} \pm SD$ . Different letters in the same row indicate significantly different means ( $p < 0.05$ ; Fisher Test)

<sup>2</sup> Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians ( $p < 0.05$ ; Mann-Whitney's test).

Although the infants were randomly selected, there were more females than males, but the sex ratio was not statistically different between the three groups. The weight of infants measured at the 5<sup>th</sup> (before enrolment in the study), 6<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 8<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> month (12 infants per class age) did not differ significantly between the three groups.

Few infants were sick (fever, diarrhea, acute respiratory problems) during the study period (8%). The occurrence of illness was compared between groups and no difference was observed ( $p > 0.05$ ).

Infant woke up at 5:30 am. The surveyors arrived at the child's home about one hour later (*between 6:15 and 6:30*). Small but significant differences in the time the observations started were observed between groups ( $p < 0.0001$ ). Observations started earlier in group 1 than in group 2 and in the control group. Observations finished earlier in the control group than in the two other groups. The total observation time was about 12 hours and no difference was found between the three groups.

### Characteristics of gruels and other complementary foods

#### Characteristics of gruels at feeding time

Table 4 shows the main characteristics of gruels at feeding time.

Table 4

Physicochemical characteristics and feeding duration of gruels

	<i>Favina</i> gruel ( <i>n</i> =126)	<i>Favilase</i> gruel ( <i>n</i> =113)	Homemade gruel ( <i>n</i> =118)
Dry matter content (g/100g)	22.8 (4.1) <sup>b</sup>	25.4 (3.8) <sup>a</sup>	16.8 (8.1) <sup>c</sup>
Flow rate <sup>1</sup> (mm/30s)	43 (52) <sup>c</sup>	158 (53) <sup>a</sup>	61 (65) <sup>b</sup>
T° at the beginning of distribution (°C) <sup>l</sup>	48 (10) <sup>b</sup>	57 (15) <sup>a</sup>	49 (12) <sup>b</sup>
Duration of gruel intake (min/meal)	22 (15) <sup>a</sup>	20 (12) <sup>b</sup>	13 (19) <sup>c</sup>
Estimated duration of distribution for 100 g of gruel (min)	21.5 (19) <sup>a</sup>	16.6 (18) <sup>b</sup>	15.3 (14) <sup>b</sup>

*n*: number of meals

Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians ( $p < 0.05$ ; Mann-Whitney's test).

Dry matter content of *Favilase* gruels (25.4 g/100 g) was significantly higher ( $p < 0.05$ , Mann-Whitney's test) than those of *Favina* (22.8 g/100 g) and home-made gruels (16.8 g/100g). The median flow rates of *Favina*, *Favilase* and home-made gruels were 43, 158 and 61 mm/30 s, respectively, indicating that *Favilase* gruels were much more liquid than *Favina* and home-made gruels.

*Favina* and home-made gruels were consumed at 48 and 49°C, respectively. The temperature at the beginning of distribution for *Favilase* gruels (57°C) was slightly higher than for the two other types of gruels ( $p < 0.0001$ ). This can be explained by the fact that *Favilase* was prepared by boiling just before the arrival of the infants at the canteens. The infants in the *Favina* and *Favilase* groups needed around 20 minutes to finish their gruel meal while the control group needed about 13 minutes. When expressed for the same quantity (100 g) of gruel, the duration of gruel consumption was significantly higher for *Favina* gruel than for *Favilase* and home-made gruels, probably because *Favina* gruel was less fluid than other gruels.

#### Energy and nutrient densities of gruels and other complementary foods

Median energy densities of the four CFs ranged from 71 to 111 kcal/100 g (Table 5). *Favina* and *Favilase* gruels and other CFs had significantly higher energy density than homemade gruels. Iron, zinc, and calcium densities (*expressed either per 100 g of ready-to-eat food or per 100 kcal*) were considerably lower in homemade gruels and in other CFs than in

experimental gruels. In addition, the mineral densities (*expressed for 100 kcal*) were significantly higher in *Favilase* gruels than in *Favina* gruels (+51% for calcium, +60% for iron and +22% for zinc).

Table 5

Energy and nutrient contents and nutrient densities of daily average samples of gruels and other CFs.

	<i>Favina</i> gruel (n=48)	<i>Favilase</i> gruel (n=48)	Homemade gruel (n=61)	Other CFs (n=53)
<i>Energy and nutrient contents (per 100g of ready-to-eat food)</i>				
Energy (kcal)	99 (18) <sup>b</sup>	105 (12) <sup>a</sup>	71 (39) <sup>c</sup>	111 (67) <sup>ab</sup>
Protein (g)	3.61 (0.6) <sup>b</sup>	4.30 (0.6) <sup>a</sup>	2.62 (1.3) <sup>c</sup>	2.84 (4.1) <sup>c</sup>
Lipid (g)	2.07 (0.04) <sup>b</sup>	1.63 (0.24) <sup>c</sup>	1.85 (1.82) <sup>bc</sup>	2.85 (4.64) <sup>a</sup>
Calcium (mg)	116 (22) <sup>b</sup>	175 (37) <sup>a</sup>	18 (39) <sup>c</sup>	21 (63) <sup>c</sup>
Iron (mg)	5.37 (1.0) <sup>b</sup>	8.59 (2.1) <sup>a</sup>	0.43 (0.3) <sup>d</sup>	0.80 (0.7) <sup>c</sup>
Zinc (mg)	1.51 (0.25) <sup>b</sup>	1.85 (0.29) <sup>a</sup>	0.39 (0.33) <sup>c</sup>	0.39 (0.57) <sup>c</sup>
<i>Energy and nutrient densities (per 100 kcal)</i>				
Protein (g)	3.65 (0.1) <sup>b</sup>	4.13 (0.3) <sup>a</sup>	3.70 (1.2) <sup>b</sup>	2.69 (2.4) <sup>b</sup>
Lipid (g)	2.03 (0.34) <sup>b</sup>	1.70 (0.38) <sup>c</sup>	1.35 (1.67) <sup>d</sup>	2.98 (6.55) <sup>a</sup>
Calcium (mg)	113 (26) <sup>b</sup>	166 (20) <sup>a</sup>	28 (46) <sup>c</sup>	18 (39) <sup>c</sup>
Iron (mg)	5.51 (0.4) <sup>b</sup>	8.17 (1.3) <sup>a</sup>	0.60 (0.5) <sup>c</sup>	0.57 (0.7) <sup>c</sup>
Zinc (mg)	1.50 (0.14) <sup>b</sup>	1.77 (0.23) <sup>a</sup>	0.65 (0.61) <sup>c</sup>	0.33 (0.17) <sup>d</sup>

*n*: number of infants who consumed the food

Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians ( $p < 0.05$ ; Mann-Whitney's test).

## Feeding frequency

### Breastfeeding

During the observation period, average breastfeeding frequency and duration for all children were around 5 times/12 h and 25 min/12 h, respectively. Average breastfeeding frequency was significantly lower for infants of the *Favilase* group (4.2) than for those of the two other groups (5.5 and 5.7). But there were no significant differences in total daily duration of breastfeeding between the three groups. The age of the infants (6, 7, 8 or 9 months of age) had no effect on the frequency and duration of breastfeeding.

### Complementary food

Average feeding frequency for *Favina* and *Favilase* gruels in the canteens was around 2.5 times per day and did not differ between the two groups (Table 6). The consumption rate of homemade gruels was considerably higher in the control group (96%) than in the two other groups ( $\leq 17\%$ ) indicating that for most infants in the *Favina* and *Favilase* groups,

experimental gruels replaced homemade gruels. The consumption rate of other CFs was also higher in the control group (58%) than in the two other groups ( $\leq 31\%$ )

The mean daily frequencies of meal consumption, whatever the kind of foods eaten, ranged from 2.9 to 3.3 but there were no significant differences between the three groups.

The age of the infants had no significant effect on the consumption rates and daily feeding frequencies of the different kinds of foods.

Table 6

Daily frequencies of breastfeeding and meals with gruels or other CFs.

	<i>Favina</i> group (n=48)	<i>Favilase</i> group (n=48)	Control group (n=48)
<i>Breastfeeding</i>			
Consumption rate (Number of infants/day)	48 (100%)	48 (100%)	48 (100%)
Frequency <sup>1</sup> (number of breastfeeds/day)	5.5 ± 2.5 <sup>a</sup>	4.2 ± 1.7 <sup>b</sup>	5.7 ± 2.5 <sup>a</sup>
Total duration <sup>2</sup> (min/day)	26 (22)	23 (17)	26 (18)
<i>Favina or Favilase gruel</i>			
Consumption rate (Number of infants/day)	48 (100%)	48 (100%)	-
Daily frequency <sup>1</sup> (Number of meals/infant)	2.6 ± 0.6	2.4 ± 0.6	
<i>Homemade gruel</i>			
Consumption rate (Number of infants/day)	7 (15%)	8 (17%)	46 (96%)
Daily frequency <sup>2</sup> (Number of meals/infant)	1 (0) <sup>a</sup>	1 (0) <sup>a</sup>	2 (1) <sup>b</sup>
<i>Other complementary foods</i>			
Consumption rate (Number of infants/day)	15 (31%)	10 (21%)	28 (58%)
Daily frequency <sup>1</sup> (Number of meals/infant)	1.73 ± 0.90 <sup>b</sup>	1.50 ± 1.94 <sup>b</sup>	1.96 ± 2.23 <sup>a</sup>
<i>Any kind of foods other than breastmilk</i>			
Consumption rate (Number of infants/day)	48 (100%)	48 (100%)	48 (100%)
Daily frequency <sup>1</sup> (Number of meals/infant)	3.3 ± 1.3	2.9 ± 0.9	3.3 ± 1.3

n: number of infants

<sup>1</sup>  $\bar{X} \pm SD$ : Different letters in the same row indicate significantly different means ( $p < 0.05$ ; Fisher Test)

<sup>2</sup> Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians ( $p < 0.05$ ; Mann-Whitney's test).

### Food and energy intakes per meal for the different types of complementary foods

Table 7 shows the amounts of food consumed per meal for the different types of CFs. The median intakes per meal of *Favina* (14.2 g/kg body weight) and *Favilase* (15.3 g/kg BW) gruels were significantly higher than the median intakes of homemade gruel (12.1 g/kg BW) or other CFs (3.9 g/kg BW). The median intake of other food than gruels was particularly low, indicating that the foods given were not appropriate for infants.

Similar differences were observed for energy intakes between experimental gruels and homemade foods. In addition, we observed a significant difference in energy intakes between *Favina* and *Favilase* gruels. Median energy intake per meal for *Favilase* gruel was, respectively, 10% and 85% higher than the corresponding intakes for *Favina* and homemade gruels, while the median energy intake for *Favina* gruels was 68% higher than the median energy intake for homemade gruels.

Table 7

Comparison of amounts of food consumed and of energy intake per meal depending on the type of CF.

	<i>Favina</i> gruel (n=126)	<i>Favilase</i> gruel (n=113)	Homemade gruel (n=118)	Other foods (n=96)
<i>Amount consumed</i>				
(g/meal)	105 (89) <sup>a</sup>	114 (87) <sup>a</sup>	88 (61) <sup>b</sup>	28 (39) <sup>c</sup>
(g/kg BW/meal)	14.2 (11.3) <sup>a</sup>	15.3 (11.2) <sup>a</sup>	12.1 (8.8) <sup>b</sup>	3.9 (5.5) <sup>c</sup>
<i>Energy intake</i>				
(kcal/meal)	110 (89) <sup>b</sup>	121 (97) <sup>a</sup>	64 (43) <sup>c</sup>	32 (45) <sup>d</sup>
(kcal/kg BW/meal)	14.8 (10.7) <sup>b</sup>	16.3 (11.6) <sup>a</sup>	8.8 (6.8) <sup>c</sup>	4.3 (6.4) <sup>d</sup>

n: number of meals

BW: body weight

Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians ( $p < 0.05$ ; Mann-Whitney's test).

### Total energy and nutrient intakes per day from all complementary foods

#### Energy and macronutrient intakes

Median daily energy intakes from all CFs of the *Favina* and *Favilase* groups (Table 8) were not different but they were significantly higher than those of the control group ( $p < 0.0001$ ).

When expressed per kg of body weight, average daily energy intakes from total CFs were, respectively, 53% and 58% higher for infants in the *Favina* and *Favilase* groups than for infants in the control group.

Table 8

Comparison of daily intakes of total energy and macronutrients from all CFs as a function of the type of gruel.

	<i>Favina</i> group (n=48)	<i>Favilase</i> group (n=48)	Control group (n=48)
<i>Energy intake</i>			
(kcal/day)	276 (253) <sup>a</sup>	293 (208) <sup>a</sup>	175 (151) <sup>b</sup>
(kcal/kg BW/day) <sup>1</sup>	43.1 ± 20.4 <sup>a</sup>	44.3 ± 28.2 <sup>a</sup>	28.1 ± 16.3 <sup>b</sup>
<i>Protein intake</i>			
(g/day) <sup>3</sup>	11.5 ± 5.7 <sup>a</sup>	13.7 ± 8.4 <sup>a</sup>	8.5 ± 7.1 <sup>b</sup>
(g/kg BW/day) <sup>3</sup>	1.53 ± 0.73 <sup>a</sup>	1.78 ± 0.98 <sup>a</sup>	1.15 ± 0.95 <sup>b</sup>
<i>Lipid intake</i>			
(g/day) <sup>2</sup>	6.5 ± 3.1 <sup>a</sup>	6.1 ± 4.0 <sup>a</sup>	4.2 ± 2.9 <sup>b</sup>
(g/kg BW/day) <sup>3</sup>	0.88 ± 0.39 <sup>a</sup>	0.79 ± 0.43 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.41 <sup>b</sup>

n: number of infants

BW: body weight

$\bar{X} \pm SD$ : Different letters in the same row indicate significantly different means (<sup>1</sup> $p < 0.001$ , <sup>2</sup> $p < 0.01$ , <sup>3</sup> $p < 0.05$ , Fisher Test)

Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians ( $p < 0.0001$ , Mann-Whitney's test).

Average daily protein intakes of infants in the *Favina* and *Favilase* groups were, respectively, 76% and 88% higher than the average protein intake of infants in the control group.

Similar differences were observed for lipid intakes (g/day).

### Mineral intakes

Table 9 shows calcium, iron and zinc daily intakes from all CFs in the three groups. Median mineral intakes of infants in the *Favilase* group were significantly higher than those in *Favina* group (*except for zinc*) and in the control group, while the median mineral intake in the *Favina* group was higher than that of the control group. By comparison with the control group, the median mineral intakes of *Favina* and *Favilase* groups were, respectively, 3.9 and 5.7 times higher for calcium, 13.7 and 14.8 times higher for iron and 2.7 and 3.6 times higher for zinc.

Table 9

Comparison of total micronutrient intakes (*mg/day*) per day from all CFs as a function of the type of gruel.

	<i>Favina</i> group (n=48)	<i>Favilase</i> group (n=48)	Control group (n=48)
Calcium <sup>3</sup>	317 (294) <sup>b</sup>	437 (475) <sup>a</sup>	65 (103) <sup>c</sup>
Iron <sup>2</sup>	14.7 (13.2) <sup>b</sup>	22.1 (21.1) <sup>a</sup>	1.4 (1.9) <sup>c</sup>
Zinc <sup>1</sup>	4.1 (3.8) <sup>a</sup>	5.1 (4.1) <sup>a</sup>	1.1 (1.2) <sup>b</sup>

n: number of infants

Medians (interquartile ranges). Different letters in the same row indicate significantly different medians (<sup>1</sup>p<0.0001, <sup>2</sup>p<0.01, <sup>3</sup>p<0.05; Mann-Whitney's test).

## **Discussion**

### Effect of experimental gruel intake on the frequency of breastfeeding and the consumption of other complementary foods

The consumption of high energy density gruels did not reduce the frequency of breastfeeding (except slightly in *Favilase* group) or the duration of breastfeeding. This result confirms previous observations by [Moursi et al. \(2003\)](#). However, even if measured only within a 12H period, the average breastfeeding frequency and duration in the three groups were considerably lower than those shown in previous studies ([Moursi et al., 2003](#); [Thiombiano-Coulibaly et al., 2004](#); [Traoré et al., 2005](#)). A likely explanation is the high workload of women living in our rural study setting.

Despite the fact that infants in the *Favina* and *Favilase* groups were not prevented from consuming other CFs than experimental gruels, significantly fewer infants consumed other gruels or other CFs than in the control group. High energy density gruels appear to have replaced other CFs more than breastmilk.

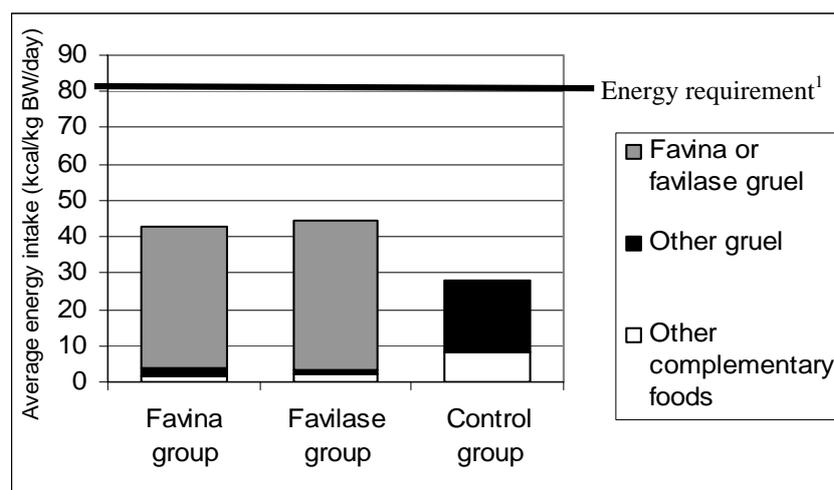
### Interest of high energy density gruel to meet energy requirements

According to the latest international recommendations, the daily energy requirement of 6-10-month-old infants is 80 kcal kg of body weight ([Butte et al., 2000](#); [FAO/WHO/UNU, 2001](#)). The average contribution to daily energy requirements of one meal was 5% for other CFs,

15% for home-made gruel, 18% for *Favina* gruel and 19% for *Favilase* gruel. This confirms that other CFs than gruels are not appropriate for children less than 10 months old.

Figure 1 illustrates the energy contribution of each type of food in the three groups: 55% of energy requirements were met with *Favina* and *Favilase* whereas only 35% of energy needs were met in the control group.

As daily energy intake from breastmilk ranges between 35 and 67 kcal/kg BW for 6-8-month-old infants depending on whether they have low or average breastmilk intake (WHO, 1998), energy intakes from our experimental gruels appeared to be sufficient to complete energy intake from breastmilk for most infants, which was not the case for infants in the control group.



<sup>1</sup> 80 kcal /kg of body weight/day (Butte et al., 2000).

Figure 1: Contribution of different types of CFs to energy requirements.

### Interest of experimental gruels to meet mineral requirements

According to the latest recommendations (FAO/WHO, 2002; Lutter and Dewey, 2003), recommended intakes for 6-8-month-old infants daily are 400 mg calcium, 18.6 mg Iron (assuming low -5%- bioavailability) and 8.2 mg zinc (assuming low -15%-bioavailability). The observed median intakes for the three groups of all CFs to calcium, iron and zinc requirements were, respectively, 80, 80 and 50% for the *Favina* group, 109, 119 and 62% for *Favilase* group and only 16, 8 and 13% for control group.

Differences in mineral intakes between the *Favina* and *Favilase* groups were partly due to higher gruel intakes but above all to the higher micronutrient densities of *Favilase* gruels than of *Favina* gruels.

Our results provide evidence that the CFs usually consumed in this area of Vietnam have too low micronutrient contents to contribute significantly to micronutrient requirements. In such a context, the interest of consuming *Favina* and *Favilase* gruels is obvious.

### Effect of age on food intake

Effects of age on food intakes were limited. When expressed per kg of body weight and per day, there were no differences in energy, protein, lipid and mineral intakes between the four age classes. When expressed per day, after 7 months of age, we observed an increase in energy, protein, lipid and zinc intakes with age (Table10). Average energy, protein, lipid and zinc intakes of 8-9-month-old infants were, respectively, 40, 35, 29 and 40% higher than those of 6-7-month-old infants.

Table 10

Comparison of average daily energy and nutrient intakes from all CFs as a function of the age of the infants.

	6 months (n=36)	7 months (n=36)	8 months (n=36)	9 months (n=36)
Energy (kcal/day)	235 <sup>a</sup>	254 <sup>a</sup>	328 <sup>b</sup>	335 <sup>b</sup>
Protein ((g/day)	9.0 <sup>a</sup>	10.1 <sup>ab</sup>	12.5 <sup>b</sup>	13.2 <sup>b</sup>
Lipid (g/day)	4.52 <sup>a</sup>	4.87 <sup>a</sup>	6.46 <sup>b</sup>	6.59 <sup>b</sup>
Zinc (mg/day)	3,21 <sup>a</sup>	3,34 <sup>a</sup>	4,56 <sup>b</sup>	4.64 <sup>b</sup>

$\bar{X}$  Different letters in the same row indicate significantly different means ( $p < 0.05$ ; Fisher Test)

No significant interaction was found between age and group indicating that the increase in intakes with age was not related to the type of food. Acceptability of experimental gruels did not decrease with age although infants consumed the same gruels twice a day after the age of 6 months. Our results do not confirm the negative effect of monotony of the diet previously mentioned by [Brown \(1997\)](#) and [WHO \(1998\)](#) and are more in accordance, even if though our study covered a shorter period, with those of [Sanchez-Grinan et al. \(1992\)](#) and [Traoré et al. \(2005\)](#) who did not observe a variation in intake as a function of the length of the period of exposure to the same gruel.

## Conclusion

The main objective of this study was to compare energy and nutrient intakes of 6-10-month-old infants consuming two types of high energy dense and fortified gruels to those of children consuming mainly homemade complementary foods in a rural area in central Vietnam.

Characteristics of experimental and homemade gruels presented significant differences in terms of energy and nutrient density and consistency. These differences are sufficient to explain that mean energy intakes from all CFs in the experimental groups were about 55% higher than those in the control group. This increase in energy intake from CFs did not affect the total duration of breastfeeding and only slightly reduced breastfeeding frequency in the *Favilase* group. Fortification of experimental gruels effectively increased micronutrient intakes, as calcium, iron and zinc intakes were 4, 13, and 3 times higher in the experimental groups than in the control group.

Some differences in gruel characteristics, energy and nutrient intakes were also observed between the *Favina* and *Favilase* groups. Due to its higher energy density and more appropriate consistency, consumption of *Favilase* gruels resulted in slightly but significantly higher median energy intake per meal than the consumption of *Favina* gruels. However, total energy intakes from all CFs of the *Favina* and *Favilase* groups did not differ significantly. On the other hand, significant difference in mineral densities between the two types of gruels resulted in significant differences in nutrient (Ca, Fe, and Zn) intakes between the two groups.

Any differences in nutrient densities between the two fortified gruels can be easily modified by changing the composition of the mineral and vitamin premix in the *Favilase* formulation. The main difference between the two experimental gruels is the presence of amylases in the *Favilase* gruel which is more effective than extrusion cooking to obtain gruels with both appropriate energy density and consistency.

But both types of products, instant flours like *Favina* or food supplements like *Favilase*, appear to be effective, even essential, to improve energy and nutrient intakes in contexts similar to the rural area of Vietnam where this study took place.

## References

- Agence Française de Normalisation-AFNOR (1970). Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode Kjeldahl (produits agricoles alimentaires). Standard NF V 03-050.
- Bennett, V. A. Morales E., González, J., Peerson, J. M., de Romaña, G. L., & Brown, K. H. (1999). Effects of dietary viscosity and energy density on total daily energy consumption by young Peruvian children. *American Journal of Clinical Nutrition*, 70, 285–291.
- Berger, J., Laillou, A., Khan N. C., Monvois, C., Salvignol, B., & Trèche, S. (2004). Fasevie: une solution originale au problème de la malnutrition infantile au Vietnam. *Les cahiers de la Coopération française au Vietnam*. 2004, N°1: 1-30. <http://www.ambafrance-vn.org>
- Brown, K.H. (1997). Complementary feeding in developing countries: Factors affecting energy intake. *Proceedings of the Nutrition Society*, 56(1A), 139–148.
- Bruyeron, O., Nguyen Cong Khan, Berger, J., Salvignol, B., Monvois, C., & Trèche, S. (2006) *Alimentation infantile au Vietnam – Dix ans d'actions et d'enseignements du programme Fasevie*. Paris, Ed. Gret, Collection Etudes et Travaux, ISBN: 2-86844- 164-5, 176 pages.
- Butte, N. F., Wong, W. W., Hopkinson, J. M., Heinz, C. J., Mehta, N. R., & Smith, E. O. B. (2000). Energy requirements derived from total energy expenditure and energy deposition during the first 2 years of life. *American Journal of Clinical Nutrition*, 72, 1558–1569.
- FAO/WHO (2002) Vitamin and mineral requirements in human nutrition, Report of a Joint FAO/WHO expert consultation, WHO, Geneva.
- FAO/WHO/UNU (2001). Human Energy Requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Rome, 17-24 October, 2001.
- Harper, J. M., & Jansen, G. R. (1985). Production of nutritious precooked foods in developing countries by low cost extrusion technology. *Food reviews International*, 1, 27-97.
- Lutter, C. K., & Dewey, K. G. (2003). Proposed nutrient composition for fortified complementary foods. *Journal of Nutrition*, 133, 3011S-3020S.
- Mouquet, C., Greffeulle, V., & Trèche, S. (2006). Characterization of the consistency of gruels consumed by infants in developing countries: assessment of the Bostwick consistometer and comparison with viscosity measurements and sensory perception. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 57, 459-469.
- Mouquet, C., Salvignol, B., Van Hoan, N., Monvois, J., & Trèche, S., (2003). Ability of a 'very low-cost extruder' to produce instant infant flours at a small scale in Vietnam. *Food Chemistry* 82, 249–255.
- Mouquet, C., & Trèche, S. (2001). Viscosity of gruels for infants: a comparison of measurement procedures. *International Journal of Food Science & Nutrition* 52, 389-400.
- Moursi, M, Mbemba, F., & Trèche, S. (2003). Does the consumption of amylase-containing gruels impact on energy intake and growth of Congolese infants? *Public Health Nutrition* 6(3), 249-257.
- Owino, V. O., Kasonka, L. M., Sinkala, M. M., Wells, J. K., Eaton, S., Darch, T., Coward, A., Tomkins, A. M., & Filteau, S. M. (2007). Fortified complementary foods with or without  $\alpha$ -amylase treatment increase hemoglobin but do not reduce breast milk intake of 9-mo-old Zambian infants. *American Journal of Clinical Nutrition*, 86, 1094-1103.
- Sanchez-Grinan, M. I. (1995). Effect of varied dietary fat and carbohydrate concentrations on total energy intake by recovering malnourished children. *FASEB journal*, 9, A10007 (abstract).
- Stephenson, D. M, Gardner, J. M. M., Walker, S. P., & Ashworth, A. (1994). Weaning-food viscosity and energy density: their effects on ad libitum consumption and energy intakes in Jamaican. *American Journal of Clinical Nutrition*, 60, 465-469.

- Thiombiano-Coulibaly, N., Rocquelin, G., Eymard-Duvernay, S., Zougmore, O. N., & Traoré, S. A. (2004). Effects of early extra fluid and food intake on breast milk consumption and infant nutritional status at 5 months of age in an urban and rural area of Burkina Faso. *European Journal of Clinical Nutrition*, 58, 80–89.
- Traoré, T., Vieu, M. C., Alfred, T. S., & Trèche, S. (2005). Effects of the duration of the habituation period on energy intakes from low and high energy density gruels by Burkinabe` infants living in free conditions. *Appetite*, 45, 279–286.
- Trèche, S. (1995). Technique pour augmenter la densité énergétique des bouillies. In Trèche S., de Benoist, B., Benbouzid, D., Verster, A., Delpeuch, F. éds: *L'alimentation de complément du jeune enfant*. Paris, pp. 123-148, Orstom, collection colloques et séminaires.
- Trèche, S., & Mbomé, L. 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 Sciences and Nutrition*, 50, 117-125.
- Vieu, M. C., Traoré, T., & Trèche, S. (2001). Effects of energy density and sweetness of gruels on Burkinabe` infant energy intakes in free living conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 52, 213–218.
- WHO (1992). Programme for control of diarrhoeal diseases. Geneva: WHO/CDD/92.38, 1992. (Eighth Programme Report 1990-1991.)
- WHO (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.

# Chapitre IV

EFFETS DES MATIÈRES  
PREMIÈRES SUR LES  
CARACTERISTIQUES  
DES EXTRUDATS ET  
DES BOUILLIES

## INTRODUCTION

La possibilité d'utiliser le «cuisneur-extrudeur à très faible coût» (CE-TFC) mis au point au Vietnam dans le cadre du programme Fasevie pour la fabrication de farines infantiles a été démontrée antérieurement (Mouquet *et al.*, 2003). Dans le chapitre III, il a également été établi la bonne acceptabilité par les enfants des premières bouillies préparées à partir de farines fabriquées par cet équipement. Ces résultats encourageants ont servi de base à des activités visant utiliser les CE-TFC à plus large échelle pour la production de farine infantile non seulement au Vietnam mais aussi dans d'autres pays en développement. Une condition nécessaire à ce développement était de parvenir à une meilleure maîtrise du procédé et de l'équipement.

Ce chapitre a pour but d'évaluer les effets de la nature et de la composition des matières premières, qui sont reconnues comme des facteurs déterminants du procédé de cuisson-extrusion, sur les caractéristiques des extrudats (*expansion, taux de gélatinisation...*) ainsi que sur le caractère instantané des farines et la consistance des bouillies.

La première étude, qui fait objet d'un article accepté dans *Journal of Food Process and Engineering*, vise à caractériser l'effet de trois facteurs liés à la composition du mélange très influents sur la qualité des produits extrudés: les teneurs en amidon, en lipides et en eau. Les intervalles de variation étudiés (*60-70 g/100 g MS pour l'amidon; 6,2-10,2 g/100 g MS pour les lipides et 10-16 g/100 g MB pour l'eau*) ont été choisis parce qu'ils correspondent aux domaines de variation des teneurs correspondantes dans les mélanges que nous sommes susceptibles d'utiliser compte tenu des contraintes nutritionnelles à prendre en compte lors de la fabrication de farines infantiles. Les mélanges possédant les teneurs choisies ont été obtenus en faisant varier les proportions de trois matières premières (riz, soja et huile de soja) facilement disponibles. Des mélanges ont pu être formulés de façon à étudier de façon indépendante l'effet des teneurs en amidon et en lipides.

Dans la seconde étude, qui fera l'objet d'une publication ultérieure, la possibilité de fabriquer des farines infantiles par cuisson-extrusion à très faible coût à partir de matières premières disponibles au Burkina Faso a été étudiée. Des matières premières produites localement (*maïs, mil, sorgho et soja*) ou importées (*riz thaïlandais*) ont été utilisées dans différentes combinaisons de façon à obtenir des mélanges plus ou moins riches en lipides et en amidon. Les échantillons préparés à Ouagadougou à partir des différentes matières premières dans le cadre d'une petite entreprise ayant bénéficié du transfert d'un CE-TFC ont été comparés au niveau des caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Les résultats des déterminations de teneurs en sucres, en dextrines solubles et en phytates ne sont pas présentés dans cette publication en raison des faibles teneurs observées (pour les teneurs en sucres et en dextrines solubles) ou en raison d'un nombre insuffisant de répétitions (pour les phytates) qui ne permettent pas de conclure sur les effets de la nature des mélanges sur la composition de la fraction glucidique ou sur la teneur en phytates. Une reprise des analyses est envisagée et les résultats seront éventuellement repris dans une autre publication.

## **Chapitre IV-1**

# **EFFET DE LA TENEUR EN AMIDON, EN LIPIDES ET EN EAU SUR LE COMPORTEMENT EN CUISSON-EXTRUSION ET LES CARACTÉRISTIQUES DES EXTRUDATS À BASE DE RIZ PRÉPARÉS À L'AIDE D'UN CUISEUR-EXTRUDEUR À TRÈS FAIBLE COÛT**

(Article accepté le 4 avril 2008 par  
*Journal of Food Process and Engineering*)

# Effets de la teneur en amidon, en lipides et en eau sur le comportement en cuisson-extrusion et les caractéristiques des extrudats à base de riz préparés à l'aide d'un cuiseur-extrudeur à très faible coût

Van Hoan Nguyen<sup>123</sup>, Mouquet-Rivier Claire<sup>2</sup>, Trèche Serge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research unit 106 "Nutrition, Alimentation, Sociétés", Institut de Recherche pour le Développement, BP 64501, F-34394 Montpellier cedex 5, France.

<sup>2</sup>Fasevie Programme in Vietnam - Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques-GRET, 223B, National Institute of Nutrition, 48B, Tang Bat Ho, Hanoi, Vietnam.

<sup>3</sup>Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier, France.

## Résumé

La méthodologie des plans d'expériences (plan factoriel 3<sup>3</sup>) associée à l'analyse des surfaces de réponses a été utilisée pour examiner les effets des teneurs en amidon (60-70 g/100 g matière sèche (MS)), en lipides (6.2-10.2 g/100 g MS) et en eau (10-16 g/100 g matière brute) de mélanges à base de riz sur le comportement en cuisson-extrusion et sur les caractéristiques physicochimiques des extrudats et la viscosité apparente des bouillies en résultant. L'augmentation de la teneur en amidon entraîne une augmentation de la perte en lipides, de l'expansion, du taux de gélatinisation (TG) et de l'indice de gonflement (*water absorption index* - WAI). L'augmentation de la teneur en lipides s'accompagne d'une perte plus importante de lipides et d'une plus faible valeur des indices de gonflement (WAI) et de solubilité (*water solubility index* - WSI). La teneur en eau est le facteur plus influent. Son augmentation entraîne une augmentation de la perte en lipides et de la teneur en eau des extrudats, une diminution de la température mesurée au niveau de filière, ainsi que du TG, du WAI et du WSI. Le TG élevé ( $\geq 91\%$ ) de tous les extrudats démontre que *le cuiseur extrudeur à très faible coût* fabriqué au Vietnam permet la production de farines infantiles instantanées.

**Mots-clés:** Taux de gélatinisation, expansion, riz, *cuiseur-extrudeur à très faible coût*, indice de solubilité, indice de gonflement

# EFFECTS OF STARCH, LIPID AND MOISTURE CONTENTS ON EXTRUSION BEHAVIOR AND EXTRUDATE CHARACTERISTICS OF RICE-BASED BLENDS PREPARED WITH A VERY-LOW-COST EXTRUDER

NGUYEN VAN HOAN<sup>1,2,3,4</sup>, CLAIRE MOUQUET-RIVIER<sup>1</sup> and SERGE TRECHE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research unit 106 "Nutrition, Alimentation, Sociétés"  
Institut de Recherche pour le Développement  
BP 64501, F-34394 Montpellier cedex 5, France

<sup>2</sup>Fasevie Program in Vietnam  
Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques-GRET  
223B, National Institute of Nutrition  
48B, Tang Bat Ho, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>Université Montpellier II  
Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier, France

Accepted for Publication April 8, 2008

## ABSTRACT

*Response surface methodology with a 3 × 3 factorial plan design was used to investigate the effects of starch content (60–70 g/100 g dry matter [DM]), lipid content (6.2–10.2 g/100 g DM) and moisture content (10–16 g/100 g wet matter [WM]) on extrusion behavior of rice-based blends, on the physicochemical properties of extrudates, and the apparent viscosity of resulting gruels. The increase in starch content increased the loss of lipid, the expansion ratio, the degree of gelatinization (DG) of starch, and the water absorption index (WAI). Increasing lipid content resulted in higher loss of lipids and a lower WAI and water solubility index (WSI). Water content had the most influence. Increasing water content resulted in increased loss of lipids, higher moisture content of extrudates, and in lower die temperature, expansion ratio, DG, WAI and WSI. The high DG (≥91%) of all extrudates demonstrated that the very-low-cost extruder manufactured in Vietnam is suitable for the production of ready-to-eat infant flour.*

<sup>4</sup> Corresponding author. TEL: (84-4) 9 72 14 78; FAX: (84-4) 9 72 14 79; EMAIL: nguyen\_vanhoan@yahoo.fr

## PRACTICAL APPLICATIONS

This work tested and optimized the effect of blend composition on the characteristics of rice-based extrudates obtained using a very-low-cost extruder (VLCE) manufactured in Vietnam and on derived gruels. Our results enable prediction of the characteristics of extruded products, when the starch, lipid and water contents of the blends are known. Thus, VLCE users will be able to choose the nature and relative proportion of ingredients to obtain extrudates with specific targeted characteristics. In addition, this study demonstrated that serious loss of lipids occurs during extrusion of blends with high lipid contents. To obtain the lipid content recommended for complementary food, it is thus preferable to add ingredients with high lipid content after extrusion. We conclude that this kind of VLCE manufactured in Vietnam is suitable for low-cost production of instant flour with all the required characteristics for use as complementary foods for infants and young children after the age of 6 months.

## INTRODUCTION

Extrusion cooking – a high-temperature, short-time process – is widely used for processing starch-based products. Because of the expansion of starch-based products, extrusion cooking gives a desirable texture to infant flour or snack products. However, the characteristics of starch-based extrudates depend on many factors, such as feed moisture and lipid content of the food, additive material, temperature, type of extruder and screw speed (Jin *et al.* 1995; Suknark *et al.* 1997; Singh *et al.* 1998; Gutkoski and El-Dash 1999; Reyes-Moreno *et al.* 2003; Singh *et al.* 2007a). Consequently, changing these factors can influence extrusion behavior and the quality of extruded products.

The effect of initial moisture content (or feed moisture) of starchy blends on the characteristics of extruded products has been extensively described (Faubion and Hoseneý 1982a; Ilo *et al.* 1996; Iwe and Ngoddy 1998; Njoki and Faller 2001; Brummer *et al.* 2002; Hashimoto *et al.* 2002; Onyango *et al.* 2004b; Ding *et al.* 2005; Thymi *et al.* 2005; Singh *et al.* 2007b). Moisture content has been found to have an effect on extrudate density, expansion, starch gelatinization, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), trypsin inhibitor activity, protein solubility, color and gruel viscosity. Effects of starch and lipid contents have also been reported (Faubion and Hoseneý 1982b; Colonna *et al.* 1989; Suknark *et al.* 1997; Iwe and Ngoddy 1998; Desrumaux *et al.* 1999; Hashimoto *et al.* 2002; De Pilli *et al.* 2005; Su and Kong 2007). However, in these studies, starch and lipid contents were always dependent variables, as changing one by changing the proportions of

raw materials leads to a change in the other. Therefore their effects were never investigated independently in the same extrudate. In the production of infant flour by extrusion of blends that are rich in both starch and lipids, the effects of these macronutrients on extrudate characteristics still need to be controlled.

The production of infant flour by low-cost extrusion cooking was recommended in the 1980s (Harper 1981). In Vietnam, we tested a locally manufactured single screw, very-low cost extruder (VLCE) for the production of infant flour. The results of the first investigation of the effect of extrusion variables on properties of a rice-based extruded product were published in 2003 (Mouquet *et al.* 2003). This work indicated that extrudates prepared with VLCE enabled production of instant flour only in the case of blends with low lipid content (<6%, dry matter [DM]) and low water content (around 10%, wet matter [WM]). In order to obtain extrudates with a higher degree of gelatinisation (DG) even when prepared with blends with higher lipid content, the VLCE was slightly modified to improve its performance. Before the new model VLCE (EX800, Center of Technological Consultant and transfer-CTC, Vietnam) was used for the production of infant flour, the extrusion conditions of rice-based blends for the production of infant flour or snacks needed to be determined. The objective of this work was thus to investigate the relationship between the biochemical composition of raw blends and some characteristics of rice-based extrudates prepared with the single screw VLCE EX800 manufactured in Vietnam. Starch, lipid and moisture contents of the raw blends were used as processing variables. Response surface methodology was used to measure the effects of these variables on extrusion behavior, on the characteristics of extrudates and on the consistency of resulting Gruels.

## MATERIALS AND METHODS

### Materials

Long-grain rice with 5% of broken grains was purchased from My Hao, a big cereal market in the north of Vietnam. Full-fat soybean (Vietnamese name DT12) harvested in 2005, was supplied by the Center for Research on Legumes of the Vietnamese Agricultural Science Institute. Pure soybean oil was produced by Cai Lan Vegetable Oil Company- Quang Ninh, Vietnam. The composition of these raw materials is listed in Table 1.

### Preparation of Blends

The rice was first oven dried at 35C for 48 h to obtain a moisture content of around 10%. The soybean was dried in a hot air cabinet dryer to obtain a final moisture content of less than 7% before the hulls were removed in a

TABLE 1.  
COMPOSITION OF RAW MATERIALS

Content	Rice	Soybean oil	Soybean (full fat grits)
Starch (g/100 g DM)	82.3	0	0
Amylose (g/100 g DM)	20.9	0	ND
Protein (g/100 g DM)	7.3	0	42.5
Lipid (g/100 g DM)	0.6	99.7	21.1
Fiber (g/100 g DM)	1.1	0	4.0
Moisture (g/100 g WM)	12.9	0	7.5

ND, not determined; WM, wet matter; DM, dry matter.

TABLE 2.  
VALUES OF INDEPENDENT VARIABLES (FACTORIAL 3 × 3 PLAN)

Variables	Variables		Levels	
	Coded	Original	Coded	Original
Starch content (g/100 g DM)	X <sub>1</sub>	SC	-1	60
			0	65
			1	70
Lipid content (g/100 g DM)	X <sub>2</sub>	LC	-1	6.2
			0	8.2
			1	10.2
Moisture content (g/100 g WM)	X <sub>3</sub>	MC	-1	10
			0	13
			1	16

WM, wet matter; DM, dry matter; SC, starch content; LC, lipid content; MC, moisture content.

DH20 dehuller (CTC, Vietnam). The soybean grits were obtained by using a M250 hammer grinder (CTC, Vietnam). Different combinations of the three ingredients (rice, full-fat soybean grits and soybean oil) were used to obtain nine blends with three different starch (60–70 g/100 g DM) or lipid (6.2–10.2 g/100 g DM) contents (Table 2). The moisture content of the blends was adjusted to 10, 13 or 16% by spraying a calculated amount of water. The samples were then kept in polyethylene bags for 2 h to allow adequate moisture distribution before extrusion.

### Extrusion Process

Extrusion was carried out with the VLCE EX800 (CTC, Vietnam), a single-screw extruder with a screw 78 mm in diameter, a screw length or diameter ratio of 3.5 and a rotation speed of ~500 rpm. The extruder was fitted



$$\text{Expansion ratio} = (D_e/D_d)^2$$

De: Diameter of extrudate

D<sub>d</sub>: Diameter of die (= 7 mm)

**Degree of Gelatinization of Starch.** The degree of gelatinization of the starch was measured according to the method described by Mouquet *et al.* (2003). Reported values are the average of two measurements.

**WAI and WSI.** The method used for the determination of WAI and WSI was slightly modified compared to that described by Anderson *et al.* (1969). Extrudates were ground to a mean particle size of approximately 500 µm. A sample of 0.8 g was dispersed in 10 mL of 45°C distilled water. After stirring for 30 min at 45°C, the dispersions were centrifuged for 10 min at 3,000 g. The supernatant was decanted and the sediment weighed. WAI and WSI were calculated as follows:

WAI (g/g) = weight of sediment/weight of total dry solids;

WSI (%) = weight of soluble solids in supernatant × 100/weight of total dry solids.

WAI and WSI were determined in triplicate for each sample of extrudate.

**Lipid Content.** Crude lipid content was determined using the HT6 Soxtec system (Tecator, Hoganas, Sweden), following the instructions of Tecator n°3144. The decrease in lipid content (g/100 g DM) – called lipid loss hereinafter – during extrusion was calculated as the difference between the initial lipid content of the blend (g/100 g DM) and the lipid content of the extrudate (g/100 g DM). All measurements were made at least in duplicate and the values were averaged.

**Protein Content.** Protein contents (N × 6.25) were determined by the method of Kjeldahl (standard NF V03-050, AFNOR 1970). Analyses were made in duplicate and the values were averaged.

**Fiber Content.** Acid detergent fiber contents were determined by the method of Van Soest (1963) using a Dosi-fiber (Selecta, Barcelona, Spain).

**Starch Content.** Starch content was determined by the enzymatic method of Batey (1982) modified by Holmes *et al.* (1986).

**Apparent Viscosity Measurement.** The method used to measure viscosity was proposed by Mouquet and Treche (2001). The viscosity of the

TABLE 3.  
COMPOSITION OF BLENDS PREPARED WITH DIFFERENT STARCH  
AND LIPID CONTENTS

N°	Characteristics of blends		Composition of blends		
	Starch (g/100 g DM)	Lipid (g/100 g DM)	Rice (g/100 g DM)	Soybean grits (g/100 g DM)	Soybean oil (g/100 g DM)
1	60	6.2	72.9	27.0	0.1
2	60	8.2	72.9	24.4	2.7
3	60	10.2	72.9	21.9	5.2
4	65	6.2	79.0	19.3	1.7
5	65	8.2	79.0	16.8	4.2
6	65	10.2	79.0	14.2	6.8
7	70	6.2	85.1	11.6	3.3
8	70	8.2	85.1	4.1	5.8
9	70	10.2	85.1	3.0	8.4

WM, wet matter; DM, dry matter.

gruels was measured with a Haake viscometer VT550 with SV-DIN coaxial cylinders, shear rate of 83/s, shear time of 10 min at a temperature of  $45.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ .

**Dry Matter Content.** The dry matter content of raw materials, extrudates and gruels was determined by oven-drying at  $105^\circ\text{C}$  to constant weight. These measurements were performed in duplicate.

### Experimental Design and Statistical Analysis

The factorial experimental design comprised three variables at three levels ( $3^3$ ). The independent variables were the starch content (60–65–70 g/100 g DM), the lipid content (6.2–8.2–10.2 g/100 g DM) and the moisture content of the raw blend (10–13–16 g/100 g WM). In all, 29 experiments were performed in random order, three of which were repetitions of the center point (Table 3). The response variables were die temperature, expansion of the extrudate, moisture content of the extrudate, lipid loss, the degree of gelatinization, water absorption index, water solubility index and viscosity of gruel prepared with extrudate flour at a concentration of 16 g DM/100 g of gruel.

The effects of the variables were evaluated by the ANOVA method using the commercial statistical software Statgraphics plus 5.1 (Virginia, U.S.A.). The following second-order polynomial model was used to predict the effect of independent variables:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} X_i X_j$$

where  $b_o$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$  and  $b_{ij}$  are the model constants and coefficients for linear, quadratic and interactive effects, respectively, and  $X_i$  and  $X_j$  are the independent variables in coded values. The validity of the regression models was checked by calculating  $R^2$  correlation coefficients. Results were analyzed using response surface methodology. The response surfaces for the resulting models were carried out as a function of two variables while keeping the third variable at the optimum level.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Die Temperature

There was an increase in die temperature (from 148C to 189C) with a decrease in the initial moisture content of the blend. The regression model for die temperature (Table 4) correlates well with observed data with  $R^2$  above 92%. Initial moisture content was the main factor that affected the die temperature. The present observation is consistent with those previously reported (Mouquet *et al.* 2003). Starch and lipid contents had no significant influence on this variable ( $P > 0.1$ ) within the range studied. Extrusion temperature is one of the main factors that affect extrusion behavior and the characteristics of extrudates (Govindasamy *et al.* 1996; Yeh *et al.* 1999; Ryu and Ng 2001; Guha *et al.* 2003; Ding *et al.* 2005; Thymi *et al.* 2005; Hagenimana *et al.* 2006; Singh *et al.* 2007b). Reviewing the nutrition aspects of food extrusion, Singh *et al.* (2007a) reported that an increase in extrusion temperature reduced the retention of vitamins, and that high extrusion temperatures ( $\geq 200\text{C}$ ) and low moisture content ( $\leq 15\%$ ) can have negative effects on the nutritional quality of extrudates. In all the experiments in the present work, the die temperature was well below 200C, which helps preserve the good nutritional quality of rice-based extrudates. However, to achieve satisfactory cooking, a minimum extrusion temperature (150–200C) is required. This may be easy with sophisticated extruders that usually have a temperature control system, i.e., electrical heating with injection of hot air or steam, but the present study used a simple VLCE with no temperature control system. An increase in temperature inside the extruder and consequently of the die is caused by very strong friction between the materials, the screw and the barrel. Our results indicate that variations in the moisture content of the blend can significantly modify the extrusion temperature. To obtain satisfactory cooking in areas where raw materials have high initial moisture content, extrusion with a VLCE will require short pre-drying treatment of raw materials.

TABLE 4.  
COEFFICIENTS OF REGRESSION MODELS FOR THE RESPONSE VARIABLES

Die temperature (C)	Expansion ratio	Moisture content of extrudate (g/100 g WM)	Lipid loss (g/100 g DM)	Degree of gelatinization (%)	Water absorption index (g/g)	Water solubility index (%)	Viscosity of gruel† (Pa·s)
b <sub>0</sub>	4.17	7.69	0.50	98.71	4.63	12.81	1.66
<b>Linear</b>							
b <sub>1</sub>	0.74**	0.09	0.48**	1.78**	0.49**	-0.05	-0.07
b <sub>2</sub>	0.1	0.27*	1.10**	0.06	0.20*	-0.54**	0.12*
b <sub>3</sub>	-15.61**	2.94**	-1.05**	-2.5**	-0.24*	-1.19**	0.14*
<b>Quadratic</b>							
b <sub>11</sub>	0.37	-0.47*	0.17	-1.06	-0.07	0.42*	-0.19*
b <sub>22</sub>	0.30	0.27	0.44*	0.44	-0.05	0.003	0.07
b <sub>33</sub>	5.06*	-0.28	0.43*	-0.90	-0.17	0.17	-0.19*
<b>Interactions</b>							
b <sub>12</sub>	0.28	0.11	0.34*	0.25	0.04	0.001	-0.08
b <sub>13</sub>	-3.08*	0.14	-0.07	1.42*	0.04	-0.04	-0.07
b <sub>23</sub>	0.92	-0.13	-0.85**	-0.25	-0.17*	0.17	-0.03
R <sup>2</sup>	0.92	0.97	0.95	0.85	0.83	0.89	0.67

\* Significant at P ≤ 0.05.

\*\* Significant at P ≤ 0.001.

† Prepared at 16 g DM/100 g gruel.

b<sub>1</sub>, starch content; b<sub>2</sub>, lipid content; b<sub>3</sub>, moisture content.

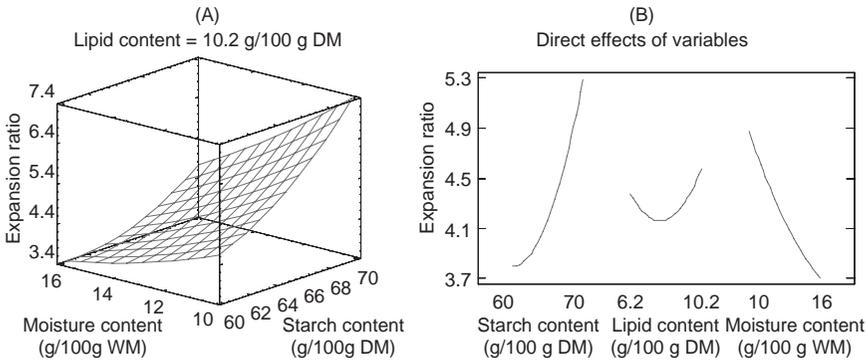


FIG. 2. RESPONSE SURFACE AND DIRECT EFFECT OF STARCH, LIPID AND MOISTURE CONTENT ON EXPANSION RATIO

### Expansion of Extruded Product

Table 4 shows that both starch and moisture contents had strong effects on the expansion ratio ( $P \leq 0.001$ ). The lipid content of the blend had no significant linear effect within the range studied ( $P > 0.10$ ). We only observed a small significant interaction effect of lipid content and moisture content ( $P = 0.03$ ) on the expansion ratio.

As starch is the main ingredient of extruded blends that provides the expanded matrix, it was thus clear that the expansion ratio would increase as a result of an increase in starch content (Fig. 2). These results are consistent with previous observations (Suknark *et al.* 1997; Iwe and Ngoddy 1998; Desrumaux *et al.* 1999; Hashimoto *et al.* 2002).

The expansion of the product outside the die is due to the instant vaporization of the water contained in the blend, resulting from the high temperature and the difference in pressure inside the barrel and outside atmospheric pressure. The release of stored energy of materials during their flow through the die increases the expansion of the extrudate. Consequently, a positive effect of increased moisture content, which may increase vapor pressure, could be expected. However, this could be counterbalanced by the fact that increasing moisture content would also change the molecular structure of the starch, reducing the melt elasticity that decreases the radial expansion ratio. Moreover, another consequence of increasing initial moisture content with a VLCE is to lower the barrel temperature, which may reduce the vapor pressure and consequently the expansion ratio. In our experiments these multiple effects resulted in a negative influence of moisture content on expansion, which is consistent with the results of many studies (Faubion and Hosney 1982a; Suknark *et al.* 1997; Ryu and Ng 2001; Brummer *et al.* 2002; Thymi *et al.*

2005; Singh *et al.* 2007b). In contrast, Bhattacharya (1997) observed an increase in the expansion ratio with the increase in barrel temperature in the case of rice-green gram blend extrusion.

Faubion and Hoseney (1982b) showed that increasing the lipid content of wheat starch and flour blends resulted in a decrease in expansion. Bhatnagar and Hanna (1994) reported that the addition of 4% of stearic acid in cornstarch before extrusion resulted in a decrease in expansion ratio. In general, the expansion of extrudate with lipid content above 5–6% is limited (Camire 2000). Conversely, Su and Kong (2007) found that adding 3% oil to rice before extrusion improved expansion. In the present work, increasing the lipid content by changing the oil/rice balance of the blend did not have a significant effect on the expansion ratio. The loss of lipids from the die may explain this phenomenon.

The structure and the texture of the extrudate depend on the degree of expansion. The high expansion of the extrudate results in a flour with an attractive texture. Pelembe *et al.* (2002) indicated that a high expansion ratio is desirable for the production of instant porridge. In the present work, optimal expansion was obtained with blends containing around 70 g of starch/100 g DM and 10% water. These results indicate that to obtain the right texture of flour, the blend should have high starch content and low moisture content.

### Moisture Content of Extrudate

Extrusion cooking reduced the moisture content of all extrudates to values varying from 3.3 to 11.0 g/100 g. The initial moisture and lipid contents of blends significantly affected the moisture content of the extrudates (Table 4). Increasing both moisture and lipid contents of the blend resulted in higher moisture content of the extrudate. The regression model for the moisture content of extrudates correlated well with observed data. To obtain extrudates with moisture content less than 7%, the moisture content of the initial blend should not exceed 12%.

The effect of extrusion conditions on the final moisture content of extrudates has rarely been reported. According to Onyango *et al.* (2004b), an increase in feed moisture increased the moisture content of the extrudate. For the production of snacks, baby food or dry food, the moisture content of the extrudate is an important factor that affects the quality of the final product. High moisture content results in high water activity and is known to reduce the shelf life of the product. In some cases, to obtain the right moisture content to ensure satisfactory preservation, extrudates need to be dried after extrusion (Jin *et al.* 1995; Ali *et al.* 1996; Iwe and Ngoddy 1998; Hagenimana *et al.* 2006). This process increases the cost of production and may change the characteristics of extruded products. In the case of the production of low-cost

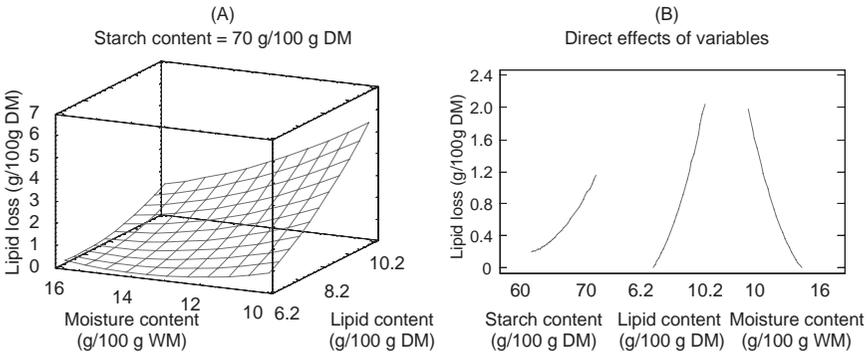


FIG. 3. RESPONSE SURFACE AND DIRECT EFFECT OF STARCH, LIPID AND MOISTURE CONTENT ON THE DECREASE IN LIPID CONTENT DURING EXTRUSION

infant flour with the Vietnamese VLCE, the extrusion of blends with low moisture content could be the best way to produce extrudates with high dry matter content, thereby minimizing production costs.

### Lipid Loss

During extrusion, under the pressure, lipids are extracted from the blends and drip out of the barrel separately. In our study, the quantity of lipids lost during extrusion depended strongly on the three variables studied (Table 4) and ranged from 0 to 5.18 g/100 g DM. It increased with an increase in starch content ( $P \leq 0.001$ ). Moisture and lipid contents both had significant linear ( $P \leq 0.001$ ) and quadratic ( $P \leq 0.05$ ) effects on the decrease in lipid content, and their interaction was also highly significant. At high lipid content, decreasing the moisture content led to an increase in the loss of lipid during extrusion (Fig. 3). Interaction between lipid content and starch content showed significant positive effects on lipid loss. The high  $R^2$  value and high level of significance (for all of three variables  $P < 0.001$ ) indicated the model is satisfactory. An inverse effect of moisture content on the decrease in lipid content can be explained by the plasticization effect of water. Increasing the moisture content may reduce the viscosity of the blends in the barrel, thus reducing die pressure and consequently the quantity of lipids lost.

To our knowledge, very few data have been reported in the literature about lipid or oil losses during extrusion. Camire (2000) reported that lipid losses as free oil at the die only occur with fat-rich materials. De Pilli *et al.* (2005) studied the effect of extrusion conditions (screw speed and initial moisture content) at low temperatures (40 and 70C) on oil loss from a wheat or almond mixture. These authors indicated that the lowest oil loss could be

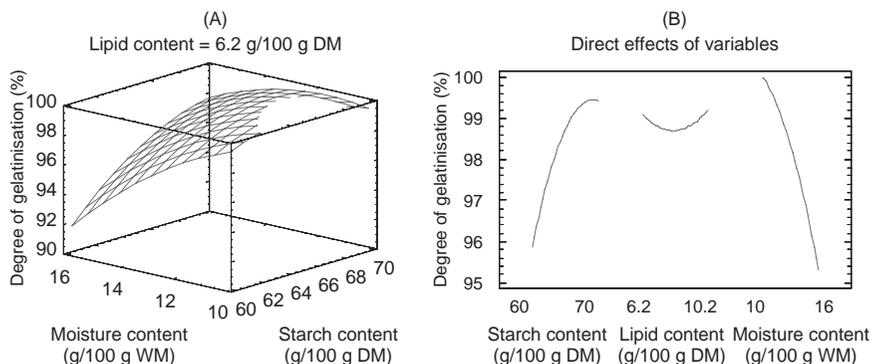


FIG. 4. RESPONSE SURFACE AND DIRECT EFFECT OF STARCH, LIPID AND MOISTURE CONTENT ON DEGREE OF GELATINIZATION OF STARCH

obtained with low moisture content, high screw speed and high extrusion temperature. Results of our experiments indicated high starch and lipid contents and low initial moisture content would increase lipid losses during extrusion. Loss of lipid was also observed during extrusion cooking of rice-sesame blends with the same type of extruder (unpublished result). This loss should be taken into account in the formulation and fabrication of extruded products, unless the extracted lipid fraction is reincorporated after extrusion, before milling. Otherwise, a lipid-rich ingredient should be added after extrusion to ensure sufficient lipid content in the final products. Addition of emulsifiers such as sucrose esters could reduce oil loss during extrusion processing (De Pilli *et al.* 2007).

### Degree of Gelatinization of Starch

The degree of gelatinization of starch was very high in all extrudates and varied from 91 to ~100%. For the small variation observed, DG increased with starch content but decreased with an increase in moisture content (Fig. 4) and their linear effects were highly significant (Table 4). The variation in lipid content did not have any effect on DG ( $P = 0.89$ ). DG showed a significant interaction between starch content and moisture content ( $P \leq 0.05$ ). Total starch gelatinization (DG ~ 100%) was obtained at SC = 66.4 g/100 g DM, LC = 10.2 g/100 g DM and MC = 10 g water/100 g WM.

Increasing the proportion of starch-rich material in raw blends resulted in an increase in DG with a rice-soybean blend (Mouquet *et al.* 2003) and with a potato-soybean blend (Iwe and Ngoddy 1998). The positive effect of starch content on die temperature may explain the positive effect on DG.

The negative effect of moisture content on DG is consistent with data in the literature. As in our study, Ilo *et al.* (1996) and Ding *et al.* (2005) reported

an increase in DG associated with a decrease in feed moisture. This can be explained by the decrease in the temperature resulting from the increase in initial moisture content due to the lubricating effect of the water. Govindasamy *et al.* (1996) and Yeh *et al.* (1999) observed that increasing barrel temperature increased starch gelatinization.

The DG of starch is a very important factor that determines the digestibility of starch-rich flours. Holm *et al.* (1988) showed that the digestion rate of starch and metabolic response increased with the DG of wheat starch. Extrudates, which have a DG above 95%, are suitable for the production of instant infant flour. The high DG of all extrudates even those prepared with lipid contents above 6%, demonstrated the high performance of the second model of VLCE (EX800) manufactured in Vietnam.

## WAI

The comparison of WAI in blends before extrusion and in extrudates is shown in Table 5. The change in starch content seems to have no effect on the WAI of raw materials. The higher values (from 3.54 to 5.43 g/g, DM) of WAI observed after extrusion indicate that the process increased the WAI of extruded products.

In extruded flour, WAI depended strongly on starch, lipid and moisture contents (Table 4). WAI increased with an increase in starch and lipid contents and a decrease in moisture content.

Because of its degradation, which enhances water absorption, it is clear that higher starch content induces a higher WAI of extrudates. In addition, the positive effect of starch content on WAI may be also due to the increase in extrusion temperature, which had a positive effect on starch degradation. This phenomenon was already observed by Jones *et al.* (2000) or Reyes-Moreno *et al.* (2003).

Concerning the effect of lipid content on WAI after extrusion, Desrumaux *et al.* (1999) reported that the addition of fatty acid (0.2–0.8%) to corn grits decreased WAI.

In the literature, reports on the effects of moisture content on WAI of extrudates of different materials are contradictory. Some authors showed that WAI of extrudates increased with a decrease in feed moisture (Anderson *et al.* 1969; Govindasamy *et al.* 1996), while others reported the reverse, i.e., that an increase in moisture content resulted in an increase in the WAI (Hashimoto *et al.* 2002; Ding *et al.* 2005; Hagenimana *et al.* 2006; Singh *et al.* 2007b). It is impossible to compare these results directly because of differences in the equipment and materials used. The measurement of the WAI has been used in many studies to evaluate the quality of extrudates. However, there is no recommended WAI value for specific products such as infant flour.

TABLE 5.  
WATER ABSORPTION AND WATER SOLUBILITY BEFORE AND AFTER EXTRUSION

Starch (g/100 g DM)	Lipid (g/100 g DM)	Moisture content (g/100 g WM)	WAI (g/g)		WSI (%)	
			Before extrusion*	After Extrusion†	Before extrusion*	After extrusion†
60	6.2	10	2.35	4.22 ± 0.52	12.52	15.50 ± 0.13
		13		3.90 ± 0.31		13.55 ± 0.30
		16		3.73 ± 0.42		12.45 ± 0.57
Mean‡				3.95 ± 0.25		13.84 ± 1.54
60	8.2	10	2.31	3.93 ± 0.36	11.88	15.09 ± 0.29
		13		3.85 ± 0.29		13.20 ± 0.52
		16		3.63 ± 0.22		12.27 ± 0.67
Mean				3.80 ± 0.15		13.52 ± 1.44
60	10.2	10	2.35	4.63 ± 0.36	10.71	13.56 ± 0.56
		13		3.99 ± 0.27		12.53 ± 0.18
		16		3.54 ± 0.32		12.35 ± 0.63
Mean				4.05 ± 0.55		12.81 ± 0.65
65	6.2	10	2.33	3.67 ± 0.97	9.64	14.44 ± 0.41
		13		4.21 ± 0.31		13.25 ± 0.30
		16		4.11 ± 0.30		12.42 ± 0.07
Mean				4.00 ± 0.28		13.37 ± 1.02
65	8.2	10	2.38	5.00 ± 0.44	8.58	13.95 ± 0.24
		13		4.63 ± 0.18		13.25 ± 0.52
		16		4.35 ± 0.31		11.73 ± 0.49
Mean				4.66 ± 0.32		12.98 ± 1.13
65	10.2	10	2.49	5.23 ± 0.08	7.34	13.54 ± 0.22
		13		4.81 ± 0.13		11.90 ± 0.56
		16		4.42 ± 0.13		11.06 ± 0.39
Mean				4.82 ± 0.40		12.17 ± 1.26
70	6.2	10	2.36	4.82 ± 0.40	6.30	15.47 ± 0.89
		13		4.99 ± 0.25		13.96 ± 1.51
		16		4.45 ± 0.36		12.65 ± 1.36
Mean				4.75 ± 0.28		14.03 ± 1.41
70	8.2	10	2.40	5.00 ± 0.41	5.67	13.95 ± 0.34
		13		5.43 ± 0.29		13.20 ± 0.18
		16		4.49 ± 0.14		11.37 ± 0.44
Mean				4.97 ± 0.47		12.84 ± 1.33
70	10.2	10	2.36	5.18 ± 0.06	4.95	14.53 ± 0.34
		13		5.23 ± 0.21		12.13 ± 0.37
		16		4.67 ± 0.30		12.37 ± 1.39
Mean				5.03 ± 0.31		13.01 ± 1.32

\* Mean of two values.

† Mean of three measurements ± standard deviation.

‡ Overall mean ± standard deviation, calculated apart from the effect of moisture content.

WAI, water absorption index; WSI, water solubility index; WM, wet matter; DM, dry matter.

## Water Solubility Index

The WSI of raw materials and extrudates is presented in Table 5. The blends with a higher starch content had a lower WSI. Extrusion cooking increased the WSI of extruded products. The value of WSI measured before and after extrusion ranged from 4.95 to 12.52% and from 12.35 to 15.47%, respectively. The change in starch content increased the WSI during extrusion.

Starch WSI is related to the quantity of soluble molecules. This depends on the extent of the degradation of starch during processing. Inverse linear effects of lipid and moisture contents were observed (Table 4). Starch content only had a positive effect on the quadratic term.

Changes in starch, lipid and moisture contents result in changes in fiber and protein contents which can also affect WSI (Jones *et al.* 2000). By adding more pea grits to a rice/pea blend before extrusion, Singh *et al.* (2007b) observed an increase in the WSI. This indicates that increasing protein and fiber contents (by adding more pea grits) and decreasing the starch content decreases the WSI. Adding fatty acids to corn before extrusion also resulted in a decrease in the WSI (Bhatnagar and Hanna 1994; Desrumaux *et al.* 1999). Like for the DG, the highest WSI was observed at low lipid and moisture contents. The negative effect of moisture content on the water solubility index has previously been reported by Anderson *et al.* (1969), Govindasamy *et al.* (1996) and Jackson *et al.* (1990). The effects of other factors on the WSI of extrudates have been demonstrated in many studies. Increasing temperature resulted in higher molecular degradation and thus in an increased WSI (Govindasamy *et al.* 1996; Guha *et al.* 2003; Ding *et al.* 2005; Hagenimana *et al.* 2006). A desirable WSI of extrudates has been obtained with rice with low amylose content (Matthey and Hanna 1997; Guha *et al.* 2003).

Measuring the water solubility index measures the amount of starch and other soluble components released from extrudate (Kirby *et al.* 1988). Extrusion cooking increases the WSI of the extrudate and thus increases the nutrient and energy availability of extruded products (Njoki and Faller 2001). Regarding the nutritional value, extrudates with a higher WSI are desirable in products such as snacks, breakfast cereal and infant flour because the starch is easier to digest.

## Apparent Viscosity

Both lipid and moisture contents had a linear positive effect on the viscosity of gruels (Table 4). Moisture content also had a significant quadratic effect. Surprisingly, starch content had no positive effect, and only a slight negative quadratic effect. The viscosity of gruels increased slightly with an increase in starch content from 60 g/100 g to 65 g/100 g DM and decreased with an increase in starch content from 65 g/100 g to 70 g/100 g DM (Fig. 5).

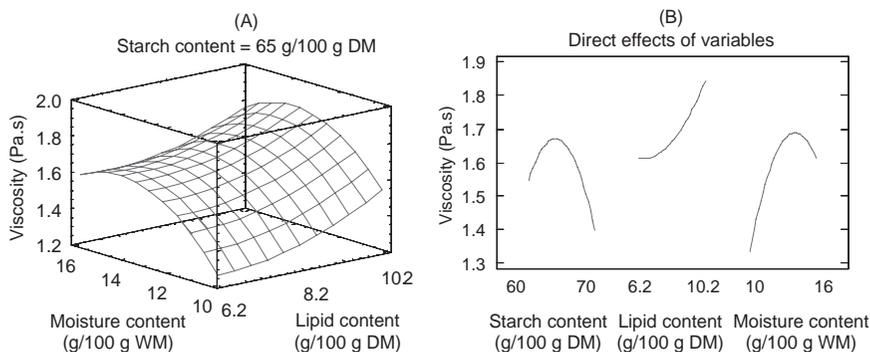


FIG. 5. RESPONSE SURFACE AND DIRECT EFFECT OF STARCH, LIPID AND MOISTURE CONTENT ON VISCOSITY OF GRUEL PREPARED BY BOILING WITH 16 G DM/100 G FOR 5 MIN

However, apparent viscosity was not very well correlated with the model ( $R^2 = 0.67$ ), which may be attributed to the fact that gruel viscosity depends on multiple variables such as starch and lipid contents and on the severity of the process.

One of the main advantages of extrusion cooking is reducing the viscosity of starchy gruels thanks to the disruption of the starch chain under high shear. Onyango *et al.* (2004a) reported that the fermentation of *uji*, a porridge made of maize, finger millet, sorghum and cassava, had no effect on viscosity but extrusion of the fermented flour of *uji* had a viscosity reducing effect. The reducing effect of extrusion on viscosity was also observed by Mouquet *et al.* (2003). In the present study, it was impossible to measure the viscosity of gruels prepared from unextruded blends using the same method and concentration (16 g DM/100 g of gruel), as it was much too thick. The negative effect of moisture content on apparent viscosity can be explained by its negative effect on die temperature, which reduces the degradation of starch. Our result agrees with previously reported results (Ilo *et al.* 1996; Gutkoski and El-Dash 1999). The negative effect of lipid on viscosity can also explained by the impairing of lipid on the performance of extruder (Camire 2000).

## CONCLUSION

Starch, lipid and moisture contents significantly affected different physicochemical characteristics of rice-based extrudates processed with a single-screw very-low-cost extruder manufactured in Vietnam. Moisture content (from 10 to 16%) of raw blends had the greatest influence, and affected all the

variables studied. The optimal initial moisture content of blends for infant flour production is around 12%. The increase in the initial lipid content of the blend resulted in a significant loss of lipids during extrusion and may therefore not be useful. To obtain the minimum lipid content recommended for complementary food ( $\approx 9.2$  g/100 g DM, WHO 1998), it is preferable to add the oil after extrusion cooking. High starch content, low lipid and moisture content are the key conditions for making extrudates with a high expansion ratio, total gelatinization of starch, high water absorption and solubility indexes and limited loss of lipids.

### ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by the Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques.

### REFERENCES

- AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR). 1970. Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode Kjeldahl (produits agricoles alimentaires). Standard NF V 03-050.
- ALI, Y., HANNA, M.A. and CHINNASWAMY, R. 1996. Expansion characteristic of extruded corn grits. *Lebensm. Wiss. Technol.* 29, 702–709.
- ANDERSON, R.A., CONWAY, H.F., PFEIFER, V.F. and GRIFFIN, E.L. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today* 14, 4–12.
- BATEY, I.L. 1982. Starch analysis using thermostable  $\alpha$ -amylase. *Starch* 4, 125–128.
- BHATNAGAR, S. and HANNA, M.A. 1994. Extrusion processing conditions for amylose-lipid complexing. *Cereal Chem.* 71, 587–593.
- BHATTACHARYA, S. 1997. Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: Extrusion and extrudate characteristics. *J. Food Eng.* 32, 93–99.
- BRUMMER, B., MEUSER, F., VAN LENGERICH, B. and NIEMANN, C. 2002. Expansion and functional properties of corn starch extrudates related to their molecular degradation, product temperature and water content. *Starch-Starke* 54, 9–15.
- CAMIRE, M.E. 2000. Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In *Extruders in Food Applications* (M.N. Riaz, ed.) pp. 127–147, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA.
- COLONNA, P., TAYEB, J. and MERCIER, C. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products. In *Extrusion-cooking* (C. Mercier, P. Linko and J.M. Harper, eds.) pp. 247–319. AACC, St. Paul, MN.

- DE PILLI, T., SEVERINI, C., BAIANO, A., DEROSI, A., ARHALIASS, A. and LEGRAND, J. 2005. Effects of operating conditions on oil loss and properties of products obtained by co-rotating twin-screw extrusion of fatty meal: Preliminary study. *J. Food Eng.* 70, 109–116.
- DE PILLI, T., CARBONE, B.F., FIORE, A.G. and SEVERINI, C. 2007. Effect of some emulsifiers on the structure of extrudates with high content of fat. *J. Food Eng.* 79, 1351–1358.
- DESRUMAUX, A., BOUVIER, J.M. and BURRI, J. 1999. Effect of free fatty acids addition on corn grits extrusion cooking. *Cereal Chem.* 76, 699–704.
- DING, Q.-B., AINSWORTH, P., TUCKER, G. and MARSON, H. 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *J. Food Eng.* 66, 283–289.
- FAUBION, J.M. and HOSENEY, R.C. 1982a. High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. *Cereal Chem.* 59, 529–533.
- FAUBION, J.M. and HOSENEY, R.C. 1982b. High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. II. Effect of protein and lipid on extrudate properties. *Cereal Chem.* 59, 533–537.
- GOVINDASAMY, S., CAMPANELLA, O.H. and OATES, C.G. 1996. High moisture twin-screw extrusion of sago starch: 1. Influence on granule morphology and structure. *Carbohydr. Polym.* 30, 275–286.
- GUHA, M., ALI, S.Z. and BHATTACHARYA, S. 2003. Screening of variables for extrusion of rice flour employing a Plackett–Burman design. *J. Food Eng.* 57, 135–144.
- GUTKOSKI, L.C. and EL-DASH, A.A. 1999. Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. *Plant Food Hum. Nutr.* 54, 315–325.
- HAGENIMANA, A., DING, X. and FANG, T. 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *J. Cereal Sci.* 43, 38–46.
- HARPER, J.M. 1981. Extrusion of starch and starchy materials. In *Extrusion of Foods*, Vol 2 (J.M. Harper, ed.) pp. 41–60, CRC Press, Boca Raton, FL.
- HASHIMOTO, J.M., NABESHIMA, E.H., CINTRA, H.S., DIAS, A.R.G., BUSTOS, F.M. and CHANG, Y.K. 2002. Effect of processing conditions on some functional characteristics of extrusion-cooked cassava starch/wheat gluten blends. *J. Sci. Food. Agric.* 82, 924–930.
- HOLM, J., LUNDQUIST, J., BJORCK, I., ELIASSON, A.-C. and ASP, N.-G. 1988. Degree of starch gelatinization, digestion rate of starch in vitro, and metabolic response in rats. *Am. J. Clin. Nutr.* 47, 1010–1016.

- HOLMES, J., BJOCK, I., DREWS, A. and ASP, N. 1986. A rapid method for the analysis of starch. *Starch* 38, 224–226.
- ILO, S., TOMSCHIK, U., BERGHOFER, E. and MUNDIGLER, N. 1996. The effect of extrusion operating conditions on the apparent viscosity and the properties of extrudates in twin-screw extrusion cooking of maize grits. *Lebensm. Wiss. Technol.* 29, 593–598.
- IWE, M.O. and NGODDY, P.O. 1998. Proximate composition and some functional properties of extrusion cooked soybean and sweet potato blends. *Plant Food Hum. Nutr.* 53, 121–132.
- JACKSON, D.S., GOMEZ, M.H., WANISKA, R.D. and ROONEY, L.W. 1990. Effects of single-screw extrusion cooking on starch as measured by aqueous high-performance size-exclusion chromatography. *Cereal Chem.* 67, 529–532.
- JIN, Z., HSIEHL, F. and HUFF, H.E. 1995. Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *J. Cereal Sci.* 22, 185–194.
- JONES, D., CHINNASWAMY, R., TAN, Y. and HANNA, M. 2000. Physicochemical properties of ready-to-eat breakfast cereals. *Cereal Food World* 45, 164–168.
- KIRBY, A.R., OLLETT, A.L., PARKER, R. and SMITH, A.C. 1988. An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *J. Food Eng.* 8, 247–272.
- MATTHEY, F.P. and HANNA, M.A. 1997. Physical and functional properties of twin-screw extruded whey protein concentrate–corn starch blends. *Lebensm. Wiss. Technol.* 30, 359–366.
- MOUQUET, C. and TRECHE, S. 2001. Viscosity of gruels for infants: A comparison of measurement procedures. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 52, 389–400.
- MOUQUET, C., SALVIGNOL, B., VAN HOAN, N., MONVOIS, J. and TRECHE, S. 2003. Ability of a ‘very low-cost extruder’ to produce instant infant flours at a small scale in Vietnam. *Food Chem.* 82, 249–255.
- NJOKI, P. and FALLER, J.F. 2001. Development of an extruded plantain/corn/soy weaning food. *Int. J. Food Sci. Technol.* 36, 415–423.
- ONYANGO, C., HENLE, T., HOFMANN, T. and BLEY, T. 2004a. Production of high energy density fermented uji using a commercial alpha-amylase or by single-screw extrusion. *Lebensm. Wiss. Technol.* 37, 401–407.
- ONYANGO, C., HENLE, T., ZIEMS, A., HOFMANN, T. and BLEY, T. 2004b. Effect of extrusion variables on fermented maize–finger millet blend in the production of uji. *Lebensm. Wiss. Technol.* 37, 409–415.

- PELEMBE, L.A., ECRASMUS, C. and TAYLOR, J.R.N. 2002. Development of a protein-rich composite sorghum-cowpea instant porridge by extrusion cooking process. *Lebensm. Wiss. Technol.* *35*, 120–127.
- REYES-MORENO, C., MILAN-CARRILLO, J., GUTIERREZ-DORADO, R., PAREDES-LOPEZ, O., CUEVAS-RODRIGUEZ, E.O. and GARZON-TIZNADO, J.A. 2003. Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L.). Optimization of extrusion process. *Lebensm. Wiss. Technol.* *36*, 685–695.
- RYU, G.H. and NG, P.K.W. 2001. Effects of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch-Starke* *53*, 147–154.
- SINGH, N., SMITH, A.C. and FRAME, N.D. 1998. Effect of process variables and monoglycerides on extrusion of maize grits using two sizes of extruder. *J. Food Eng.* *35*, 91–109.
- SINGH, S., GAMLATH, S. and WAKELING, L. 2007a. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *Int. J. Food Sci. Technol.* *42*, 916–925.
- SINGH, B., SEKHON, K.S. and SINGH, N. 2007b. Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chem.* *100*, 198–202.
- SU, C.-W. and KONG, M.-S. 2007. Effects of soybean oil, cellulose, and SiO<sub>2</sub> addition on the lubrication and product properties of rice extrusion. *J. Food Eng.* *78*, 723–729.
- SUKNARK, K., PHILLIPS, R.D. and CHINNAN, M.S. 1997. Physical properties of directly expanded extrudates formulated from partially defatted peanut flour and different types of starch. *Food Res. Int.* *30*, 515–583.
- THYMI, S., KROKIDA, M.K., PAPPAS, A. and MAROULIS, Z.B. 2005. Structural properties of extruded corn starch. *J. Food Eng.* *68*, 519–526.
- VAN SOEST, P.S. 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds II- A rapid method for the determination of fiber and lignin. *J. Assoc. Off. Ana. Chem.* *46*, 829–835.
- WHO 1998. *Complementary Feeding of Young Children in Developing Countries: A Review of Current Scientific Knowledge*, pp. 64–67. World Health Organization, Geneva.
- YEH, A.-I., WU, T.-W. and JAW, I.-M. 1999. Starch transitions and their influence on flow pattern during single-screw extrusion cooking of rice flour. *Food Bioprod. Process.* *77*, 47–54.

## **Chapitre IV-2**

# **EFFET DE LA NATURE DE LA SOURCE AMYLACÉE UTILISÉE SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES EXTRUDATS ET DES BOUILLIES**

# **Effets de la nature de la source amyliacée utilisée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies**

VAN HOAN Nguyen, MOUQUET-RIVIER Claire, TRECHE Serge

## **Résumé**

Les effets de la nature de la source amyliacée utilisée sur le comportement en extrusion, les caractéristiques des extrudats et la consistance des bouillies ont été étudiés. Les sources amyliacées testées sont le maïs blanc ou jaune, le mil, le sorgho et le riz, matières premières disponibles au Burkina Faso. Pour chaque matière première, des proportions différentes de céréale et de soja ont permis d'obtenir trois mélanges contenant des quantités différentes de lipides et d'amidon, respectivement de 6,2 et 67 % bs; 8,2 et 59 % bs; et 10,2 et 51% bs.

La nature de la matière première et les proportions de lipides et d'amidon influent significativement sur toutes les variables étudiées. Pour le riz, des farines instantanées ont été obtenues avec des teneurs en lipides et amidon de 6,2 - 67 % et 8,2 - 59 %. L'extrusion de mélanges à base de maïs (blanc ou jaune), de mil et de sorgho ne permet pas d'obtenir des farines instantanées mais seulement des farines à cuisson rapide. De plus, des modifications de couleur indésirables ont été observées avec ces matières premières après cuisson-extrusion.

**Mots-clés :** Maïs, mil, sorgho, riz, indice d'instantanéité.

## Introduction

Les applications de la cuisson extrusion dans la transformation agro-alimentaire sont très variées (Linko *et al.*, 1981; Mercier 1994). D'un point de vue technologique, l'utilisation d'un cuiseur-extrudeur est particulièrement intéressante pour produire des aliments pour enfants car elle permet d'obtenir des farines instantanées ou à cuisson rapide (Della Valle *et al.*, 1981; Harper, 1981; Harper et Jansen, 1985; Mensa-Wilmot *et al.*, 2001a,2001b; Mouquet *et al.*, 2003), en réduisant les teneurs en certains facteurs antinutritionnels et la charge en microorganismes des matières premières (Cheftel, 1994; Alonso *et al.*, 2000; Abd El-Hady et Habiba, 2003).

La production de farines infantiles à partir de mélanges maïs-soja par cuisson-extrusion à faible coût a été proposée dès les années 80 (Del Valle *et al.*, 1981; Harper 1981). Au Vietnam, le *cuiseur-extrudeur à très faible coût* développé dans le cadre du programme Fasevie, initié en 1994 (Berger *et al.*, 2004; Bruyeron *et al.*, 2006), est issu d'un équipement préexistant au Vietnam au début des activités, qui a été adapté par les technologues du Gret (Groupe de Recherche et d'Echanges technologiques- France) et les chercheurs de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement- France) en collaboration avec les mécaniciens du CTC (*Center for Technology transfer and Consultancy on investment; Post Harvest Institute*), pour répondre aux spécificités de la production des farines infantiles. Depuis 1999, le projet Fasevie a mis en route la production de farines infantiles instantanées (*Favilo* et *Favina*) en utilisant ce type de cuiseur extrudeur. La promotion de ces farines auprès des enfants de 7 à 24 mois vise à lutter contre la malnutrition chez les nourrissons et les jeunes enfants dans les zones reculées du Vietnam. Le succès du projet Fasevie nous a conduits à envisager l'utilisation de ce type d'équipement avec de nouvelles matières premières pour la fabrication de farines infantiles dans d'autres contextes tels que ceux de l'Afrique subsaharienne, où les problèmes de malnutrition sont encore très préoccupants.

Au Burkina Faso, les matières premières amylacées les plus disponibles sur les marchés sont les sorghos rouge et blanc et le mil, cultivées traditionnellement, les maïs blanc et jaune, dont la culture s'est très largement développée ces 20 dernières années, et le riz (produit localement ou importé de Thaïlande). En 2007, la production de riz (paddy) a atteint 123 million de tonnes (MT) au Burkina Faso représentant ainsi la quatrième production de céréale du pays après le maïs (879 MT), le sorgho (1620 MT) et le mil (1104 MT) (FAO, 2008).

De nombreux travaux se sont intéressés à l'utilisation de la cuisson extrusion pour la fabrication de farines infantiles à partir de riz (Harper et Jansen, 1985; Mouquet *et al.*, 2003; Van Hoan *et al. in press*) ou à partir de maïs (Obatolu et Cole, 2000; Mensa-Wilmot *et al.*, 2001b; Reyes-Monero *et al.*, 2003). Du sorgho extrudé a aussi été utilisé pour préparer des farines infantiles dans certains pays africains (Malleshi *et al.*, 1996; Wambugu *et al.*, 1997; Egounlety, 2002). Dans le cas du mil, Malleshi *et al.* (1996) ont utilisé deux espèces de mil (*Eleusine coracana* et *Pennisetum glaucum*) pour fabriquer des farines infantiles instantanées. Une autre espèce de mil (*Setaria italica*) a été utilisée pour la fabrication de produits extrudés prêts à consommer (Ushakumari *et al.*, 2004). Mais l'application de la cuisson-extrusion pour la fabrication de farines infantiles à partir de mil et de sorgho semble encore limitée.

Pour ces raisons, avant d'envisager l'utilisation de *cuiseur-extrudeur à très faible coût* pour la production de farines infantiles au Burkina Faso, il était nécessaire d'étudier les principales caractéristiques des extrudats préparés à partir des matières premières disponibles dans ce pays et de les comparer à celles du riz.

## Matériels et méthodes

### Matières premières

Le riz (importé de Thaïlande), deux variétés de maïs cultivées localement (blanc ‘SR21’ et jaune ‘Espoir’), le mil, le sorgho blanc et le soja ont été achetés au marché de *Sankariaré* à Ouagadougou, Burkina Faso. Le mil, le sorgho et le soja ont été décortiqués à l’aide d’un décortiqueur à meule DMS 500 Electra (France). Le maïs a été passé pendant 5 minutes dans une dégermeuse de conception et de fabrication brésiliennes (Maquina d’Andrea), traitement qui permet, en fonction de son intensité, d’enlever les enveloppes et tout ou partie des germes. Les grains de maïs décortiqués résultants ont été utilisés tels quels pour préparer les mélanges.

La composition globale de ces céréales est donnée dans le tableau IV-2/1.

**Tableau IV-2/1:** Composition globale de différentes céréales et de soja testées en cuisson-extrusion au Burkina Faso.

	Teneur en matière sèche (g/100g MB)	Amidon total (g/100g MS)	Protéines (g/100g MS)	Lipides (g/100g MS)	Fibres (g/100g MS)	Cendres (g/100g MS)
Maïs blanc ‘SR21’ décortiqué	91,2	70,5	8,2	5,3	2,9	1,3
Maïs jaune ‘Espoir’ décortiqué	91,4	72,8	8,0	4,9	3,2	1,0
Mil décortiqué	91,9	68,9	7,5	5,6	2,4	0,9
Sorgho blanc décortiqué	92,3	71,0	11,1	5,2	5,0	1,3
Riz blanchi (Thaïlande)	90,7	88,8	6,7	0,1	0,3	1,1
Soja	94,8	0	42,7	23,7	4,0	5,5

### Méthodes

#### Préparation des mélanges avant extrusion

Les farines infantiles préparées par cuisson-extrusion sont composées d’un mélange de matières premières agricoles qui représente 77% de l’ensemble. Le reste, appelé « premix » est un mélange d’ingrédients quantitativement minoritaires, tels que le sucre, de la poudre de lait, du complément minéral et vitaminique, etc. La teneur en lipides cible de la farine étant fixée à 9,3 g pour 100g de MS (Bruyeron *et al.*, 2006), et le lait en poudre contenu dans le premix en apportant 1,4 g, 7,9 g de lipides doivent être apportés par les matières premières agricoles, qui doivent par conséquent avoir une teneur en lipides de 10,2 g pour 100 g de MS. Comme les lipides sont connus pour réduire la performance de la cuisson extrusion, en raison de leurs propriétés lubrifiantes, nous avons étudié le comportement en extrusion de mélanges céréales/soja en différentes proportions, la valeur maximale de teneur en lipides étant fixée à la valeur souhaitée pour la formule (10,2 g/100g MS). Trois niveaux de teneurs en lipides dans les mélanges ont été étudiés, différant par un intervalle de 2 g/100 g MS. Nous avons également tenu compte du fait que l’augmentation de la proportion de soja entraînait une

diminution passive de la teneur en amidon. Ainsi, pour chaque céréale étudiée, les mélanges de céréales et de soja ont été formulés afin d'obtenir les trois couples de teneurs en lipides et en amidon cibles suivants: 6,2/67 (LA1); 8,2/59 (LA2); et 10,2/51 (LA3), valeurs exprimées en pourcentage de la matière sèche (Tableau IV-2/2).

**Tableau IV-2/2:** Composition des mélanges préparés avec différentes teneurs en lipides et en amidon

	Caractéristiques des mélanges			Composition des mélanges	
	Lipides (g/100g MS)	Amidon (g/100g MS)	Code de proportion lipide/amidon	Céréale (g/100g MS)	Soja décortiqué (g/100g MS)
Maïs blanc 'SR21'	6,2	67	LA1	95,0	5,0
	8,2	59	LA2	84,2	15,8
	10,2	51	LA3	73,3	26,7
Maïs jaune 'Espoir'	6,2	67	LA1	93,0	7,0
	8,2	59	LA2	82,4	17,6
	10,2	51	LA3	71,7	28,3
Mil	6,2	67	LA1	96,7	3,3
	8,2	59	LA2	85,6	14,4
	10,2	51	LA3	74,6	25,6
Sorgho blanc	6,2	67	LA1	94,6	5,4
	8,2	59	LA2	83,8	16,2
	10,2	51	LA3	72,9	27,1
Riz "Thai"	6,2	67	LA1	74,1	25,9
	8,2	59	LA2	65,7	34,3
	10,2	51	LA3	57,2	42,8

Les mélanges ont tous été humidifiés avant cuisson-extrusion de manière à avoir une teneur en eau identique. Cette humidification a été réalisée par pulvérisation d'eau sur le mélange placé dans une bassine. La quantité d'eau à ajouter a été calculée en tenant compte de la teneur en matière sèche initiale des matières premières pour obtenir une teneur en eau initiale de 14 g/100 g de mélange. Après pulvérisation, les mélanges ont été laissés pendant 120 minutes dans un sachet en plastique fermé avant passage dans le cuiseur-extrudeur.

#### La cuisson-extrusion

Les essais de cuisson-extrusion ont été réalisés dans l'entreprise CTRAPA à Ouagadougou, à l'aide d'un cuiseur-extrudeur à très faible coût EX800 (CTC, Vietnam). Il s'agit d'un cuiseur-extrudeur mono-vis autogène fonctionnant avec une vis de 28 mm de diamètre. Le ratio longueur/diamètre est de 3,5 et la vitesse de la vis est d'environ 1500 tours par minute. La température de l'extrudeur n'est pas contrôlée et elle est mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde thermocouple NiCr-Ni MF 72 (SKG – Corée) positionné à la sortie de la filière. Pour chaque essai, 10 kg de mélange ont été préparés. Le débit d'alimentation du cuiseur-extrudeur a été fixé à 90 kg/h. A la sortie de la filière, les extrudats sont refroidis à température ambiante dans une bassine métallique. Les échantillons sont prélevés dans les extrudats résultant des 5 derniers kilogrammes de mélange de matières premières, supposés avoir des caractéristiques plus stables. Les extrudats sont ensuite réduits en farine à l'aide d'un broyeur à marteaux Electra (France) équipé d'un tamis en acier inoxydable ayant des fentes longitudinales de 0,5 mm de largeur et 7 mm de longueur. Les échantillons sont conditionnés dans des sacs en plastique aluminisés, et stockés à 4°C avant d'être analysés. Pour chaque mélange étudié, trois essais de cuisson-extrusion ont été réalisés lors de 3 jours différents.

## Méthodes d'analyses physicochimiques et biochimiques

### *Mesure de l'expansion des extrudats*

Le diamètre des extrudats est mesuré après refroidissement à température ambiante avec un pied à coulisse Vernier (précision 0,01 mm). Les valeurs retenues sont des moyennes de 15 valeurs mesurées sur trois extrudats (5 valeurs sont obtenues sur des portions différentes d'un même extrudat). A partir de ce diamètre, est calculé un indice d'expansion à l'aide de la formule suivante (Brümer *et al.*, 2002):

$$\text{Indice d'expansion} = (D_e/D_f)^2$$

Avec:  $D_e$ : Diamètre de l'extrudat (mm)

$D_f$ : Diamètre de la filière, soit 7 mm

### *Teneur en matière sèche*

Les teneurs en matière sèche sont déterminées par dessiccation de 5 à 10 g d'échantillon (graines, farines ou bouillies) dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (minimum 24 h). Toutes les mesures sont faites en double et la valeur moyenne est retenue.

### *Teneur en protéines*

La teneur en protéines des matières premières est déterminée par la méthode de Kjeldhal selon la norme NF V03-050 (AFNOR, 1970). Le facteur de conversion de l'azote en protéines de 6,25 est utilisé. Toutes les mesures sont faites en double et la valeur moyenne est retenue.

### *Teneur en lipides:*

Les teneurs en lipides des matières premières sont déterminées par méthode gravimétrique après extraction par l'éther de pétrole à l'aide d'un Soxtec System (Application Note Tectator n°1344, selon la méthode AOAC 2003.06). Toutes les mesures sont faites en double et la valeur moyenne est retenue.

La perte de lipides au cours de la cuisson-extrusion est calculée comme la différence entre la teneur en lipides des mélanges avant cuisson-extrusion (g/100g MS) et la teneur en lipides des extrudats (g/100g MS).

### *Teneur en fibres ADF:*

Les teneurs en fibres des matières premières sont déterminées par la méthode de Van Soest (1963) permettant de déterminer la teneur en lignine et en cellulose à l'aide d'un Dosi-fiber (Selecta, Barcelona, Spain). Lorsque leur teneur en lipides est supérieure à 5 g/100 g MS, les échantillons sont préalablement délipidés à l'acétone. Toutes les mesures sont faites en double et la valeur moyenne est retenue.

### *Teneur en cendres:*

Les teneurs en cendres des matières premières sont déterminées par calcination complète de l'échantillon au four à 530°C pendant 6 heures. Toutes les mesures sont faites en double et la valeur moyenne est retenue.

### *Teneur en amidon total:*

Les teneurs en amidon total sont déterminées sur les matières premières par les méthodes enzymatiques de Batey (1982) et Holmes *et al.* (1986).

### *Taux de gélatinisation*

L'amidon gélatinisé (susceptible à l'hydrolyse par l'amyloglucosidase) est dosé dans les farines d'extrudats par les méthodes proposées par Chiang et Johnson (1977) et Kainuma (1981). Le taux de gélatinisation (TG) de l'amidon correspond au pourcentage de la teneur en

amidon gélatinisé sur la teneur en amidon total. La valeur retenue est la moyenne des valeurs obtenues sur trois extrudats différents.

#### *Dosage de l'activité antitrypsique.*

L'activité antitrypsique des extrudats est déterminée selon une méthode colorimétrique adaptée de la méthode [AFNOR V18 \(1970\)](#): après une éventuelle délipidation (pour les échantillons ayant une teneur en lipides > 5 g/100 g MS), une prise d'essai finement broyée (<500 µm) est mise en suspension dans de l'acide chlorhydrique 0,0025 N. Des quantités croissantes de cette suspension sont ensuite mises en contact avec un excès de trypsine. Le réactif coloré, le chlorhydrate de N α-benzoyl D L arginine p-nitroanilide est alors ajouté. Après blocage de la réaction par de l'acide acétique, la coloration jaune, due à la formation de p-nitroaniline (complexe trypsine-BAPNA), est mesurée au spectrophotomètre à 410 nm. Toutes les mesures sont faites en double et la valeur moyenne est retenue.

### Mesures de la consistance

#### *Préparation des bouillies*

Les farines obtenues par broyage des extrudats peuvent être préparées sous forme de bouillies de deux manières différentes. La comparaison des caractéristiques rhéologiques des bouillies ainsi obtenues permet d'évaluer leur caractère instantané ([Mouquet et al., 2003](#)).

##### *\* par cuisson à ébullition (mode cuisson)*

La farine et l'eau sont mélangées dans une casserole en acier de 15 cm de diamètre. Cette casserole est ensuite posée sur une plaque chauffante (Ceran ®, Schott, Type CK112) réglée en position 7. Le mélange est porté à 85°C correspondant à la température d'apparition des premières bulles, puis maintenu à ébullition pendant 5 minutes tout en remuant. Après cuisson, la bouillie est laissée à refroidir jusqu'à 45°C, température à laquelle sont effectuées les mesures de viscosité et de teneur en matière sèche (TMS).

##### *\* par simple addition d'eau à 75°C (mode instantané)*

La farine et l'eau préalablement préchauffée à 75°C sont mélangées dans une casserole dans des proportions calculées en fonction de la teneur finale en matière sèche souhaitée pour la bouillie. La bouillie ainsi obtenue est remuée et laissée à refroidir jusqu'à 45°C, température à laquelle sont effectuées les mêmes mesures que pour les bouillies préparées par cuisson à ébullition.

#### *Mesure de la viscosité apparente*

La viscosité apparente des bouillies à la vitesse de cisaillement de 83s<sup>-1</sup> a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre rotatif HAAKE Viscotester VT 550 (Rheo, Champlan, France), équipé d'un dispositif de mesure SV-DIN. Pendant la mesure, la température de la bouillie est maintenue à 45°C grâce à une enceinte thermostatée. La viscosité est enregistrée après 10 minutes de rotation du mobile selon la méthode proposée par [Mouquet et Trèche \(2001\)](#). La valeur obtenue retenue est la moyenne de trois valeurs obtenues sur trois extrudats

Pour chaque farine, au moins deux bouillies ayant des teneurs en matière sèche inférieure et supérieure à 16,0 g de MS pour 100 g de bouillie sont préparées. La viscosité apparente de la bouillie à une TMS de 16,0 g MS/100 g est déterminée par interpolation.

#### *Evaluation de l'instantanéité de farines extrudées*

Le caractère instantané des farines d'extrudats a été vérifié par la méthode proposée par [Mouquet et al. \(2003\)](#), consistant à comparer les viscosités apparentes de bouillies de même teneur en matière sèche (16,0 g MS/100 g de bouillie) préparées par cuisson à ébullition pendant 5 minutes (mode cuisson) à celle de bouillies préparées par addition d'eau à 75°C

(mode instantané). Pour faciliter l'analyse des résultats, nous proposons l'utilisation d'un 'indice d'instantanéité' calculé comme la différence de viscosité apparente entre les deux bouillies:

$$\text{Indice d'instantanéité} = \mu_a - \mu_c$$

Avec:  $\mu_a$ : Viscosité apparente de la bouillie préparée par ajout d'eau à 75°C

$\mu_c$ : Viscosité apparente de la bouillie préparée par cuisson à ébullition pendant 5 min.

Une farine est considérée comme « instantanée » si son indice d'instantanéité est supérieur ou égal à 0.

### Analyse des données

Les moyennes obtenues sont comparées par analyse de variance (ANOVA) en utilisant le test de Fisher au niveau de signification de 0,05. Toutes les analyses statistiques sont réalisées à l'aide du logiciel Statgraphics Plus 5.1 (Virginia, USA).

## **Résultats et discussion**

### **Expansion des extrudats**

En cuisson-extrusion, lorsque le mélange de matières premières est entraîné par la vis sans fin dans le fourreau, la température de l'eau qu'il contient, monte et peut rapidement dépasser 100°C tout en restant en phase liquide, en raison de la pression élevée. En sortie de filière, la pression chute brutalement pour revenir à la pression atmosphérique (Colonna et Buléon, 1994). A ce moment, l'eau passe instantanément en phase vapeur et forme des bulles visibles dans le produit extrudé qui fige sous les effets simultanés de la déshydratation et du refroidissement. L'importance de l'expansion est variable en fonction de nombreux paramètres tels que la teneur en eau initiale (Iwe et Ngoddy, 1998; Guha et Ali, 2006; Singh *et al.*, 2007), la teneur en amylose (Charbonnière *et al.*, 1973; Iwe et Ngoddy, 1998), la teneur en lipides (Faubion et Hosene, 1982; Bhatnagar *et al.*, 1994), la granulométrie des matières premières (Desrumaux *et al.*, 1998, Mathew *et al.*, 1999), la température (Mercier et Feillet, 1975; Altan *et al.*, 2008), le débit d'alimentation (Baik *et al.*, 2004; Ding *et al.*, 2005), la vitesse de rotation de la vis (Ali *et al.*, 1996; Ainsworth *et al.*, 2007), ou encore le diamètre de la filière (Sokhey *et al.*, 1997; Choudhury et Gautam, 1998).

L'expansion des extrudats est très variable à la fois selon la nature de la source amyliacée utilisée et le couple teneur en lipides/teneur en amidon LA (Tableau IV-2/3). Les extrudats de riz et de maïs préparés avec une teneur en lipides faible et une teneur en amidon élevée (LA1) ont un indice d'expansion plus important que ceux de mil et de sorgho. Pour LA2, le taux d'expansion des extrudats de riz reste élevé, alors que ceux de maïs blanc et jaune diminuent considérablement. Les indices d'expansion des extrudats de mil et de sorgho sont faibles et ne varient pas significativement avec les teneurs en lipides et en amidon. De plus, les extrudats de mil présentent une couleur verdâtre peu engageante. L'expansion des extrudats des mélanges à base de maïs obtenue dans cette étude est plus faible que celle des extrudats de maïs concassé (tout seul), observée par Desrumaux *et al.* (1998). La différence de taille de particules et du couple de teneur en lipides/teneur en amidon peuvent expliquer ce phénomène. Mathew *et al.* (1999) ont également observé une expansion plus faible pour les extrudats de mil que pour ceux de maïs.

Quelle que soit la céréale utilisée pour le mélange, l'expansion des mélanges préparés à une teneur élevée en lipides et une teneur plus faible en amidon (LA3) est relativement faible.

**Tableau IV-2/3:** Indice d'expansion des extrudats préparés à partir de différentes sources amylacées

Lipides/ Amidon	Source amylacée					P
	<i>Maïs blanc</i>	<i>Maïs jaune</i>	<i>Mil</i>	<i>Sorgho</i>	<i>Riz</i>	
LA1	5,2±0,5 <sup>c**</sup>	4,2±0,3 <sup>b**</sup>	2,0±0,1 <sup>a**</sup>	2,3±0,5 <sup>a**</sup>	4,0±0,4 <sup>b**</sup>	<0,0001
LA2	2,4±0,5 <sup>b*</sup>	1,8±0,1 <sup>a*</sup>	1,7±0,2 <sup>a*</sup>	1,6±0,1 <sup>a*</sup>	3,8±0,3 <sup>c**</sup>	<0,0001
LA3	1,7±0,1 <sup>a*</sup>	1,7±0,1 <sup>a*</sup>	1,6±0,1 <sup>a*</sup>	1,5±0,1 <sup>a*</sup>	2,0±0,2 <sup>b*</sup>	0,0167
P	0,0001	0,0005	0,0227	0,0313	0,0028	

Sur une même ligne, des lettres a,b,c,d différentes ou dans une même colonne, des astérisques \*,\*\*,\*\*\* indiquent l'existence d'une différence significative.

Bouvier (1997) a constaté que l'expansion des extrudats définit la texture des produits extrudés et qu'il est par conséquent important de l'optimiser. Même après broyage en farine, le niveau d'expansion a une influence: plus l'expansion est importante, et plus faible est la densité apparente de la farine, ce qui a des conséquences sur les volumes d'emballage. La diminution de la granulométrie du mélange de matières premières peut être une solution pour augmenter l'expansion des extrudats. Garber *et al.* (1995), Desrumaux *et al.* (1998), Mathew *et al.* (1999) ont montré que l'expansion des extrudats de maïs augmente lorsque la taille des particules diminue. Dans notre étude, la granulométrie du maïs aurait pu être diminuée avant cuisson-extrusion par broyage, mais dans le cas du mil et du sorgho, dont les grains ont déjà un faible diamètre, la réduction de taille est difficilement envisageable.

Au cours de la cuisson-extrusion, les lipides ont une action lubrifiante, qui réduit la friction entre les particules du mélange et la vis et donc l'échauffement à l'intérieur de la vis. La température du fourreau de l'extrudeur a une influence importante sur l'expansion des extrudats. Plus la température est élevée, plus l'expansion est importante (Ding *et al.*, 2006). L'augmentation de la teneur en lipides dans différents mélanges à base de blé ou de maïs s'accompagne une diminution de l'expansion des extrudats (Bhatnagar et Hanna, 1994). Selon Wu *et al.* (2007), l'augmentation du taux d'incorporation de graines de lin, une graine contenant 45% de lipides, s'accompagne une baisse de l'expansion d'extrudats à base de maïs.

La teneur en amidon a également une influence sur l'expansion des extrudats. Plus elle est élevée, plus l'expansion est importante. Ce phénomène a été observé lors de l'extrusion de maïs (Suknark *et al.*, 1997; Desrumaux *et al.*, 1999), de pomme de terre (Iwe et Ngoddy, 1998), de manioc et de blé (Hashimoto *et al.*, 2002) et de riz (Van Hoan *et al. in press*).

### Teneur en eau des extrudats

Un des effets positifs de la cuisson-extrusion est de réduire la teneur en eau, en raison de la perte en eau par vaporisation instantanée en sortie de filière. Dans cette étude, la réduction de teneur en eau au cours de la cuisson-extrusion est d'environ 7 g pour 100 g de mélange, quelle que soit la nature de la source amylacée. La teneur en eau finale des extrudats est d'environ 6,8 ± 0,5 g pour 100g d'extrudat.

L'augmentation la teneur en eau du mélange avant extrusion entraîne une augmentation de teneur en eau des extrudats (Onyango *et al.*, 2004). Afin d'assurer la bonne conservation de la farine durant le stockage, la teneur en eau finale des produits doit être la plus faible possible, et normalement inférieure à 7%. Pour augmenter la teneur en matière sèche des extrudats, il est souvent nécessaire d'appliquer un séchage après cuisson-extrusion (Jin *et al.*, 1995; Guha

*et al.*, 1998; Mensa-Wilmot *et al.*, 2001a; Hagenimana *et al.*, 2006). Ce traitement supplémentaire augmente le coût de fabrication. Dans cette étude, la teneur en eau des extrudats (variable de 6,3 à 7,1 %) est suffisamment basse pour permettre une bonne conservation des farines

### Perte de lipides au cours de la cuisson-extrusion

Pendant la cuisson-extrusion de mélanges riches en lipides, une certaine quantité de lipides est perdue sous forme d'huile qui s'écoule en sortie de filière (Camire, 2000; De Pilli *et al.*, 2005). Les quantités de lipides perdues au cours de la cuisson-extrusion à l'occasion de nos essais sont très variables et ne semblent pas liées à la teneur en lipides du mélange (pas de différence significative entre LA1 et LA3 (Tableau IV-2/4). Dans le cas des extrudats préparés à LA3, les pertes de lipides des extrudats de riz et de mil sont significativement inférieures à celle des extrudats de sorgho.

**Tableau IV-2/4:** Perte en lipides des extrudats pendant l'extrusion (g/100g MS)

Lipides/ Amidon	Source amylacée					P
	Maïs blanc	Maïs jaune	Mil	Sorgho	Riz	
LA1	0,64±0,06	0,23±0,23	0,08±0,13	0,41±0,21	0,22±0,33	0,06
LA3	0,35±0,09 <sup>ab</sup>	0,36±0,10 <sup>ab</sup>	0,02±0,03 <sup>a</sup>	0,75±0,51 <sup>b</sup>	0,01±0,01 <sup>a</sup>	0,02

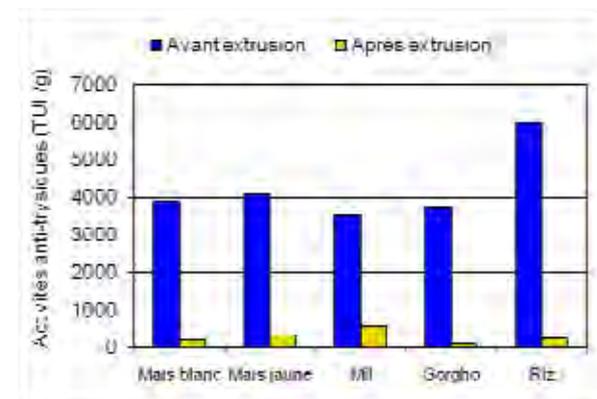
Sur une même ligne, des lettres différentes indiquent l'existence d'une différence significative

Les pertes de lipides observées dans notre étude sont nettement moins importantes que celles obtenues lors d'une étude précédente réalisée avec des mélanges de riz, de soja et d'huile de soja (Van Hoan *et al.*, *in press*), ce qui peut être dû au fait que les lipides présents dans les graines des matières premières sont plus difficiles à extraire que lorsqu'ils sont ajoutés au mélange sous forme d'huile.

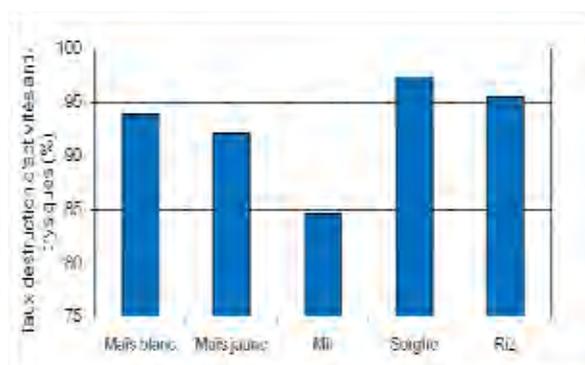
### Réduction de l'activité antitrypsique

L'importance de l'activité antitrypsique des mélanges est tout d'abord liée au taux d'incorporation de soja. Cette légumineuse est en effet riche en facteurs antitrypsiques qui réduisent la digestibilité des protéines. Seules les activités antitrypsiques des mélanges préparés avec les plus grandes proportions de soja (LA3), les plus à risque, ont été mesurées. Avant cuisson-extrusion, les activités antitrypsiques variaient de 3 640 à 5 990 TUI/g de matière sèche (Figure 1). Ces valeurs sont relativement faibles ce qui est dû à la faible activité antitrypsique (13 695 TUI/g MS) du soja utilisé dans cette étude. Mouquet *et al.* (2003), avec la même méthode d'analyse, ont trouvé une activité antitrypsique d'environ 40 000 TUI/g de MS dans une variété de soja en provenance du Vietnam. Cette différence peut être liée au génotype d'origine ou à la température ambiante élevée au Burkina Faso (30-40°C), qui pourrait entraîner une réduction importante de l'activité antitrypsique durant le stockage. L'activité antitrypsique plus élevée des mélanges à base de riz est due à la quantité plus importante de soja ajouté (42,8 g/100 g MS) pour atteindre la teneur en lipides de 10,2 g/100 g de MS (LA3). Dans tous les cas, le traitement de cuisson-extrusion entraîne une réduction importante de l'activité antitrypsique: 92 à 97% des facteurs antitrypsiques sont détruits au cours de la cuisson-extrusion dans les mélanges à base de maïs blanc, maïs jaune, sorgho et riz (Figure 2). Pour le mélange à base de mil, le taux de destruction des facteurs antitrypsiques est plus faible (85%) par rapport à ceux des autres extrudats mais reste égal à la valeur maximale observée par Mouquet *et al.* (2003). La température élevée atteinte au cours de la cuisson-extrusion (de 160 à 170°C, mesurée en sortie de filière) est à l'origine de la destruction importante des facteurs antitrypsiques, thermolabiles. Abd El-Hady et Habiba (2003), lors d'essais sur des mélanges contenant des haricots, ont observé que l'extrusion à

140-180°C entraîne la destruction de plusieurs facteurs antinutritionnels (acide phytique, composés phénoliques tannins et facteurs antitrypsiques) avec une destruction totale des facteurs antitrypsiques à 180°C.



**Figure IV-2/1 :** Activités antitrypsiques des mélanges avant et après la cuisson-extrusion



**Figure IV-2/2:** Taux de réduction de l'activité antitrypsique au cours de la cuisson-extrusion

Selon [Alonso et al. \(2000\)](#), la cuisson-extrusion est le traitement technologique le plus efficace pour détruire les inhibiteurs de trypsine, de la chymotrypsine et des  $\alpha$ -amylases ainsi que l'activité hémagglutinine, sans modifier le contenu en protéines. Le passage dans le cuiseur-extrudeur à très faible coût a donc permis la destruction quasi-totale des facteurs antitrypsiques conférant ainsi aux extrudats des teneurs résiduelles en facteurs antitrypsiques extrêmement faibles.

### Taux de gélatinisation

L'influence de la nature de la source amylacée ainsi que l'effet des teneurs en lipides et amidon des mélanges sur le taux de gélatinisation (TG) des extrudats sont présentés dans le tableau IV-2/5. Ces deux facteurs ont un effet significatif sauf pour le riz, pour lequel quel que soit le niveau de teneurs en lipides et amidon, les TG des mélanges à base de riz sont très élevés et proches de 100%. On observe également que les TG des mélanges à base de maïs blanc sont toujours significativement plus élevés que ceux des mélanges à base de maïs jaune. Les TG des extrudats à base de maïs jaune, mil et sorgho sont similaires et varient d'environ 76 % (LA3) à environ 89 % (LA1), indiquant l'existence d'une part résiduelle d'amidon non gélatinisé d'environ 24 et 10 % respectivement.

Pour les matières premières autres que le riz, le TG diminue lorsque la teneur en lipides du mélange augmente et que sa teneur en amidon diminue. Ceci peut tout d'abord s'expliquer par l'effet lubrifiant des lipides entraînant une baisse de la température dans l'extrudeur et une efficacité moindre du traitement de cuisson-extrusion conformément au phénomène déjà observé par [Van Hoan et al. \(in press\)](#). Mais, une autre explication pourrait être l'augmentation de la proportion de matières premières riches en amidon dans les mélanges avant extrusion qui est connu pour s'accompagner d'une augmentation du TG des extrudats ([Iwe et al., 1998](#); [Iwe et Ngoddy, 1998](#); [Mouquet et al., 2003](#)).

Selon [El-Dash et al. \(1984\)](#), la rupture des granules d'amidon dépend du type d'amidon. Par exemple, les TG élevés des extrudats de riz peuvent être dus à la petite taille des granules d'amidon de riz (2-8 $\mu$ m) qui favorise le transfert de chaleur augmentant ainsi leur vitesse de fusion et les rendant plus fragiles à la température et au cisaillement ([Frame, 1994](#)).

**Tableau IV-2/5:** Taux de gélatinisation de l'amidon d'extrudats de mélanges à base de différentes sources amylacées

Lipides/ Amidon	Taux de gélatinisation (%)					P
	Source amylacée					
	<i>Maïs blanc</i>	<i>Maïs jaune</i>	<i>Mil</i>	<i>Sorgho</i>	<i>Riz</i>	
LA1	93,8±1,5 <sup>b**</sup>	89,8±1,6 <sup>a**</sup>	88,6±2,4 <sup>a***</sup>	89,6±3,1 <sup>a**</sup>	100±0,0 <sup>c</sup>	0,0002
LA2	91,4±1,1 <sup>cd**</sup>	77,1±4,4 <sup>a*</sup>	85,5±0,5 <sup>bc**</sup>	79,8±5,3 <sup>ab*</sup>	95,8±6,0 <sup>d</sup>	0,0019
LA3	82,7±1,3 <sup>c*</sup>	78,5±0,5 <sup>b*</sup>	74,6±0,7 <sup>a*</sup>	76,3±2,8 <sup>ab*</sup>	93,1±3,4 <sup>d</sup>	<0,0001
P	0,0001	0,002	0,0001	0,0145	0,19	

Sur une même ligne, des lettres a,b,c,d différentes ou dans une même colonne, des astérisques\*, \*\*, \*\*\* indiquent l'existence d'une différence significative.

La gélatinisation est un effet important de la cuisson-extrusion sur les matières premières riches en amidon, augmentant ainsi sa digestibilité (Harper, 1981; Ding *et al.*, 2006). Dans notre étude, l'amidon des extrudats de riz préparés à faible teneur en lipides et haute teneur en amidon (LA1) atteint la gélatinisation totale, ce qui confère à la farine un facteur-clé de l'instantanéité. Les autres extrudats à base de riz (LA2 et LA3) ainsi que les extrudats des mélanges à base de maïs blanc préparés à LA1 et LA2 ont également un TG élevé (> 90 %) qui permet, étant donné la variabilité de la mesure du TG, d'envisager de les utiliser pour la production de farines instantanées. Pour les autres extrudats, la gélatinisation de l'amidon n'est que partielle et nécessite une cuisson à ébullition rapide, au moment de la préparation de bouillies, avant de les donner aux enfants.

### Viscosité apparente des bouillies

La viscosité est une propriété fonctionnelle importante des aliments. Elle influe sur la sensation de la langue et la qualité texturale des aliments préparés sous forme liquide. En ce qui concerne les bouillies pour les jeunes enfants, la viscosité est un facteur important maintenant largement reconnu comme influant sur le niveau d'ingéré énergétique (Trèche, 1996; WHO, 1998; WHO, 2003). La cuisson-extrusion figure parmi les méthodes utilisées pour réduire la viscosité des bouillies préparées à teneur élevée en matière sèche, grâce à la rupture des chaînes d'amidon (dextrinisation) obtenue sous l'effet du cisaillement lors du passage dans le cuiseur-extrudeur. Son efficacité à réduire la viscosité a ainsi été démontrée sur des bouillies à base de riz (Hagenimana *et al.* 2006), sur des bouillies fermentées de type *uji* à partir de maïs, mil, sorgho et manioc (Onyango *et al.* (2004), ou encore sur des bouillies à base de mil, en comparaison avec des bouillies préparées à partir de farines transformées par floconnage, séchage sur rouleaux, ou soufflage (Ushakumari *et al.*, 2000). Selon Guha *et al.* (1998), la viscosité des bouillies de riz extrudé diminue avec l'intensité du traitement de cuisson-extrusion (augmentation de température de 80 à 120°C et de la vitesse de la vis).

Les viscosités apparentes des bouillies préparées par cuisson à ébullition pendant 5 minutes à partir des farines issues des différents extrudats sont présentées dans le tableau IV-2/6. A teneurs en amidon égales, l'obtention d'une viscosité plus faible indique qu'un cisaillement plus intense au cours de la cuisson-extrusion a entraîné une dextrinisation plus importante de l'amidon. On observe que la nature de la source amylacée utilisée ainsi que le couple de teneurs en lipides et en amidon ont une influence significative sur la viscosité apparente. La viscosité des bouillies à base de riz, quel que soit LA, est significativement inférieure à celle des bouillies de maïs blanc, de sorgho ou de mil. Les bouillies à base de maïs jaune ont également généralement une viscosité apparente plus faible relativement aux bouillies à base des autres matières premières. Les bouillies à base de mil sont de couleur foncée, risquant de compromettre leur acceptabilité.

Notons que dans notre étude, il était impossible de mesurer la viscosité des bouillies préparées à la même concentration (16g DM/100g) à partir des farines de mélanges non-extrudés, car ces bouillies étaient beaucoup trop épaisses.

**Tableau IV-2/6:** Influence de la nature de la source amylicée et du couple teneurs en lipides et en amidon sur la viscosité apparente (Pa.s) de bouillies préparées par cuisson à une teneur en matière sèche de 16 g MS / 100 g de bouillie.

Lipides /Amidon	Viscosité apparente à 83 s <sup>-1</sup> (Pa.s)					P
	Source amylicée					
	<i>Maïs blanc</i>	<i>Maïs jaune</i>	<i>Mil</i>	<i>Sorgho</i>	<i>Riz</i>	
LA1	1,3±0,1 <sup>b*</sup>	1,3±0,2 <sup>ab*</sup>	2,1±0,1 <sup>c*</sup>	2,1±0,1 <sup>c*</sup>	1,1±0,1 <sup>a*</sup>	<0,0001
LA2	2,4±0,4 <sup>c**</sup>	1,9±0,3 <sup>b**</sup>	2,6±0,1 <sup>c**</sup>	2,3±0,1 <sup>c*</sup>	1,1±0,1 <sup>a*</sup>	0,0001
LA3	2,9±0,3 <sup>b**</sup>	2,1±0,006 <sup>a**</sup>	2,8±0,3 <sup>b**</sup>	2,9±0,4 <sup>b**</sup>	1,7±0,3 <sup>a**</sup>	0,0003
P	0,0017	0,0064	0,0049	0,0127	0,0197	

Sur une même ligne, des lettres a,b,c,d différentes ou dans une même colonne, des astérisques \*, \*\*, \*\*\* indiquent l'existence d'une différence significative.

Dans la littérature, de nombreuses données de viscosité de bouillies sont disponibles, mais elles ne sont pas comparables car mesurées dans des conditions différentes et avec différents équipements (Mouquet et Trèche, 2001). Ces auteurs ont proposé, pour la même méthode de mesure que celle utilisée dans notre étude, un domaine d'acceptabilité de 1 à 3 Pa.s pour une bouillie destinée aux jeunes enfants. Les valeurs obtenues pour les bouillies préparées par cuisson sont bien dans cette plage. L'augmentation de la teneur en lipides, bien qu'elle soit liée à une diminution de la teneur en amidon, entraîne d'une manière générale une augmentation de la viscosité des bouillies. Iwe *et al.* (1998) ont aussi observé une diminution de la viscosité des bouillies lors d'une augmentation de la proportion de patate douce dans des mélanges patate douce/soja (de 60 à 100%). Cela s'explique par l'effet lubrifiant des lipides qui diminue l'intensité du cisaillement et, par conséquent, le niveau de dextrinisation de l'amidon.

### Caractère instantané des farines

Les viscosités des bouillies préparées selon le mode instantané (par ajout d'eau chaude) ont également été mesurées et l'indice d'instantanéité, défini comme la différence entre viscosité apparente des bouillies préparées selon les deux modes de préparation est présenté dans le tableau IV-2/7.

Seules les farines d'extrudats à base de riz préparés à haute teneur en amidon et faible teneur en lipides (LA1 et LA2) ont le caractère instantané. Pour ces deux couples de teneurs en lipides et amidon, les viscosités de bouillies préparées par cuisson et par ajout d'eau à 75°C sont similaires, ce qui donne un indice d'instantanéité allant de -0,2 à +0,4. Pour tous les autres essais, l'indice d'instantanéité est inférieur à 0, indiquant la non-instantanéité des farines. En effet, une valeur inférieure à 0 indique qu'une fraction d'amidon non gonflée après cuisson-extrusion poursuit son gonflement au cours de la préparation par cuisson conduisant à une bouillie de viscosité plus élevée.

La proportion lipides/amidon influe significativement sur l'indice d'instantanéité. Pour toutes les sources amylicées étudiées, l'augmentation de la teneur en lipides et la diminution de teneur en amidon s'accompagnent une diminution de l'indice d'instantanéité. Cependant, l'effet du niveau de LA est variable et dépend de la nature de la source amylicée. Pour le riz, l'indice d'instantanéité des extrudats préparés à LA3 est très faible et traduit la non-instantanéité de la farine, malgré son taux de gélatinisation élevé (>93%).

**Tableau IV-2/7:** Indice d'instantanéité des farines obtenues à partir d'extrudats de mélanges contenant différentes sources amylacées.

Indice d'instantanéité ( $\mu_{\text{addition d'eau chaude}} - \mu_{\text{cuisson}}$ ) en Pa.s						
Lipides/ Amidon	Source amylacée					P
	<i>Maïs blanc</i>	<i>Maïs jaune</i>	<i>Mil</i>	<i>Sorgho</i>	<i>Riz</i>	
LA1	-0,8±0,1 <sup>b*</sup>	-0,9±0,2 <sup>b*</sup>	-1,5±0,2 <sup>c*</sup>	-1,5±0,2 <sup>c*</sup>	-0,2±0,1 <sup>a*</sup>	<0,0001
LA2	-1,9±0,2 <sup>bc**</sup>	-1,6±0,2 <sup>b**</sup>	-2,3±0,1 <sup>d**</sup>	-2,1±0,1 <sup>cd**</sup>	0,4±0,3 <sup>a*</sup>	<0,0001
LA3	-2,6±0,3 <sup>b***</sup>	-1,7±0,1 <sup>a**</sup>	-2,8±0,3 <sup>b***</sup>	-2,7±0,4 <sup>b***</sup>	-1,35±0,2 <sup>a**</sup>	0,0001
P	0,0001	0,0031	0,0001	0,0034	0,0002	

Sur une même ligne, des lettres a,b,c,d différentes ou dans une même colonne, des astérisques \*,\*\*,\*\*\* indiquent l'existence d'une différence significative.

L'instantanéité est une caractéristique importante car elle décide de mode d'utilisation de la farine. Pour une farine instantanée, un simple ajout d'eau chaude suffit pour préparer une bouillie prête à donner aux enfants. Pour une bouillie à cuire, la préparation demande plus de temps. Dans certains contextes tels que celui du Vietnam, les mères sont demandeuses de farines instantanées car elles ont souvent à disposition des thermos remplis d'eau chaude pour la préparation du thé. Au Burkina Faso, il existe une réelle culture de cuisson des produits alimentaires, et une enquête réalisée à Ouagadougou en 2003 a montré que les mères préfèrent cuire les bouillies qu'elles préparent pour leurs enfants (Hervé et Mouquet, communication personnelle).

Les résultats de notre étude montrent que les extrudats à base de riz préparés à des couples de teneurs en lipides et amidon de 6,2 et 67%, ou 8,2 et 59% (LA1 et LA2) ont des caractéristiques de farine instantanée (TG  $\approx$  100%; indices d'instantanéité très proches de 0). La viscosité de bouillies préparées à 16 g MS/100g à partir de ces deux extrudats est faible, ce qui indique qu'elles peuvent être préparées à plus haute concentration et par conséquent à une densité énergétique plus élevée ce qui est un avantage dans le cas d'aliments de complément destinés aux jeunes enfants.

## Conclusion

Parmi les quatre sources amylacées étudiées, le riz est la matière première qui permet l'obtention d'extrudats avec le CE-TFC ayant les caractéristiques les plus intéressantes, adaptables en fonction du contexte pour la production de farines infantiles instantanées ou à cuisson rapide, par simple modulation des teneurs en lipides et en amidon. Les extrudats de maïs (blanc ou jaune) préparés à faible teneur en lipides et haute teneur en amidon (LA=6,2/67%) possèdent certaines caractéristiques similaires à celles des extrudats de riz. Cependant, les mesures de viscosité montrent que le traitement par le CE-TFC des mélanges à base de maïs ne permet pas d'obtenir de farines tout à fait instantanées, et que les bouillies doivent être préparées avec un traitement rapide de cuisson à ébullition. Par rapport aux extrudats des mélanges à base de riz, les extrudats des mélanges à base de sorgho et de mil présentent une faible expansion et une gélatinisation partielle de l'amidon, et donnent des bouillies dont la viscosité est relativement élevée, indiquant que ces céréales sont moins bien adaptées à la transformation par le CE-TFC. Ainsi, si ces expérimentations montrent la faisabilité de la production de farines infantiles à cuisson rapide à base de riz ou de maïs en utilisant un CE-TFC dans un contexte tel que celui du Burkina Faso, celle de farine infantiles à base de mil et de sorgho nécessite encore la réalisation d'un travail de mise au point supplémentaire.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier des Ambassades de France au Vietnam et au Burkina Faso dans le cadre d'un transfert de technologie organisé par le Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques (GRET) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) entre le programme Fasevie au Vietnam et le programme Nutrifaso au Burkina Faso.

## Références

- Abd El-Hady E.A., Habiba R.A, (2003). Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 36, 285–293.
- Agence Française de Normalisation (AFNOR) 1997. Dosage des inhibiteurs trypsiques. Norme XP V18-202.
- Agence Française de Normalisation-AFNOR (1970). Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode Kjeldahl (produits agricoles alimentaires). Standard NF V 03-050.
- Ainsworth P., Ibanoglu S., Plunkett A., Ibanoglu E., Stojceska V. (2007). Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the selected physical and nutritional properties of an extruded snack. *Journal of Food Engineering* 81, 702–709.
- Ali Y., Hanna M.A, Chinnaswamy R., (1996). Expansion characteristics of extruded corn grits. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 29, 702–707.
- Alonso R., Aguirre A., Marzo F., (2000). Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chemistry* 68, 159-165.
- Altan A., McCarthy K.L., Maskan M. (2008). Evaluation of snack foods from barley–tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering* 84(2), 231–242.
- Batey I.L. (1982). Starch analysis using thermostable  $\alpha$ -amylase. *Starch* 4, 125-128.
- Berger J., Lailou A., Khan N.C., Monvois C., Salvignol B., Trèche S. (2004). Fasevie: une solution originale au problème de la malnutrition infantile au Vietnam. *Les cahiers de la Coopération française au Vietnam 2004*, N°1: 1-30. <http://www.ambafrance-vn.org>
- Bhatnagar S., Hanna, M.A. (1994). Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal Chemistry* 71, 582-587.
- Bouvier J.M. (1997). Melt expansion in extrusion-cooking. *Feed Technology* 1(2), 13-15
- Brümmer B., Meuser F., Lengerich D., Niemann, C. (2002). Expansion and functional properties of corn starch extrudates related to their molecular degradation, product temperature and water content. *Starch* 54, 9-15.
- Bruyeron O., Khan N.C., Berger J., Salvignol B., Monvois C., Trèche S. (2006). Alimentation infantile au Vietnam. Dix ans d'actions et d'enseignements du programme Fasevie. Collection Etudes et Travaux GRET Eds.
- Camire M.E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In *Extruders in Food Applications* (M.N. Riaz, ed.) pp. 127–147, Technomic Publishing Co.Inc. Lancaster, PA.
- Cheftel J.C. (1994). Destruction de microorganismes par cuisson- extrusion. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Dela Valle), pp. 230-250, Technique& Documentation- Lavoisier.
- Chiang C.J., Johnson J.A. (1977). Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-tuluidine reagent. *Cereal Chemistry* 54, 429-435

- Choudhury G.S., Gautam A. (1998). Comparative study of mixing elements during twin-screw extrusion of rice flour. *Food Research International* 31, 7-17.
- Colonna P., Buléon A. (1994). Transformations structurales de l'amidon. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Dela Valle), pp. 17-43, Technique & Documentation- Lavoisier.
- De Pilli T., Severini C., Baiano A., Derossi A., Arhaliass A., Legrand J. (2005). Effects of operating conditions on oil loss and properties of products obtained by co-rotating twin-screw extrusion of fatty meal: Preliminary study. *Journal of Food Engineering* 70, 109–116.
- Del Valle F.R., Villanueva H., Reyes-Govea J., Escobedo M., Bourges H., Ponce J., Munoz M.J. (1981). Development, evaluation and industrial production of a powdered soy-oats infant formula using a low-cost extruder. *Journal of Food Science* 46(1), 192–197.
- Desrumaux A., Bouvier J.M., Burri J. (1998). Corn grits particle size and distribution effects on the characteristics of expanded extrudates. *Journal of Food Science* 63(5), 857–863.
- Ding Q., Ainsworth P., Plunkett A., Tucker G., Marson H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering* 73, 142-148.
- Ding Q., Ainsworth P., Tucker G., Marson H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering* 66, 283-289.
- Egounlety M. (2002). Production of legume-fortified weaning foods. *Food Research International* 35, 233-237.
- FAO (2008). Agricultural data: FAOSTAT. (consulté en juillet 2008)  
<http://faostat.fao.org/faostat/default.jsp>
- Faubion J.M., Hoseney R.C. (1982). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. *Cereal Chemistry* 59(6), 529-533.
- Frame N.D. (1994). The Technology of Extrusion Cooking. ed. N. D. Frame. pp.1-51. Blackie Academic & Professional, London.
- Garber B.W., Hsieh F., Huff H.E. (1997). Influence of particle size on the twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chemistry* 74(5), 656-661.
- Guha M., Ali S.Z. (2006). Extrusion cooking of rice: Effect of amylose content and barrel temperature on product profile. *Journal of Food Processing and Preservation* 30(6), 706–716.
- Guha M., Ali S.Z., Bhattacharya S. (1998). Effect of barrel temperature and screw speed on rapid viscoanalyser pasting behaviour of rice extrudate. *International Journal of Food Science & Technology* 33(3), 259-266.
- Hagenimana A., Ding X., Fang T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science* 43, 38–46.
- Harper J.M. (1981). Extrusion of starch and starchy materials. In *Extrusion of Foods*, Vol 2 (J.M. Harper, ed.), pp. 41–60, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Harper J.M., Jansen G.R. (1985). Production of nutritious precooked foods in developing countries by low cost extrusion technology. *Food reviews International* 1, 27-97.
- Hashimoto J.M., Nabeshima E.H., Cintra H.S., Dias A.R.G., Bustos F.M., Chang Y.K. (2002). Effect of processing conditions on some functional characteristics of extrusion-cooked cassava starch/wheat gluten blends. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 924-930.
- Holmes J., Bjöck I., Drews A, Asp N. (1986). A rapid method for the analysis of starch. *Starch* 38, 224-226.

- Iwe M.O., Ngoddy P.O. (1998). Proximate composition and some functional properties of extrusion cooked soybean and sweet potato blends. *Plant Food for Human Nutrition* 53(2), 121–132.
- Iwe M.O., Wolters I., Gort G., Stolpb W., van Zuilichemb D.J. (1998). Behaviour of Gelatinisation and Viscosity in Soy-Sweet Potato Mixtures by Single Screw Extrusion: A Response Surface Analysis. *Journal of Food Engineering* 38, 369-379.
- Jin Z., Hsieh F., Huff H.E. (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *Journal of Cereal Science* 22, 185-194.
- Kainuma K., Matsunaga A., Itagawa N., Kobayashi S. (1981). New enzyme system  $\beta$ -amylase-pullulanase to determine the degree of gelatinization and retrogradation of starch products. *Journal of Japanese Society on Starch Science* 28, 235-240.
- Linko P., Colona P., Mercier C. (1981). High-temperature short-time extrusion cooking. In: Pomeranz Y., Ed. *Advances in Cereal Science and Technology. Vol. IV*, pp. 145-235. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota.
- Malleshi N. G., Hadimani N. A., Chinnaswamy R., Klopfenstein C.F. (1996). Physical and nutritional qualities of extruded weaning foods containing sorghum, pearl millet, or finger millet blended with mung beans and nonfat dried milk. *Plant Foods for Human Nutrition* 49(3), 181-189.
- Mathew J.M., Hosney R.C., Faubion J.M. (1999). Effects of corn sample, mill type, and particle size on corn curl and pet food extrudates. *Cereal Chemistry* 76(5), 621-624.
- Mensa-Wilmot R., Phillips D., Hargrove J.L. (2001a). Acceptability of extrusion cooked cereal/legume weaning food supplements to Ghanaian mothers. *International Journal of Food Science and Nutrition* 52, 83-90.
- Mensa-Wilmot R., Phillips D., Hargrove J.L. (2001b). Protein quality evaluation of cowpea-based extrusion cooked cereal/legume weaning mixtures. *Nutrition Research* 21, 849-857.
- Mercier C. (1994). Comment aborder la cuisson-extrusion. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Dela Valle), pp. 1-13, Technique & Documentation- Lavoisier.
- Mercier C., Feillet P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. *Cereal Chemistry* 52(3), 283-297.
- Mouquet C., Salvignol B., Van Hoan N., Monvois J, Trèche S. (2003). Ability of a 'very low-cost extruder' to produce instant infant flours at a small scale in Vietnam. *Food Chemistry* 82, 249–255.
- Mouquet C., Trèche S. (2001). Viscosity of gruels for infants: a comparison of measurement procedures. *International Journal of Food Sciences & Nutrition* 52, 389-400.
- Obatolu V.A., Cole A.H. (2000). Functional property of complementary blends of soybean and cowpea with malted or unmalted maize. *Food Chemistry* 70(2), 147-153.
- Onyango C., Henle T., Hofmann T., Bley T. (2004). Production of high energy density fermented uji using a commercial alpha-amylase or by single-screw extrusion. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 37, 401-407.
- Reyes-Moreno C., Milan-Carrillo J., Gutierrez-Dorado R., Paredes-Lopez O., Cuevas-Rodriguez E.O., Garzon-Tiznado J.A. (2003). Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of extrusion process. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 36, 685–695.
- Singh B., Sekhon K.S., Singh N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry* 100, 198–202.
- Sokhey A.S., Ali Y., Hanna M.A. (1997). Effects of die dimensions on extruder performance. *Journal of Food Engineering* 31(2), 251-261.
- Suknark K., Philips R.D., Chinnan M.S. (1997). Physical properties of directly expanded extrudates formulated from partially defatted peanut flour and different types of starch. *Food Research International*, 30, 515–583.

- Trèche S. (1996). Influence de la densité énergétique et de la viscosité des bouillies sur les ingérés énergétiques des nourrissons. *Cahiers Santé* 6, 237-243.
- Ushakumari S.R., Latha S., Malleshi N.G. (2004). The functional properties of popped, flaked, extruded and roller-dried foxtail millet (*Setaria italica*). *International Journal of Food Science and Technology* 39, 907-915.
- Van Hoan N., Mouquet-Rivier C. Trèche S. *in press*. Effects of starch, lipid and moisture contents on extrusion behaviour and extrudate characteristics of rice-based blends prepared with a very-low-cost extruder. *Journal of Food Process and Engineering*. Accepted the 4<sup>th</sup> April, 2008.
- Van Soest P.S. (1963). Use of detergents in the analysis of fibrous feed II- A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of Association of Official Analytical Chemistry* 46, 829-835.
- WHO (1998). Complementary feeding of young children in developing countries: a review of current scientific knowledge. *Geneva: World Health Organization*.
- WHO (2003). Special issue based on a World Health Organization expert consultation on complementary feeding. *Geneva: World Health Organization*.
- Wu W., Huff H.E., Hsieh F. (2007). Processing and properties of extruded flaxseed-corn puff. *Journal of Food Processing and Preservation* 31(2), 211-226.

# Chapitre V

## EFFETS DE MODIFICATIONS DE LA VIS SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES EXTRUDATS ET DES BOUILLIES

## INTRODUCTION

Des études antérieures réalisées dans le cadre du programme Fasevie (Berger *et al.*, 2004, Van Hoan, 2004 ; Bruyeron *et al.*, 2006) et l'étude des effets de facteurs liés à la composition des mélanges (*teneurs en amidon, lipides et eau ; nature de la source amylacée*) sur les caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies (*chapitre IV-1 et IV-2*) ont montré que le «cuiseur extrudeur à très faible coût» (CE-TFC) mis au point dans le cadre du programme Fasevie confère aux produits extrudés des propriétés intéressantes en vue d'une utilisation comme farines infantiles. Cependant, bien que le CE-TFC de seconde génération soit utilisable pour produire aussi bien des farines instantanées que des farines à cuisson rapide, ses performances étaient parfois encore insuffisantes, notamment lorsque l'on souhaite obtenir la gélatinisation totale de l'amidon dans le cas de l'extrusion de mélanges de matières premières à faible teneur en amidon et/ou haute teneur en lipides. L'étude des effets de modifications, volontaires ou non, de l'équipement, en particulier de l'ensemble vis/fourreau est donc apparue nécessaire pour améliorer, ou mieux maîtriser, les conditions d'utilisation du CE-TFC proposé.

La première partie des travaux décrits dans ce chapitre a été réalisée dans le but d'optimiser la vis et le fourreau, pièces maîtresses d'un cuisEUR-extrudeur, afin de proposer un nouveau modèle ayant une vis plus performante que celle du CE-TFC de seconde génération.

La seconde partie s'intéresse à la durabilité de la vis et du fourreau fabriqués à partir d'acier localement disponible au Vietnam. Elle a consisté en une comparaison des caractéristiques des extrudats et des bouillies obtenues en utilisant des ensembles vis-fourreaux présentant différents niveaux d'usure.

Ces deux études sont présentées sous forme de projets d'article en français.

## Chapitre V-1

# UTILISATION DE «*CUISEURS-EXTRUDEURS À TRÈS FAIBLE COUT*» POUR LA PRODUCTION DE FARINES INFANTILES : EFFETS DE LA LONGUEUR DE LA VIS EN FONCTION DE LA COMPOSITION DES MÉLANGES

VAN HOAN Nguyen, MOUQUET-RIVIER Claire, TRECHE Serge

### Résumé

Les effets de l'allongement de la vis (*de 28 à 46 cm*) d'un extrudeur à très faible coût (EX800, CTC) fabriqué au Vietnam ont été étudiés en extrudant des mélanges de riz, soja et huile de soja formulés de manière à obtenir des mélanges ayant différentes teneurs en amidon (60, 65 et 70g/100g MS) et en lipides (6,2, 8,2 et 10,2 g/100g MS).

La méthodologie des plans d'expériences (plan factoriel 3<sup>3</sup>) associée à l'analyse des surfaces de réponse a été utilisée pour évaluer les effets de trois variables indépendantes (*longueur de la vis, teneur en amidon et teneur en lipides*) sur certains paramètres (*température, pression*) d'extrusion, sur certaines caractéristiques des extrudats (*expansion, gonflement et solubilité dans l'eau, pertes en lipides et taux de gélatinisation*) et sur la viscosité apparente de bouillies préparées à partir des farines extrudées pour en calculer un indice d'instantanéité.

L'allongement de la vis se traduit par une diminution de la pression au niveau de la filière et du gonflement dans l'eau (WAI) des extrudats et par une augmentation de leur indice d'expansion, de leur taux de gélatinisation (TG), de leur solubilité dans l'eau (WSI) et de leur indice d'instantanéité. L'augmentation de la teneur en amidon a pour effet une augmentation de la température et une diminution de la pression au niveau de la filière, une augmentation de l'expansion, du TG, de la WAI, de la perte en lipides et de l'indice d'instantanéité des extrudats et une diminution de leur WSI. L'augmentation de la teneur en lipides est à l'origine d'une diminution de la température et de la pression au niveau de la filière ainsi que de l'expansion, de la WSI des extrudats et d'une augmentation de la WAI et de la perte en lipides. Toutes les farines extrudées préparées avec des vis de longueur au moins égale à 37 cm avaient un TG de 100% et pouvaient être considérées comme instantanées.

L'allongement de la vis de l'EX800 de 28 cm à au moins 37 cm entraîne des modifications favorables des caractéristiques physicochimiques des extrudats, en particulier de leur indice d'expansion, de leur taux de gélatinisation et de leur indice d'instantanéité.

**Mots-clés :** Cuisson-extrusion – longueur de vis – amidon – lipides – farines instantanées

## Introduction

La cuisson-extrusion est un procédé largement utilisé pour la transformation des aliments. Il est utilisé pour la fabrication de farines infantiles depuis les années 80 (Della Valle *et al.*, 1981; Harper, 1981). Cependant, son utilisation dans les pays en développement est encore très limitée en raison de difficultés économiques et techniques. En effet, les cuiseurs-extrudeurs sont souvent sophistiqués et coûteux ce qui limite leur utilisation dans de petites unités de production. Depuis 1997, un cuiseur-extrudeur à très faible coût (EX800, CTC-*Center for Technology transfer and Consultancy on investment*; Post Harvest Institute) a été mis au point au Vietnam dans le cadre du programme Fasevie (Berger *et al.*, 2004, Bruyeron *et al.*, 2006) dans le but de fabriquer localement, avec un faible investissement, des farines infantiles instantanées ou à cuisson rapide.

La longueur de la vis est un élément important qui peut influencer sur la qualité des produits extrudés dans la mesure où elle détermine le temps de séjour, paramètre souvent utilisé pour évaluer la performance des extrudeurs (Unlu et Faller, 2002). Avec le diamètre et la configuration de la vis et la taille de la filière, elle correspond à des caractéristiques de l'équipement qu'il est difficile de modifier. L'extrudeur EX800 du CTC est un extrudeur mono-vis avec une vis de 28 cm de longueur et de 7,8 cm de diamètre. Le temps de séjour des produits se situe entre 15 et 20s. Par rapport aux vis qui équipent d'autres types d'extrudeur mono-vis, celle de l'EX800 est relativement courte. Dans la mesure où une vis de longueur plus importante, en allongeant le temps de séjour des produits dans l'extrudeur, serait susceptible de modifier les caractéristiques des extrudats, l'étude des effets d'un allongement de la vis est apparue nécessaire pour optimiser ce type de cuiseur-extrudeur.

La composition des matières premières peut influencer sur certaines caractéristiques des produits extrudés comme leur expansion (De Pilli *et al.*, 2007). L'effet des teneurs en amidon et en lipides a fait l'objet de nombreuses études (Faubion et Hosney, 1982; Colonna *et al.*, 1989; Suknark *et al.*, 1997; Iwe et Ngoddy, 1998; Desrumaux *et al.*, 1999; Su et Kong, 2007). Au cours d'études préliminaires réalisées avec le même type d'extrudeur, Van Hoan *et al.* (*in press*) ont mis en évidence les effets de la teneur en amidon et en lipides sur les caractéristiques des extrudats. Il est apparu intéressant d'évaluer l'interaction entre les effets de ces deux facteurs et ceux de la longueur de la vis.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les effets de la longueur de la vis d'un extrudeur mono-vis à très faible coût fabriqué au Vietnam sur quelques caractéristiques des extrudats. En utilisant des mélanges de matières premières ayant des teneurs en amidon et en lipides différentes, nous avons également cherché à vérifier les effets de la composition des matières premières sur les caractéristiques des extrudats et sur la consistance des bouillies et à étudier les éventuelles interactions avec les effets de la longueur de la vis. La méthodologie des plans d'expérience associée à l'analyse des surfaces de réponse a été utilisée pour évaluer les effets des trois variables indépendantes : longueur de vis, teneur en amidon et teneur en lipides.

## Matériels et méthodes

### Matériels

Un lot de riz composé à 95% de grains entiers a été acheté sur un grand marché de produits agricoles du Nord du Vietnam (marché My Hao). Le soja (*nommé DT12*), provenant de la récolte 2005, a été fourni par le Centre de Recherche sur les légumineuses de l'Institut National des Sciences Agronomiques. L'huile de soja a été fabriquée par la compagnie «huiles végétales de Cai Lan» de la province de Quang Ninh. La composition des matières premières utilisées est donnée dans le tableau V-1/1.

**Tableau V-1/1:** Composition des matières premières

	Riz	Huile de soja	Soja décortiqué
Amidon (g/100 g MS)	82,3	0	0
Amylose (g/100 g MS)	20,9	0	ND <sup>1</sup>
Protéines (g/100 g MS)	7,3	0	42,5
Lipides (g/100 g MS)	0,6	99,7	21,1
Fibres (ADF) (g/100 g MS)	1,1	0	4,0
Teneur en eau (g/100 g MB)	12,9	0	7,5

<sup>1</sup>Non déterminé

MS, matière sèche ;

MB, matière brute,

ADF, Acid Detergent Fiber

### Choix des paramètres étudiés

Trois longueurs de vis ont été étudiées: 28 cm, longueur initiale de la vis de l'extrudeur EX800 du CTC, 37 et 46 cm. Les rapports longueur/diamètre (L/D) de ces vis sont, respectivement 3,5 / 4,7 et 5,9.

Les teneurs en amidon et en lipides des mélanges utilisés ont été, respectivement, de 60, 65 et 70 g/100gMS et de 6,2, 8,2 et 10,2 g/100g.

### Obtention des échantillons

#### - Préparation des mélanges avant extrusion

Le soja a été séché à l'air à 35°C dans un séchoir de type DR50 (CTC, Vietnam) afin d'atteindre une teneur en matière sèche supérieure à 92% sans modifier le produit. Les grains de soja ont été dépelliculés à l'aide d'un décortiqueur de type DH20 (CTC, Vietnam). Le soja décortiqué a été transformé en grains concassés par un broyeur de type M250 (CTC, Vietnam).

Les différentes combinaisons de trois matières premières ont été établies afin d'obtenir des mélanges ayant les teneurs en amidon et en lipides souhaitées (Tableau V-1/2). La teneur en eau de tous les mélanges a été ajustée à 13g/100g en ajoutant par pulvérisation les quantités d'eau nécessaires, calculées en tenant compte des teneurs en eau initiales des matières premières. Après pulvérisation, les mélanges étaient laissés pendant 120 minutes dans un sachet en plastique fermé avant de passer dans le cuiseur-extrudeur.

**Tableau V-1/2:** Composition des 9 mélanges correspondant aux teneurs en amidon et en lipides souhaitées.

N°	Teneur (g/100g MS)		Composition du mélange (g/100g MS)		
	Amidon	Lipides	Riz	soja	Huile de soja
1	60	6,2	72,9	27,0	0,1
2	60	8,2	72,9	24,4	2,7
3	60	10,2	72,9	21,9	5,2
4	65	6,2	79,0	19,3	1,7
5	65	8,2	79,0	16,8	4,2
6	65	10,2	79,0	14,2	6,8
7	70	6,2	85,1	11,6	3,3
8	70	8,2	85,1	4,1	5,8
9	70	10,2	85,1	3,0	8,4

### - Préparation des extrudats et des farines

La cuisson-extrusion des mélanges a été réalisée à l'aide d'un cuiseur-extrudeur mono-vis autogène EX800 (CTC, Vietnam). Trois ensembles vis-fourreau de longueurs respectives de 28, 37 et 46 cm fabriqués par le CTC ont été utilisés. La vitesse de rotation des vis était de ~1500 t/min. La température de l'extrudeur a été mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde (thermocouple NiCr-Ni MF 72, SKG - Corée) positionné sur la filière.

Dix kilogrammes de mélange ont été préparés pour chaque essai. Le débit d'alimentation était de 90 kg/h. A la sortie de la filière, les extrudats ont été refroidis à température ambiante dans une bassine métallique. Les échantillons ont été prélevés dans les extrudats correspondant aux 5 derniers kg de matières premières supposés avoir des caractéristiques plus stables. Puis les extrudats ont été réduits en farine à l'aide d'un broyeur à marteau (DSM 500, Electra, France) équipé d'un tamis en acier inoxydable ayant des fentes longitudinales de 0,5 mm de largeur et 7,0 mm de longueur. Les échantillons ont été conditionnés dans des sacs en aluminium et stockés à 4°C avant être analysés. Tous les mélanges étudiés ont fait l'objet de deux essais de cuisson-extrusion, réalisés des jours différents.

### - Préparation des bouillies

#### *\* par cuisson à ébullition*

La farine et l'eau sont mélangées dans une casserole en acier de 15 cm de diamètre. La casserole est ensuite posée sur une plaque chauffante (Ceran®, Schott, Type CK112) réglée en position 7. Le mélange est porté à 85°C correspondant à l'apparition des premières bulles, puis maintenu à ébullition pendant 5 minutes tout en remuant. Après cuisson, la bouillie est laissée refroidir jusqu'à 45°C, température à laquelle ont été effectuées les mesures de viscosité et de teneur en matière sèche.

#### *\* par simple mélange dans de l'eau à 75°C (mode instantané)*

La farine et l'eau préalablement préchauffée à 75°C sont mélangées dans une casserole dans des proportions calculées en fonction de la teneur finale en matière sèche souhaitée pour la bouillie. La bouillie ainsi obtenue est remuée et laissée à refroidir jusqu'à 45°C, température à laquelle ont été effectuées les mêmes mesures que sur les bouillies préparées par cuisson à ébullition.

Pour chaque farine et chaque mode de préparation des bouillies, au moins deux bouillies ayant des teneurs en matière sèche les plus proches possible de 16g/100g de bouillie, mais l'une ≤16g et l'autre >16g MS/100g, ont été préparées de façon à estimer par interpolation les valeurs de viscosité correspondant à des bouillies ayant des teneurs en MS de 16g MS/100g.

## **Mesures et analyses physicochimiques**

### - Mesure de l'expansion des extrudats

Le diamètre des extrudats a été mesuré après refroidissement à température ambiante avec un pied à coulisse Vernier (précision 0,01 mm). Pour chaque extrudat, les valeurs retenues sont des moyennes de 15 valeurs prises sur des portions différentes (*5 mesures sur chacune des portions*). Un indice d'expansion est calculé à l'aide de la formule (Brümer *et al.*, 2002):

$$\text{Indice d'expansion} = (D_e/D_f)^2$$

Avec:  $D_e$ : Diamètre de l'extrudat (mm)

$D_f$ : Diamètre de la filière, soit 7 mm

#### - Teneur en matière sèche

Les teneurs en matière sèche ont été déterminées par dessiccation de 5 à 10 g d'échantillon (*graines, farines ou bouillies*) dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (*minimum 24 h*). Toutes les mesures ont été réalisées en double et la moyenne des deux valeurs a été retenue.

#### - Teneur en protéines

La teneur en protéines des matières premières a été déterminée par la méthode de Kjeldhal selon la norme NF V03-050 (AFNOR, 1970). Le facteur de conversion de l'azote en protéines utilisé a été de 6,25. Toutes les mesures ont été réalisées en double et la moyenne des deux valeurs a été retenue.

#### - Teneur en lipides

La teneur en lipides des matières premières et des extrudats a été déterminée par méthode gravimétrique après extraction par l'éther de pétrole à l'aide d'un Soxtec System (Application Note Tectator n°1344, selon la méthode AOAC 2003.06).

La perte en lipides au cours de la cuisson-extrusion, qui correspond en réalité à un différentiel de teneurs entre les matières premières et les extrudats, a été calculée en faisant la différence entre les teneurs en lipides (en g/100gMS) des mélanges avant cuisson-extrusion et des extrudats.

#### - Teneur en fibres ADF (Acid Detergent Fiber)

Les teneurs en fibres des matières premières ont été déterminées, en utilisant un appareil Dosi-fiber (Selecta, Barcelone, Espagne), par la méthode de Van Soest (1963) qui permet de déterminer la teneur en lignine + cellulose. Lorsque leur teneur en lipides était supérieure à 5 g/100 g MS, les échantillons étaient préalablement délipidés à l'acétone. Toutes les mesures ont été réalisées en double et la moyenne des deux valeurs a été retenue.

#### - Teneur en amidon total

Les teneurs en amidon total ont été déterminées sur les matières premières et sur les farines par la méthode enzymatique de Batey (1982) et Holmes *et al.* (1986). Toutes les mesures ont été réalisées en double et la moyenne des deux valeurs a été retenue.

#### - Taux de gélatinisation

L'amidon endommagé a été dosé dans les farines selon les méthodes proposées par Chiang et Johnson (1977) et Kainuma (1981). Le taux de gélatinisation (TG) de l'amidon correspond au rapport de la teneur en amidon endommagé sur la teneur en amidon total. Toutes les mesures ont été réalisées en double et la moyenne des deux valeurs a été retenue.

#### - Indice de gonflement et de solubilité de farines (WAI et WSI)

Le gonflement (WAI, Water absorption index) et la solubilité (WSI, Water solubility index) ont été mesurés, en triple sur chaque farine, par la méthode de Anderson *et al.* (1969) légèrement modifiée. Les échantillons sont finement broyés pour obtenir une taille de particule <500µm. Environ 0,8 g de farine est dispersé dans 10ml d'eau à 45°C. Après agitation à 45°C pendant 30 minutes, la suspension est centrifugée à 3000g pendant 10 minutes. Le surnageant est décanté et le culot est pesé. La WAI et la WSI sont calculées à l'aide des formules suivantes:

$$\text{WAI (g/g)} = \text{poids du culot (g)} / \text{prise d'essai (g MS)};$$

$$\text{WSI (\%)} = \text{Quantité de matière sèche dans le surnageant (g)} \times 100 / \text{prise d'essai (g MS)}.$$

### - Mesure de la viscosité

La viscosité apparente des bouillies pour une vitesse de cisaillement de  $83s^{-1}$  a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre rotatif HAAKE Viscotester VT 550 (Rheo, Champlan, France), équipé d'un dispositif de mesure SV-DIN. Pendant la mesure, la température de la bouillie est maintenue à  $45^{\circ}C$  grâce à une enceinte thermostatée. La viscosité est enregistrée après 10 minutes de rotation du mobile selon la méthode proposée par [Mouquet et Trèche \(2001\)](#).

### **Evaluation du caractère instantané des farines après cuisson-extrusion**

Le caractère instantané ou «instantanéité» des farines, que l'on peut définir comme leur aptitude à être préparées sous forme de bouillies par simple mélange avec de l'eau à  $75^{\circ}C$ , a été évalué en utilisant la méthode proposée par [Mouquet et al. \(2003\)](#) qui consiste à comparer les viscosités apparentes de bouillies de même teneur en matière sèche (16.0 g MS/100g de bouillie) préparées, d'une part, par cuisson à ébullition pendant 5 minutes et, d'autre part, par addition d'eau à  $75^{\circ}C$ . Pour faciliter l'analyse des résultats, nous proposons l'utilisation d'un 'indice d'instantanéité' calculé comme la différence entre les viscosités apparentes des bouillies préparées selon les deux méthodes décrites :

$$\text{Indice d'instantanéité} = V_a - V_c$$

Avec:  $V_a$ : Viscosité apparente de la bouillie préparée par ajout d'eau à  $75^{\circ}C$

$V_c$ : Viscosité apparente de la bouillie préparée par cuisson à ébullition pendant 5 minutes.

Une farine est considérée comme «instantanée» si son indice d'instantanéité est supérieur ou égal à 0.

### **Plan d'expérience et analyse statistique**

Le plan d'expérience utilisé dans cette étude est un plan factoriel à trois facteurs et trois niveaux ( $3^3$ ). Ces trois facteurs ou variables indépendantes sont la longueur de la vis (28-37-46 cm), la teneur en lipides (6,2-8,2-10,2 g/100g MS) et la teneur en amidon (60-65-70 g/100g MS). 29 expériences, dont 3 points centraux, ont été menées (Tableau V-1/3). Les paramètres étudiés sont la température et la pression au niveau de la filière, l'indice d'expansion des extrudats, la perte en lipides (*différence de teneur en lipides entre les mélanges et les extrudats*), le taux de gélatinisation, le gonflement (WAI) et la solubilité (WSI) des farines ainsi que la viscosité des bouillies préparées à la concentration de 16.0 g MS/100g avec ou sans cuisson afin de calculer l'indice d'instantanéité des farines.

Les effets des variables sont évalués par ANOVA en utilisant le logiciel Statgraphics Plus 5.1 (Virginia, Etats Unis). Un modèle polynomial du second degré a été utilisé pour prédire les effets des variables indépendantes:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} X_i X_j$$

Dans cette formule,  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$  et  $b_{ij}$  sont, respectivement, la valeur constante et les coefficients des effets linéaires, quadratiques et d'interaction.  $X_i$  et  $X_j$  sont les variables indépendantes codées. La validité des modèles de régression est vérifiée par le calcul des coefficients de corrélation ( $R^2$ ). Les résultats sont analysés par la méthode des surfaces de réponse. Les surfaces de réponse des modèles obtenus sont établies en fixant une des trois variables à un niveau optimal pendant que les deux autres varient.

Le graphique de Pareto est utilisé pour représenter l'importance des effets des variables et de leurs combinaisons sur les caractéristiques des extrudats.

**Tableau V-1/3:** Valeurs des variables indépendantes (Plan factoriel 3<sup>x</sup>3)

<i>Variables</i>	<i>Variables</i>		<i>Niveau</i>	
	<i>Codé</i>	<i>Réel</i>	<i>Codé</i>	<i>Réel</i>
Longueur de la vis ( <i>cm</i> )	X <sub>1</sub>	LV	-1	28
			0	37
			1	46
Teneur en amidon ( <i>g/100 g MS</i> )	X <sub>2</sub>	AMI	-1	60
			0	65
			1	70
Teneur en lipides ( <i>g/100 g MS</i> )	X <sub>3</sub>	LIP	-1	6,2
			0	8,2
			1	10,2

## Résultats et discussion

Le comportement en extrusion et les caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies obtenus en utilisant des vis de longueur différentes et en faisant varier les teneurs en amidon et en lipides des mélanges sont présentés dans le tableau V-1/4.

L'analyse des données issues du plan d'expérience a permis de calculer les coefficients de régression ajustés aux données (Tableau V-1/5). Leur niveau de signification permet d'identifier parmi les trois variables indépendantes celles qui exercent un effet principal (linéaire), un effet quadratique ou un effet d'interaction sur les variables réponses prises en compte.

Les valeurs des coefficients de corrélation (R<sup>2</sup>) qui rendent compte de l'adéquation du modèle proposé aux valeurs expérimentales sont, pour 5 variables sur les 10 étudiées, suffisantes ( $\geq 0,90$ ) pour valider les modèles proposés. C'est pour la mesure de la viscosité apparente des bouillies préparées par cuisson et pour le taux de gélatinisation des extrudats que l'ajustement du modèle aux valeurs expérimentales est le moins bon.

### Température et pression au niveau de la filière

#### - Température

Les teneurs en amidon et en lipides ont un effet significatif sur la température mesurée au niveau de la filière. L'augmentation de teneur en amidon des mélanges s'accompagne d'une augmentation de la température (Tableau V-1/5). En revanche, celle de la teneur en lipides provoque une diminution de la température (Figure V-1/1A). On observe, par ailleurs, que la température augmente quand la longueur de la vis passe de 28 à 37cm, et diminue quand elle passe de 37 à 48cm, ce qui traduit l'existence d'un effet quadratique hautement significatif ( $p < 0,001$ ) qui est le plus important de tous les effets observés (Figure V-1/1B). Il existe par ailleurs une interaction entre la longueur de vis et la teneur en amidon : la valeur maximale de température (174°C) serait obtenue pour une longueur de vis de 39,6cm et avec un mélange ayant une teneur en amidon de 70g/100g et une teneur en lipides de 6,7g/100g.

Les lipides ont un effet lubrifiant qui explique que les frictions entre les matières premières et l'ensemble vis-fourreau soient moins importantes quand la quantité de lipides augmente (Ilo *et al.*, 2000). Cette diminution des frictions explique la diminution de la température observée quand la teneur en lipides des mélanges augmente.

**Tableau V-1/4 :** Comportement en extrusion et caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies en fonction de la longueur de la vis et des teneurs en amidon et en lipides des mélanges (*les valeurs données sont des moyennes calculées, pour chaque combinaison de longueur de vis et de teneur en amidon, à partir des 3 valeurs obtenues pour des teneurs en lipides différentes*).

Variables indépendantes			Comportement en extrusion et caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies									
			Au niveau de la filière		Sur les extrudats ou farines extrudés					Sur les bouillies		
Longueur de la vis (cm)	Teneur en amidon (g/100g MS)	Teneur en lipides (g/100g MS)	Température (°C)	Pression (Bar)	Indice d'expansion	WAI (g/g)	WSI (%)	Perte en lipides (g/100g MS)	Taux de gélatinisation	Viscosité après cuisson (Pa.s)	Viscosité (ajout d'eau à 75°C) (Pa.s)	Indice d'instantanéité
28	60	6,2	165 ± 3	33 ± 11	4,1 ± 0,6	3,9 ± 0,1	13,1 ± 0,5	0,4 ± 0,7	94,9 ± 1,1	1,7 ± 0,3	0,5 ± 0,0	-1,2 ± 0,3
	65		163 ± 3	44 ± 13	4,2 ± 0,4	4,5 ± 0,3	12,8 ± 0,8	0,8 ± 1,0	99,0 ± 1,5	1,7 ± 0,1	1,0 ± 0,3	-0,7 ± 0,2
	70		162 ± 2	38 ± 12	5,2 ± 0,1	5,2 ± 0,2	13,1 ± 0,9	1,6 ± 1,6	100	1,4 ± 0,3	1,4 ± 0,1	0,0 ± 0,3
37	60	ou	169 ± 4	28 ± 10	4,4 ± 0,5	4,2 ± 0,1	13,8 ± 0,7	0,6 ± 0,7	100	1,1 ± 0,1	1,5 ± 0,1	0,4 ± 0,0
	65	8,2	170 ± 3	26 ± 5	4,6 ± 0,0	4,5 ± 0,1	13,9 ± 0,5	0,9 ± 0,7	100	1,2 ± 0,2	1,9 ± 0,1	0,7 ± 0,1
	70	ou	171 ± 4	24 ± 8	5,4 ± 0,2	5,1 ± 0,2	14,8 ± 0,4	1,2 ± 1,2	100	1,2 ± 0,1	2,1 ± 0,1	0,9 ± 0,2
46	60	10,2	158 ± 7	26 ± 7	4,3 ± 0,5	3,8 ± 0,2	14,6 ± 0,1	0,1 ± 0,2	100	1,3 ± 0,1	1,3 ± 0,2	0,0 ± 0,3
	65		161 ± 3	24 ± 8	4,5 ± 0,2	4,3 ± 0,1	13,5 ± 0,3	1,6 ± 0,7	100	1,3 ± 0,3	1,7 ± 0,1	0,4 ± 0,3
	70		169 ± 1	21 ± 4	5,3 ± 0,1	4,8 ± 0,4	14,2 ± 0,4	1,9 ± 1,8	100	1,4 ± 0,2	2,1 ± 0,3	0,7 ± 0,1

*Moyennes ± écarts types des 3 valeurs obtenues pour des teneurs en lipides différentes.*

**Tableau V-1/5:** Coefficients de régression ajustés aux données.

	Au niveau de la filière		Sur les extrudats ou farines extrudées					Sur les bouillies <sup>1</sup>		
	Température (°C)	Pression (Bar)	Indice d'expansion	WAI (g/g)	WSI (%)	Perte en lipides (g/100g MS)	Taux de gélatinisation	Viscosité après cuisson (Pa.s)	Viscosité (ajout d'eau à 75°C) (Pa.s)	Indice d'instantanéité
<b><i>b</i><sub>0</sub></b>	170,32	25,39	4,57	4,49	13,75	0,75	100,22	1,18	1,84	0,67
<b>Linéaire</b>										
<b><i>b</i><sub>1</sub></b>	-0,39	-7,22***	0,10*	-0,13**	0,53***	0,13	1,00***	-0,12*	0,37***	0,49***
<b><i>b</i><sub>2</sub></b>	1,72*	-0,56	0,54***	0,53***	0,11	0,61***	0,83**	-0,02	0,38***	0,40***
<b><i>b</i><sub>3</sub></b>	-2,11**	-7,83***	-0,21***	0,14***	-0,37**	0,95***	0,11	0,05	0,06	0,01
<b>Quadratique</b>										
<b><i>b</i><sub>11</sub></b>	-6,87***	4,98**	-0,22*	-0,13*	-0,63**	0,16	-0,95*	0,29***	-0,51***	-0,81***
<b><i>b</i><sub>22</sub></b>	0,79	-3,36	0,37***	0,08	0,50**	-0,13	-0,45	-0,05	-0,04	0,01
<b><i>b</i><sub>33</sub></b>	-1,37	4,48*	-0,0004	0,02	0,12	0,38*	0,05	0,03	0,03	0,001
<b>Interaction</b>										
<b><i>b</i><sub>12</sub></b>	3,42***	-2,42	-0,03	-0,07	-0,09	0,15	-1,25***	0,12*	0,01	-0,11
<b><i>b</i><sub>13</sub></b>	-1,17	1,83	-0,02	0,01	0,40**	-0,06	-0,16	-0,10	0,01	0,11
<b><i>b</i><sub>23</sub></b>	0,42	0,58	0,22**	0,10*	0,04	0,52***	0,08	0,03	0,05	0,01
<b>R<sup>2</sup></b>	0,80	0,88	0,91	0,93	0,79	0,90	0,77	0,65	0,94	0,93

WAI, gonflement dans l'eau (water absorption index); WSI, solubilité dans l'eau (water solubility index)

<sup>1</sup> préparées à la concentration de 16 g MS/100g

*b*<sub>1</sub>: Longueur de la vis;

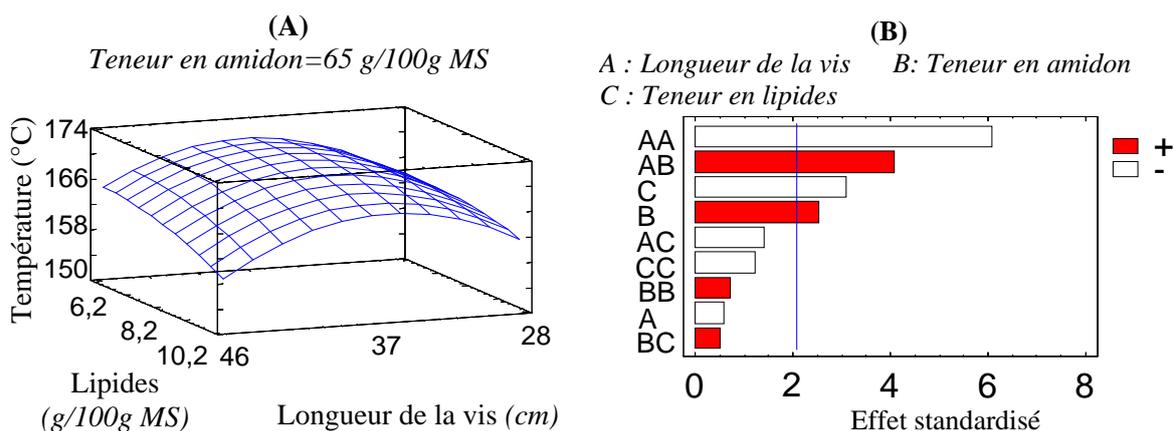
*b*<sub>2</sub>: Teneur en amidon;

*b*<sub>3</sub>: Teneur en lipides

\* *p*<0,05

\*\* *p*<0,01

\*\*\* *p*<0,001

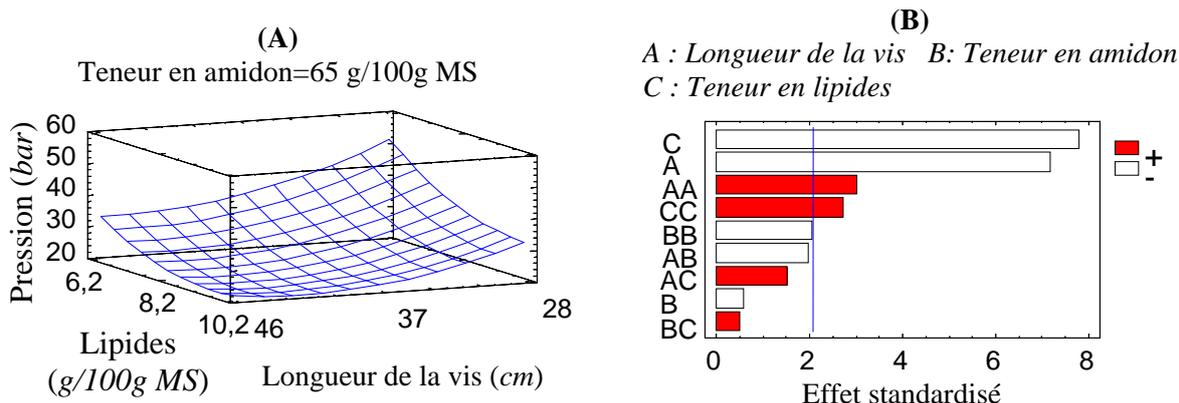


**Figure V-1/1A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé des effets sur la température au niveau de la filière.

La température au cours de la cuisson-extrusion est reconnue comme un facteur important pouvant influencer sur les caractéristiques et la qualité nutritionnelle des extrudats (Guzman-Tello et Cheftel, 1990; Guha *et al.*, 2003; Thymi *et al.*, 2005; Guha *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2007). Une augmentation excessive de la température peut provoquer des pertes importantes en vitamines thermosensibles (Zielinski *et al.*, 2001 ; Singh *et al.*, 2007). Ces derniers auteurs ont par ailleurs observé que l'extrusion à haute température ( $\geq 200^{\circ}\text{C}$ ) et faible teneur en eau ( $\leq 15\%$ ) pouvait réduire la qualité nutritionnelle des extrudats. Le contrôle de la température est donc très important en industrie alimentaire. Sur les extrudeurs sophistiqués, il existe des systèmes de régulation de la température permettant un chauffage (*injection de vapeur, résistance électrique, induction magnétique, circulation de fluide*) ou un refroidissement (Frame, 1994; Desrumaux *et al.*, 1999; Moretti *et al.*, 2005). Dans le cas de cuiseurs-extrudeurs rudimentaires comme l'EX800, la température d'extrusion résulte de l'auto-échauffement de la matière au cours du passage entre la vis et le fourreau dans les régions de cisaillement intense. La température ne peut donc être modifiée qu'en jouant sur la composition des mélanges. Les températures observées au cours de nos essais se situent bien au dessous de  $200^{\circ}\text{C}$  et la qualité nutritionnelle des extrudats ne risque pas d'être altérée par une température excessive. Nos résultats montrent que pour atteindre une température suffisante permettant de conférer aux extrudats les caractéristiques physico-chimiques souhaitées, il est nécessaire d'utiliser des mélanges ayant une teneur élevée en amidon ou/et une faible teneur en lipides.

#### - Pression

Certaines caractéristiques des produits extrudés résultent de modifications au niveau de l'amidon (*éclatement des grains, dépolymérisation de l'amylose et de l'amylopectine*) qui se produisent sous les effets de la pression, de la température, du cisaillement et dépendent du temps de séjour (Colonna *et al.*, 1989). La longueur de la vis et la teneur en lipides exercent des effets linéaires et quadratiques significatifs sur la pression au niveau de la filière (Tableau V-1/5) : l'augmentation de ces deux variables s'accompagne d'une diminution de la pression. En revanche, les variations de teneurs en amidon (de 60 à 70g MS/100g) ne modifient pas de manière significative la pression. Il n'y a aucun effet d'interaction des facteurs étudiés sur la pression. L'effet linéaire le plus important est celui de la teneur en lipides, mais celui de la longueur de la vis est presque aussi important (Figure V-1/2AB). La pression minimale (15 bars) est obtenue avec une longueur de vis de 44,7cm, une teneur en amidon de 70g/100g et une teneur en lipides de 9,5g/100g.



**Figure V-1/2A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé des effets sur la pression au niveau de la filière

L'effet lubrifiant des lipides, qui se traduit par une diminution des frictions et de la température entre vis et fourreau (Ilo *et al.*, 2000) peut expliquer l'effet observé sur la pression. Cependant, Singh et Smith (1997) ont montré que la pression au niveau de la filière pouvait augmenter avec les quantités d'huile ajoutées avant extrusion à des mélanges de farines de blé et d'avoine. Des différences au niveau des équipements, des conditions d'extrusion et des matières premières peuvent expliquer ces résultats contradictoires.

### Caractéristiques physico-chimiques des extrudats

#### - Indice d'expansion

L'expansion est une caractéristique importante pour les produits extrudés à forte teneur en amidon. Elle est influencée par les modalités d'extrusion et le type de matières premières. Dans cette étude les trois variables indépendantes ont des effets significatifs sur l'indice d'expansion des extrudats (Tableau V-1/5). L'augmentation de la longueur de vis et de la teneur en amidon ont pour conséquence une augmentation de l'indice d'expansion ( $p < 0,05$  et  $p < 0,001$ , respectivement). En revanche, plus la teneur en lipides des mélanges est importante, plus l'expansion des extrudats est faible ( $p < 0,01$ ). Des effets quadratiques de la longueur de vis et de la teneur en amidon ont également été observés ( $p < 0,05$  et  $p < 0,001$ , respectivement). On observe aussi un effet d'interaction entre la teneur en amidon et la teneur en lipides ( $p < 0,01$ ). La valeur maximale de l'indice d'expansion (5,5) serait obtenue avec une longueur de vis de 38,2 cm, une teneur en amidon de 70g/100g et une teneur en lipides de 10,2g/100g.

Les effets de la teneur en amidon sur l'expansion des extrudats observés dans cette étude ne sont pas surprenants et confirment les résultats d'autres auteurs (Singh *et al.*, 2007). Selon Ilo *et al.* (2000), il est nécessaire pour obtenir une bonne expansion des extrudats que les matières premières aient une teneur en amidon supérieure à 60g/100g MS.

L'effet de la teneur en lipides sur l'expansion des extrudats que nous avons observé est comparable à celui obtenu par Faubion et Hosney (1982), Malkki *et al.* (1984) et Guy *et al.* (1994). Il peut s'expliquer par la diminution, en raison de l'effet lubrifiant des lipides, des frictions et de la température dans le fourreau, cette dernière ayant un effet important sur l'expansion des extrudats (Ali *et al.*, 1996; Ilo *et al.*, 1999; Thymi *et al.*, 2005; Guha *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2007). Des réactions de complexation entre les lipides et l'amylose durant l'extrusion (Bhatnagar et Hanna, 1994) peuvent aussi être une des raisons de la faible expansion des extrudats préparés à partir des mélanges riches en lipides (Galloway *et al.*, 1989). Signalons néanmoins que l'addition d'une faible quantité de lipides peut, dans certains cas, avoir un effet positif sur l'expansion des extrudats : Jager *et al.* (1991) ont montré que

l'ajout de 1% d'huile végétale peut améliorer l'expansion, la texture et les caractéristiques des extrudats ; [Pan et al. \(1992\)](#) ont obtenu une expansion optimale dans des extrudats de riz après avoir incorporé 3% d'huile de soja.

L'allongement de la vis a pour conséquence d'augmenter le temps de séjour des produits dans l'extrudeur. Cette augmentation peut améliorer le niveau de cuisson (taux de gélatinisation) et l'expansion des extrudats ([Chinnaswamy et Hanna, 1990](#); [Meuser et Van Legerich, 1992](#)) et favoriser la complexation de l'amidon et des lipides ([Ilo et al., 1999](#)). Cependant, la longueur de la vis peut modifier la qualité nutritionnelle des produits extrudés : plus la vis est longue, plus les vitamines, notamment les vitamines groupe B, sont détruites au cours de l'extrusion ([Athar et al., 2006](#)).

Un allongement de la vis de l'EX800 permettrait donc l'obtention d'extrudats ayant une expansion plus importante susceptible d'améliorer la texture des produits finis, mais une évaluation préalable des effets sur la valeur nutritionnelle, en particulier sur les teneurs en vitamines serait nécessaire.

#### - Gonflement des extrudats (WAI)

Le WAI des extrudats varie de 3,6 à 5,5g/g et dépend des trois variables indépendantes étudiées (Tableau V-1/5), mais c'est l'effet de la teneur en amidon qui est le plus important de tous les effets observés. La valeur maximale du WAI correspond à un extrudat obtenu avec une vis de 30 cm de longueur et des mélanges ayant une teneur en amidon de 70g/100g et une teneur en lipides de 10,2g/100g. L'augmentation de la longueur de la vis au delà de 30 cm s'accompagne d'une diminution du WAI ( $p < 0,01$ ). Le WAI augmente significativement avec les teneurs en amidon ( $p < 0,001$ ) et en lipides ( $p = 0,001$ ) des mélanges. La longueur de la vis a également un effet quadratique ( $p < 0,05$ ). Il existe, par ailleurs, un effet d'interaction entre la teneur en amidon et la teneur en lipides ( $p < 0,05$ ).

L'augmentation du WAI en fonction de la teneur en amidon peut s'expliquer, d'une part, par la présence d'une quantité plus importante d'amidon dans les extrudats et, d'autre part, par un endommagement plus important de l'amidon sous l'effet de l'augmentation de la température entre vis et fourreau. L'effet positif de la température sur le WAI d'extrudats à base de riz a déjà été rapporté par [Guha et al. \(2003\)](#), [Kadan et al. \(2003\)](#), [Sachetti et al. \(2004\)](#) et [Signh et al. \(2007\)](#). En revanche, certains auteurs ont observé des effets inverses ([Pelembé et al., 2002](#); [Altan et al., 2008](#)).

La détermination du WAI est une méthode couramment utilisée pour caractériser des farines instantanées ([Reyes-Monero et al., 2003](#)). Cependant, il n'existe pas de seuil de valeur reconnu permettant de considérer une farine comme instantanée. Les valeurs de WAI obtenues au cours de nos essais sont assez proches que celles obtenues par [Bedolla et Rooney \(1984\)](#) et [Reyes-Monero et al. \(2003\)](#) dans le cas de la fabrication de farines instantanées à base de maïs.

#### - Solubilité des extrudats (WSI)

La solubilité dans l'eau des extrudats dépend significativement de la longueur de la vis et de la teneur en lipides (Tableau V-1/5). L'augmentation de la longueur de la vis se traduit par une augmentation du WSI ( $p < 0,001$ ) tandis que celle de la teneur en lipides agit en sens inverse ( $p < 0,01$ ). La teneur en amidon n'a pas d'effet linéaire sur la solubilité ( $p = 0,31$ ), mais elle a, comme la teneur en lipides, un effet quadratique significatif ( $p < 0,01$ ). Par ailleurs, il existe une interaction significative entre les effets de la longueur de la vis et ceux de la teneur en lipides ( $p < 0,01$ ). Si on le compare aux effets des autres variables, c'est l'effet de la longueur de la vis qui est le plus important sur le WSI.

Le WSI correspond à une propriété fonctionnelle de l'amidon dont la valeur augmente avec la quantité d'amidon endommagé et dextrinisé. En entraînant une augmentation du temps de séjour des produits dans l'extrudeur, l'allongement de la vis permet d'augmenter le niveau de cuisson qui lui-même se traduit par des valeurs de WSI plus élevées. Gujska et Khan (1990) avaient déjà montré sur des extrudats de haricot commun (*Phaseolus vulgaris*) que le WSI augmente avec le niveau de dégradation de l'amidon.

L'effet négatif de la teneur en lipides sur le WSI des extrudats à forte teneur en amidon a déjà été rapporté par d'autres auteurs : Bhatnagar et Hanna (1994) et Desrumaux *et al.* (1999) ont montré que l'ajout d'acides gras dans du maïs extrudé se traduit par la baisse du WSI ; Jone *et al.* (2000) et Singh *et al.* (2007) ont observé que l'augmentation du taux d'incorporation de pois cassés, qui a pour conséquence une augmentation de la teneur en lipides dans les mélanges, se traduisait par une diminution du WSI d'extrudats à base de riz. Une complexation entre lipides et amidon pendant l'extrusion peut expliquer ce phénomène (Bhatnagar et Hanna, 1994). La baisse de température consécutive à l'augmentation de teneur en lipides pourrait également expliquer la diminution du WSI en raison d'une dégradation moins importante de l'amidon en cours d'extrusion. Pelembe *et al.* (2002), Guha *et al.* (2003), Kadan *et al.* (2003) et Sacchetti *et al.* (2004) ont observé que le WSI augmentait avec la température dans le cas de l'extrusion de mélanges à base de riz. Chang *et al.* (1998) ont également observé cet effet dans le cas de l'extrusion de maïs. Cependant, Altan *et al.* (2008) en extrudant de l'orge, Gutkoski et El-Dash (1999) en extrudant de l'avoine et Milan-Carrillo *et al.* (2002) en extrudant des pois chiches ont observé qu'une augmentation de la température pouvait aussi s'accompagner d'une baisse du WSI.

#### - Pertes en lipides

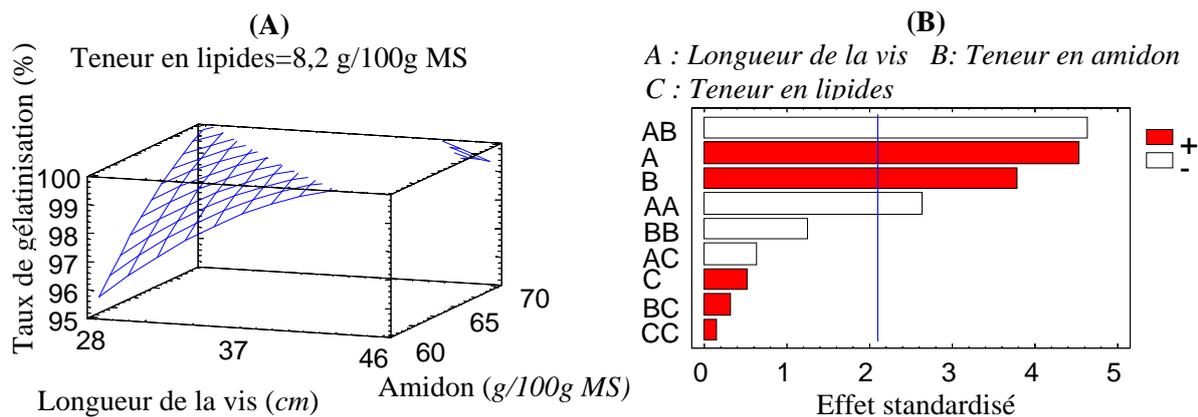
Les différences de teneur en lipides entre les mélanges et les extrudats à l'issue des différents essais ont varié entre 0 et 3,66g/100g MS. Cette différence correspond à une perte de lipides sous forme d'huile sortant de la filière en fin de traitement. Aucune perte de lipides n'a été observée lorsque la cuisson-extrusion a été réalisée avec la vis de 37 cm de longueur et des mélanges ayant une teneur en amidon de 60g/100g et une teneur en lipides de 6,2g/100g. Le niveau de pertes en lipides observé au cours des différents essais est comparable à celui observé antérieurement avec le même type d'extrudeur (Van Hoan *et al.*, *in press*). Les pertes en lipides ne varient pas avec la longueur de la vis, mais augmentent significativement ( $p < 0,001$ ) avec les teneurs en amidon et en lipides des mélanges (Tableau V-1/5). La teneur en lipides a également un effet quadratique positif significatif ( $p < 0,05$ ) sur le niveau de pertes observé. Enfin il existe un effet d'interaction entre la teneur en amidon et la teneur en lipides sur ce niveau de pertes ( $p < 0,001$ ).

Une augmentation des pertes en lipides en rapport avec une augmentation de la teneur en lipides des mélanges a déjà été rapporté par plusieurs auteurs (Berset *et al.*, 1994; Carmire, 2000; De Pilli *et al.*, 2007; Van Hoan *et al.*, *in press*). Mais d'autres auteurs (Unlu et Faller ; 2002) estiment que, compte tenu de leur effet lubrifiant qui a pour conséquence de réduire les frictions et la pression entre la vis et le fourreau, une augmentation de la teneur en lipides dans les mélanges peut dans certains cas se traduire par une diminution des pertes en lipides. Nos résultats ne confirment pas ceux de Unlu et Faller (2002) et mais sont en accord avec ceux des autres auteurs.

L'augmentation des pertes en lipides avec celle de la teneur en amidon des mélanges peut s'expliquer par l'augmentation de température entre vis et fourreau qui favoriserait l'extraction de l'huile dans les mélanges.

### - Taux de gélatinisation

Un taux de gélatinisation (TG) quasi-total (de 94% à 100%) a été observé pour tous les extrudats ce qui explique en partie le coefficient de corrélation modéré du modèle (0,77), lié au peu d'effet des facteurs sur la variable réponse. En particulier, tous les extrudats préparés avec les vis de 37 et 46 cm de longueur ont un TG de 100%. La longueur de la vis et la teneur en amidon des mélanges ont des effets linéaires positifs significatifs sur le TG ( $p < 0,001$  et  $p < 0,01$ , respectivement) (Tableau V-1/5). La longueur de la vis a aussi un effet quadratique négatif sur le TG ( $p < 0,05$ ) indiquant l'atteinte d'un maximum. Un effet d'interaction entre la longueur de la vis et la teneur en amidon a également été observé ( $p < 0,001$ ). Parmi les effets significatifs obtenus, c'est l'effet d'interaction entre la longueur de la vis et la teneur en amidon qui est le plus important (Figure V-1/3B).



**Figure V-1/3A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé des effets sur le taux de gélatinisation

L'augmentation du TG avec la longueur de la vis peut s'expliquer par l'augmentation du temps de séjour des mélanges dans l'extrudeur qui a pour effet d'augmenter le niveau de cuisson. L'effet positif de la teneur en amidon sur le TG a déjà été rapporté dans la littérature pour un mélange pomme de terre/soja (Iwe et Ngoddy, 1998), un mélange riz/soja/sésame (Mouquet *et al.*, 2003), des mélanges à base de maïs et d'avoine (Ainsworth *et al.*, 2007) et un mélange riz/soja/huile de soja (Van Hoan *et al.*, *in press*).

La cuisson-extrusion est reconnue comme un traitement permettant d'augmenter la digestibilité de l'amidon (Zamora, 2003; Sun *et al.*, 2006). La gélatinisation quasi-totale des extrudats observée au cours de nos essais permet d'obtenir des farines hautement digestibles et donc parfaitement appropriées pour une utilisation comme farine infantile. Les résultats obtenus conduisent à préconiser pour l'EX800 l'utilisation d'une vis d'au moins 37 cm pour obtenir une gélatinisation totale de l'amidon.

### Viscosité apparente des bouillies

#### Bouillies préparées par cuisson

L'évaluation des effets des trois variables indépendantes sur la viscosité apparente des bouillies préparées à la concentration de 16,0 gMS/100g par cuisson à ébullition pendant 5 minutes est donnée dans le tableau V-1/5. La longueur de la vis a un effet linéaire négatif ( $p < 0,01$ ) et un effet quadratique positif ( $P < 0,001$ ) sur la viscosité apparente de la bouillie. Mais la viscosité de la bouillie ne dépend ni de la teneur en amidon ni de celle en lipides et aucune interaction entre les trois variables indépendantes n'a été observée. Le modèle expliquant la viscosité apparente des bouillies obtenues par cuisson est celui pour lequel le

coefficient de corrélation (0,65) est le plus faible (Tableau V-1/5) ce qui confirme la faible influence des facteurs étudiés sur cette variable réponse.

L'effet de la longueur de la vis sur la viscosité apparente des bouillies pourrait s'expliquer par une dextrinisation de l'amidon plus poussée sous l'effet d'un cisaillement plus long dû à l'augmentation du temps de séjour dans l'extrudeur. En effet la dextrinisation de l'amidon est reconnue comme une cause de la diminution de la viscosité des bouillies (Schweizer *et al.*, 1986 ; Guha *et al.*, 1998). Chiang and Johnson (1977) ont montré que l'extrusion de blé à une température supérieure à 80°C se traduisait par une augmentation progressive du niveau de dextrinisation et par une diminution de la viscosité des bouillies à 50°C.

Equiper l'extrudeur EX800 d'une vis plus longue que celle actuellement utilisée pourrait donc permettre de réduire la viscosité des bouillies préparées par cuisson à ébullition et donc permettre de les préparer à une densité énergétique plus élevée.

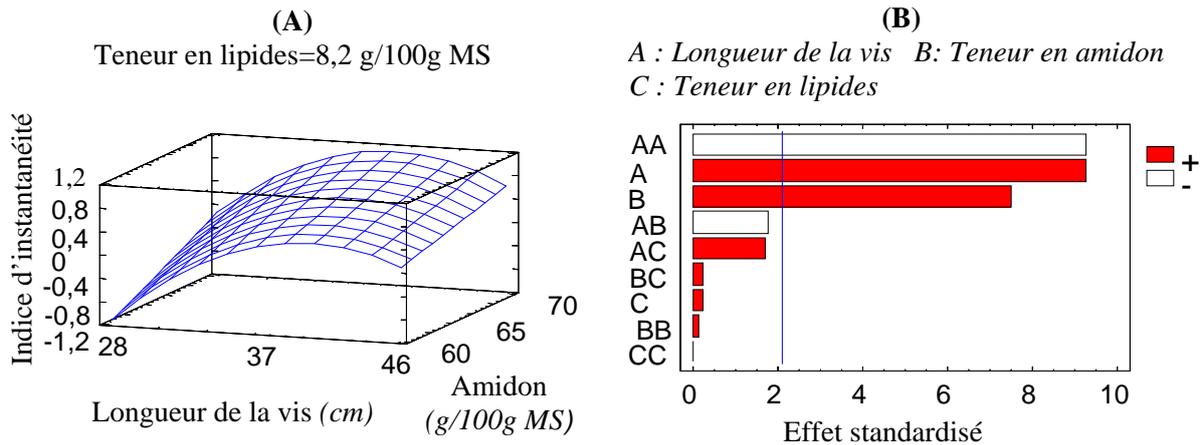
#### Bouillies préparées par ajout d'eau

La viscosité apparente des bouillies préparées par simple ajout d'eau dépend fortement de la longueur de la vis et de la teneur en amidon (Tableau V-1/5). Ces deux variables ont un effet linéaire positif sur la viscosité ( $p < 0,001$ ). La longueur de la vis a aussi un effet quadratique négatif hautement significatif ( $p < 0,001$ ). En revanche, la teneur en lipides n'a pas d'effet sur la viscosité. La valeur de viscosité minimale est obtenue avec une vis de 28 cm de longueur et un mélange ayant une teneur en amidon de 60g/100g et une teneur en lipides de 8,2g/100g.

#### **Caractère instantané des farines**

Les effets des 3 variables étudiées sur l'indice d'instantanéité des farines évalué par la différence entre les viscosités apparentes des bouillies préparées selon les deux modes de préparation sont présentés dans le tableau V-1/5. L'augmentation de la longueur de vis et de la teneur en amidon entraîne une augmentation hautement significative de l'indice d'instantanéité ( $p < 0,001$ ) (Figure V-1/4A). L'effet positif de la longueur de la vis est néanmoins atténué par le fait qu'elle exerce dans le même temps un effet quadratique négatif ( $p < 0,001$ ) sur l'indice d'instantanéité. La teneur en lipides n'a aucun effet significatif sur l'indice d'instantanéité des farines extrudées. L'effet quadratique de la longueur de la vis est l'effet le plus important suivi de l'effet linéaire de la teneur en amidon et de celui de la longueur de la vis (Figure V-1/4B). Le modèle obtenu est celui pour lequel on obtient le plus fort coefficient de corrélation ( $R^2=0,94$ ) : les conditions d'extrusion les plus favorables pour conférer une bonne instantanéité aux farines sont l'utilisation d'une vis de 40cm et d'un mélange ayant des teneurs en amidon de 70g/100g et en lipides de 10,2g/100g.

L'allongement de la vis a un effet particulièrement intéressant sur l'indice d'instantanéité des farines extrudées. Parmi les 9 farines préparées avec la vis la plus courte (28cm), seulement deux farines avaient un indice d'instantanéité supérieur ou proche de 0 alors que toutes les farines préparées avec les vis de 37 et 46cm avaient un indice d'instantanéité supérieur ou proche de 0 et peuvent donc être considérées comme instantanées. Par ailleurs, le fait que les bouillies préparées à la concentration de 16g MS/100g avaient une consistance très fluide indique qu'il est encore possible d'augmenter la proportion farine/eau lors de la préparation des bouillies de façon à leur conférer une densité énergétique plus élevée.



**Figure V-1/4A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé pour les effets sur l'indice d'instantanéité.

## Conclusion

L'utilisation de vis de longueurs différentes (*entre 28 et 46 cm*) lors du passage dans l'extrudeur de type EX800 de mélanges à base de riz/soja/huile modifie significativement, quelles que soient les teneurs en amidon et en lipides de mélanges à l'intérieur des intervalles de variation étudiés, les paramètres d'extrusion (*température, pression*), les caractéristiques physicochimiques des extrudats et le comportement rhéologique des bouillies préparées à partir des farines extrudées. L'allongement de la vis actuellement utilisée (28 cm) se traduirait par des modifications favorables des caractéristiques physicochimiques des extrudats et des farines, en particulier l'indice d'expansion, le taux de gélatinisation et l'indice d'instantanéité.

Les teneurs en amidon et en lipides des mélanges avant extrusion sont également des facteurs déterminants des caractéristiques des produits extrudés. Une haute teneur en amidon et une faible teneur en lipides des mélanges favorisent l'extrusion et permettent d'obtenir des extrudats ayant un taux de gélatinisation élevé et un bon indice d'instantanéité. La formulation des mélanges destinés à être transformés en farines extrudées doit tenir compte de la perte de lipides qui se produit au cours de l'extrusion et qui est d'autant plus importante que les teneurs en lipides et en amidon des mélanges sont élevés.

## Remerciements

Ce travail a été financé dans le cadre du programme Fasevie, mené par le GRET (*Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques*) l'IRD (*Institut de recherche pour le développement*) et le NIN (*Institut National de Nutrition du Vietnam*) et principalement financé par le Conseil régional du Nord-Pas de Calais, le conseil général des Côtes-d'Armor, le Ministère Français des Affaires étrangères, le Comité français pour l'Unicef et l'IRD.

## Références

- Agence Française de Normalisation-AFNOR (1970). Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode Kjeldahl (produits agricoles alimentaires). Standard NF V 03-050.
- Ainsworth P., Ibanoglu S., Plunkett A., Ibanoglu E., Stojceska V. (2007). Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the selected physical and nutritional properties of an extruded snack. *Journal of Food Engineering* 81, 702–709.
- Ali Y., Hanna, M.A., Chinnaswamy R. (1996). Expansion characteristics of extruded corn grits. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 29, 702–707.

- Altan A., McCarthy K.L., Maskan M. (2008). Evaluation of snack foods from barley–tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering* 84, 231–242.
- Anderson R.A., Conway H.F., Pfeifer V.F, Griffin E.L. (1969). Gelatinisation of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal science today* 14, 4-12.
- AOAC (2003). Crude fat in feeds, cereal grains, and forages. Randall/soxtec/hexanes extraction-submersion method. *Journal of AOAC International* 86, 888-899.
- Athar N., Hardacre A., Taylor G., Clark S., Harding S., McLaughlin J. (2006) Vitamin retention in extruded food products. *Journal of Food Composition and Analysis* 19, 379–383.
- Batey, I.L. (1982). Starch analysis using thermostable  $\alpha$ -amylase. *Starch* 4, 125-128.
- Bedolla S., Rooney L.W. (1984). Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World* 29, 732–735.
- Berger J., Laillou A., Khan N.C., Monvois C., Salvignol B., Trèche S. (2004). Fasevie: une solution originale au problème de la malnutrition infantile au Vietnam. *Les cahiers de la Coopération française au Vietnam*. 2004, N°1: 1-30. <http://www.ambafrance-vn.org>
- Berset C. (1994). Influence de la cuisson-extrusion sur les lipides et les pigments. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Della Valle), pp. 142-162, Technique & Documentation-Lavoisier.
- Bhatnagar S., Hanna M.A. (1994) . Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal Chemistry* 71, 582-587.
- Bhattacharya S. (1997). Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: Extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering* 32(1), 93- 99.
- Brümmer B., Meuser F., Lengerich D., Niemann C. (2002). Expansion and functional properties of corn starch extrudates related to their molecular degradation, product temperature and water content. *Starch* 54, 9-15.
- Bruyeron O., Nguyen Cong Khan, Berger J., Salvignol S., Monvois C., Trèche S. (2006). *Alimentation infantile au Vietnam – Dix ans d’actions et d’enseignements du programme Fasevie*. Paris, Ed. Gret, Collection Etudes et Travaux, ISBN : 2-86844- 164-5, 176 pages.
- Camire M.E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In *Extruders in Food Applications* (M.N. Riaz, ed.) pp. 127–147, Technomic Publishing Co.Inc. Lancaster, PA.
- Chang Y.K., Martinez-Bustos F., Lara H. (1998). Effect of some extrusion variables on rheological properties and physicochemical changes of cornmeal extruded by twin screw extruder. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 15(4), 370-381.
- Chiang C.J., Johnson J.A. (1977). Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-tuluidine reagent. *Cereal chemistry* 54, 429-435.
- Chinnaswamy R., Hanna M.A. (1990). Relationship between viscosity and expansion properties of various extrusion-cooked grain components. *Food Hydrocolloids* 3, 423–434.
- Colonna P., Tayeb J., Mercier C. (1989). Extrusion cooking of starch and starchy products. In *Extrusion-cooking* (C. Mercier, P. Linko, J.M. Harper eds.), pp.247-319. AACC, St. Paul, MN, USA.
- De Pilli T., Carbone B.F., Fiore A.G., Severini C. (2007). Effect of some emulsifiers on the structure of extrudates with high content of fat. *Journal of Food Engineering* 79, 1351–1358.
- Della Valle F.R., Villanueva H., Reyes-Govea J., Escobedo M., Bourges H., Ponce J., Munoz M.J. (1981). Development, evaluation and industrial production of a powdered soy-oats infant formula using a low-cost extruder. *Journal of Food Science* 46(1), 192–197.
- Desrumaux A., Bouvier J.M., Burri J. (1999). Effect of free fatty acids addition on corn grits extrusion cooking. *Cereal Chemistry* 76(5), 699-704.
- Faubion J.M., Hosenev R.C. (1982). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. II. Effect of protein and lipid on extrudate properties. *Cereal Chemistry* 59(6), 533-537.
- Frame N.D. (1994). *The Technology of Extrusion Cooking*. ed. N.D. Frame. pp.1-51. Blackie Academic & Professional, London.

- Galloway G.I., Biliaderis C.G., Stanley D.W. (1989). Properties of structure of amylose-glycerol monostearate complexes formed in solution or on extrusion of wheat flour. *Journal of Food Science* 54, 950-957.
- Guha M., Ali S.Z. (2006). Extrusion cooking of rice: Effect of amylose content and barrel temperature on product profile. *Journal of Food Processing and Preservation* 30(6), 706–716.
- Guha M., Ali S.Z., Bhattacharya S. (2003). Screening of variables for extrusion of rice flour employing a Plackett–Burman design. *Journal of Food Engineering* 57, 135–144.
- Gujska E., Khan K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fraction of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science* 55, 466–469.
- Gutkoski L.C., El-Dash A.A. (1999). Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. *Plant Foods for Human Nutrition* 54, 315–325.
- Guy R.C.E. (1994). Raw materials for extrusion cooking processes. In: The technology of extrusion cooking. Frame, N.D. (Ed), pp. 52-72. Blackie Academic & Professional, London.
- Guzman-Tello R., Cheftel J.C. (1990). Colour loss during extrusion cooking of  $\beta$ -carotene-wheat flour mixes as an indicator of the intensity of thermal and oxidative processing. *International Journal of Food Science & Technology* 25(4), 420-434.
- Hagenimana A., Ding X., Fang T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science* 43, 38–46.
- Harper J.M. (1981). Extrusion of starch and starchy materials. In *Extrusion of Foods*, Vol 2 (J.M. Harper, ed.) pp. 41–60, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Holmes J., Bjöck I., Drews A., Asp N. (1986). A rapid method for the analysis of starch. *Starch* 38, 224-226.
- Ilo S., Liu Y., Berghofer E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 32, 79-88.
- Ilo S., Schoenlechner R., Berghofer E. (2000). Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites* 97 (51), 97-110.
- Iwe M.O., Ngoddy P.O. (1998). Proximate composition and some functional properties of extrusion cooked soybean and sweet potato blends. *Plant Food Human Nutrition* 53(2), 121–132.
- Jager T., van Zuilichem D.J., Stolp W., van't Riet K. (1991): Residence time distributions in extrusion cooking. Part VI: Viscous dissipation in a drossel element in the feed zone of a counter-rotating, twinscrew extruder. *Journal of Food Engineering* 12, 67- 82.
- Jones D., Chinnaswamy R., Tan Y., Hanna M. (2000). Physicochemical properties of ready-to-eat breakfast cereals. *Cereal Food World* 45(4), 164–168.
- Kadan R.S., Bryant R.J., Pepperman A.B. (2003). Functional properties of extruded rice flours. *Journal of Food Science* 68, 1669–1672.
- Kainuma K., Matsunaga A., Itagawa N., Kobayashi S. (1981). New enzyme system  $\beta$ -amylase-pullulanase to determine the degree of gelatinization and retrogradation of starch products. *Journal of Japanese society on starch science* 28, 235-240.
- Malkki Y., Kervinen R., Olkku J., Linko P. (1984). Effect of monoglycerides during cooking extrusion of wheat flour. In *Fats (Lipids) in Baking and Extrusion, Lipid Forum Symposium*, Goteborg, Sweden, pp. 130-137, ed. R. Marcuse.
- Meuser F., Van Lengerich B. (1992). System analytical model for the extrusion of starches. In J. L. Kokini, C. T. Ho, & M. V. Karwe (Eds.), *Food extrusion and technology*, pp. 619–630, New York: Marcel Dekker.
- Milan-Carrillo C., Reyes-Moreno C., Camacho-Hernandez I., Rouzaud-Sandez O. (2002). Optimisation of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum L*) into a useful product. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 718-728.
- Moretti D., Lee T.-C., Zimmermann M.B., Nuessli J., Hurrell R.F. (2005). Development and evaluation of iron-fortified extruded rice grains. *Journal of Food Science* 70(5), 330–336.

- Mouquet C., Salvignol B., Van Hoan N., Monvois J., Trèche S., (2003). Ability of a 'very low-cost extruder' to produce instant infant flours at a small scale in Vietnam. *Food Chemistry* 82, 249–255.
- Mouquet C., Trèche S. (2001). Viscosity of gruels for infants: a comparison of measurement procedures. *International Journal of Food Science & Nutrition* 52, 389-400.
- Pan B.S., Kong M.S., Chen H.H. (1992). Twinscrew extrusion for expanded rice products: processing parameters and formulation of extrudate properties. In: Food Extrusion Science and Technology. Kokini J.L., Ho, C. and Karwe, M.V. (Eds), pp. 693-709, Marcel Dekker inc., New York.
- Pelembé L.A., Ecrasmus C., Taylor J.R.N. (2002). Development of a protein-rich composite sorghum-cowpea instant porridge by extrusion cooking process. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 35, 120-127.
- Reyes-Moreno C., Milan-Carrillo J., Gutierrez-Dorado R., Paredes-Lopez O., Cuevas-Rodriguez E.O., Garzon-Tiznado J.A. (2003). Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of extrusion process. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 36, 685–695.
- Sacchetti S., Pinnavaia G.G., Guidolin E., Dalla Rosa M. (2004). Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. *Food Research International* 37, 527-534.
- Singh B., Sekhon K.S., Singh N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry* 100, 198–202.
- Su C.-W., Kong M.-S. (2007). Effects of soybean oil, cellulose, and SiO<sub>2</sub> addition on the lubrication and product properties of rice extrusion. *Journal of Food Engineering* 78, 723–729.
- Suknark K., Philips R.D., Chinnan M.S. (1997). Physical properties of directly expanded extrudates formulated from partially defatted peanut flour and different types of starch. *Food Research International* 30, 515–583.
- Sun T., Lærke H.N., Jorgensen H., Bach Knudsen K.E. (2006). The effect of extrusion cooking of different starch sources on the *in vitro* and *in vivo* digestibility in growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 131, 66–85.
- Thymi S., Krokida M.K., Pappa A., Maroulis Z.B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering* 68, 519–526
- Unlu E., Faller J.F. (2002). RTD in twin-screw food extrusion. *Journal of Food Engineering* 53(2), 115-131.
- Van Hoan N., Mouquet-Rivier C. Trèche S. *in press*. Effects of starch, lipid and moisture contents on extrusion behaviour and extrudate characteristics of rice-based blends prepared with a very-low-cost extruder. *Journal of Food Process and Engineering*. Accepted the 4<sup>th</sup> April, 2008.
- Van Soest P.S. (1963). Use of detergents in the analysis of fibrous feed II- A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of Association of Official Analytical Chemistry* 46, 829-835.
- Yeh A.-I., Wu T.-W., Jaw I.-M. (1999). Starch transitions and their influence on flow pattern during single-screw extrusion cooking of rice flour. *Food and Bioproducts Processing* 77(1), 47-54.
- Zamora N.C. (2003). Effect of extrusion on the activity of anti-nutritional factors and *in vitro* digestibility of protein and starch in flours of *Canavalia ensiformis*. *Archivos Latinoamericanos Nutricion* 53(3), 293-8.
- Zielinski H., Kozłowska H., Lewczuk B. (2001). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2, 159-169.
- Schweizer T.F., Raimann S., Solm J., Elliasson A.-C., Asp N.G. (1986). Influence of drum-drying and twin screw extrusion cooking on wheat carbohydrates II. Effect of lipids on physical properties, degradation and complex formation of starch in wheat flour. *Journal of Cereal Science* 4, 249-260.

## Chapitre V-2

# UTILISATION DE «*CUISEURS-EXTRUDEURS À TRÈS FAIBLE COÛT*» POUR LA PRODUCTION DE FARINES INFANTILES: EFFETS DU NIVEAU D'USURE DE LA VIS EN FONCTION DE LA COMPOSITION DES MÉLANGES

VAN HOAN Nguyen, MOUQUET-RIVIER Claire, TRECHE Serge

### Résumé

Les effets de l'usure de la vis d'un extrudeur à très faible coût (EX800, CTC) fabriqué au Vietnam sur le comportement en extrusion, les caractéristiques des extrudats et la consistance de bouillies à base de riz préparées à partir de ces extrudats ont été étudiés. Les trois niveaux d'usure pris en compte correspondent à des quantités différentes de matière (*mélange riz/sésame*) passées dans l'extrudeur (0, 3,5 tonnes et 7 tonnes). Les mélanges de riz, soja et huile de soja ont été formulés de manière à avoir différentes teneurs en amidon (60, 65 et 70g/100g MS) et en lipides (6,2, 8,2 et 10,2 g/100g MS).

La méthodologie des plans d'expériences (plan factoriel 3<sup>3</sup>) associée à l'analyse des surfaces de réponse a été utilisée pour évaluer les effets de trois variables indépendantes (*niveau d'usure de la vis, teneur en amidon et teneur en lipides*) sur certains paramètres d'extrusion (*température, pression*), sur certaines caractéristiques des extrudats (*expansion, gonflement et solubilité dans l'eau, pertes en lipides et taux de gélatinisation*) et sur la viscosité apparente de bouillies préparées à partir des farines extrudées pour en calculer un indice d'instantanéité.

L'usure de la vis se traduit par une diminution de la température et de la pression au niveau de la filière, de l'expansion des extrudats, du gonflement (WAI) et de la solubilité WSI) dans l'eau ainsi que de l'indice d'instantanéité des farines extrudées. Les effets de la teneur en amidon et de la teneur en lipides sont identiques à ceux observés à l'occasion d'études précédentes réalisées avec le même type de cuiseur-extrudeur.

Pour prolonger la durée d'utilisation des vis et des fourreaux, il serait nécessaire d'utiliser des matériaux plus solides ou des procédés plus adaptés pour leur fabrication. Pour compenser les effets de l'usure de la vis, il semble dans une certaine mesure possible d'utiliser des mélanges ayant des teneurs plus élevées en amidon et plus faibles en lipides que ceux utilisés avec une vis neuve.

**Mots-clés :** Cuisson-extrusion – usure de la vis – amidon – lipides – farines instantanées

## Introduction

La cuisson extrusion est considérée comme un procédé efficace pour la préparation de farines infantiles. Cependant, au Vietnam, cette technologie est encore peu utilisée en raison du coût élevé et de la capacité trop importante des extrudeurs généralement proposés.

Il est maintenant établi que le cuiseur-extrudeur à très faible coût (EX800, CTC- *Center for Technology transfer and Consultancy on investment*; Post Harvest Institute) mis au point au Vietnam dans le cadre du programme Fasevie (Berger *et al.*, 2004 ; Bruyeron *et al.*, 2006) permet de fabriquer localement et à petite échelle des farines infantiles ayant toutes les caractéristiques requises à partir de matières agricoles disponibles (Mouquet *et al.*, 2003 ; Van Hoan, *in press*).

Cependant, le suivi de la qualité des farines produites montre que les extrudats préparés avec des vis ayant servi à la production de plus de deux tonnes de farines sont plus durs et moins expansés que ceux produits avec une vis neuve. Cette observation suggère que le niveau d'usure de la vis influe sur les caractéristiques des extrudats et qu'il est donc nécessaire de connaître la nature et l'importance de ces changements afin de mieux maîtriser le fonctionnement de cet équipement.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier l'effet du niveau d'usure de la vis sur le comportement en extrusion, les caractéristiques des extrudats et la consistance de bouillies à base de riz préparées à partir de ces extrudats afin d'évaluer la durabilité de la vis actuellement utilisée.

## Matériels et méthodes

*Cette partie est rigoureusement identique à la partie correspondante du Chapitre V-2, si ce n'est que le facteur « longueur de la vis » est remplacé par le facteur « niveau d'usure de la vis »*

Signalons seulement que :

- La longueur des vis utilisées pour cette étude est de 28 cm.
- Les trois niveaux d'usure pris en compte correspondent à des quantités différentes de matière (*mélange riz/sésame*) passées dans l'extrudeur (0, 3,5 tonnes et 7 tonnes).

## Résultats et discussions

Le comportement en extrusion et les caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies obtenus en utilisant des vis de niveaux d'usure différents et en faisant varier les teneurs en amidon et en lipides des mélanges sont présentés dans le tableau V-2/1.

L'analyse des données issues du plan d'expérience a permis de calculer les coefficients de régression ajustés aux données (Tableau V-2/2). Leur niveau de signification permet d'identifier parmi les 3 variables indépendantes celles qui exercent un effet principal (linéaire), un effet quadratique ou un effet d'interaction sur les variables réponses prises en compte.

Les valeurs des coefficients de corrélation ( $R^2$ ) qui rendent compte de l'adéquation du modèle proposé aux valeurs expérimentales sont, pour 5 variables sur les 10 étudiées, suffisantes ( $\geq 0,90$ ) pour valider les modèles proposés. Comme dans une étude précédente visant à préciser l'effet de la longueur de la vis sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies, c'est pour la mesure de la viscosité apparente des bouillies préparées par cuisson et pour le taux de gélatinisation des extrudats que l'ajustement du modèle aux valeurs expérimentales est le moins bon.

**Tableau V-2/1 :** Comportement en extrusion et caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies en fonction de niveau d'usure de la vis et des teneurs en amidon et en lipides des mélanges (*les valeurs données sont des moyennes calculées, pour chaque combinaison de niveau d'usure de la vis et de teneur en amidon, à partir des 3 valeurs obtenues pour des teneurs en lipides différentes*).

Variables indépendantes			Comportement en extrusion et caractéristiques physicochimiques des extrudats et des bouillies									
			Au niveau de la filière		Sur les extrudats ou farines extrudés					Sur les bouillies		
Niveau d'usure de la vis	Teneur en amidon (g/100g MS)	Teneur en lipides (g/100g MS)	Température (°C)	Pression (Bar)	Indice d'expansion	WAI (g/g)	WSI (%)	Perte en lipides (g/100g MS)	Taux de gélatinisation	Viscosité après cuisson (Pa.s)	Viscosité (ajout d'eau à 75°C) (Pa.s)	Indice d'instantanéité
Niveau 0 (Vis neuve)	60	6,2	165,0 ± 3,0	33,0 ± 11,4	4,1 ± 0,6	3,9 ± 0,1	13,1 ± 0,5	0,4 ± 0,7	94,9 ± 1,1	1,7 ± 0,3	0,5 ± 0,0	-1,2 ± 0,3
	65		163,0 ± 2,6	44,0 ± 13,0	4,2 ± 0,4	4,5 ± 0,3	12,8 ± 0,8	0,8 ± 1,0	99,0 ± 1,5	1,7 ± 0,1	1,0 ± 0,3	-0,7 ± 0,2
	70		162,3 ± 2,1	38,0 ± 11,5	5,2 ± 0,1	5,2 ± 0,2	13,1 ± 0,9	1,6 ± 1,6	100,0 ± 0,0	1,4 ± 0,3	1,4 ± 0,1	0,0 ± 0,3
Niveau 1 (après traitement de 3,5t de mélanges)	60	8,2	162,3 ± 3,8	34,3 ± 8,0	3,4 ± 0,2	3,8 ± 0,2	13,0 ± 0,5	0,4 ± 0,5	95,3 ± 0,9	1,3 ± 0,2	1,0 ± 0,2	-0,4 ± 0,1
	65		156,7 ± 3,1	33,0 ± 6,6	3,8 ± 0,3	4,0 ± 0,2	13,1 ± 1,0	0,9 ± 1,0	97,9 ± 1,1	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,0	0,0 ± 0,1
	70		158,3 ± 3,5	32,0 ± 7,0	4,8 ± 0,3	4,6 ± 0,1	14,0 ± 1,0	2,0 ± 1,5	99,6 ± 0,7	1,2 ± 0,2	1,6 ± 0,1	0,4 ± 0,2
Niveau 2 (après traitement de 7t de mélanges)	60	10,2	155,3 ± 4,2	33,0 ± 7,0	2,9 ± 0,3	3,0 ± 0,1	11,4 ± 0,4	0,8 ± 0,8	98,3 ± 0,7	1,7 ± 0,2	0,3 ± 0,1	-1,4 ± 0,3
	65		151,7 ± 0,6	31,7 ± 6,7	3,1 ± 0,3	3,3 ± 0,2	11,1 ± 0,6	0,4 ± 0,3	98,0 ± 1,0	1,7 ± 0,0	0,6 ± 0,1	-1,1 ± 0,1
	70		158,7 ± 1,5	28,7 ± 7,5	3,8 ± 0,5	3,9 ± 0,0	10,8 ± 0,2	0,9 ± 0,9	100,0 ± 0,1	1,6 ± 0,2	1,0 ± 0,1	-0,7 ± 0,1

Moyennes ± écarts- types des 3 valeurs obtenues pour des teneurs en lipides différentes.

**Tableau V-2/2:** Coefficients de régression ajustés aux données.

	Au niveau de la filière		Sur les extrudats ou farines extrudées					Sur les bouillies <sup>1</sup>		
	Température (°C)	Pression (Bar)	Indice d'expansion	WAI (g/g)	WSI (%)	Perte en Lipides (g/100g MS)	Taux de gélatinisation	Viscosité après cuisson (Pa.s)	Viscosité (ajout d'eau à 75°C) (Pa.s)	Indice d'instantanéité
<b><i>b</i><sub>0</sub></b>	157,59	33,41	3,68	4,11	13,05	0,70	97,70	1,28	1,22	-0,05
Linéaire										
<b><i>b</i><sub>1</sub></b>	-4,11***	-3,61**	-0,61***	-0,58***	-0,94***	-0,12	0,39	0,05	-0,16***	-0,21***
<b><i>b</i><sub>2</sub></b>	-0,56	-0,28	0,59***	0,48***	0,07	0,48***	1,83***	-0,09	0,35***	0,44***
<b><i>b</i><sub>3</sub></b>	-1,83**	-7,83***	-0,21**	0,13**	-0,53***	0,89***	0,11	0,09	0,04	-0,05
Quadratique										
<b><i>b</i><sub>11</sub></b>	0,22	1,61	-0,08	-0,16*	-1,33***	-0,28	0,72	0,38***	-0,47***	-0,85
<b><i>b</i><sub>22</sub></b>	3,22**	-3,06	0,36**	0,08	0,24	0,33*	-0,28	-0,01	0,04	0,05
<b><i>b</i><sub>33</sub></b>	-0,94	2,61	0,09	-0,05	0,27	0,28	0,22	-0,03	0,02	0,05
Interaction										
<b><i>b</i><sub>12</sub></b>	1,50	-2,33	-0,05	-0,11*	-0,15	0,26*	-0,83*	0,07	-0,05	-0,12***
<b><i>b</i><sub>13</sub></b>	-0,75	1,25	0,002	-0,05	0,18	0,18	0	-0,003	-0,03	-0,03
<b><i>b</i><sub>23</sub></b>	0,42	0	0,13	0,02	-0,10	0,33**	0,17	-0,01	0,03	0,04
<b>R<sup>2</sup></b>	0,80	0,79	0,91	0,97	0,87	0,90	0,78	0,66	0,94	0,92

WAI, gonflement dans l'eau (Water absorption index); WSI, solubilité dans l'eau (Water solubility index)

<sup>1</sup> préparées à la concentration de 16 g MS/100g

*b*<sub>1</sub>: Niveau d'usure ;

*b*<sub>2</sub>: Teneur en amidon;

*b*<sub>3</sub>: Teneur en lipides

\* *p*<0,05

\*\* *p*<0,01

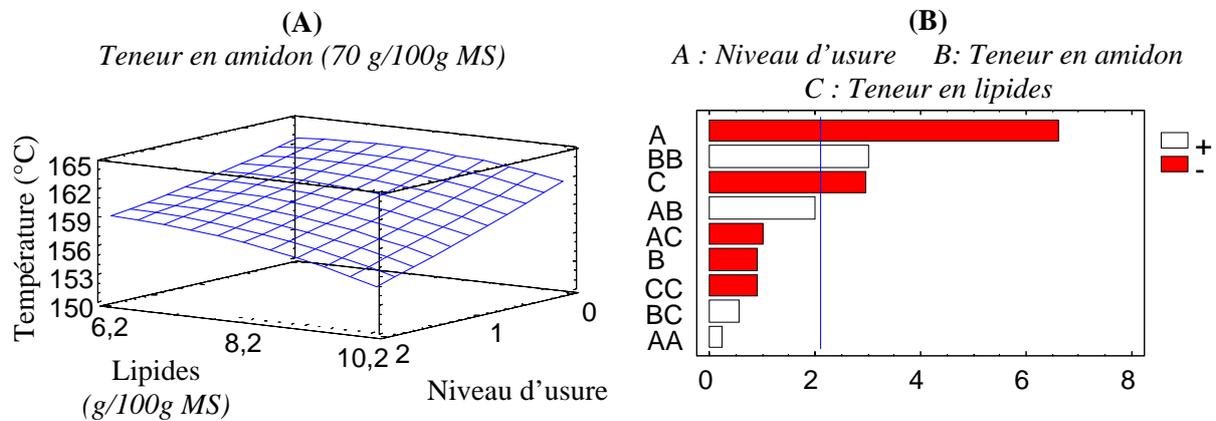
\*\*\* *p*<0,001

## Température et pression au niveau de la filière

### - Température

Les effets des variables indépendantes sur la température mesurée à la filière sont présentés dans le tableau V-2/2 et sur la figure V-2/1A et B. L'augmentation du niveau d'usure de la vis et celle de la teneur en lipides provoquent une diminution hautement significative de la température ( $p < 0,001$ ). La teneur en amidon n'a pas d'effet linéaire sur la température mais exerce un effet quadratique positif ( $p < 0,01$ ). Le graphique de Pareto montre que le niveau d'usure est le facteur le plus influent sur la température. La température maximale (168°C) est obtenue pour le niveau d'usure 1, une teneur en amidon de 60 g/100g MS et une teneur en lipides de 6,6 g/100g MS.

L'effet négatif du niveau d'usure de la vis sur la température s'explique par la diminution des frictions entre les matières premières et les surfaces de la vis et de fourreau. L'effet de la teneur en lipides peut également s'expliquer par une diminution des frictions due à l'effet lubrifiant des lipides (Ilo *et al.*, 2000).

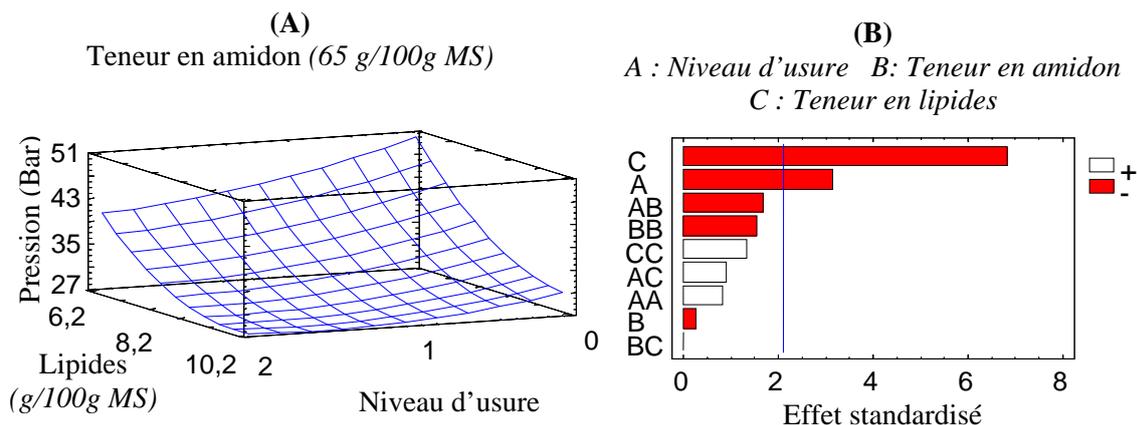


**Figure V-2/1A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé pour les effets sur la température.

### - Pression

La pression au niveau de la filière est influencée significativement par le niveau d'usure de la vis et par la teneur en lipides des mélanges (Tableau V-2/2 et Figure V-2/2A et B). Elle diminue quand le niveau d'usure ( $p < 0,01$ ) ou la teneur en lipides ( $p < 0,001$ ) augmentent, mais c'est la teneur en lipides qui est le facteur le plus influent. En revanche, la teneur en amidon n'influe pas sur la pression et aucune interaction entre les effets des 3 variables n'a été observée. La pression minimale (Bar) est obtenue avec un niveau d'usure de 2, une teneur en amidon de 70 g/100g MS et une teneur en lipides de 10 g/100g MS.

La diminution de la pression en relation avec le niveau d'usure de la vis peut s'expliquer, comme pour la température, par la diminution des frictions entre les matières premières et la surface de la vis et du fourreau. L'effet de la teneur en lipides sur la pression, qui a déjà été observé par Malkki *et al.* (1984), peut s'expliquer de la même manière.

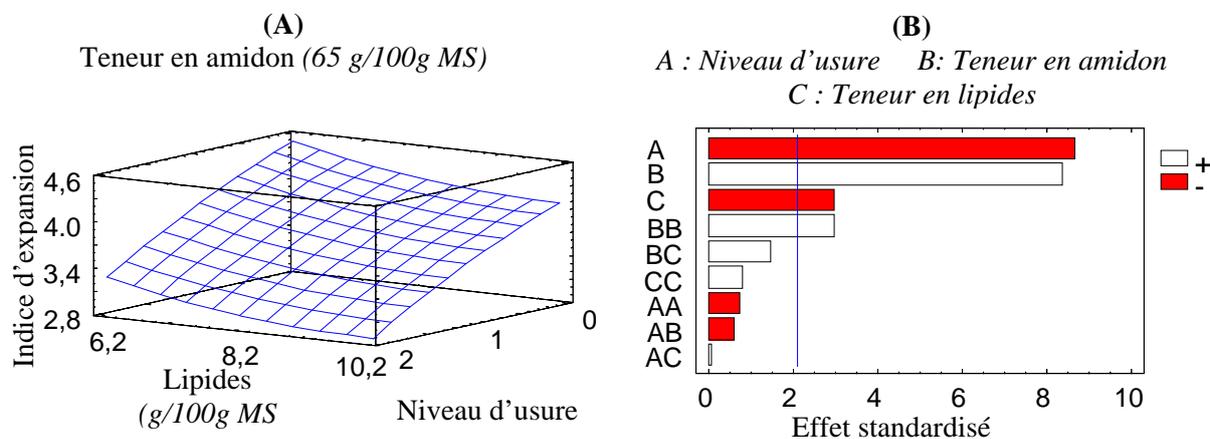


**Figure V-2/2A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé pour les effets sur la pression.

### Caractéristiques physico-chimiques des extrudats

#### - Indice d'expansion

Les trois variables indépendantes ont des effets significatifs sur l'indice d'expansion (Tableau V-2/3 et Figure V-2/3A et B). Une augmentation du niveau d'usure de la vis ou de la teneur en lipides des mélanges diminue l'indice d'expansion des extrudats ( $p < 0,001$ ) tandis que celle de la teneur en amidon a pour effet de l'augmenter ( $p < 0,001$ ). La teneur en amidon exerce également un effet négatif quadratique significatif ( $p < 0,01$ ). Parmi les 3 variables étudiées, c'est le niveau d'usure de la vis qui a l'effet le plus important (Figure V-2/3B). L'expansion maximale a été observée avec une vis neuve, une teneur en amidon de 70g/100g MS et une teneur en lipides de 6,2g/100g MS.



**Figure V-2/3A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé pour les effets sur l'indice d'expansion.

La diminution de l'intensité du cisaillement entre la vis et le fourreau consécutive à l'usure de la vis est probablement la cause de l'effet négatif de ce facteur sur l'expansion des extrudats. L'indice d'expansion obtenu à partir d'un mélange donné est donc un bon indicateur du niveau d'usure de la vis.

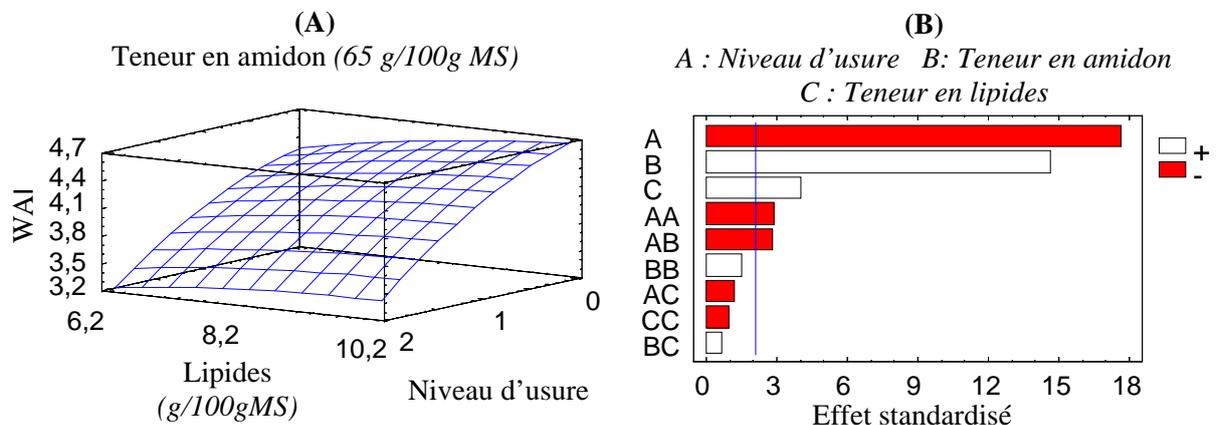
L'effet de la teneur en lipides sur l'expansion des extrudats est en accord avec les constatations de [Faubion et Hoseney \(1982\)](#), [Malkki et al. \(1984\)](#) et [Bhatnagar et Hanna \(1994\)](#). La diminution de l'expansion quand la teneur en lipides augmente s'explique en grande partie par la diminution de la température qui est un facteur particulièrement influent

de l'expansion des extrudats (Ali *et al.*, 1996; Ilo *et al.*, 1999; Thymi *et al.*, 2005; Guha *et al.*, 2006). La complexation de l'amylose par les lipides pourrait aussi expliquer la diminution de l'expansion (Galloway *et al.*, 1989; Bhatnagar et Hanna, 1994).

- Gonflement des extrudats (WAI)

Les trois variables étudiées ont des effets linéaires significatifs sur les caractéristiques des extrudats (Tableau V-2/2 et Figure V-2/4A et B). Plus la vis est usée, moins le gonflement dans l'eau des extrudats est important ( $p < 0,001$ ). Le niveau d'usure de vis a aussi des effets quadratiques significatifs ( $p < 0,05$ ). L'augmentation de la teneur en amidon et de la teneur en lipides s'accompagnent d'une augmentation du WAI ( $p < 0,001$  et  $p < 0,01$ , respectivement). Il existe également un effet interactif entre le niveau d'usure de la vis et la teneur en amidon ( $p < 0,05$ ). Le niveau d'usure de la vis est la variable qui a l'effet le plus important (Figure V-2/4B). La valeur maximale du WAI est observé avec une vis neuve, une teneur en amidon de 60g/100g MS et une teneur en lipides de 6,2g/100g MS.

L'effet négatif de l'usure de la vis sur le gonflement des farines extrudées est probablement la conséquence d'une dégradation moins importante de l'amidon en raison d'une diminution des frictions entre la vis et le fourreau.



**Figure V-2/4A et B:** Surface de réponse et graphique de Pareto standardisé pour les effets sur le gonflement des extrudats.

- Solubilité des extrudats (WSI)

Le niveau d'usure de la vis et la teneur en lipides des mélanges influent fortement sur le WSI des extrudats (Tableau V-2/2). Leur augmentation entraîne une diminution hautement significative du WSI ( $p < 0,001$ ). Le niveau d'usure exerce également un effet quadratique négatif sur le WSI ( $p < 0,001$ ). La teneur en amidon n'a pas d'effet et aucun effet d'interaction n'a été observé entre les variables étudiées. L'effet linéaire négatif du niveau d'usure de la vis sur le WSI est l'effet le plus important.

La valeur du WSI reflète le niveau de dégradation de l'amidon après extrusion (Gujska et Khan, 1990). Il est donc normal que le WSI diminue quand le niveau d'usure de la vis augmente. L'effet négatif de la teneur en lipides sur la solubilité a été discuté dans les chapitres IV-1, IV-2 et V-1.

### - Pertes en lipides

La teneur en amidon et en lipides des mélanges influent fortement sur la perte en lipides au cours de l'extrusion (Tableau V-2/2). Leur augmentation s'accompagne d'une augmentation des pertes en lipides ( $p < 0,001$ ). La teneur en amidon a également un effet quadratique ( $p < 0,05$ ). Il existe des interactions, d'une part, entre l'effet du niveau d'usure de la vis et celui de la teneur en amidon ( $p < 0,05$ ) et, d'autre part, entre celui de la teneur en amidon et celui de la teneur en lipides ( $p < 0,01$ ). La teneur en lipides est la variable qui a l'effet le plus important. Les pertes minimales seraient observées avec une vis ayant un niveau d'usure de 1,7, une teneur en amidon de 64g/100g MS et une teneur en lipides de 6,3g/100g MS.

L'effet de la teneur en amidon des mélanges sur la perte de lipides au cours de l'extrusion est de même nature que celui observé dans les essais précédents réalisés avec les mêmes mélanges à des teneurs en eau différentes (Chapitre IV-1), avec des mélanges préparés à partir d'autres matières premières (Chapitre IV-2) ou avec les mêmes mélanges mais avec des vis de longueurs différentes (Chapitre V-1). L'effet de la teneur en lipides des mélanges sur la perte en lipides pendant l'extrusion confirme les résultats obtenus antérieurement avec ce type de cuiseur-extrudeur (Chapitre IV-1, IV-2 et V-1) ou avec des cuiseurs-extrudeurs plus sophistiqués (Berset *et al.*, 1994; Carmire, 2000; De Pilli *et al.*, 2007).

Le résultat de cette étude indique que la perte de lipides est inévitable et que l'usure de la vis ne modifie pas l'importance de cette perte. Ceci confirme une nouvelle fois la nécessité de tenir compte des pertes en lipides au moment de la formulation et au cours de la fabrication de farines infantiles par ce type de cuiseur-extrudeur.

### - Taux de gélatinisation

Les taux de gélatinisation des extrudats sont très élevés : ils varient entre 94 et 100%. Il ne semble pas y avoir d'effet linéaire ou quadratique du niveau d'usure de la vis et de la teneur en lipides des mélanges sur le taux de gélatinisation de l'amidon des extrudats (Tableau V-2/2). En revanche, la teneur en amidon influe fortement sur le taux de gélatinisation. Une augmentation de teneur en amidon s'accompagne d'une augmentation de ce taux ( $p < 0,001$ ). Par ailleurs, il existe une interaction négative entre le niveau d'usure de la vis et la teneur en amidon sur le taux de gélatinisation ( $p < 0,05$ ).

L'usure de la vis se traduit par une augmentation de l'entrefer vis-fourreau qui devrait avoir pour conséquence de diminuer l'intensité du cisaillement et donc de l'échauffement. On constate que cette diminution ne suffit pas à réduire le taux de gélatinisation. Il est probable que la vitesse de rotation de la vis relativement élevée (~500 t/min) ainsi que la température élevée (>150°C) soit pour maintenir une dégradation importante de l'amidon de riz.

## **Viscosité des bouillies**

### Bouillies préparées par cuisson

Les variations de viscosité apparente des bouillies obtenues par cuisson à ébullition dépendent essentiellement du niveau de dextrinisation de l'amidon obtenu lors de la cuisson-extrusion.

Aucune des trois variables indépendantes n'a d'effet linéaire significatif sur la viscosité apparente des bouillies préparées par cuisson à la concentration de 16,0g MS/100g (Tableau V-2/2) et aucun effet d'interaction entre ces variables n'a été mis en évidence. Seul le niveau d'usure de la vis a un effet quadratique positif sur la viscosité ( $p < 0,001$ ) ce qui semble indiquer une réduction du niveau de dextrinisation de l'amidon. En raison du peu d'effet des trois variables, le modèle proposé a une faible corrélation avec les valeurs de viscosité mesurées ( $R^2=0,66$ ).

### Bouillies préparées par ajout d'eau

Les effets linéaires du niveau d'usure de la vis et de la teneur en amidon sur la viscosité apparente des bouillies préparées par simple ajout d'eau à 75°C et à la concentration de 16,0g MS/100g sont hautement significatifs (Tableau V-2/2). L'augmentation de niveau d'usure de la vis s'accompagne d'une diminution de la viscosité de bouillie ( $p < 0,001$ ) tandis que celle de la teneur en amidon se traduit par une augmentation de viscosité ( $p < 0,001$ ). Le niveau d'usure a également un effet quadratique négatif ( $p < 0,001$ ). En revanche, la teneur en lipides n'a aucun effet significatif sur la viscosité et il n'existe aucun effet d'interaction entre les trois variables. L'effet linéaire de la teneur en amidon est l'effet le plus important.

### **Caractère instantané des farines**

L'évaluation des effets des trois variables indépendantes sur l'indice d'instantanéité des farines est donnée dans le tableau V-2/2. L'augmentation du niveau d'usure de la vis s'accompagne d'une diminution de l'indice d'instantanéité ( $p < 0,001$ ). A l'inverse de la teneur en lipides qui n'a pas d'effet, la teneur en amidon influe également fortement sur l'indice d'instantanéité des farines : une augmentation de teneur de 60 à 70 g MS/100g s'accompagne d'une augmentation de l'indice d'instantanéité ( $p < 0,001$ ) et donc du caractère instantané des bouillies. Le niveau d'usure a également un effet quadratique négatif sur l'indice d'instantanéité ( $p < 0,001$ ) qui est l'effet le plus important parmi tous les effets observés. Aucun effet d'interaction entre les trois variables n'a été observé. La valeur maximale de l'indice d'instantanéité (0,5) est obtenue avec un niveau d'usure égal à 0,8, une teneur en amidon de 70g/100g MS et une teneur en lipides de 6,2g/100g MS. Avec une vis usée et en utilisant des mélanges à faible teneur en amidon il apparaît difficile d'obtenir pour cette longueur de vis des farines véritablement instantanées.

### **Conclusion**

Le niveau d'usure de la vis a des effets significatifs linéaires, quadratiques ou d'interaction avec les teneurs en amidon et en lipides sur l'ensemble des caractéristiques des extrudats et des bouillies prises en compte. L'augmentation du niveau d'usure provoque notamment une diminution de l'expansion des extrudats ainsi que de la solubilité et du gonflement dans l'eau et de l'indice d'instantanéité des farines. Ces effets peuvent se résumer en constatant que plus la vis est usée, moins le degré de cuisson des extrudats est élevé. Les niveaux d'usure se répercutant sur les caractéristiques des produits sont atteints après passage dans l'extrudeur de seulement 5 à 7 tonnes de mélanges. Pour prolonger la durée d'utilisation des vis et des fourreaux, il serait nécessaire d'utiliser des matériaux plus solides ou des procédés plus adaptés pour leur fabrication.

Les teneurs en amidon et en lipides ont également des effets sur les caractéristiques étudiées. Ces effets sont les mêmes que ceux observés au cours des autres études rapportées dans cette thèse (Chapitres IV-1, IV-2 et V-1). Les résultats obtenus confirment une nouvelle fois l'importance de la composition des mélanges lorsqu'il s'agit d'extruder des mélanges amylicés en vue d'obtenir des farines infantiles. Pour compenser les effets de l'usure de la vis, il semble possible, dans une certaine mesure, d'utiliser des mélanges ayant des teneurs plus élevées en amidon et plus faibles en lipides que ceux utilisés avec une vis neuve.

### **Remerciements**

Ce travail a été financé dans le cadre du programme Fasevie, mené par le GRET (*Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques*) l'IRD (*Institut de recherche pour le développement*) et le NIN (*Institut National de Nutrition du Vietnam*) et principalement

financé par le Conseil régional du Nord-Pas de Calais, le conseil général des Côtes-D'Armor, le Ministère Français des Affaires étrangères, le Comité français pour l'Unicef et l'IRD.

## Références

- Ali Y., Hanna M.A., Chinnaswamy R. (1996). Expansion characteristics of extruded corn grits. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 29, 702–707.
- Berger J., Laillou A., Khan N.C., Monvois C., Salvignol B., Trèche S. (2004a). Fasevie: une solution originale au problème de la malnutrition infantile au Vietnam. *Les cahiers de la Coopération française au Vietnam*. 2004, N°1: 1-30. <http://www.ambafrance-vn.org>
- Berset C. (1994). Influence de la cuisson-extrusion sur les lipides et les pigments. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Della Valle), Tech&Doc Lavoisier, pp. 142-162,
- Bhatnagar S., Hanna M.A. (1994) . Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal Chemistry* 71, 582-587.
- Bruyeron O., Nguyen Cong Khan, Berger J., Salvignol S., Monvois C., Trèche S. *Alimentation infantile au Vietnam – Dix ans d'actions et d'enseignements du programme Fasevie*. Paris, 2006, Ed. Gret, Collection Etudes et Travaux, ISBN : 2-86844- 164-5, 176 pages.
- Camire M.E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In *Extruders in Food Applications* (M.N. Riaz, ed.) pp. 127–147, Technomic Publishing Co.Inc. Lancaster, PA.
- De Pilli T., Carbone B.F., Fiore A.G., Severini C. (2007). Effect of some emulsifiers on the structure of extrudates with high content of fat. *Journal of Food Engineering* 79, 1351–1358.
- Faubion J.M., Hosney R.C. (1982). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. *Cereal Chemistry* 59(6), 529-533.
- Galloway G.I., Biliaderis C.G., Stanley D.W. (1989). Properties of structure of amylose-glycerol monostearate complexes formed in solution or on extrusion of wheat flour. *Journal of Food Science* 54, 950-957.
- Guha M., Ali S.Z. (2006). Extrusion cooking of rice: Effect of amylose content and barrel temperature on product profile. *Journal of Food Processing and Preservation* 30(6), 706–716.
- Gujska E., Khan K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fraction of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science* 55, 466–469.
- Ilo S., Berghofer E. (1999). Kinetics of colour changes during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering* 39, 73-80.
- Malkki Y., Kervinen R., Olkku J., Linko P. (1984). Effect of monoglycerides during cooking extrusion of wheat flour. In *Fats (Lipids) in Baking and Extrusion, Lipid Forum Symposium*, Goteborg, Sweden, ed. R. Marcuse, pp. 130-137.
- Mouquet C., Salvignol B., Van Hoan N., Monvois J., Trèche S., (2003). Ability of a 'very low-cost extruder' to produce instant infant flours at a small scale in Vietnam. *Food Chemistry* 82, 249–255.
- Thymi S., Krokida M.K., Pappa A., Maroulis Z.B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering* 68, 519–526
- Van Hoan N., Mouquet-Rivier C., Trèche S. *In press*. Effects of starch, lipid and moisture contents on extrusion behaviour and extrudate characteristics of rice-based blends prepared with a very-low-cost extruder. *Journal of Food Process and Engineering*. Accepted the 4<sup>th</sup> April, 2008..

# Chapitre VI

INFLUENCE DES PROCÉDÉS DE  
FABRICATION DES FARINES  
INFANTILES SUR LES NIVEAUX  
D'INGÉRÉS EN ÉNERGIE ET EN  
NUTRIMENTS DES NOURRISSONS  
DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM

## INTRODUCTION

Les études et expérimentations dont les résultats sont donnés dans les chapitres IV et V ont permis de définir des modalités d'utilisation du CE-TFC mis au point dans le cadre du programme Fasevie au Vietnam pour la production de deux types de farines infantiles: une farine extrudée instantanée et une farine extrudée à cuisson rapide.

Parallèlement, pour les populations des régions reculées où les conditions d'hygiène ne sont pas assurées, le programme Fasevie a également mis au point une farine à cuire, à partir des mêmes matières premières que les deux précédentes, dont la production ne nécessite pas l'utilisation du CE-TFC. Elle est produite en utilisant uniquement des procédés de torréfaction et de broyage avec incorporation d'amylases.

Ce dernier chapitre a pour but de comparer les effets des trois différents modes de fabrication, qui confèrent aux farines des caractéristiques physicochimiques et organoleptiques différentes, sur les niveaux d'ingérés en énergie et en nutriment chez des nourrissons de plus de six mois habitant dans des villages de la province de Quang Nam dans la partie centrale du Vietnam.

Les trois farines présentées ci-dessus ainsi qu'une farine témoin (*de même composition, mais sans traitement de cuisson-extrusion ni incorporation d'enzymes*) ont été proposées aux enfants sous forme de bouillie dans des cantines spécialement aménagées pour cette étude. Les enfants ont consommé chaque type de bouillies à raison de deux repas par jour pendant quatre périodes consécutives de 4 jours. Outre la détermination par pesée des quantités de bouillies consommées par chaque enfant, certaines caractéristiques des bouillies ont été déterminées.

Cette partie est présentée sous forme d'un article à soumettre.

# INFLUENCE DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DES FARINES INFANTILES SUR LES INGÉRÉS EN ÉNERGIE ET EN NUTRIMENTS DES NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM

VAN HOAN Nguyen, MOUQUET-RIVIER Claire,  
EYMARD-DUVERNAY Sabrina, TRECHE Serge

## RÉSUMÉ

Une étude quantitative de l'ingéré en énergie et en nutriment chez des enfants de 6 à 10 mois en milieu rural au Vietnam a été menée dans le but de comparer les effets de différents procédés utilisables pour augmenter la densité énergétique (DE) des bouillies. Pendant 4 périodes de 4 jours, les enfants ont consommé successivement 4 types de bouillies préparées à partir de 4 farines de même composition: une farine extrudée instantanée (bouillie A), une farine extrudée plus  $\alpha$ -amylase (bouillie B), un mélange riz/sésame cru avec du soja torréfié plus  $\alpha$ -amylase (bouillie C) et une bouillie témoin (D) correspondant à la même farine que celle utilisée pour préparer la bouillie C, mais sans incorporation d'amylases. Afin de conférer aux bouillies une même intensité de saveur sucrée, des quantités variables de sucre ont été ajoutées dans les farines en fonction de la teneur en MS des bouillies. La teneur en matière sèche des bouillies A, B, C et D était de respectivement 22,2; 28,8; 29,0 et 13,9 g/100 g.

La DE des bouillies A, B, C étaient, respectivement, 94, 122 et 124 kcal/100g tandis que celle de la bouillie D avait la plus faible DE (59 kcal/100g)

Les quantités de bouillie consommées ont varié en sens inverse de la concentration des bouillies (donc de leur DE). Les ingérés moyens de bouillies A, B, C ont été, respectivement, de 112, 135 et 117 kcal par repas et ils étaient significativement plus élevés que celui de la bouillie D (81 kcal/100g). Les ingérés moyens à partir de deux repas de bouillies A, B, C correspondent à 100% et 73% de l'énergie nécessaire en moyenne à partir des aliments de complément chez les enfants de, respectivement 6-8 mois et 9-11 mois. L'ingéré énergétique à partir de la bouillie D était significativement plus faible que ceux des trois autres bouillies et ne correspondait qu'à seulement 81% et 53% de l'énergie en moyenne nécessaire à partir des aliments complément pour les deux classes d'âge considérée.

**Mots-clés:** Farine instantanée, farine à cuire,  $\alpha$ -amylase, densité énergétique, ingéré en énergie.

## Chapitre VI

# EFFECT OF THE TECHNOLOGY USED TO INCREASE ENERGY DENSITY OF GRUELS ON ENERGY AND NUTRIENT INTAKES OF 6-10-MONTH-OLD VIETNAMESE INFANTS

VAN HOAN Nguyen<sup>1,2,3</sup>, MOUQUET-RIVIER Claire<sup>1</sup>,  
EYMARD-DUVERNAY Sabrina<sup>1</sup> and TRECHE Serge<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research unit 106 "Nutrition, Alimentation, Sociétés", Institut de Recherche pour le Développement, BP 64501, F-34394 Montpellier cedex 5, France.

<sup>2</sup>Fasevie Programme in Vietnam - Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques-GRET, 226, National Institute of Nutrition, 48B, Tang Bat Ho, Hanoi, Vietnam.

<sup>3</sup>Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier, France.

### Abstract

Quantitative study of energy and nutrient intake of 67 infants from 6 to 10 month in rural areas in Vietnam was conducted to compare the effect of different technologies used to increase the density energy (DE) of gruel. During 4 periods of 4 days, the infants consumed successively four gruels which were prepared from flours having the same composition: extruded instant flour (*gruel A*), extruded plus  $\alpha$ -amylase flour (*gruel B*), blend of crude rice and sesame and roasted soybean (*gruel C*), and the control gruel (*gruel D*) which was prepared in the same way as flour for gruel C but without amylase. The quantity of sugar in the flour was varied, as the dry matter content of gruel, in order to have the same sweetness in four gruels.

The dry matter content of gruels in alphabetic order was: 22.2; 28.8; 29.0 and 13.9 g/100 g, respectively. The ED of gruels A, B and C were 94, 122 and 124 kcal/100g, respectively, while the control gruel had lowest DE: 59 kcal/100g.

The intake of gruel A, C and D is inversely linked to the concentration (and to the ED). The average energy intake from gruel A, B and C were respectively 112.0, 134.7 and 117.2 kcal per meal and they were significantly higher than the energy intake from gruel D (81.1 kcal/100g). The mean energy intake from two meals of studied gruels A, B and C can cover 100% and 73% of the energy requirement from complementary food of infant 6-8 months and 9-11 months, respectively. The covering of energy requirement of gruel D (81% and 53%) for two groups of infants was significantly lower than three other gruels.

**Key words:** Instant flour, ready-to-cook flour,  $\alpha$ -amylase, energy density, energy intake.

**Corresponding author:** E-mail address: [nguyenvan\\_hoan@yahoo.fr](mailto:nguyenvan_hoan@yahoo.fr)

## Introduction

In the developing world, 32% (178 millions) of underfive children (WHO standards) are still suffering of stunting (Black *et al.*, 2008). In Vietnam, over the last two decades, a remarkable progress has been made in reducing child undernutrition: thus, the prevalence of stunting for example has decreased from 59.7 % in 1985 to 27.9 % in 2006 (NCHS reference). However, malnutrition is still a major public health concern in this country, and the Vietnamese government has implemented a national plan of action to accelerate the reduction of stunting (Khan *et al.*, 2008). One of the conditions required to prevent the young children from malnutrition is that households have access to affordable complementary foods of appropriate energy and nutrient densities in addition to breast milk. The studies realized through the Fasevie program (Bruyeron *et al.*, 2006) have demonstrated the possibilities to produce nutritious infant flours from local raw materials by using different processes: extrusion-cooking with a very low cost extruder (VLCE) designed by a Vietnamese institute (Center of Technological Consultant and transfer-CTC) or addition of amylase. These processing methods, by enabling a more or less pronounced partial starch hydrolysis, allow the preparation of gruels of high energy density.

The effects of feeding children with high energy density gruels on the quantity and energy intake have been described in numerous studies and in different countries (Bennet *et al.*, 1999; Vieu *et al.*, 2001; Traoré *et al.*, 2005; Islam *et al.*, 2006 and 2008). However, the effect of the type of processing methods used to produce the infant flours allowing the preparation of high energy dense gruels was not investigated.

The objectives of this study were to determine the intakes (in quantity, energy and nutrient) from gruels prepared from flours produced by three processing methods –extrusion-cooking, amylase addition, or a combination of both techniques- compared to that of a minimally-processed gruel prepared from a flour of crude or roasted raw materials without extrusion-cooking or amylase addition.

## Subjects, materials and methods

### Sample's size determination

The sample size was estimated by using data collected previously during a food consumption study in the rural areas of Tam Ky town, in Quang Nam province, centre of Vietnam, which indicated that the energy intake of infant from 6 to 10 months who consumed daily at least 2 meals of a gruel of high energy density (*Favina*) was  $39.4 \pm 19.6$  kcal/kg BW/d. We estimated that a sample size of 65 infants would be sufficient to detect a within-subject difference of 8 kcal/kg BW in mean daily energy intake from the different gruels prepared from flours produced by different processing methods at a 5% level of significance and 95% power.

### Recruitment of study participants

The study was conducted in 6 communes in the countryside of Tam Ky city in Quang Nam province. Before launching the study, a meeting was organized by the coordinator of the study to inform local authorities (the chief of the villages, health workers, and a representative of the women union) of the objectives and activities of the study.

All infants aged from 6 to 10 months (82 infants) during the period planned for the study in those villages were invited to participate in a general health examination in the council health center. To be eligible, infants had to be breastfed, should not be severely malnourished (weight-for-age and height-for-age z-scores > -3) and parents should accept to bring them to the closest canteen of their home twice a day during the whole study. A letter explaining the

objectives and the organization of the study was sent to parents who should give their written consent. For ethical reason, children excluded for health reasons were allowed to eat the gruels like other infants.

During the study, 15 infants have not eaten the gruel regularly because of being sick (5), because caregivers were too busy (7) or because the family had moved far from Tam Ky (3). Finally, sixty-seven infants from 6 to 10 months having no apparent handicap were enrolled in the study.

Then, parents were invited to participate in a meeting during which the objectives and the activities of the study were presented. A written consent was obtained from the mother (or father) of each infant.

Nine canteens that could receive about 8 infants each day were set up. They were open every day from 7H00 to 10H00 and from 15H00 to 18H00.

The protocol of the study was approved by the ethical committee of the National Institute of Nutrition, in Vietnam.

### Study protocol

Infants were fed four types of gruels -one type twice a day- during four periods of four days, the first day of each being considered as an adaptation day, and the three following days as days of observations.

Depending on the period of the study (Table 1), corresponding gruels were prepared by the canteen staff, which was previously trained.

**Table 1.** Design of the study.

	Period 1				Period 2				Period 3				Period 4				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
<i>Day of consumption*</i>																	
Canteens 1, 2	19 infants	Gruel A				Gruel C				Gruel B				Gruel D			
Canteens 3, 4	13 infants	Gruel B				Gruel A				Gruel D				Gruel C			
Canteens 5, 6	13 infants	Gruel C				Gruel D				Gruel A				Gruel B			
Canteens 7, 8, 9	22 infants	Gruel D				Gruel B				Gruel C				Gruel A			

\* Two meals of gruel per day, one in the morning, one in the afternoon

### Composition and preparation of the study flours

The formulations and processing methods of the four infant flours were defined in order to obtain gruels having the following characteristics:

- Gruel A: this gruel is prepared from the instant infant flour *Favina*, as it is produced in the Fasevie program, *i.e.* from an extruded blend of rice and sesame with roasted soybean added and then milk powder, sugar and vitamin and minerals. Gruels A are prepared according to the instant procedure (addition of water at 75°C) in order to have a final dry matter (DM) content of 22 g/100 g corresponding to an energy density of 93.5 kcal/100 g and a Bostwick flow of 65 mm/30 s corresponding to a thick gruel.
- Gruel B: this gruel is prepared with a ready-to-cook flour resulting from an extruded blend of rice, soybean and sesame, with milk powder, sugar, and vitamins and minerals added. An industrial powdered amylase (BAN, 800MG, Novo) is also added at the rate of 0.001%, in order to enable the preparation of gruel -by the cooking procedure (boiling at 100°C for 10 min)-, with final DM content of 29 g/100 g, corresponding to an energy density of 124 kcal/100 g and a Bostwick flow of 95 mm/30 s corresponding to a semi-liquid gruel.

- Gruel C: this gruel is prepared from a flour of a blend of crude rice and sesame and roasted soybean with milk powder, sugar, and vitamins and minerals added. BAN amylase is also added at the rate of 0.006% in order to enable the preparation, by the cooking procedure, of gruel with same DM content (corresponding to an energy density of 124 kcal/100 g) and same Bostwick flow as the gruel B.
- Gruel D: this gruel -the minimally processed one, used as control- is prepared from a flour of a blend of crude rice and sesame, and roasted soybean with milk powder, sugar, and vitamins and minerals added. The gruel is prepared according to the cooking procedure to obtain a final DM content of 14 g/100 g (corresponding to an energy density of 59 kcal/100 g) and with the same Bostwick flow as the gruel A.

The composition of the four infant flours before adding sugar and amylase is the same. The mineral and vitamin premix was designed in order to obtain gruels having nutrient densities that meet the last international recommendations for young children (FAO/WHO, 2002, Lutter and Dewey, 2003). However, in order that the different gruels have the same sweetness, that is supposed to influence their acceptability (Vieu *et al*, 2001), their sugar content based on dry matter contents were determined so that the sugar content based on wet matter is 3.23 g/100 g of gruel (Table 2).

The four types of flours were produced using same batches of rice, sesame and soybean. Extrusion-cooking of rice-sesame (flour A) or rice-sesame-soybean (flour B) was performed using a “very low-cost extruder” EX-800 which is a simple single-screw autogenous extruder developed through Fasevie program and manufactured by CTC in Vietnam. Hulls of soybean were removed in a DH20 dehuller (CTC, Vietnam) and when necessary, the soybean was roasted at 121°C in a gas-roaster. Extrudates, roasted soybean or blends of crude rice and sesame (flours C and D) were grinded and blended in adequate proportions. Resulting flours were then mixed with the other ingredients of the formula (*i.e.* sugar, milk powder, vitamin and mineral premix, CaCO<sub>3</sub>, milk aroma, and if necessary, BAN amylase).

One batch of each type of flour was produced at the beginning of the study and packed into individual sachet containing the quantity required to prepare a bowl of gruel for one child (300 g). The sachets were then stored in a cooled room until use.

**Table 2.** Composition of study flours after adjusting sugar content.

Ingredient	Formula of the 4 flours before sugar addition	Type of gruel			
		A	B	C	D
		Instant	Extruded + BAN	Raw + BAN	Raw
		<b><i>g / 100g DM</i></b>			
Rice	62.19	53.04 <sup>a</sup>	54.73 <sup>a</sup>	54.73 <sup>c</sup>	45.42 <sup>c</sup>
Soybean	18.49	15.77 <sup>b</sup>	16.29 <sup>a</sup>	16.29 <sup>b</sup>	13.52 <sup>b</sup>
Sesame	5.94	5.07 <sup>a</sup>	5.23 <sup>a</sup>	5.23 <sup>c</sup>	4.34 <sup>c</sup>
Milk powder	11.48	9.79	10.10	10.10	8.38
Salt	0.82	0.7	0.72	0.72	0.60
CaCO <sub>3</sub>	0.47	0.4	0.41	0.41	0.34
Vitamin and mineral premix	0.29	0.25	0.26	0.26	0.21
Milk aroma	0.30	0.26	0.27	0.27	0.22
BAN amylase	--	0	0.001	0.006	0
Sugar	--	14.69	11.98	11.98	26.95

<sup>a</sup>extruded; <sup>b</sup>roasted; <sup>c</sup>raw

## Preparation and distribution of gruels

In each of the nine canteens, according to the period of the study, the appropriate type of gruel was prepared by using the number of sachet equal to the number of children present and the corresponding quantity of water.

For each sachet of infant flour A (72 g), 233 g of drinking water previously boiled for 5 min and cooled at 75°C were poured on the flour and the slurry was stirred until obtaining a homogeneous gruel.

For the infant flours B and C, the contents of the sachets (98 g) were blended with respectively 263 and 272 g of drinking water at ambient temperature in an aluminium pan, and cooked over a gentle heat until boiling which is maintained for 5 min in case of gruel B, and for 10 min in case of gruel C. Indeed, as gruel C is prepared with crude rice and sesame, it is necessary to cook it for a longer time. The slow increase in temperature enables the action of amylase on gruel starch and the boiling ensures the inactivation of the enzyme.

For the infant flour D, the contents of the sachet (47 g) was blended with 340 g of drinking water in an aluminium pan and then cooked by boiling for 10 min.

Samples of each gruel prepared were collected for the determination of DM content (by dehydration in an oven until constant weight) and Bostwick flow measurements (Mouquet *et al*, 2006). The canteen staffs poured then about 300 g of gruel in a previously coded and weighed bowl, and mothers were asked to spoon-feed the gruel to their child *ad libitum*. Clean pre-weighed serviettes were given to the mothers simultaneously with the bowl in order that they collect any loss of gruel. Trained study personnel, selected among local volunteers, had to weigh the child, to weigh the bowl and serviette before and after the consumption of the gruel by the child (0.1 g precision), and to intervene in case of child choke on gruel.

## Nutritional value of infant flours

Samples of each of the four infant flours were collected for biochemical analyses.

Protein content (N x 6.25) was determined by the method of Kjeldahl (standard NF. V03-050, AFNOR, 1970). Lipids were extracted with ether using the HT6 Soxtec system (Tecator, Höganäs, Sweden) according to the AOAC official method 2003.06 (AOAC, 2003). Insoluble fibre (Acid Detergent Fibre, ADF) contents were determined by the method of Van Soest (1963) using a Dosi-fiber (Selecta, Barcelona, Spain). Ash contents were determined by calcination in a furnace at 530°C. Available carbohydrates were calculated by difference (100 - proteins - lipids - ADF - ashes). Energy contents of the infant flours were then calculated by using Atwater coefficients: 4 kcal/g DM (16.7 kJ/g DM) for proteins and available carbohydrates and 9 kcal/g DM (37.6 kJ/g DM) for lipids. Mineral (calcium, iron and zinc) contents were determined by atomic absorption spectrophotometry (SpectrAA 200, Varian, Victoria, Australia). All analyses were made in duplicate and both values were averaged. The energy content and main nutrient composition of each study infant flours are presented in table 3.

**Table 3.** Energy content and main nutrient composition of study flours

	Type of gruel			
	A Instant	B Extruded + BAN	C Raw flour + BAN	D Raw flour
Energy value (g / 100 g DM)	425	423	429	423
Protein (g / 100 g DM)	14.6	14.4	15.2	13.5
Lipid (g / 100 g DM)	8.5	8.1	9.3	7.7
Calcium (mg / 100 g DM)	259.3	282.6	276.2	242.3
Iron (mg / 100 g DM)	20.6	22.0	26.0	23.3
Zinc (mg / 100 g DM)	7.7	8.4	9.8	8.6

### Data management and statistical analysis

Office Excel software (version 2003) was used for data entry. Statistical analyses were then carried out using SAS software (version 9.1; SAS Institute, Cary, NC, USA). The influence of the canteen (from 1 to 9) on the characteristics of gruels (DM content and Bostwick flow) was analysed by ANOVA. Concerning intakes, outcomes were compared by using a SAS Mixed Model, and main effects were the type of gruel (A, B, C or D), the day of diet period (from day 1 to day 4), the age of children (in months), the number of the canteen (from 1 to 9) and the meal (morning or afternoon) - this last variable was included only for the outcomes expressed per meal- and adjusted for the number of the period (1 to 4). Interactions between type of gruel and day of diet period, age, and meal were also analysed, but were not significant. The primary response variables were amount of gruel consumed and energy intake (EI) expressed in g/ kg of body weight (BW) and per meal or per day. Different nutrient intakes were also calculated and analyzed. When appropriate, the Tukey's test was used for *post hoc* analyses. In all comparisons, differences were considered significant when  $P < 0.05$ .

## Results and discussion

### Characteristics of infants

The distribution of the study subjects in function of their sex and age are shown in table 4. All children was still breastfed during the study as it was an including criterion.

**Table 4.** Main characteristics of infants

Age <sup>1</sup> (months)	67	7.59 ± 1.33
Distribution in function of age	<i>n</i>	
6 months	22	
7 months	10	
8 months	16	
9 months	19	
Gender (%)		
Male	32	52%
Female	35	48%
Weight <sup>1</sup> (kg)	67	7.79 ± 1.22

<sup>1</sup> Values are mean ± SD

## Characteristics of study gruels

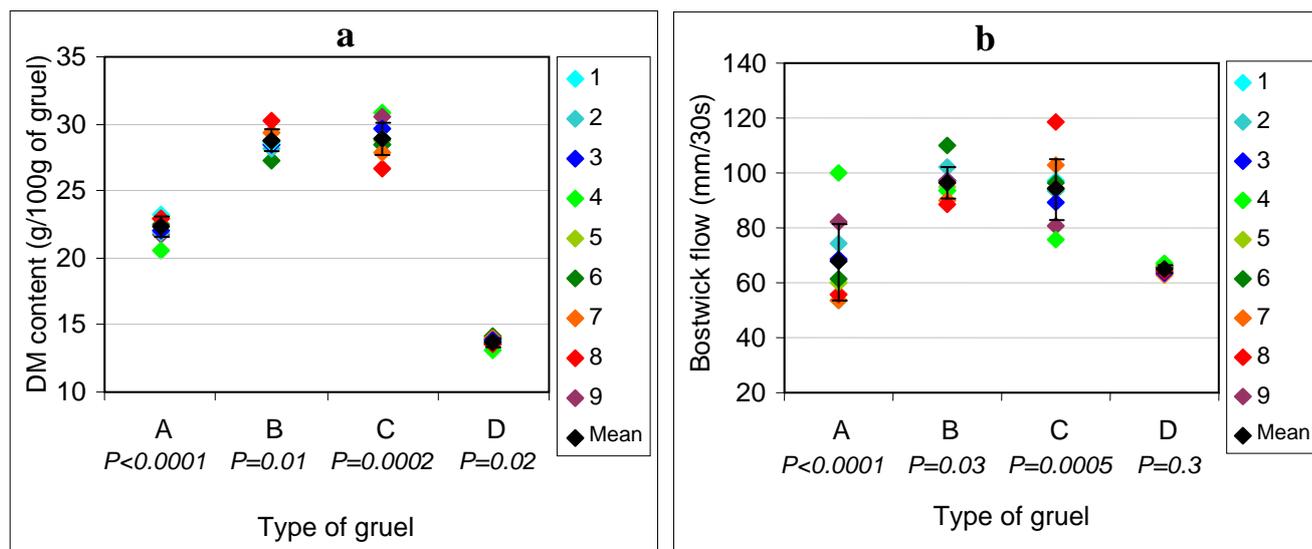
The mean DM content and corresponding ED of the study gruels, as well as the mean Bostwick flow as an indicator of the consistency, are shown in table 5. All values are close to those that were obtained at lab scale. Thus, as expected, the dry matter content and the Bostwick flow of gruels B and C were not significantly different. For the dry matter content, the standard deviation is low, indicating a relatively good control of the methods of preparation of gruels by the canteen staff. Concerning the Bostwick flow, its variability is remarkably low for the gruel D, but higher for the three gruels of high energy density A, B and C. Indeed, the increase in energy density is based on a partial starch hydrolysis during processing, and the extent of this starch hydrolysis obtained through extrusion-cooking or amylase action is highly variable upon the processing conditions. The consistency of highly concentrated gruels is also strongly dependent on the temperature of measurement (Mouquet *et al.*, 2006).

**Table 5.** Characteristics of the gruels distributed to the infants

	Type of gruels			
	A Instant <i>n</i> = 72	B Extruded + BAN <i>n</i> = 72	C Raw flour + BAN <i>n</i> = 72	D Raw flour <i>n</i> = 72
Dry matter content (g/100 g of gruel)				
Mean	22.2 <sup>b</sup>	28.8 <sup>c</sup>	29.0 <sup>c</sup>	13.9 <sup>a</sup>
± SD	± 1.1	± 1.7	± 1.9	± 0.8
Range	18.6 - 24.1	24.2 - 33.6	19.8 - 34.0	12.3 - 16.0
Energy density (kcal/100 g of gruel)				
Mean	94.4	121.8	124.4	58.8
Bostwick flow (mm/30 s)				
Mean	68 <sup>a</sup>	96 <sup>b</sup>	94 <sup>b</sup>	65 <sup>a</sup>
± SD	± 21	± 13	± 20	± 3
Range	38 - 135	65 - 146	48 - 180	57 - 72

<sup>2</sup> Values in a row with different superscript letters are significantly different,  $P < 0.05$

Despite the good control of the preparation of the different types of gruel, there was an effect of the canteen on both DM content and Bostwick flow for the three gruels of high energy density (figures 1 a and b). This effect was highly significant in case of gruels A and C, and significant in case of gruel B. But it was not significant for the Bostwick flow of the gruel D of low energy density. In most cases, a higher value of Bostwick flow was linked to a lower value of DM content. This effect of canteen can then be due to the know-how of canteen staff or to surrounding conditions during the heating of water for the preparation of the instant flour A, or during cooking for gruels B and C.



**Figure 1.** Effect of the canteen (from 1 to 9) on the characteristics of gruels: a. DM content; b. Bostwick flow.

### Amounts of gruel consumed and energy intakes

#### Influence of the day of the period

It was first assumed that the first day of consumption of a type of gruel, the intakes could be different, that is why periods of four days of consumption were chosen in the protocol. However, neither effect of the day ( $P = 0.43$ ), nor interaction of day with type of gruel ( $P = 0.67$ ) were significant. This variable was then retired of the model.

#### Influence of the canteen

The effects of the canteen on amount of gruel consumed and energy intake were both highly significant (table 6) with particularly low values for the canteen n°2. This effect of canteen may partially be explained by differences in the characteristics of gruels due to way of preparation by the canteen staff (figure 1), but also by the general surrounding in each canteen (from the smile of the canteen staff to the layout of canteen facilities). To be free from this canteen effect, all following SAS models were controlled for this variable.

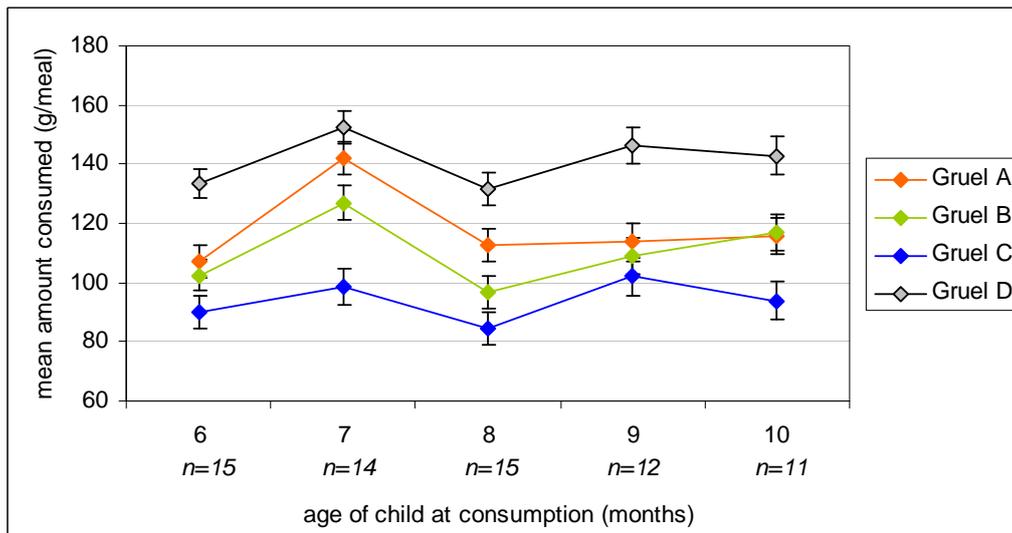
**Table 6.** Mean amounts of gruel consumed and energy intakes in function of the canteen<sup>1</sup>

Canteen	Amount of gruel/meal (g)		Energy intake/meal (kcal)	
	Mean	Std Error	Mean	Std Error
1	133,5	3,74	128,7	3,85
2	70,7	3,79	63,5	3,90
3	92,9	3,57	90,3	3,67
4	149,2	4,31	143,7	4,43
5	127,2	3,60	123,9	3,70
6	105,3	3,92	99,0	4,04
7	104,4	4,85	100,5	4,99
8	148,0	3,72	141,3	3,82
9	112,5	3,94	110,2	4,06

<sup>1</sup> $P < 0.0001$ , values obtained by ANOVA after control for other variables of the model: type of gruel, period, age and meal.

### Influence of the age of the child

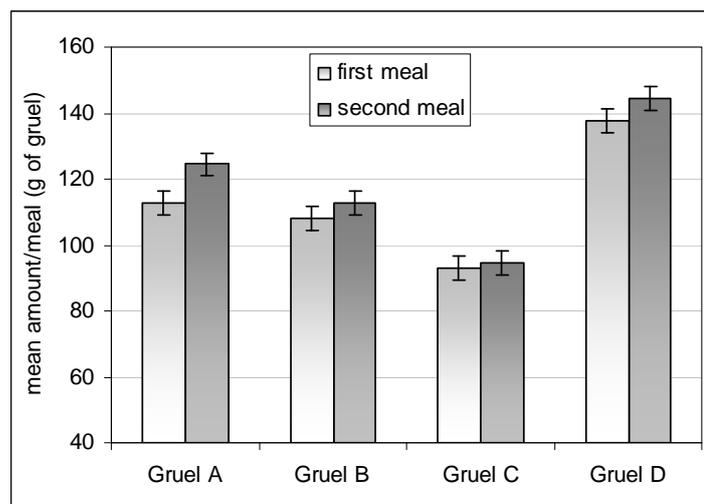
The effect of the age of the child at the moment of consumption of the gruel on the mean amount of gruel consumed per meal was highly significant ( $P < 0.0001$ ) but followed a surprising pattern (figure 2). This pattern was approximately the same for each type of gruel. These variations of the amounts of gruel consumed per meal in function of the age in our study could be explained by the fact that only the meals delivered at the canteens were followed, and that it was possible that new complementary foods were introduced by mothers over the period of the study. To be free from the effect of the age of the child at the moment of consumption, all following SAS models were controlled for this variable.



**Figure 2.** Effect of the age of the child on the day of consumption on the mean amount of gruel consumed per meal (bars are for standard errors). Data were analysed by using mixed-model ANOVA after control for the variables period, meal and canteen,  $P < 0.0001$ .

### Influence of the meal

Children received two meals of gruel per day, the first in the morning, and the second in the afternoon. The analysis of the effect of rank of the meal in the day through SAS model revealed that it was significant ( $P < 0.05$ ), the mean amount of gruel consumed being slightly higher during the second meal of the day (figure 3).



**Figure 3.** Effect of the moment of meal consumption (morning or afternoon) on the amount of gruel consumed. Data were analysed by using mixed-model ANOVA after control for the variables canteen, period and age,  $P < 0.05$ .

### Influence of the type of gruel

Mean gruel amounts consumed and energy intakes expressed per meal or per day are shown in table 7. The effect of the type of gruel was highly significant ( $P < 0.0001$ ) for all outcomes. The mean amount of gruel consumed per meal ranged from 11.6 to 17.5 g/kg of BW /meal and was consequently much lower than the assumed functional gastric capacity of children estimated at 30 g/kg of BW, value on which are based most calculations made to establish recommendations for complementary feeding (Dewey and Brown, 2003). However, values even lower have already been reported in different contexts (Vieu *et al.* 2001; Traoré *et al.*, 2005). The highest amount consumed was obtained with the gruel of low energy density (gruel D) and was significantly reduced in the case of the three gruels of high energy density (gruels A, B and C). Despite this reduction, energy intakes were significantly higher in the case of the three gruels of high energy density compared to that of the gruel of low energy density. Thus, the energy intake from the two meals of gruel during the day was increased of 37%, 43% and 65% for the gruels A, C and B respectively, compared to that of gruel D. The reducing effect of the increase in gruel energy density on the amount consumed has often been reported and authors also all noticed the consecutive increase in energy intakes (Moursi *et al.*, 2003; Traoré *et al.*, 2005; Islam *et al.*, 2008).

**Table 7:** Mean amounts of gruel and energy intakes by type of gruel<sup>1</sup>

	<b>Type of gruel</b>			
	<b>A</b> Instant	<b>B</b> Extruded+Ban	<b>C</b> Raw flour + Ban	<b>D</b> Raw flour
<b>Gruel amount<sup>2</sup></b>				
(g/meal)	118.6 ± 2.50 <sup>b</sup>	110.4 ± 2.55 <sup>b</sup>	93.8 ± 2.62 <sup>c</sup>	141.1 ± 2.50 <sup>a</sup>
(g/kg BW/meal)	14.8 ± 0.32 <sup>b</sup>	13.6 ± 0.32 <sup>c</sup>	11.6 ± 0.33 <sup>d</sup>	17.5 ± 0.32 <sup>a</sup>
(g/day)	238.1 ± 6.43 <sup>b</sup>	221.4 ± 6.53 <sup>b</sup>	187.6 ± 6.90 <sup>c</sup>	283.8 ± 6.38 <sup>a</sup>
(g/kg BW/day)	29.8 ± 0.82 <sup>b</sup>	27.3 ± 0.83 <sup>b</sup>	23.2 ± 0.88 <sup>c</sup>	35.1 ± 0.81 <sup>a</sup>
<b>Energy intake</b>				
(kcal/meal)	112.0 ± 2.57 <sup>b</sup>	134.7 ± 2.62 <sup>a</sup>	117.2 ± 2.70 <sup>b</sup>	81.1 ± 2.57 <sup>c</sup>
(kcal/kg BW/meal)	14.0 ± 0.33 <sup>b</sup>	16.7 ± 0.33 <sup>a</sup>	14.6 ± 0.34 <sup>b</sup>	9.9 ± 0.33 <sup>c</sup>
(kcal/day)	224.7 ± 6.58 <sup>b</sup>	270.3 ± 6.68 <sup>a</sup>	234.4 ± 7.05 <sup>b</sup>	163.4 ± 6.53 <sup>c</sup>
(kcal/kg BW/day)	28.1 ± 0.84 <sup>b</sup>	33.5 ± 0.85 <sup>a</sup>	29.3 ± 0.90 <sup>b</sup>	20.0 ± 0.84 <sup>c</sup>

<sup>1</sup> $P < 0.0001$  for all outcomes. All values are mean ± std error. They were obtained by ANOVA after control for canteen, period, age, and meal (only in the case of data expressed /meal).

<sup>2</sup> Values in a row with different superscript letters are significantly different,  $P < 0.05$ .

Generally, the amount consumed is inversely linked to the concentration (and then to the energy density) of the gruel, as it appears in our study for gruels D, A and C. However, it should be noticed here that the mean amount of gruel B, prepared from flour produced by extrusion cooking and addition of amylase, which was consumed by children per meal or per day was higher than that of gruel C, prepared from flour of crude rice and sesame with addition of amylase but without any of step of extrusion-cooking. There was though no significant difference between both gruel characteristics, neither in DM content nor in Bostwick flow (table 5). Therefore, the difference in amount consumed between gruels B and C should be attributed to a better acceptability or appetite of the gruel B, produced by extrusion-cooking. During the study, canteen staff also reported that gruel C was not as well accepted by children and their mothers that the other types of gruel. And finally, energy

intakes from gruel B prepared with extrusion-cooking and addition of amylase were significantly higher than that of the gruel A prepared only by extrusion, due the lower energy density of the latter (94 vs 122 kcal/100 g of gruel), and also higher than that of the gruel C prepared only by addition of amylase due to a lower acceptability.

According to Dewey and Brown (2003), energy requirements from complementary foods based on the new figures for total energy requirements proposed by Butte *et al.* (2000) are 202 kcal for children at 6-8 months of age and 307 kcal for children from 9-11 months of age, assuming average human milk intake (WHO, 1998). The mean energy intakes per day, only from the study gruels (table 7), allowed the covering of 100% and at least 73% of these energy requirements respectively for the 6-8 months and the 9-11 months in the case of gruels A, B and C, but only 81% and 53% for the 6-8 months and the 9-11 months in the case of gruel D. By looking at individuals, 27, 28, 23 and only 11 children of our study covered 100% of their energy needs from complementary foods when consuming twice a day, gruels A, B, C or D.

The increase of DM content by using processing that partially hydrolyse starch in order to obtain gruel of high energy density has also the considerable advantage to increase the intake in all the nutrients contained in the infant flour. Thus, in our study, as shown in table 8 for few examples of nutrients, the nutrient intakes from the gruels of high energy density A, B and C were substantially increased compared to that from gruel D.

**Table 8:** Nutrients intakes per day by type of gruels

	Mean $\pm$ SE <sup>1</sup>				Recommended daily intake from complementary foods <sup>2</sup>
	Gruel A	Gruel B	Gruel C	Gruel D	
Lipid (g/d) <sup>3</sup>	4.49 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	5.16 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	5.07 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	2.96 $\pm$ 0.13 <sup>c</sup>	4.8
Protein (g/d)	7.73 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	9.20 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>	8.31 $\pm$ 0.24 <sup>b</sup>	5.23 $\pm$ 0.22 <sup>c</sup>	3 - 4.5
Calcium (mg/d)	139.0 $\pm$ 4.2 <sup>b</sup>	179.4 $\pm$ 4.3 <sup>a</sup>	143.3 $\pm$ 4.5 <sup>b</sup>	101.1 $\pm$ 4.2 <sup>c</sup>	100 - 200
Iron (mg/d)	10.9 $\pm$ 0.36 <sup>b</sup>	14.6 $\pm$ 0.36 <sup>a</sup>	13.7 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>	9.1 $\pm$ 0.35 <sup>c</sup>	11
Zinc (mg/d)	4.07 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	5.54 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	5.09 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	3.27 $\pm$ 0.13 <sup>c</sup>	4 - 5

<sup>1</sup>  $P < 0.0001$ . Values were obtained by ANOVA after control for canteen, period, and age of the child.

<sup>2</sup> for infants aged 6-11 months having average breast milk intakes, (Lutter and Dewey, 2003).

<sup>3</sup> Values in a row with different superscript letters are significantly different,  $P < 0.05$  (Tukey's test).

The highest mean nutrient intakes were obtained with the gruel B prepared from the flour produced by extrusion cooking and amylase addition, values for protein and calcium intakes being even significantly higher than that of the three other gruels. Compared to the recommendations for daily nutrient intakes from complementary foods, two meals of gruel A, B or C bring enough nutrients to cover 100% of the requirements for lipid, protein, calcium, iron and zinc. With two meals of gruel D, only the requirements for protein and calcium were fully satisfied. It should be noticed that such high percentages of covering would not have been achieved in our study unless the fortification of each experimental infant flour with a mineral and infant premix. The actual benefit of fortification of complementary foods for reducing anaemia and increasing weight in young children has recently been demonstrated (Lutter *et al.*, 2008).

## Conclusion

The use of fortified infant flours produced from a rice-sesame-soybean blend by three different processing methods (extrusion-cooking using a VLCE, addition of amylases, or both) to allow the preparation of gruels of high energy density proved to be efficient in increasing the energy and nutrient intakes by children, compared to a fortified infant flour having the same composition but produced without any extrusion-cooking step or amylase addition.

Among these three processing methods, the one that combines extrusion-cooking and amylase addition (gruel B) led to the highest intakes. Despite the fact that the resulting infant flour is not instant and require a short cooking time that can be found a little bit more constraining by caregivers, the addition of amylase enables the preparation of the gruel at a very high energy density, significantly higher than the gruel prepared with the instant flour (gruel A), thus leading to higher DM intakes by the children. In contexts where the good hygienic quality of the water is not always ensured, which is the case in numerous developing countries, the short cooking time needed is a guarantee that the children will receive a safe gruel. Compared to the gruel prepared from the flour with only amylase added (gruel C), the cooking time required is shorter, and overall, the final gruel obtained is consumed in higher quantities by children. This can be attributed to a better acceptability, due to the numerous biochemical reactions undergone by the product during the extrusion-cooking step.

Thus the preparation of infant flour by combination of extrusion-cooking and amylase addition constitutes a new way of utilisation of the VLCE that may extend its use for the production of nutritious infant flours beyond Vietnam, in other developing countries.

## Acknowledgement

This work was conducted within the frame of Fasevie programme, realised by the GRET (*Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques*), IRD (*Institut de recherche pour le développement*) and the NIN (*National Institut of Nutrition of Vietnam*) with the financial support from Regional Council of Nord-Pas de Calais, Regional Council of Côtes-D'Armor, the French Ministry of Foreign Affairs, and the French Committee for Unicef.

Authors would like to thank the mothers and infants who participated in this study.

## References

- Agence Française de Normalisation-AFNOR (1970). Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode Kjeldahl (produits agricoles alimentaires). Standard NF V 03-050.
- AOAC (2003). Crude fat in feeds, cereal grains, and forages. Randall/Soxtec/hexane extraction-submersion method. *Journal of AOAC International* 86, 888-899.
- Bennett V.A., Morales E., González J., Peerson J.M., de Romaña G.L., Brown K.H. (1999). Effects of dietary viscosity and energy density on total daily energy consumption by young Peruvian children. *American Journal of Clinical Nutrition* 70, 285–291.
- 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 study group. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *Lancet* 371 (9608), 243-260.
- Bruyeron O., Nguyen Cong Khan, Berger J., Salvignol S., Monvois C., Trèche S. (2006) *Alimentation infantile au Vietnam – Dix ans d'actions et d'enseignements du programme Fasevie*. Paris, Ed. Gret, Collection Etudes et Travaux, ISBN: 2-86844- 164-5, 176 pages.
- Butte N.F., Wong W.W., Hopkinson J.M., Heinz C.J. Mehta N.R., Smith E.O.B. (2000). Energy requirements derived from total energy expenditure and energy deposition during the first 2 years of life. *American Journal of Clinical Nutrition* 72, 1558–1569.

- 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.
- FAO/WHO (2002). Human vitamin and mineral requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Bangkok, Thailand, 2001.
- Islam M.M., Khatun M., Peerson J.M., Ahmed T., Mollah M.A., Dewey K.G., Brown K.H. (2008). Effects of energy density and feeding frequency of complementary foods on total daily energy intakes and consumption of breast milk by healthy breastfed Bangladeshi children. *American Journal of Clinical Nutrition* 88(1), 84-94.
- Khan N.K., Hop L.T., Tuyen L.D., Khoi H.H., Son T.H., Duong P.H., Phuong H.N. (2008). A national plan of action to accelerate stunting reduction in Vietnam. *SCN News* 36, 30-37.
- Lutter C.K., Dewey K.G. (2003). Proposed nutrient composition for fortified complementary foods. *Journal of Nutrition* 133, 3011S-3020S.
- Lutter, C.K., Rodríguez A., Fuenmayor G., Avila L., Sempertegui F., Escobar J. (2008). Growth and micronutrient status in children receiving a fortified complementary food. *The Journal of Nutrition* 138(2), 379-388.
- Mouquet C., Greffeuille V., Trèche S. (2006). Characterization of the consistency of gruels consumed by infants in developing countries: assessment of the Bostwick consistometer and comparison with viscosity measurements and sensory perception. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 57, 459-469.
- Moursi M., Mbemba F., Trèche S. (2003). Does the consumption of amylase-containing gruels impact on energy intake and growth of Congolese infants? *Public Health Nutrition* 6(3), 249-257.
- Traoré T., Vieu M.-C., Alfred T.S., Trèche S. (2005). Effects of the duration of the habituation period on energy intakes from low and high energy density gruels by Burkinabe` infants living in free conditions. *Appetite* 45, 279–286.
- Van Soest P.S. (1963). Use of detergents in the analysis of fibrous feed II- A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of Association of Official Analytical Chemistry* 46, 829-835.
- Vieu M.C., Traoré T., Trèche S. (2001). Effects of energy density and sweetness of gruels on Burkinabe infant energy intakes in free living conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 52, 213-218.
- WHO (1998). Complementary feeding of young children in developing countries: a review of current scientific knowledge. Geneva: World Health Organization.

# Conclusion

# Générale

## Conclusion générale

Il nous est apparu important de mieux connaître les effets de modifications aux niveaux des matières premières (*teneur en amidon, en lipides et en eau*) et de l'ensemble vis/fourreau (*longueur et usure*) lorsque le «cuiseur-extrudeur à très faible coût» (CE-TFC) mis au point au Vietnam dans le cadre du programme Fasevie est utilisé pour la production de farines infantiles. En effet, certaines de ces modifications se produisent inévitablement lors de l'utilisation de l'équipement (*usure de la vis*), d'autres peuvent facilement être mises en œuvre pour améliorer la qualité des produits (*modification de la longueur de la vis, de la teneur en eau des mélanges*), d'autres enfin (*variations des teneurs en amidon et en lipides des mélanges*), peuvent être envisagées pour différentes raisons. En effet, les variations de teneurs en amidon et en lipides dans les intervalles étudiés correspondent à des variations de formules des mélanges qui pourraient être adoptées, soit pour faire varier la composition finale des farines infantiles, soit pour leur conférer ou non le caractère instantané tout en gardant la même composition ce qui nécessiterait des réajustements au niveau des mélanges post-extrusion (*e.g.*, incorporation de farine de soja torréfiée non passée dans le CE-TFC).

Les études réalisées ont permis de mettre en évidence les effets de ces modifications. Les principaux résultats exposés dans les chapitres IV et V sont synthétisés dans le tableau VII/1. A l'issue de nos essais où les variations de composition des matières premières et de configuration de l'ensemble vis/fourreau ont été testées selon différentes combinaisons, des constantes apparaissent au niveau des effets de certains facteurs. Les teneurs en amidon, en lipides et en eau des mélanges influent le plus souvent de manière importante sur le comportement en extrusion et sur les caractéristiques physicochimiques des extrudats et la consistance de bouillies, mais des effets tout aussi importants ont pu être mis en évidence en rapport avec la nature de la source amyliacée du mélange ou des modifications de l'ensemble vis/fourreau du CE-TFC (Tableau VII/1).

L'augmentation de la teneur en amidon provoque une augmentation de la température au niveau de la filière qui est en grande partie responsable de l'augmentation de l'expansion, du gonflement dans l'eau, du taux de gélatinisation et du caractère instantané des extrudats ; l'obtention d'une viscosité plus élevée dans les bouillies préparées par simple ajout d'eau à 75°C quand la teneur en amidon des mélanges est plus élevée pourrait, quant à elle, être tout simplement due à la présence de quantités plus importantes d'amidon dans la bouillie dans la mesure où c'est l'amidon qui est le principal responsable de la consistance des bouillies.

L'augmentation de la teneur en lipides s'accompagne de diminutions de la température et de la pression au niveau de la filière, qui elles-mêmes sont responsables des diminutions observées aux niveaux de l'expansion, de la solubilité et du taux de gélatinisation des extrudats ; l'obtention d'une viscosité plus élevée dans les bouillies préparées par simple ajout d'eau à 75°C quand la teneur en lipides des mélanges augmente pourrait être due à une dextrinisation moins importante en raison de la diminution du cisaillement résultant de la diminution de la pression lors du passage dans l'extrudeur.

Des teneurs élevées en amidon et de faibles teneurs en lipides et en eau favorisent donc l'obtention d'extrudats ayant un taux de gélatinisation élevé qui contribue à conférer aux farines leur caractère instantané. Il est probable par ailleurs que la diminution de la teneur en lipides favorise la dextrinisation et, en conséquence, contribue à l'abaissement de la viscosité des bouillies obtenues par simple ajout d'eau à 75°C.

Les variations de teneur en eau, même quand elles se produisent dans un intervalle relativement restreint (10 à 16 g/100g de mélange,) ont, pour leur part, des effets souvent encore plus marqués que les variations de teneur en amidon et en lipides. Sur les paramètres que nous avons étudiés, les effets d'une augmentation de la teneur en eau vont dans le même sens que les effets de l'augmentation de la teneur en lipides sauf pour les pertes en lipides. Les effets négatifs d'une augmentation de teneur en eau sur les caractéristiques des extrudats (*diminution de l'expansion, du taux de gélatinisation, de la solubilité*) avaient déjà été observés par plusieurs auteurs (Lin *et al.*, 1998; Hashimoto *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2007a). L'augmentation de la teneur en eau dans les mélanges est responsable, en outre, d'une augmentation de la teneur en eau dans les extrudats. Cette dernière n'étant pas favorable à la bonne conservation des farines au cours du stockage, il est souhaitable, sauf dans le cas du recours à un séchage post-extrusion des produits, que la teneur en eau des mélanges utilisés pour la fabrication de farines infantiles ne dépasse pas 12 g /100 g.

Le CE-TFC peut être utilisé avec différentes matières premières amylacées pour la production de farines infantiles, mais les caractéristiques qu'il confère aux extrudats dépendent de la nature de ces sources amylacées.

Le riz est la matière première qui est la plus facile à extruder : à partir de mélanges à base de riz ayant une teneur en amidon au moins égale à 59 g/100g MS et une teneur en lipides ne dépassant pas 8,2 g/100g MS. Il suffit donc d'adapter, par simple modification des teneurs en amidon et en lipides, les conditions d'utilisation du CE-TFC pour obtenir soit des farines infantiles instantanées, soit des farines à cuisson rapide.

Avec le maïs, on peut obtenir une gélatinisation totale de l'amidon dans les extrudats en utilisant des mélanges contenant 6,2 g de lipides pour 100 g MS, mais la comparaison des viscosités apparentes des bouillies préparées à partir de ces extrudats, soit par cuisson, soit par simple ajout d'eau à 75°C, montre que les farines extrudées ne possèdent pas le caractère instantané. Il semble néanmoins possible de conférer aux farines le caractère instantané en utilisant des mélanges ayant des teneurs en lipides légèrement inférieures.

Les extrudats obtenus à partir de mélanges à base de sorgho et de mil présentent une faible expansion et seulement une gélatinisation partielle de l'amidon. Par ailleurs, la viscosité des bouillies préparées à partir de ces extrudats est plus élevée que celle des bouillies à base de riz. Dans les conditions d'utilisation du CE-TFC que nous avons explorées, les mélanges à base de maïs, de sorgho et de mil ne permettent donc que la production de farines à cuire.

En ce qui concerne les modifications affectant l'ensemble vis/fourreau, nous avons pu mettre en évidence que la longueur de la vis qui équipe actuellement le CE-TFC permet de produire facilement des farines instantanées à partir de mélanges à base de riz à faible teneur en lipides (6,2 g/100g MS) et haute teneur en amidon ( $\geq 65$  g/100g MS).

Les essais réalisés ont montré que l'utilisation d'une vis plus longue ( $\geq 36$  cm) permet, probablement en raison d'une augmentation du temps de séjour des matières premières dans le CE-TFC et par conséquent de l'intensité de la cuisson (Ficarelle *et al.*, 2006), d'obtenir des extrudats avec un bon indice d'instantanéité même s'ils sont préparés à partir de mélanges à haute teneur en lipides (10,2g/100g MS) et faible teneur en amidon (60 g/100g MS).

Par ailleurs, les modifications observées au niveau du comportement en extrusion et des caractéristiques des extrudats et des bouillies avec le niveau d'usure de la vis ont confirmé la faible durabilité de la vis et du fourreau de la génération actuelle du CE-TFC. Il est possible d'assurer une certaine constance aux caractéristiques des produits au fur et à mesure de l'usure de la vis en augmentant la teneur en amidon et en diminuant la teneur en lipides des mélanges mais il serait souhaitable de fabriquer l'ensemble vis/fourreau avec des matériaux plus résistants.

**Tableau VII/1:** Synthèse des effets des modifications étudiées au niveau des matières premières et de l'ensemble vis/fourreau sur le comportement en extrusion, sur les caractéristiques des extrudats et sur la consistance des bouillies.

		Effet d'une augmentation...				
		...de la teneur des mélanges en			...de la longueur de la vis (de 28 à 46 cm)	du niveau d'usure de la vis (après production de 0 à 7 tonnes de farine)
		amidon (de 60 à 70 g/100g MS)	lipides (de 6,2 à 10,2 g/100g MS)	eau (de 10 à 16 g/100g MB)		
Au niveau de la filière	Température	↗	↘	↘	↔	↘
	Pression	↔	↘	Non déterminé	↘	↘
Sur les extrudats ou farines extrudées	Expansion	↗	↘	↘	↗	↘
	Gonflement	↗	Effets variables selon les essais	↘	↘	↘
	Solubilité	Effets variables selon les essais	↘	↘	↗	↘
	Perte en lipides	↗	↗	↘	↔	↔
	Taux de gélatinisation	↗	↘	↘	↗	↔
Sur les bouillies préparées à la concentration de 16 g MS/100g	Viscosité apparente après cuisson	↔	↔	↘	↘	↔
	Viscosité apparente après ajout d'eau à 75°C	↗	↗	Non déterminé	↗	↘
	Instantanéité	↗	↔	Non déterminé	↗	↘

Les études effectuées auprès de nourrissons de 6 à 10 mois vivant en zones rurales pour mesurer l'effet des modes de préparation sur les quantités de bouillies qu'ils sont capables de consommer montrent que les farines infantiles produites en utilisant le CE-TFC sont non seulement bien acceptées mais permettent des niveaux d'ingérés satisfaisants.

Consommée au moins deux fois par jour, la farine instantanée *Favina* permet de couvrir la moitié des besoins énergétiques des enfants de 6 à 10 mois. Par rapport à des enfants restés au régime alimentaire habituel de la zone d'étude, la consommation de bouillies préparées à partir de *Favina* permet d'augmenter de 58% les apports énergétiques des enfants à partir des aliments de complément sans diminution de la fréquence et de la durée des tétées. Ces résultats sont très comparables à ceux obtenus auprès d'enfants congolais de même âge avec une farine à cuire de haute densité énergétique (Moursi *et al.*, 2003). Il faut souligner par ailleurs que les farines instantanées ayant subi un traitement permettant de réduire les activités de certains facteurs nutritionnels et bénéficiant de l'incorporation de compléments minéraux et vitaminiques, permettent d'augmenter les apports en micronutriments par rapport aux aliments de complément habituels dans des proportions qui sont considérablement plus élevées que pour l'énergie (*les apports en fer, zinc et calcium à partir de l'alimentation de complément sont, respectivement, multipliés par 9,5, par 2,7 et par 3,9 pour les enfants consommant Favina par rapport aux enfants restés aux régimes habituels*).

Par ailleurs, la comparaison des ingérés à partir de bouillies préparées à partir de farines instantanées (*FEI*), de farines à cuire avec ajout d'amylases produites (*FCR*) ou non (*FAA*) en utilisant le CE-TFC et de farines de composition comparable sans ajout d'amylases ni passage dans l'extrudeur (*FSA*) a permis de vérifier que bien que les ingérés de bouillies soient significativement plus élevés pour les bouillies de faible densité énergétique (*préparée avec FSA*), les ingérés énergétiques à partir de deux repas journaliers de bouillie sont significativement plus importants (*respectivement, +37%, +65%, +43% pour FEI, FCR, FAA par rapport à FSA*) lorsque les bouillies sont de haute densité énergétique (*respectivement, 94, 122 et 124 kcal/100g pour FEI, FCR, FAA*) que lorsqu'elles sont de faible densité énergétique (*FSA, 59 kcal/100g*). Ces résultats qui confirment l'intérêt de l'utilisation de bouillies de haute densité énergétique sont en accord avec ceux de nombreux autres auteurs (Bennet *et al.*, 1999; Vieu *et al.*, 2001; Dewey et Brown, 2003; Moursi *et al.*, 2003; Islam *et al.*, 2008). La comparaison des ingérés obtenus pour les deux farines extrudées (*FEI et FCR*) montre que, si la farine instantanée (*FEI*) présente l'avantage d'être plus facile à préparer au niveau des ménages et de ne pas contenir d'amylases, en revanche les ingérés énergétiques qu'elle permet d'atteindre, compte tenu de sa densité énergétique sensiblement plus faible, sont 15% plus faibles (*28,1 vs 33,5 kcal/(kg PC x j)*) que ceux obtenus à partir de la farine à cuisson rapide (*FCR*).

L'ensemble de nos travaux a permis d'établir que le CE-TFC mis au point au Vietnam dans le cadre du programme Fasevie peut conférer aux extrudats à base de céréales les caractéristiques physicochimiques appropriées pour une utilisation comme farines infantiles permettant de préparer des bouillies de haute densité énergétique. La consommation au moins deux fois par jour de bouillies préparées à partir de ces farines permet d'atteindre des niveaux ingérés en énergie et en nutriments satisfaisants chez des nourrissons après 6 mois et chez les jeunes enfants. Les travaux présentés dans cette thèse, qui ont largement contribué à leur mise au point, mettent en outre en évidence l'intérêt des farines à cuisson rapide qui présentent de nombreux avantages liés à l'utilisation du procédé de cuisson-extrusion tout en nécessitant une cuisson à l'eau au moment de leur préparation sous forme de bouillie. Si ce mode de préparation final est moins commode d'usage pour ceux qui s'occupent des enfants, il apporte non seulement une garantie sur la qualité hygiénique de la bouillie dans des contextes où celle

de l'eau n'est pas toujours assurée mais il se traduit également par des ingérés énergétiques et en nutriments plus importants que ceux observés avec les bouillies préparées à partir des farines instantanées en raison de l'augmentation de densité énergétique rendue possible par l'addition d' $\alpha$ -amylases.

Dans la perspective d'une utilisation à plus grande échelle du CE-TFC et de son transfert dans d'autres contextes des pays du Sud, il serait utile ou nécessaire de :

- prolonger la durée d'utilisation de l'ensemble vis/fourreau en utilisant pour leur fabrication des matériaux plus résistants ou des procédés de fabrication plus performants ;
- de livrer l'équipement avec des jeux de vis/fourreau de longueurs différentes de façon à donner aux utilisateurs la possibilité de changer en fonction du type de mélanges et du type de produits (*farines instantanée ou à cuisson rapide*) qu'ils souhaitent produire ;
- de poursuivre des travaux visant à définir les modalités d'utilisation du CE-TFC avec d'autres matières premières agricoles, en particulier les céréales tropicales rencontrées en Afrique sahélienne, afin de pouvoir diversifier la gamme des farines infantiles proposées ;
- d'étudier la possibilité de fabriquer d'autres produits que des farines infantiles, en particulier des céréales précuites ou des produits utilisables comme snacks.

Malgré ses imperfections actuelles, le CE-TFC, dont les premiers prototypes sont utilisés depuis près de 10 ans dans le cadre du programme Fasevie, a néanmoins fait la preuve de son intérêt en raison de la possibilité qu'il offre de pouvoir installer avec de faibles investissements des petites unités décentralisées capables de produire des farines infantiles adaptées aux besoins nutritionnels des enfants. Cet intérêt a été reconnu au cours des derniers mois par le démarrage d'un projet mis en oeuvre par le NIN et financé par la Banque Asiatique de Développement (ADB) qui vise à installer deux nouvelles unités de production de farines infantiles utilisant le CE-TFC et à étendre à 6 nouvelles provinces du Vietnam l'utilisation des farines produites.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd El-Hady E.A., Habiba R.A. (2003). Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 36, 285–293.
- Abdel-Aal E.-S.M., Sosulski F.W., Shehata A.A.Y., Youssef M.M. (1996). Nutritional, functional and sensory properties of wheat, rice and fababean blends texturized by drum drying. *International Journal of Food Science & Technology* 31(3), 257-266.
- Abrahamsson L., Bengtsson O., Hambræus L., Holm H. (1979). Protein quality of milk-cereal based foods for infants and children in relation to processing methods and composition of the products. *International Journal of Food Science & Technology* 14(4), 429–440.
- Abu-Dweih B.M., Tukan S.K., Takturi H.R. (2000). The effect of browning intensity on the protein quality of *qurshallah*. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 51, 483–488.
- Agassant J.F., Avenas P., Sergent J.P. (1986). La mise en forme des matières plastiques. Technique & Documentation- Lavoisier.
- Agence Française de Normalisation (AFNOR) 1997. Dosage des inhibiteurs trypsiques. Norme XP V18-202.
- Agence Française de Normalisation-AFNOR (1970). Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode Kjeldahl (produits agricoles alimentaires). Standard NF V 03-050.
- Ainsworth P., Fuller D., Plunkett A., Ibanoglu S. (1999). Influence of extrusion variables on the protein in vitro digestibility and protein solubility of extruded soy tarhana. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 79, 675-678.
- Ainsworth P., Ibanoglu S., Plunkett A., Ibanoglu E., Stojceska V. (2007). Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the selected physical and nutritional properties of an extruded snack. *Journal of Food Engineering* 81, 702–709.
- Akdogan H. (1996). Pressure, torque, energy responses of a twin screw extruder at high moisture contents. *Food Research International* 29, 423-429.
- Akdogan H. (1999). High moisture food extrusion. *International Journal of Food Science & Technology* 34, 195-207.
- Akdogan H., Tomas G.L., Oliveira J.C. (1997). Rheological properties of rice starch at high moisture contents during twin-screw extrusion. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 30, 488–496.
- Ali Y., Hanna M.A., Chinnaswamy R. (1996). Expansion characteristics of extruded corn grits. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 29, 702–707.
- Allen K.E., Carpenter C.E., Walsh M.K. (2007). Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *International Journal of Food Science & Technology* 42(8), 953-960.
- Alonso R., Aguirre A., Marzo F. (2000). Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chemistry* 68, 159-165.
- Alonso R., Rubio L.A., Muzquiz M., Marzo F. (2001). The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals. *Animal Feed Science and Technology* 94, 1-13.
- Altan A., McCarthy K.L., Maskan M. (2008). Evaluation of snack foods from barley–tomato pomace blends by extrusion processing. *Journal of Food Engineering* 84, 231–242.
- Anderson J.S., Sunderland R. (2002). Effect of extruder moisture and dryer processing temperature on vitamin C and E and astaxanthin stability. *Aquaculture* 207, 137–149.
- Anderson R.A., Conway H.F., Pfeifer V.F., Griffin E.L. (1969). Gelatinisation of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal science today* 14, 4-12.

- AOAC (2003). Crude fat in feeds, ce real grains, and forages. Randall/soxtec/hexanes extraction-submersion method. *Journal of AOAC International* 86, 888-899.
- Arija I., Centeno C., Viveros A., Brenes A., Marzo F., Illera J.C., Silvan G. (2006). Nutritional evaluation of raw and extruded kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. *Pinto*) in Chicken Diets. *Poultry Science* 85, 635–644.
- Asiedu M., Nilsen R., Lie O., Lied E. (1993). Effect of processing (sprouting and/or fermentation) on sorghum and maize. I: Proximate composition, minerals and fatty acids. *Food Chemistry* 46(4), 351-353.
- Athar N., Hardacre A., Taylor G., Clark S., Harding S., McLaughlin J. (2006) Vitamin retention in extruded food products. *Journal of Food Composition and Analysis* 19, 379–383.
- Badau M.H., Jidean I.A., Nkama I. (2006). Rheological behaviour of weaning food formulations as affected by addition of malt. *International Journal of Food Science & Technology* 41(10), 1222-1228.
- Badrie N., Mellowes W.A. (1992). Soybean flour/oil and wheat bran effects on characteristics of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) flour extrudates. *Journal of Food Science* 57, 108-111.
- Baik B.-K., Powers J., Nguyen L.T. (2004). Extrusion of regular and waxy barley flours for production of expanded cereals. *Cereal chemistry* 81(1), 94-99.
- Batey I.L. (1982). Starch analysis using thermostable  $\alpha$ -amylase. *Starch* 4, 125-128.
- Bedolla S., Rooney L.W. (1984). Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World* 29, 732–735.
- Bennett V.A. Morales E., González J., Peerson J.M., de Romaña G.L., Brown K.H. (1999). Effects of dietary viscosity and energy density on total daily energy consumption by young Peruvian children. *American Journal of Clinical Nutrition* 70, 285–291.
- Berger J, Laillou A., Khan N.C., Monvois C., Salvignol B., Trèche S. (2004a). Fasevie: une solution originale au problème de la malnutrition infantile au Vietnam. *Les cahiers de la Coopération française au Vietnam. 2004, N°1: 1-30.* <http://www.ambafrance-vn.org>
- Berger J., Phu P.V., Salvignol B., Hoan N.V., Khan N.C., Tuong P.D., Trèche S. (2004b) Regular Consumption of Complementary Foods Fortified with Micronutrients Improves Iron Status of Vietnamese Infants. In “2004 INACG Symposium”, 18 Novembre 2004, Lima, Peru, 2004: 31 **(abstract)**.
- Bernal M.J., Periago M.J., Ros G. (2002). Effects of processing on dextrin, total starch, dietary fiber and starch digestibility in infant cereals. *Journal of Food Science* 67(3), 1249-1254.
- Berset C. (1994). Influence de la cuisson-extrusion sur les lipides et les pigments. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Della Valle), pp. 142-162, Technique& Documentation-Lavoisier.
- Besançon P. (1995). Innocuité et disponibilité des nutriments dans les aliments de complément. In Trèche, S., de Benoist, B., Benbouzid, D., Verster, A., Delpeuch, F. eds: *L'alimentation de complément du jeune enfant*. Paris, pp. 105-122. Orstom, collection colloques et séminaires.
- Besançon P. (1999). Safety of complementary foods and bioavailability of nutrients. In Dop M.C., Benbouzid D., Trèche S., de Benoist B., Verster A., Delpeuch F. eds: *Complementary feeding of young children in Africa and the Midle East*. pp. 59-73. Geneva, 1999, WHO.
- Besrat A. (1981). Protein quality of Fafa, the ethopian infant formula as effected by pulse substitution. *Journal of Food Biochemistry* 5(3), 233–238.
- Bhatnagar S., Hanna M.A. (1994a) . Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. *Cereal Chemistry* 71, 582-587.
- Bhatnagar S., Hanna M.A. (1994b). Extrusion processing conditions for amylose-lipid complexing. *Cereal Chemistry* 71(6), 587-593.

- Bhattacharya S. (1997). Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: Extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering* 32(1), 93- 99.
- Bhattacharya S., Sivakumar V., Chakraborty D. (1997). Changes in CIELab colour parameters due to extrusion of rice-green gram blend: a response surface approach. *Journal of Food Engineering* 32, 125-131.
- Birch L.F., Fisher J.O. (1997). Food intake regulation in children. Fat and sugar substitutes and intake. *Annals of the New York Academy of Sciences* 819, 194–220.
- Birch L.L., Gunder L., Grimm-Thomas K., Laing D.G. (1998). Infants' consumption of a new food enhances acceptance of similar foods. *Appetite* 30(3), 283–295.
- Björck I., Asp N.–G. (1983). The effects of extrusion cooking on nutritional value- A literature review. *Journal of Food Engineering* 2, 281-308.
- Björck I., Asp N.–G., Dahlqvist A. (1984). Protein nutritional value of extrusion-cooked wheat flours. *Food Chemistry* 15, 203-214.
- 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 study group. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *Lancet* 371 (9608), 243-260.
- Bounie D. (1988). Modelling of the flow pattern in a twin-screw extruder through residence-time distribution experiments. *Journal of Food Engineering* 7(3), 223-246.
- Bouveresse J.A., Cerf O., Guilbert S., Cheftel J.C. (1982). Influence of extrusion cooking on the thermal destruction of *Bacillus stearothermophilus* spores in a starch-protein-sucrose mix. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 15, 135-138.
- Brown K.H. (1997). Complementary feeding in developing countries: Factors affecting energy intake. *Proceedings of the Nutrition Society* 56(1A), 139–148.
- Brown K.H., Black R.E., Robertson A.D., Becker S. (1985). Effects of season and illness on the dietary intake of weanlings during longitudinal studies in rural Bangladesh. *American Journal of Clinical Nutrition* 41, 343-355.
- Brown K.H., Sanchez-Grinan M., Perz F., Peerson J.M., Ganoza L., Stern J.S. (1995). Effects of dietary energy density and feeding frequency on total daily energy intakes of recovering malnourished children. *American Journal of Clinical Nutrition* 62, 13-18.
- Brown K.H., Sanchez-Grinan M.I., Perz F., Peerson J.M., Stern J.S. (1994). Effects of dietary starch and sugar contents on total daily energy intakes by recovering malnourished children. *FASEB Journal* 8, A155.
- Brown K.H., Stallings R.Y., Creed de Kanshiro H., Lopez de Romana G., Black R.E. (1990). Effects of common illnesses on infants' energy intakes from breast milk and other foods during longitudinal community based studies in Huascar (Lima), Peru. *American Journal of Clinical Nutrition* 52, 1005-1013
- Brümmer B., Meuser F., Lengerich D., Niemann C. (2002). Expansion and functional properties of corn starch extrudates related to their molecular degradation, product temperature and water content. *Starch* 54, 9-15.
- Bruyeron O., Nguyen Cong Khan, Berger J., Salvignol S., Monvois C., Trèche S. (2006) *Alimentation infantile au Vietnam – Dix ans d'actions et d'enseignements du programme Fasevie*. Paris, Ed. Gret, Collection Etudes et Travaux, ISBN : 2-86844- 164-5, 176 pages.
- Butte N.F., Wong W.W., Hopkinson J.M., Heinz C.J. Mehta N.R., Smith E.O.B. (2000). Energy requirements derived from total energy expenditure and energy deposition during the first 2 years of life. *American Journal of Clinical Nutrition*, 72, 1558–1569.
- Camire M.E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In *Extruders in Food Applications* (M.N. Riaz, ed.) pp. 127–147, Technomic Publishing Co.Inc. Lancaster, PA.

- Camire M.E., Dougherty M.P., Briggs J.L. (2005) Antioxidant-rich foods retard lipid oxidation in extruded corn. *Cereal Chemistry* 82, 666–670.
- Camire M.E., Dougherty M.P., Briggs J.L. (2007). Functionality of fruit powders in extruded corn breakfast cereals. *Food Chemistry* 101, 765–770
- Carter E.G., Carpenter K.J. (1982). The available niacin values of foods for rats and their relation to analytical values. *Journal of Nutrition* 112, 2091–2103.
- Carvalho C.W.P., Mitchell J.R. (2000). Effect of sugar on the extrusion of maize grits and wheat flour. *International Journal of Food Science and Technology* 35, 569–576.
- Cha J.Y., Suparno M., Dolan K.D., Ng P.K.W. (2003). Modeling thermal and mechanical effects on retention of thiamin in extruded foods. *Journal of Food Science* 68(8), 2488-2489.
- Champ M. (1994). Impact nutritionnel de la cuisson-extrusion. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Della Valle), pp. 203-229, Technique& Documentation- Lavoisier.
- Chang Y.K., Martinez-Bustos F., Lara H. (1998). Effect of some extrusion variables on rheological properties and physicochemical changes of cornmeal extruded by twin screw extruder. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 15(4), 370-381.
- Chauhan G.S., Bains G.S. (1985). Effect of granularity on the characteristics of extruded rice snack. *International Journal of Food Science & Technology* 20(3), 305-309.
- Chavez-Jauregui R.N., Silva M.E.M.P., Aréas J.A.G. (2000) Extrusion cooking process for amaranth (*Amaranthus caudatus* L.). *Journal of Food Science* 65(6), 1009–1015.
- Cheftel J.C. (1986). Nutritional effect of extrusion-cooking. *Food chemistry* 20, 263-283.
- Cheftel J.C. (1994). Destruction de microorganismes par cuisson- extrusion. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Della Valle), 230-250, Technique& Documentation- Lavoisier.
- Cheng Z.J., Hardy R.W. (2003). Effects of extrusion and expelling processing, and microbial phytase supplementation on apparent digestibility coefficients of nutrients in full-fat soybeans for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 218, 501–514
- Chiang C.J., Johnson J.A. (1977). Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-tuluidine reagent. *Cereal chemistry* 54, 429-435.
- Chinnaswamy R., Hanna M.A. (1990). Relationship between viscosity and expansion properties of various extrusion-cooked grain components. *Food Hydrocolloids* 3, 423–434.
- Choudhury G.S., Gautam A. (1998). Comparative study of mixing elements during twin-screw extrusion of rice flour. *Food Research International* 31, 7-17.
- Colonna P., Buléon A. (1994). Transformations structurales de l'amidon. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Della Valle), pp. 17-43, Technique& Documentation- Lavoisier.
- Colonna P., Tayeb J., Mercier C. (1989). Extrusion cooking of starch and starchy products. In *Extrusion-cooking* (C. Mercier, P. Linko, J.M. Harper eds.), pp.247-319. AACC, St. Paul, MN, USA.
- Darling J.C., Kitundu J.A., Kingamkono R.R., Msengi A.E., Mduma B., Sullivan K.R., Tomkins A.M. (1995). Improved energy intakes using amylase-digested weaning foods in Tanzanian children with acute diarrhea. *Journal of Pediatric Gastroenterol Nutrition* 21(1), 73-81.
- de Cindio B., Gabriele D., Pollini C.M., Peressini D., Sensidoni A. (2002). Filled snack production by coextrusion-cooking: 2. Effect of processing on cereal mixtures. *Journal of Food Engineering* 54, 63–73.
- De Muelenaere H.J.H., Buzzard J.L. (1969). Cooker extruders in service of world feeding. *Food Technology* 23, 345-351.
- De Pilli T., Carbone B.F., Fiore A.G., Severini C. (2007). Effect of some emulsifiers on the structure of extrudates with high content of fat. *Journal of Food Engineering* 79, 1351–1358.

- De Pilli T., Severini C., Baiano A., Derossi A., Arhaliass A., Legrand J. (2005). Effects of operating conditions on oil loss and properties of products obtained by co-rotating twin-screw extrusion of fatty meal: Preliminary study. *Journal of Food Engineering* 70, 109–116.
- Del Valle F.R., Villanueva H., Reyes-Govea J., Escobedo M., Bourges H., Ponce J., Munoz M.J. (1981). Development, evaluation and industrial production of a powdered soy-oats infant formula using a low-cost extruder. *Journal of Food Science* 46(1), 192–197.
- Della Valle G., Vergnes B., Colonna P., Patria A. (1997). Relations between rheological properties of molten starches and their expansion behaviour in extrusion. *Journal of Food Engineering* 31, 277–296.
- den Besten L., Glatthaar I.I., Ijsselmuiden C.B. (1998). Adding alpha-amylase to weaning food to increase dietary intake in children. A randomized controlled trial. *Journal of Tropical Pediatrics* 44(1),4-9.
- Desrumaux A., Bouvier J.M., Burri J. (1998). Corn grits particle size and distribution effects on the characteristics of expanded extrudates. *Journal of Food Science* 63(5), 857–863.
- Desrumaux A., Bouvier J.M., Burri J. (1999). Effect of free fatty acids addition on corn grits extrusion cooking. *Cereal Chemistry* 76(5), 699-704.
- Dettwyler K. A. (1986) Infant feeding in Mali, West Africa: Variations in belief and practice. *Social Science and Medicine* 23(7), 651-664.
- Dettwyler K. A. (1987) Breast-feeding and weaning in Mali: Cultural context and hard data. *Social Science and Medicine* 24(8), 633-644.
- 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.
- Dickin K.L., Brown K.H., Fagbule D., Adedoyin M., Gittelsohn J., Esrey S.A., Oni G.A. (1990). Effect of diarrhoea on dietary intake by infants and young children in rural villages of kwara State, Nigeria. *American Journal of Clinical Nutrition* 44, 307-317.
- Ding Q., Ainsworth P., Plunkett A., Tucker G., Marson H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering* 73, 142-148.
- Ding Q., Ainsworth P., Tucker G., Marson H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering* 66, 283-289.
- Donnen P., Dramaix M., Brasseur D., Bitwe Mihanda R., Fazili S., Treche S. (1996). High energy density gruels in the treatment of hospitalized children suffering from mainly protein malnutrition in Zaire. *Food and Nutrition Bulletin* 17, 145-153.
- Duodu K.G., Tang H., Grant A., Wellner N., Belton P.S., Taylor J.R.N. (2001). FTIR and solid state <sup>13</sup>C NMR spectroscopy of proteins of wet cooked and popped sorghum and maize. *Journal of Cereal Science* 33, 261–269.
- Egounlety M. (2002). Production of legume-fortified weaning foods. *Food Research International* 35, 233-237.
- El-Habashy M., Philips R.D., Eitenmiller R.R., Mostafa M.M., Rahma A., El-bedaiwy A. (1997). Protein quality assessment of computer optimized weaning formulas. *Journal of Food Quality* 20(4), 267-277.
- Engle P.L., Menon P., Haddad L. (1999). Care and Nutrition: Concepts and Measurement. *World Development* 27(8), 1309-1337.
- Esposito F., Arlotti G., Bonifati A.M., Napolitano A., Vitale D., Fogliano V. (2005). Antioxidant activity and dietary fibre in durum wheat bran by-products. *Food Research International* 38(10), 1167-1173.

- Fan J., Mitchell J.R., Blanshard J.M.V. (1996). The effect of sugars on the extrusion of maize grits: I. The role of the glass transition in determining product density and shape. *International Journal of Food Science and Technology* 31, 55–65.
- FAO (2005). The State of Food Insecurity in the World 2005. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO (2008). Agricultural data: FAOSTAT. (consulté en juillet 2008) <http://faostat.fao.org/faostat/default.jsp>
- FAO/WHO (2002). Human vitamin and mineral requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Bangkok, Thailand, 2001.
- FAO/WHO/UNU (2001). Human energy requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Rome, 17-24 October, 2001.
- Faraj A., Vasanthan T., Hoover R., 2004. The effect of extrusion cooking on resistant starch formation in waxy and regular barley flours. *Food Research International* 37, 517–525.
- Faubion J.M., Hosney R.C. (1982a). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. *Cereal Chemistry* 59(6), 529-533.
- Faubion J.M., Hosney R.C. (1982b). High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour. II. Effect of protein and lipid on extrudate properties. *Cereal Chemistry* 59(6), 533-537.
- Fayard G., Löliger J., Bauer W. (2004). Sciences des aliments- Les glucides. *Document de l'Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne*. 1-129.
- Fernández-Artigas P., Guerra-Hernández E., García-Villanova B. (2001). Changes in sugar profile during infant cereal manufacture. *Food Chemistry* 74(4), 499-505.
- Ficarella A., Milanese M., Laforgia D. (2006). Numerical study of the extrusion process in cereals production: Part II. Analysis of variance. *Journal of Food Engineering* 72(2), 179-188.
- Frame N.D. (1994). The Technology of Extrusion Cooking. ed. N. D. Frame. pp.1-51. Blackie Academic & Professional, London.
- Galloway G.I., Biliaderis C.G., Stanley D.W. (1989). Properties of structure of amylose-glycerol monostearate complexes formed in solution or on extrusion of wheat flour. *Journal of Food Science* 54, 950-957.
- Galpin L., Thakwalakwa C., Phuka J., Ashorn P., Maleta K., Wong W.W., Manary M.J. (2007). Breast milk intake is not reduced more by the introduction of energy dense complementary food than by typical infant porridge. *Journal of Nutrition* 137, 1828-1833.
- Garber B.W., Hsieh F., Huff H.E. (1997). Influence of particle size on the twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chemistry* 74(5), 656-661.
- Gimbi D.M., Kamau D., Almazan A.M. (1997). Improved corn and millet based weaning foods: Formulation, viscosity, and nutritional and microbial quality. *Journal of Food Processing and Preservation* 21(6), 507-524.
- Gökmen S. (2004). Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering* 65(3), 357-362.
- Goneli A.L.D., Corre P.C., Resende O., Reis Neto S.A. (2007). Electrical conductivity for quality evaluation of popcorn kernels subjected to mechanical damage. *Biosystems Engineering* 96(3), 361–367
- Gonzalez R.J., Torres R.L., De Greef D.M., Guadalupe B.A. (2006). Effects of extrusion conditions and structural characteristics on melt viscosity of starchy materials. *Journal of Food Engineering* 74(1), 96-107.
- Gopaldas T., John C. (1992). Evaluation of a controlled 6 months feeding trial on intake by infants and toddlers fed a high energy-low bulk gruel versus a high energy-high bulk gruel in addition to their habitual home diet. *Journal of Tropical Pediatric* 38, 278-283.

- Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. (1996). High moisture twin-screw extrusion of sago starch: 1. Influence on granule morphology and structure. *Carbohydrate Polymers* 30(4), 275-286.
- Gry P., Holm F. (1987). Degermination of spices in a extruder. In Cornner C.O., Ed. Extrusion technology for the food industry, pp.86-89, Elsevier Applied Sci. Pub. London.
- Gry P., Holm F., Kristensen K.H. (1984). Degermination of spices in a extruder. In Zeuthen P., Cheftel J.C., Eriksson C., Jul M., Leniger H., Linko P., Varela G., and Vos G., Eds. Thermal processing and quality of food, pp.185-188. Elsevier Applied Sci. Pub. London.
- Gualberto D.G., Bergman C.J., Kazemzadeh M., Weber C.W. (1997). Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal brans *Plant Foods for Human Nutrition* 51, 187–198.
- Guerra-Hernandez E., Corzot N., Garcia-Villanova B. (1999). Maillard reaction evaluation by furosine determination during infant cereal processing. *Journal of Cereal Science* 29, 171–176.
- Guha M., Ali S.Z. (2006). Extrusion cooking of rice: Effect of amylose content and barrel temperature on product profile. *Journal of Food Processing and Preservation* 30(6), 706–716.
- Guha M., Ali S.Z., Bhattacharya S. (2003). Screening of variables for extrusion of rice flour employing a Plackett–Burman design. *Journal of Food Engineering* 57, 135–144.
- Guha M., Ali S.Z., Bhattacharya S. (1998). Effect of barrel temperature and screw speed on rapid viscoanalyser pasting behaviour of rice extrudate. *International Journal of Food Science & Technology* 33(3), 259-266.
- Gujral H.S, Singh N., Singh B. (2001). Extrusion behaviour of grits from flint and sweet corn. *Food Chemistry* 74, 303-308.
- Gujral H.S., Singh N. (2002). Extrusion behaviour and product characteristics of brown and milled rice grits. *International Journal of Food Properties* 5, 307-316.
- Gujska E., Khan K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fraction of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science* 55, 466–469.
- Guldan G.S., Zeitlin M.F., Beiser A.S., Super C.M., Gershoff S.N., Datta S. (1993). Maternal education and child feeding practices in rural Bangladesh. *Social Science & Medicine* 36, 925–935.
- Gutkoski L.C., El-Dash A.A. (1999). Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. *Plant Foods for Human Nutrition* 54, 315–325.
- Guy R.C.E. (1994). Raw materials for extrusion cooking processes. In: The technology of extrusion cooking. Frame N.D. (Ed), pp. 52-72. Blackie Academic & Professional, London.
- Guzman-Tello R., Cheftel J.C. (1987). Thiamine destruction during extrusion cooking as an indicator of the intensity of thermal processing. *International Journal of Food Science & Technology* 22(5), 549-562.
- Guzman-Tello R., Cheftel J.C. (1990). Colour loss during extrusion cooking of  $\beta$ -carotene-wheat flour mixes as an indicator of the intensity of thermal and oxidative processing. *International Journal of Food Science & Technology* 25(4), 420-434.
- Ha P.B., Bentley M.E., Pachon H., Sripaipan T., Caulfield L.E., Marsh D.R., Schroeder D.G. (2002). Caregiver styles of feeding and child acceptance of food in rural Viet Nam. *Food and Nutrition Bulletin*, 23(4 Supplement), 95–100.
- Hagenimana A., Ding X., Fang T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science* 43, 38–46.
- Harper J.M. (1981). Extrusion of starch and starchy materials. In *Extrusion of Foods*, Vol 2 (J.M. Harper, ed.) pp. 41–60, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Harper J.M. (1995). Low-cost extrusion: possibilities for Africa. *The South African journal of food science and nutrition* 7, 524-527.

- Harper J.M., Jansen G.R. (1985). Production of nutritious precooked foods in developing countries by low cost extrusion technology. *Food reviews International*, 1, 27-97.
- Harper, J.M., Stone M.L., Tribelhorn R.E., Jansen G.R., Lorzen K.J., Maga J.A. (1977). Evaluation of low-cost extrusion cookers for use in LDC's, Annual report, LEC-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, April, 1977.
- Hashimoto J.M., Grossmann M.V.E. (2003). Effects of extrusion conditions on quality of cassava bran/cassava starch extrudates. *International Journal of Food Science & Technology* 38(5), 511-517.
- Hashimoto J.M., Nabeshima E.H., Cintra H.S., Dias A.R.G., Bustos F.M., Chang Y.K. (2002). Effect of processing conditions on some functional characteristics of extrusion-cooked cassava starch/wheat gluten blends. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 924-930.
- Hazell T., Johnson I.T. (1989). Influence of food processing on iron availability in vitro from extruded maize-base snack foods. *Journal of Science Food and Agriculture* 46, 365-374.
- Holmes J., Bjöck I., Drews A., Asp N. (1986). A rapid method for the analysis of starch. *Starch* 38, 224-226.
- Holmes J., Lundquist J., Björck I., Eliasson A.-C., Asp N.-G (1988). Degree of starch gelatinization, digestion rate of starch in vitro, and metabolic response in rats. *American Journal of Clinical Nutrition* 47, 1010– 1016.
- Hossain M.I., Wahed M.A., Ahmed S. (2005). Increased food intake after the addition of amylase-rich flour to supplementary food for malnourished children in rural communities of Bangladesh. *Food Nutrition Bulletin* 26(4), 323-329.
- Hoyle B., Yunus M., Chen L.C. (1980). Breast-feeding and food intake among children with acute diarrheal disease. *American Journal of Clinical Nutrition* 33, 2365-2371.
- Ibanoglu S., Ainsworth P., Hayes G.D. (1997). In vitro protein digestibility and content of thiamin and riboflavin in extruded tarhana, a traditional Turkish cereal food. *Food Chemistry* 58, 141-144.
- Ilo S., Berghofer E. (1998). Kinetics of thermomechanical destruction of thiamin during extrusion cooking. *Journal of Food Science* 63(2), 312–316.
- Ilo S., Berghofer E. (1999). Kinetics of colour changes during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering* 39, 73-80.
- Ilo S., Berghofer E. (2003). Kinetics of lysine and other amino acids loss during extrusion cooking of maize grits. *Journal of Food Science* 68(2), 496–502.
- Ilo S., Liu Y., Berghofer E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 32, 79-88.
- Ilo S., Schoenlechner R., Berghofer E. (2000). Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites* 97 (51), 97-110.
- Ilo S., Tomschik U., Berghofer E., Mundigler N. (1996). The effect of extrusion operating conditions on the apparent viscosity and the properties of extrudates in twin-screw extrusion cooking of maize grits. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 29(7), 593–598.
- Islam M.M., Khatun M., Peerson J.M., Ahmed T., Mollah M.A., Dewey K.G., Brown, K.H. (2008). Effects of energy density and feeding frequency of complementary foods on total daily energy intakes and consumption of breast milk by healthy breastfed Bangladeshi children. *American Journal of Clinical Nutrition* 88(1), 84-94.
- Islam M.M., Peerson J.M., Ahmed T., Dewey K.G., Brown K.H. (2006). Effects of varied energy density of complementary foods on breast-milk intakes and total energy consumption by healthy, breastfed Bangladeshi children. *American Journal of Clinical Nutrition* 83, 851 - 858.
- Iwe M.O., Ngoddy P.O. (1998). Proximate composition and some functional properties of extrusion cooked soybean and sweet potato blends. *Plant Food Human Nutrition* 53(2), 121–132.

- Iwe M.O., Wolters I., Gort G., Stolpb W., van Zuilichem D.J. (1998). Behaviour of Gelatinisation and Viscosity in Soy-Sweet Potato Mixtures by Single Screw Extrusion: A Response Surface Analysis. *Journal of Food Engineering* 38, 369-379.
- Jackson D.S., Gomez M.H., Waniska R.D., Rooney L.W. (1990). Effects of single-screw extrusion cooking on starch as measured by aqueous high-performance size-exclusion chromatography. *Cereal Chemistry* 67(6), 529-532.
- Jager T., van Zuilichem D.J., Stolp W., van't Riet K. (1988). Residence time distributions in extrusion-cooking. Part IV the feed zone of a conical, counter-rotating, twin-screw extruder processing maize grits. *Journal of Food Engineering* 8(3), 157-172.
- Jansen G.R., Harper J.M., O'deen L.A. (1978). Nutritional evaluation of full-fat soy flour produced by heat roasting. *Journal of Food Science* 43(4), 1350-1351.
- Jin Z., Hsieh F., Huff H.E. (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *Journal of Cereal Science* 22, 185-194.
- Jones D., Chinnaswamy R., Tan Y., Hanna M. (2000). Physicochemical properties of ready-to-eat breakfast cereals. *Cereal Food World* 45(4), 164-168.
- Kadan R.S., Bryant R.J., Pepperman A.B. (2003). Functional properties of extruded rice flours. *Journal of Food Science* 68, 1669-1672.
- Kainuma K., Matsunaga A., Itagawa N., Kobayashi S. (1981). New enzyme system  $\beta$ -amylase-pullulanase to determine the degree of gelatinization and retrogradation of starch products. *Journal of Japanese society on starch science* 28, 235-240.
- Kelley T.R., Walker P.M. (1999). Bacterial concentration reduction of food waste amended animal feed using a single-screw dry-extrusion process. *Bioresource Technology* 67, 247-253.
- Kelley T.R., Walker P.M. (2000). Bacterial concentration reduction in swine waste amended livestock feed using a single-screw dry-extrusion process. *Bioresource Technology* 75, 189-195.
- Khan N.K., Hop L.T., Tuyen L.D., Khoi H.H., Son T.H., Duong P.H., Phuong H.N. (2008). A national plan of action to accelerate stunting reduction in Vietnam. *SCN News* 36, 30-37.
- Kirby A.R., Ollett A.L., Parker R., Smith A.C. (1988). An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *Journal of Food Engineering* 8(4), 247-272.
- Laporte J., Kovacsik G., Pinta M. (1980). Milieux végétaux, in: Pinta, M., (Eds., 2<sup>nd</sup> édition), Spectrométrie d'absorption atomique, Tome 2 : Application à l'analyse chimique. pp. 378-421. Masson, Paris.
- Larrea M.A., Chang Y.K., Martinez Bustos F. (2005). Effect of some operational extrusion parameters on the constituents of orange pulp. *Food Chemistry* 89, 301-308.
- Lasekan O.O., Lasekan W.O. (2000). Moisture sorption and the degree of starch polymer degradation on flours of popped and malted sorghum (sorghum bicolor). *Journal of Cereal Science* 31, 55-61.
- Li S.-Q., Zhang H.Q., Jin Z. T., Hsieh F.-H. (2005). Textural modification of soya bean/corn extrudates as affected by moisture content, screw speed and soya bean concentration. *International Journal of Food Science & Technology* 40(7), 731-741.
- Lichovnikova M., Zeman L., Kracmar S., Klecker D. (2004). The effect of the extrusion process on the digestibility of feed given to laying hens. *Animal Feed Science and Technology* 116, 313-318.
- Lin S., Hsieh F., Huff H.E. (1998). Effects of lipids and processing conditions on lipid oxidation of extruded dry pet food during storage. *Animal Feed Science and Technology* 71, 283-294.
- Linko P., Colona P., Mercier C. (1981). High-temperature short-time extrusion cooking. In: Pomeranz Y., Ed. *Advances in Cereal Science and Technology*. Vol. IV, pp.145-235. American Association of Cereal Chemists. St paul, Minnesota.

- Livingstone A.S., Feng J.J., Malleshi N.G. (1993). Development and nutritional quality evaluation of weaning foods based on malted, popped and roller dried wheat and chickpea. *International Journal of Food Science & Technology* 28(1), 35–43.
- Ljokjel K., Harstad O.M., Skrede A. (2000). Effect of heat treatment of soybean meal and fish meal on amino acid digestibility in mink and dairy cows. *Animal Feed Science and Technology* 84, 83-95.
- Lutter C.K., Dewey K.G. (2003). Proposed nutrient composition for fortified complementary foods. *Journal of Nutrition* 133, 3011S-3020S.
- Lutter, C.K., Rodríguez A., Fuenmayor G., Avila L., Sempertegui F., Escobar J. (2008). Growth and micronutrient status in children receiving a fortified complementary food. *The Journal of Nutrition* 138(2), 379-388.
- Malkki Y., Kervinen R., Olkku J., Linko P. (1984). Effect of monoglycerides during cooking extrusion of wheat flour. In *Fats (Lipids) in Baking and Extrusion, Lipid Forum Symposium*, Goteborg, Sweden, ed. R. Marcuse, pp. 130-137.
- Malleshi N.G., Hadimani N.A., Chinnaswamy R., Klopfenstein C.F. (1996). Physical and nutritional qualities of extruded weaning foods containing sorghum, pearl millet, or finger millet blended with mung beans and nonfat dried milk. *Plant Foods Human Nutrition* 49(3), 181-189.
- Marero L.M., Payumo E.M., Aguinaldo A.R., Homma S., Igarashio O. (1991). Vitamin E constituents of weaning foods from germinated cereals and legumes. *Journal of Food Science* 56(1), 270–271.
- Marero L.M., Payumo E.M., Librando E.C., Lainez W.N., Gopez M.D., Homma S. (1988). Technology of weaning food formulations prepared from germinated cereals and legumes. *Journal of Food Science* 53(5), 1391-1395.
- Marquis G.S., Lopez T., Peerson J.M., Brown K.H. (1993). Effect of dietary viscosity on energy intake by breast-fed and non- breast-fed children during and after acute diarrhea. *American Journal of Clinical Nutrition* 57, 218 - 223.
- Marsman G.J.P., Gruppen H., Van der Poel A.F.B., Resink J.W., Versteegen M.W.A., Voragen A.G.J. (1995). The effect of shear forces and addition of a mixture of a protease and a hemicellulase on chemical, physical and physiological parameters during extrusion of soybean meal. *Animal Feed Science Technology* 56(1-2), 21-35.
- Martorell R., Yarbrough C., Yarbrough S., Klein R.E. (1980). The impact of ordinary illnesses on the dietary intakes of malnourished children. *American Journal of Clinical Nutrition* 33, 345-350.
- Mathew J.M., Hosney R.C., Faubion J.M. (1999). Effects of corn sample, mill type, and particle size on corn curl and pet food extrudates. *Cereal Chemistry* 76(5), 621-624.
- Matthey F.P., Hanna M.A. (1997). Physical and functional properties of twin-screw extruded whey protein concentrate–corn starch blends. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 30(4), 359–366.
- Mendonça S., Grossmann M.V.E., Verhe R. (2000). Corn bran as a fibre source in expanded snacks. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 33, 2-8.
- Mensah P., Tomkins A. (2003). Household-level technologies to improve the availability and preparation of adequate and safe complementary foods. *Food and Nutrition Bulletin* 24(1), 104-125.
- Mensa-Wilmot R., Phillips D., Hargrove J.L. (2001a). Acceptability of extrusion cooked cereal/legume weaning food supplements to Ghanaian mothers. *International Journal of Food Science and Nutrition* 52, 83-90.
- Mensa-Wilmot R., Phillips D., Hargrove J.L. (2001b). Protein quality evaluation of cowpea-based extrusion cooked cereal/legume weaning mixtures. *Nutrition Research* 21, 849-857.
- Mercier C. (1993). Nutritional appraisal of extruded foods. *International Journal of Food Science and Nutrition* 44, 45-53.

- Mercier C., Feillet P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. *Cereal Chemistry* 52(3), 283-297.
- Mercier, C. (1994). Comment aborder la cuisson extrusion. In *La cuisson-extrusion* (Edited by Colonna and Dela Valle), pp. 1-13, Technique & Documentation- Lavoisier.
- Meuser F., Van Lengerich B. (1992). System analytical model for the extrusion of starches. In Kokini J.L., Ho C.T., Karwe M.V. (Eds.), *Food extrusion and technology*, New York, pp. 619–630, Marcel Dekker.
- Mezreb K., Goullieux A., Ralainirina R., Queneudec M. (2006). Effect of sucrose on the textural properties of corn and wheat extrudates. *Carbohydrate Polymers* 64, 1-8.
- Milan-Carrillo C., Reyes-Moreno C., Camacho-Hernandez I., Rouzaud-Sandez O. (2002). Optimisation of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L) into a useful product. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 718-728.
- Ministère de la Santé. (2001). Arrêt du ministre du ministère de la santé sur « les limites acceptables pour certains microorganismes dans des aliments » N° 3742 / 2001 / QN-BYT. (*en Vietnamien*) *Ha Noi, le 31 aout 2001*.
- Ministère de la Santé. (2003). Arrêt du ministre du ministère de la santé sur “La réglementation de la fortification des micro-nutriments dans les produits”. (*en Vietnamien*) *Ha Noi, le 9 décembre 2003*.
- Moore A.C., Akhter S., Aboud F.E. (2006). Responsive complementary feeding in rural Bangladesh. *Social Science & Medicine* 62(8), 1917-1930.
- Moretti D., Lee T.-C., Zimmermann M.B., Nuessli J., Hurrell R.F. (2005). Development and evaluation of iron-fortified extruded rice grains. *Journal of Food Science* 70(5), 330–336.
- Mouquet C., Greffeuille V., Trèche S. (2006). Characterization of the consistency of gruels consumed by infants in developing countries: assessment of the Bostwick consistometer and comparison with viscosity measurements and sensory perception. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 57, 459-469.
- Mouquet C., Salvignol B., Van Hoan N., Monvois J., Trèche S., (2003). Ability of a ‘very low-cost extruder’ to produce instant infant flours at a small scale in Vietnam. *Food Chemistry* 82, 249–255.
- Mouquet C., Trèche S. (2001). Viscosity of gruels for infants: a comparison of measurement procedures. *International Journal of Food Science & Nutrition* 52, 389-400.
- Moursi M., Mbemba F., Trèche S. (2003). Does the consumption of amylase-containing gruels impact on energy intake and growth of Congolese infants? *Public Health Nutrition* 6(3), 249-257.
- Neumann C.G., Bwibo N.O., Marquardt M., Trostle M., Wienberg S. (1994). Food intake during acute illness and convalescence in Kenyan toddlers. *FASEB [Federation of American Societies for Experimental Biology] Journal* 8(4), A 2550.
- Ng W.-K., Keembiyehetty C.N., Wilson R.P. (1998). Bioavailability of niacin from feed ingredients commonly used in feeds for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* 161, 393–404.
- Nguyen T.T.T. (2005). Étude de l'effet de procédés technologiques combinés à la fermentation par des bactéries lactiques amylolytiques pour élaborer de nouveaux aliments de compléments du jeune enfant à base de riz et de soja". Doctorat de L'ENSIA-MASSY soutenue en décembre 2005.
- Nguyen T.T.T., Loiseau G., Icard-Vernière C., Rochette I., Trèche S., Guyot J.P. (2007). Effect of fermentation by amylolytic lactic acid bacteria in process combinations, on characteristics of rice/soybean slurries: a new method for preparing high energy density complementary foods for young children. *Food Chemistry* 100, 623-631.
- NIN (*Institut National de la Nutrition du Vietnam*) (2003). General nutrition survey 2000. *Medical Publishing House*.
- Njoki P., Faller J.F. (2001). Development of an extruded plantain/corn/soy weaning food *International Journal of Food Science and Technology* 36, 415-423.

- Noguchi A. (1986). Food processing activities in Japan on the use of twin screw extruders. *Report of the National Food Research Institute*. Tsukuba, Japan.
- Nout M.J.R. (1993). Processed weaning foods for tropical climates. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 43, 213–221.
- Nwabueze T.U. (2007). Effect of process variables on trypsin inhibitor activity (TIA), phytic acid and tannin content of extruded African breadfruit–corn–soy mixtures: A response surface analysis. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 40, 21–29.
- Obatolu V.A., Cole A.H. (2000). Functional property of complementary blends of soybean and cowpea with malted or unmalted maize. *Food Chemistry* 70(2), 147-153.
- Obatolu V.A., Cole A.H., Maziya-Dixon B.B. (2000). Nutritional quality of complementary food prepared from unmalted and malted maize fortified with cowpea using extrusion cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80, 646-650.
- Occena L.G., Bennink M.R., Uebersax M.A., Chung Y.S. (1997). Evaluation of drum-dried meals prepared from split beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Protein quality and selected antinutritional factors. *Journal of Food Processing and Preservation* 21(4), 335-344.
- Ohtsubo K., Suzuki K., Yasui Y., Kasumi T. (2005). Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder. *Journal of Food Composition and Analysis* 18, 303–316.
- Onimawo I.A., Akpojobwo A.E. (2006). Toasting (dry heat) and nutrient composition, functional properties and antinutritional factors of pigeon pea (*cajanus cajan*) flour. *Journal of Food Processing & Preservation*, 30(6), 742-753.
- Onwulata C.I., Smith P.W., Konstance R.P, Holsinger V.H. (2001). Incorporation of whey products in extruded corn, potato or rice snacks. *Food Research International* 34, 679-687.
- Onyango C., Henle T., Hofmann T., Bley T., (2004a). Production of high energy density fermented uji using a commercial alpha-amylase or by single-screw extrusion. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 37, 401-407.
- Onyango C., Henle T., Ziems A., Hofmann T., Bley T. (2004b). Effect of extrusion variables on fermented maize–finger millet blend in the production of uji. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 37, 409-415.
- Onyango C., Noetzold H., Hofmann T., Bley T., Henle T. (2004c) Proximate composition and digestibility of fermented and extruded uji from maize–finger millet blend. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 37, 827–832.
- Onyango C., Noetzold H., Ziems A., Hofmann T., Bley T., Henle T. (2005). Digestibility and antinutrient properties of acidified and extruded maize–finger millet blend in the production of uji. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 38, 697–707.
- Owino V.O., Kasonka L.M., Sinkala M.M., Wells J.K., Eaton S., Darch T., Coward A., Tomkins A.M., Filteau S.M. (2007). Fortified complementary foods with or without  $\alpha$ -amylase treatment increase hemoglobin but do not reduce breast milk intake of 9-mo-old Zambian infants. *American Journal of Clinical Nutrition* 86, 1094-1103.
- Ozer E.A., Herken E.N., Güzel S., Ainsworth P., İbanoglu Ş. (2006). Effect of extrusion process on the antioxidant activity and total phenolics in a nutritious snack food. *International Journal of Food Science & Technology* 41(3), 289-293.
- Pan B.S., Kong M.S., Chen H.H. (1992). Twinscrew extrusion for expanded rice products: processing parameters and formulation of extrudate properties. In: Food Extrusion Science and Technology. Kokini J.L., Ho, C. and Karwe, M.V. (Eds), New York, pp. 693-709, Marcel Dekker inc.
- Pansawat N., Jangchud A., Jangchud K., Wuttijumng P., Koehler P.E., Phillips R.D. (2004). Effects of extrusion on n-3 fatty acids and vitamin E in a fish, rice flour, menhaden oil formulation. In *Abstract of the 10th world congress on clinical nutrition* (p. 109). Thailand: Phuket.

- Pansawat N., Jangchud K., Jangchud A., Wuttijumnong P., Saalia F.K., Eitenmiller R.R., Phillips, R.D. (2008). Effects of extrusion conditions on secondary extrusion variables and physical properties of fish, rice-based snacks. *Food Science and Technology* 41(4), 632-641.
- Parker M.L., Grant A., Rigby N.M., Belton P.S., Taylor J.R.N. (1999). Effects of popping on the endosperm cell walls of sorghum and maize. *Journal of Cereal Science* 30(3), 209-216.
- Pelembé, L.A., Ecrasmus, C., Taylor, J.R.N. (2002). Development of a protein-rich composite sorghum-cowpea instant porridge by extrusion cooking process. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 35, 120-127.
- Pelletier D.L., Frongillo E.A., Habicht J.P. (1993). Epidemiological evidence for a potentiating effect of malnutrition on children mortality. *American Journal of Public Health* 83(8), 1130-1133
- Pelletier D.L., Frongillo E.A., Schoeder D.G., Habicht J.P. (1995). The effects of malnutrition on child mortality in developing countries. *Bulletin of the World Health Organisation* 73, 443-448
- Pham Van Phu (2007). Research on solution to improve quality of complementary foods produced from local materials in a rural area of QuangNam province. Doctorat de L'Ecole de Médecine de Hanoi (*en Vietnamese*).
- Plunkett A., Ainsworth P. (2007). The influence of barrel temperature and screw speed on the retention of L-ascorbic acid in an extruded rice based snack product. *Journal of Food Engineering* 78, 1127-1133.
- Poltronieri F., Areas J.A.G., Colli C. (2000). Extrusion and iron bioavailability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) *Food Chemistry* 70, 175-180.
- Rahman M.M., Islam M.A., Mahalanabis D., Biswas E., Majid N., Wahed M.A. (1994). Intake from a energy-dense porridge liquefy by amylase of germinated wheat: a controlled trial in severely malnourished children during convalescence from diarrhoea. *European Journal of Clinical Nutrition* 48, 46-53.
- Rahman M.M., Mahalanabis D., Ali M., Mazumder R.N., Wahed M.A., Fuchs G.J. (1997a). Absorption of macronutrients and nitrogen balance in children with dysentery fed an amylase-treated energy-dense porridge. *Acta Paediatrica* 86(12), 1312-1316.
- Rahman M.M., Mitra A.K., Mahalanabis D., Wahed M.A., Khatun M., Majid N. (1997b). Absorption of macronutrients from a calorie-dense diet in malnourished children during acute shigellosis. *Journal of Pediatrics Gastroenterol Nutrition* 24(2), 119-123.
- Ralet M.C., Bonnin E., Thibault J.F. (1993) Raw and extruded fibre from pea hulls. Part I: Composition and physico-chemical properties. *Carbohydrate polymers* 20(1), 17-23
- Rémond B., Le Guen M.P., Poncet C. (2003). Degradation in the rumen and nutritional value of lupin (*Lupinus albus* L.) seed proteins effect of extrusion. *Animal Feed Science and Technology* 105, 55-70.
- Reyes-Moreno C., Milan-Carrillo J., Gutierrez-Dorado R., Paredes-Lopez O., Cuevas-Rodriguez E.O., Garzon-Tiznado J.A. (2003). Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L). Optimization of extrusion process. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 36, 685-695.
- Ryu G.H., Ng P.K.W. (2001). Effects of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch/Stärke* 53(3-4), 147-154.
- Sacchetti S., Pinnavaia G.G., Guidolin E., Dalla Rosa M. (2004). Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. *Food Research International* 37, 527-534.
- Saklar S., Katnas S., Ungan S. (2001). Determination of optimum hazelnut roasting conditions. *International Journal of Food Science and Technology* 36, 271-281.
- Sanchez-Grinan M.I. (1995). Effect of varied dietary fat and carbohydrate concentrations on total energy intake by recovering malnourished children. *FASEB journal* 9, A10007 (abstract).

- Sandberg A.-S., Andersson H., Kivisto B., Sandstrom B. (1986). Extrusion cooking of high-fiber cereal product. I. Effect on digestibility and absorption of protein, fat, starch dietary fibre and phytate in the small intestine. *British Journal of Nutrition* 55, 245-254.
- Sanni A.I., Onilude A.A., Ibidapo O.T. (1999). Biochemical composition of infant weaning food fabricated from fermented blends of cereal and soybean. *Food Chemistry* 65(1), 35-39.
- Sarker S.A., Molla A.M., Rahaman M.M. (1982). Calorie intake in childhood diarrhoea. *Nutrition Reports International* 26, 581-590
- Sarker S.A., Molla A.M., Rahaman M.M. (1983). Impact of supplementary food on intake of breast milk in diarrhoea. *Lancet* ii 8363, 1349-1351.
- Sayre R.N., Nayyar D.K., Saunders R.M. (1985). Extraction and refining of edible oil from extrusion stabilized rice bran. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 62, 1040-1043.
- Schweizer T.F., Raimann S., Solm J., Elliasson A.-C., Asp N.G. (1986). Influence of drum-drying and twin screw extrusion cooking on wheat carbohydrates II. Effect of lipids on physical properties, degradation and complex formation of starch in wheat flour. *Journal of Cereal Science* 4, 249-260.
- Seiler K., Seibel (1978). Herstellung ballestoffangereicherter extrudate auf Getreidebasis, *Gordian* 78, 284-291.
- Seker M. (2005). Residence time distributions of starch with high moisture content in a single-screw extruder. *Journal of Food Engineering* 41(4), 632-641.
- Singh B., Sekhon K.S., Singh N. (2007a). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry* 100, 198-202.
- Singh J., Singh N. (1999). Effects of different ingredients and microwave power on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering* 42, 161-165
- Singh M., Srivastava S. (1993). Sorghum grain moisture: Its effect on popping quality. *Journal of Food Science and Technology (Mysore)* 30, 296-297.
- Singh N., Smith A.C. (1997). A comparison of wheat starch, whole wheat meal and oat flour in the extrusion cooking process. *Journal of Food Engineering* 34, 15-32
- Singh S., Gamlath S., Wakeling L. (2007b). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology* 42, 916-925.
- Sokhey A.S., Ali Y., Hanna M.A. (1997). Effects of die dimensions on extruder performance. *Journal of Food Engineering* 31(2), 251-261.
- Sorensen M., Ljokjel K., Storebakken T., Shearer K.D., Skrede A. (2002). Apparent digestibility of protein, amino acids and energy in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a fish meal based diet extruded at different temperatures. *Aquaculture* 211, 215-225.
- Sriburi P., Sandra Hill E. (2000). Extrusion of cassava starch with either variations in ascorbic acid concentration or pH. *International Journal of Food Science & Technology* 35(2), 141-154.
- Srivastava S. (1996) . Use of popped versus malted sorghum flour in supplementary foods for children. *INCRISAT International Sorghum and Millet News Letter* 37, 71-72.
- Stephenson D.M, Gardne J.M.M., Walker S.P., Ashworth A. (1994). Weaning-food viscosity and energy density: their effects on ad libitum consumption and energy intakes in Jamaican. *American Journal of Clinical Nutrition* 60, 465-469.
- Stojceska V., Ainsworth P., Plunkett A., Ibanoglu S. (2008). The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology. *Journal of Cereal Science* 47(3), 469-479.
- Stuffins C. B. (1967). The determination of phosphate and calcium in feedstuffs. *Analyst* 92, 107-111.
- Su C.-W. (2007) Effects of eggshell powder addition on the extrusion behaviour of rice. *Journal of Food Engineering* 79, 607-612.

- Su C.-W., Kong M.-S. (2007). Effects of soybean oil, cellulose, and SiO<sub>2</sub> addition on the lubrication and product properties of rice extrusion. *Journal of Food Engineering* 78, 723–729.
- Suknark K., Philips R.D., Chinnan M.S. (1997). Physical properties of directly expanded extrudates formulated from partially defatted peanut flour and different types of starch. *Food Research International* 30, 515–583.
- Sullivan J.F., Kozmpel M.F., Egoville M.J., Talley E.A. (1985). Loss of amino acids and water soluble vitamins during potato processing. *Journal of Food Science* 50 (5), 1249–1253.
- Sullivan S.A., Birch L.L. (1994). Infant dietary experience and acceptance of solid foods. *Pediatrics* 93(2), 271–277.
- Sun T., Lærke H.N., Jorgensen H., Bach Knudsen K.E. (2006). The effect of extrusion cooking of different starch sources on the *in vitro* and *in vivo* digestibility in growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 131, 66–85.
- Suparno M., Dolan K.D., Ng P.K.W. (2005). Thermal kinetic parameters of thiamin in wheat flour at temperatures higher than 100 °C. *Journal of Food Science*, 70(3), 205–214.
- Talamond P., Gallon G., Trèche S. (1998). Rapide and sensitive liquid chromatographic method using a conductivity detector for the determination of phytic acid in food. *Journal of Chromatography A* 805, 143-147.
- Tatala S., Ndossi G., Ash D., Mamiro P. (2007). Effect of germination of finger millet on nutritional value of foods and effect of food supplement on nutrition and anaemia status in Tanzanian children. *Tanzan Health Research Bulletin* 9(2), 77-86.
- Taylor D.P., Carpenter C.E., Walsh M.K. (2006). Influence of sulfonation on the properties of expanded extrudates containing 32% Whey Protein. *Journal of Food Science* 71(2), 17–24.
- Tetteh G.L., Sefa-Dedeh S.K., Phillips R.D., Beuchat L.R. (2004). Survival and growth of acid-adapted and unadapted *Shigella flexneri* in a traditional fermented Ghanaian weaning food as affected by fortification with cowpea. *International Journal of Food Microbiology* 90(2), 189-195.
- Thathola A., Srivastava S. (2002). Physicochemical properties and nutritional traits of millet-based weaning food suitable for infant of the Kumaon hills, Northern India. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition* 11(1), 28–32.
- Thiombiano-Coulibaly N., Rocquelin G., Eymard-Duvernay S., Zougmore O.N., Traoré S.A. (2004). Effects of early extra fluid and food intake on breast milk consumption and infant nutritional status at 5 months of age in an urban and rural area of Burkina Faso. *European Journal of Clinical Nutrition* 58, 80–89.
- Thymi S., Krokida M.K., Pappa A., Maroulis Z.B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering* 68, 519–526
- 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(1), 52-60.
- Tou E.H., Mouquet-Rivier C., Picq C., Traoré A.S., Trèche S., Guyot J.P. (2007a). Improving the nutritional quality of ben-saalga, a traditional fermented millet-based gruel, by co-fermenting millet with groundnut and modifying the processing method. *LWT - Food Science and Technology* 40(9), 1561-1569.
- Tou E.H., Mouquet-Rivier C., Rochette I., Traoré A.S., Trèche S., Guyot J.P. (2007b). 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(3), 935-943.
- Traoré T., Vieu M-C., Traoré A.S., Trèche S. (2005). Effects of the duration of the habituation period on energy intakes from low and high energy density gruels by Burkinabe` infants living in free conditions. *Appetite* 45, 279–286.

- Trèche S. (1995). Technique pour augmenter la densité énergétique des bouillies. In Trèche S., de Benoist B., Benbouzid D., Verster A., Delpeuch F. éd(s): *L'alimentation de complément du jeune enfant*. Paris, pp. 123-148, Orstom, collection colloques et séminaires.
- Trèche S. (1996). Influence de la densité énergétique et de la viscosité des bouillies sur les ingérés énergétiques des nourrissons. *Cahiers Santé* 6, 237-243.
- Trèche S. (1998). Factors affecting the energy intake from gruel by breast-fed children in developing countries. *Exposé invité présenté à l'International conference on Infant and Pre-school child Nutrition*, 18-21 Novembre 1998, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria.
- Trèche S. (1999). Techniques for increasing the energy density of gruel. In Dop, M.C., Benbouzid, D., Trèche, S., de Benoist, B., Verster, A., Delpeuch, F. éd(s): *Complementary feeding of young children in Africa and the Middle East*. pp. 101-120. Geneva, 1999, WHO.
- Trèche S. (2002). Complementary foods in developing countries: Importance, required characteristics, constraints and potential strategies or improvement. In P. Kolsteren, & T. Hoérée (Eds.), *Proceedings of the International Colloquium promoting growth and development of under fives*. Antwerpen, pp. 132-148, ITG Press. conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 52, 213-218.
- Trèche S., Mbomé 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 Sciences and Nutrition* 50, 117-125.
- Trèche S., Mouquet-Rivier C. (2008). Use of amylases in infant food. In Porta R., Di Pierro P. and Mariniello L. eds. *Recent Research Developments in Food Biotechnology. Enzymes as Additives or Processing Aids*. Trivandrum: Signpost, 2008, p. 213-245. (ISBN: 978-81-208-0228-2).
- Trinh Bao Ngoc, Pham Van Phu, Pham Duy Tuong, Nguyen Cong Khan, Trèche S. (2006). Energy and nutrient densities of complementary foods for 4-9-month-old infants in a commune of Thangbinh district, Quangnam Province. (*en vietnamien*). *Y hoc thuc Hanh (Journal of practical medicine)* 538(4), 38-31.
- UNICEF (2008). La situation des enfants dans le monde 2008. (Consulté en novembre 2008 : <http://www.unicef.fr/accueil/s-informer/nos-publications/les-rapports-unicef/var/lang/FR/rub/595.html>)
- Unlu E., Faller J.F. (2002). RTD in twin-screw food extrusion. *Journal of Food Engineering* 53(2), 115-131.
- Ushakumari S.R., Latha S., Malleshi N.G. (2004). The functional properties of popped, flaked, extruded and roller-dried foxtail millet (*Setaria italica*). *International Journal of Food Science and Technology* 39, 907-915
- Van de Velde C., Boune D., Coq J.L., Cheftel J.C. (1984). Destruction of microorganisms and toxins by extrusion cooking. In: Zeuthen P., Cheftel J.C., Eriksson C., Jul M., Leniger H., Linko P., Varela G., and Vos G., Eds. *Thermal processing and quality of food*, pp.155-161. Elsevier Applied Sci. Pub. London.
- Van de Velde-Mary C. (1985). Influence de la cuisson-extrusion sur la teneur en microorganismes, toxines, pigments et enzymes de quelques mélanges alimentaires. Thèse de troisième cycle. Université de Montpellier.
- Van Hoan N. (2004). Condition d'utilisation d'un cuiseur extrudeur à très faible coût et de traitements enzymatiques pour la production d'une farine infantile à cuire à base de riz. *Mémoire de DEA de Sciences des aliments*, Université Montpellier 2.
- Van Hoan N., Mouquet-Rivier C., Icard-Vernière C., Rochette I., Trèche S. (2006). Combination of amylase treatments and very low-cost extrusion cooking for infant flour production in Vietnam. *Poster présenté à "Food is Life", IUFOST XIIIth Congress, 17-21/09/2006, Nantes, France*.
- Van Hoan N., Mouquet-Rivier C., Trèche S. *in press*. Effects of starch, lipid and moisture contents on extrusion behaviour and extrudate characteristics of rice-based blends prepared with a very-low-cost extruder. *Journal of Food Process and Engineering*. Accepted the 4<sup>th</sup> April, 2008.

- Van Soest P.S. (1963). Use of detergents in the analysis of fibrous feed II- A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of Association of Official Analytical Chemistry* 46, 829-835.
- Vasanthan T., Gaosong J., Yeung J., Li J. (2002). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry* 77, 35–40.
- Vergnes B., Villemaire J.P., Colonna P., Tayeb J. (1987). Interrelationships between thermomechanical treatment and macro-molecular degradation of maize starch in a novel rheolometer with preshearing. *Journal of Cereal Science* 5, 189-202.
- Vieu M.C., Traoré T., Trèche S. (2001). Effects of energy density and sweetness of gruels on Burkinabe` infant energy intakes in free living conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 52, 213–218.
- Viscidi K.A., Dougherty M.P., Briggs J., Camire M.E. (2004). Complex phenolic compounds reduce lipid oxidation in extruded oat cereals. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 37, 789–796.
- Wang X.Y., Kozempel M.G., Hick K.B., Seib P.A. (1992) Vitamin C stability during preparation and storage of potato flakes and reconstituted mashed potatoes. *Journal of Food Science* 57(5), 1136–1139.
- White J. (1991). Twin screw extrusion: technology and principles. *Ed Hanser*, 7-10.
- WHO (1992). Programme for control of diarrhoeal diseases. Geneva: WHO/CDD/92.38, 1992. (Eighth Programme Report 1990-1991.)
- WHO (1998). Complementary feeding of young children in developing countries: a review of current scientific knowledge. *Geneva: World Health Organization.*
- WHO (2003). Special issue based on a World Health Organization expert consultation on complementary feeding. *Geneva: World Health Organization.*
- WHO/UNICEF (2006). Planning Guide for national implementation of the Global Strategy for Infant and Young Child Feeding. WHO Press, Geneva, Switzerland.
- Wu W., Huff H.E., Hsieh F. (2007). Processing and properties of extruded flaxseed-corn puff. *Journal of Food Processing and Preservation* 31(2), 211-226.
- Yanez E., Lobos P., Diaz G., Ballester D. (1986). Effect of roasting on the chemical composition and protein quality of lupin seeds (*Lupinus albus* cv Multolupa). *Journal of Food Science* 51(5), 1235–1238.
- Yang S.-H, Peng J., Lui W.-B., Lin J. (2008) Effects of adlay species and rice flour ratio on the physicochemical properties and texture characteristic of adlay-based extrudates. *Journal of Food Engineering* 84, 489–494
- Yanniotis S., Petraki A., Soumpasi E. (2007). Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *Journal of Food Engineering* 80, 594–599.
- Yeh A.-I., Wu T.-W., Jaw I.-M. (1999). Starch transitions and their influence on flow pattern during single-screw extrusion cooking of rice flour. *Food and Bioproducts Processing* 77(1), 47-54.
- Zamora N.C. (2003). Effect of extrusion on the activity of anti-nutritional factors and in vitro digestibility of protein and starch in flours of *Canavalia ensiformis*. *Archivos Latinoamericanos Nutricion* 53(3), 293-8.
- Zielinski H., Kozłowska H., Lewczuk B. (2001). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2, 159-169.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	1
<b>Chapitre I: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	5
<b>1. Définition, caractéristiques requises et modes de production pour les farines infantiles</b>	6
1.1. <u>Définition des farines infantiles</u>	6
1.2. <u>Caractéristiques à conférer aux farines infantiles</u>	6
1.2.1. Qualité sanitaire	6
1.2.2. Composition en nutriments	7
1.2.3. Biodisponibilité des nutriments	7
1.2.4. Consistance et densité énergétique	8
1.2.5. Qualités organoleptiques	9
1.2.6. Modes de préparation	9
1.2.7. Prix	9
1.2.8. Emballage	9
1.2.9. Services accompagnant la vente	10
1.3. <u>Principaux procédés utilisables pour la production de farines infantiles</u>	10
1.3.1. Le broyage	10
1.3.2. Le grillage et la torréfaction	11
1.3.3. Le séchage sur rouleau	11
1.3.4. Le soufflage ( <i>popping</i> )	12
1.3.5. La cuisson-extrusion	12
1.3.6. La fermentation	13
1.3.7. La germination	13
1.3.8. Les traitements enzymatiques	14
1.4. <u>Equipements et procédés de fabrication mis au point dans le cadre du programme Fasevie</u>	14
1.4.1. Mise au point d'un «cuiseur-extrudeur à très faible coût» pour la préparation de farines instantanées	15
1.4.2. Vérification de la capacité du CE-TFC mis au point à produire des farines infantiles instantanées	16
1.4.3. Mis au point d'un CE-TFC de seconde génération	17
1.4.4. Conditions d'utilisation d'un CE-TFC et de traitements enzymatiques pour la production d'une farine infantile à cuire à base de riz	18

<b>2. Intérêts et contraintes de la cuisson-extrusion</b>	20
2.1. <u>Principe et application</u>	20
2.2. <u>Les différents types de cuiseur-extrudeur</u>	21
2.2.1. Nombre de vis	21
2.2.2. Coût	22
2.3. <u>La cuisson-extrusion à faible coût et la cuisson-extrusion à très faible coût</u>	22
2.3.1 La cuisson-extrusion à faible coût	22
2.3.2. La cuisson-extrusion à très faible coût	23
2.4. <u>Effets de la cuisson-extrusion sur certaines caractéristiques des produits</u>	24
2.4.1. Sur l'activité des facteurs antinutritionnels	24
2.4.2. Sur les protéines	25
2.4.3. Sur les lipides	26
2.4.4. Sur les fibres	27
2.4.5. Sur les vitamines et les anti-oxydants	28
2.4.6. Sur les minéraux	30
2.4.7. Sur les caractéristiques des amidons	30
2.4.7.1. Généralités	30
2.4.7.2. <i>Gélatinisation, dextrinisation, le gonflement (WAI) et la solubilité (WSI) dans l'eau</i>	31
2.4.7.3. <i>Viscosité et écoulement des bouillies</i>	31
2.4.7.4. <i>Caractère instantané des farines</i>	32
2.4.7.5. <i>Expansion des extrudats</i>	32
2.4.7.6. <i>Digestibilité de l'amidon</i>	33
2.4.8. Sur la qualité sanitaire	33
2.4.9. Sur les caractéristiques organoleptiques	35
2.5. <u>Facteurs modifiant les effets de la cuisson-extrusion</u>	36
2.5.1. Température	36
2.5.2. Vitesse de la vis	37
2.5.3. Débit d'alimentation	39
2.5.4. Configuration de la vis	39
2.5.5. Composition des matières premières	39
2.5.5.1. <i>Teneur en eau</i>	39
2.5.5.2. <i>Teneur en amidon</i>	41
2.5.5.3. <i>Teneur en lipides</i>	41
2.5.5.4. <i>Teneur en protéines</i>	42
2.5.5.5. <i>Teneur en fibres</i>	42
2.5.6. La taille des particules à l'entrée de l'extrudeur	43
2.5.7. Ajout d'autres ingrédients	43
2.5.7.1. <i>Ajout de sucre</i>	43
2.5.7.2. <i>Ajout de matières riches en minéraux</i>	44
2.5.7.3. <i>Ajout d'autres agents en vue d'améliorer les caractéristiques physicochimiques des produits extrudés</i>	44

<b>3. Facteurs influant sur les niveaux d'ingéré des nourrissons et des jeunes enfants</b>	<b>45</b>
3.1. <u>Les trois niveaux de facteurs déterminants</u>	45
3.1.1. Les déterminants immédiats	46
3.1.2. Les facteurs sous jacents	46
3.1.3. Les causes fondamentales	46
3.2. <u>Les principaux facteurs à prendre en compte</u>	46
3.2.1. Facteurs liés à l'enfant	47
3.2.1.1 <i>Etat de santé</i>	47
3.2.1.2 <i>Etat nutritionnel</i>	47
3.2.1.3 <i>Age</i>	47
3.2.2. Caractéristiques des aliments	48
3.2.2.1 <i>Densité énergétique et consistance des bouillies</i>	48
3.2.2.2 <i>Saveur</i>	48
3.2.3. Pratiques alimentaires	48
3.2.3.1 <i>Fréquence de consommation</i>	48
3.2.3.2 <i>Comportement des donneurs de soins</i>	49
<b>Chapitre II: MATÉRIELS ET MÉTHODES</b>	<b>50</b>
<b>1. Matières premières</b>	<b>51</b>
1.1. <u>Matières premières utilisées au Vietnam</u>	51
1.1.1. Grains de céréales et graines de légumineuses	51
1.1.2. Autres ingrédients des farines infantiles étudiées	51
1.1.3. Complément minéral et vitaminique	52
1.2. <u>Matières premières utilisées au Burkina Faso</u>	52
<b>2. Equipements</b>	<b>53</b>
2.1. <u>Cuiseur extrudeur</u>	53
2.2. <u>Torréfacteur</u>	53
2.3. <u>Séchage</u>	53
2.4. <u>Décortiqueuse</u>	53
2.5. <u>Dégermeur à maïs</u>	54
2.6. <u>Broyeur</u>	54
2.7. <u>Mélangeur</u>	54

<b>3. Protocole des études réalisées</b>	<b>54</b>
3.1. <u>Etude des effets de la consommation de bouillies de haute densité énergétique et nutritionnelle sur le niveau de couverture des besoins nutritionnels des nourrissons de 6 à 10 mois au Vietnam (Chapitre III)</u>	54
3.1.1. Sujets	54
3.1.2. Caractéristiques des farines et bouillies distribuées dans les cantines	55
3.1.3. Observations et échantillons récoltés	55
3.1.4. Traitement des données	56
3.2. <u>Effets des teneurs en amidon, en lipides et en eau des matières premières sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Chapitre IV-1)</u>	56
3.2.1. Origine et conservation des matières premières	56
3.2.2. Préparation des mélanges	56
3.2.3. Obtention et broyage des extrudats	57
3.2.4. Plan d'expérience et analyse statistique	57
3.2.5. Mesures et analyses physicochimiques réalisées	58
3.3. <u>Effets de la nature de la source amylicée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Chapitre IV-2)</u>	58
3.3.1. Matières premières	58
3.3.2. Préparation des mélanges et extrudats	59
3.3.3. Mesures et analyses physicochimiques réalisées	59
3.3.4. Analyse des données	59
3.4. <u>Effet de la longueur de la vis sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Chapitre V-1)</u>	59
3.4.1. Matériels et matières premières	60
3.4.2. Préparation des mélanges et des extrudats	60
3.4.3. Plan d'expérience et analyse statistique	60
3.4.4. Mesures et analyses physicochimiques réalisées	60
3.5. <u>Effets de l'usure de la vis sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Chapitre V-2)</u>	60
3.5.1. Matériel et matières premières	60
3.5.2. Préparation des mélanges et extrudats	61
3.5.3. Plan d'expérience et analyse statistique	61
3.5.4. Mesures et analyses physicochimiques réalisées	61
3.6. <u>Influence des procédés technologiques utilisés pour la fabrication des farines infantiles sur le niveau des ingérés en énergie et en nutriments de nourrissons de 6 à 10 mois (Chapitre VI)</u>	61
3.6.1. Sujets et localisation	61
3.6.2. Organisation de l'étude	62
3.6.3. Composition des farines expérimentales	62
3.6.4. Préparation des farines expérimentales	63

3.6.5. Préparation et distribution des bouillies	64
3.6.6. Traitement des données	65
<b>4. Détermination des teneurs en nutriments et facteurs antinutritionnels</b>	<b>65</b>
4.1. <u>Détermination des teneurs en nutriments</u>	65
4.1.1. Protéines totales	65
4.1.2. Lipides totaux	65
4.1.3. Amidon total	65
4.1.4. Teneurs en cendres et en minéraux	65
4.1.5. Teneur en matière sèche	66
4.2. <u>Détermination de la composition des fractions glucidiques</u>	66
4.2.1. Teneur en oligosides	66
4.2.2. Teneur en dextrines solubles	66
4.3. <u>Dosage de l'activité alpha amylasique</u>	66
4.4. <u>Détermination des teneurs en facteurs antinutritionnels</u>	67
4.4.1. Activités anti-trypsiques	67
4.4.2. Teneur en phytates	67
4.4.3. Teneur en fibres (ADF)	67
<b>5. Enregistrements de paramètres et déterminations physico-chimiques</b>	<b>67</b>
5.1. <u>Mesure de la température d'extrusion</u>	67
5.2. <u>Mesure de la pression</u>	68
5.3. <u>Caractérisation des extrudats</u>	68
5.3.1. Indice d'expansion des extrudats	68
5.3.2. Mesure du gonflement et la solubilité	68
5.3.3. Teneur en amidon endommagé	68
5.4. <u>Caractéristiques rhéologiques et osmolalité des bouillies</u>	68
5.4.1. Modes de préparation des bouillies	68
5.4.1.1. <i>Par cuisson à ébullition</i>	68
5.4.1.2. <i>Par ajout d'eau à 75°C</i>	68
5.4.2. Evaluation de la consistance	69
5.4.2.1 <i>Principe des mesures</i>	69
5.4.2.2. <i>Mesure de la viscosité</i>	69
5.4.2.3. <i>Mesure de l'écoulement</i>	69

<b>Chapitre III: EFFETS DE LA CONSOMMATION DE BOUILLIE FORTIFIÉE DE HAUTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE SUR LES INGÉRÉS DE NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM</b>	70
INTRODUCTION	71
RÉSUMÉ	72
<b>Effects of the consumption of high energy dense and fortified gruels on energy and nutrient intakes of 6-10-month-old Vietnamese infants. Van Hoan N, Van Phu P, Salvignol B, Berger J, Trèche S. (Projet d'article à soumettre à la revue Appetite)</b>	73
<b>Chapitre IV: EFFETS DES MATIÈRES PREMIÈRES SUR LES CARACTERISTIQUES DES EXTRUDATS ET DES BOUILLIES</b>	88
INTRODUCTION	89
<b>IV-1: Effet de la teneur en amidon, en lipides et en eau sur le comportement en cuisson-extrusion et les caractéristiques des extrudats a base de riz préparés à l'aide d'un cuiseur-extrudeur à très faible coût</b>	90
RÉSUMÉ	91
<b>Effects of starch, lipid and moisture contents on extrusion behaviour and extrudate characteristics of rice-based blends prepared with a very-low-cost extruder. Van Hoan N, Mouquet-Rivier C, Trèche S (Article accepté le 04/04/2008 par Journal of Food Process and Engineering)</b>	92
<b>IV-2: Effet de la nature de la source amylicée utilisée sur les caractéristiques des extrudats et des bouillies (Projet d'article)</b>	113
<b>Chapitre V: EFFETS DE MODIFICATIONS DE LA VIS SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES EXTRUDATS ET DES BOUILLIES</b>	131
INTRODUCTION	132
<b>V-1: Utilisation de «cuiseurs-extrudeurs à très faible coût» pour la production de farines infantiles: effets de la longueur de la vis en fonction de la composition des mélanges (Projet d'article)</b>	133

<b>V-2: Utilisation de «cuisseurs-extrudeurs à très faible coût» pour la production de farines infantiles: effets du niveau d'usure de la vis en fonction de la composition des mélanges (Projet d'article)</b>	152
<b>Chapitre VI: INFLUENCE DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DES FARINES INFANTILES SUR LES INGÉRÉS EN ÉNERGIE ET EN NUTRIMENTS DES NOURRISSONS DE 6 À 10 MOIS AU VIETNAM</b>	162
INTRODUCTION	163
RÉSUMÉ	164
<b>Effect of the technology used to increase energy density of gruels on energy and nutrient intakes of 6-10 months Vietnamese infants. Van Hoan N, Mouquet-Rivier C, Eymard-Duvernay S, Trèche S. (Projet d'article)</b>	165
<b>CONCLUSION</b>	178
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	184
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	202
<b>ANNEXES</b>	209

# ANNEXES

QUELQUES PHOTOS  
PRESENTANT LES ACTIVITES  
SUR LE TERRAIN ET LES  
FARINES INFANTILES



**Photo 1:** Matières premières localement disponibles pouvant utilisées pour la fabrication de farines infantiles au Vietnam



**Photo 2:** Mise au point du CE-TFC



Photo 3: Unité de production de farines infantiles à Quang Nam



Photo 4: Farines instantanées Favilo et Favina



**Photo 5:** Farine à cuisson rapide Nufavie



**Photo 6:** Transfert un CE-TFC au Burkina Faso  
(Préparation des échantillons à la CTRAPA, Burkina Faso-chapitre IV-2)



**Photo 7:** Vérification des données collectées chez un enfant  
*(Etude ingéré 1-chapitre III)*



**Photo 8:** Mesure de l'écoulement à l'aide d'un Bostwick  
*(Etude ingéré 1-chapitre III)*



**Photo 9:** Les parents emmènent leur bébé à la cantine au village de Tam Dan à Quang Nam  
(*Etude ingéré 2- chapitre VI*)



**Photo 10:** Un repas de bouillies à la cantine au village de Tam Phu à Quang Nam  
(*Étude ingéré 2-chapitre VI*)



**Photo 11:** La joie après le repas



**Photo 12:** ... et le dodo

---

## RESUME

L'objectif général de la thèse est de compléter les connaissances nécessaires à la maîtrise de l'utilisation et du transfert de «ciseurs-extrudeurs à très faible coût» (CE-TFC) mis au point au Vietnam pour la production locale de farines infantiles à partir des matières premières disponibles et de comparer, en fonction de leurs modalités de production, les niveaux d'ingérés de farines produites ou non avec le CE-TFC chez des enfants de 6 à 10 mois.

Les effets de certaines variables du procédé de production (*teneurs en amidon, lipides et eau des mélanges avant extrusion; nature des sources amylacées utilisées; longueur et niveau d'usure de la vis*) ont été étudiés sur certains paramètres de l'extrusion (*température, pression*), sur certaines caractéristiques des extrudats (*expansion, gonflement et solubilité dans l'eau, pertes en lipides et taux de gélatinisation*) et sur la viscosité apparente de bouillies préparées à partir des farines d'extrudats pour en calculer un indice d'instantanéité. Ce travail a permis de préciser les modalités de production permettant d'obtenir soit des farines instantanées soit des farines à cuisson rapide.

Préparées à partir de riz, soja, sésame et sucre, les farines instantanées et les farines à cuisson rapide, après ajout de compléments minéraux et vitaminiques et, pour la farine à cuisson rapide, d'amylases, permettent de préparer des bouillies fortifiées de consistance et de densité énergétique appropriées à la consommation par de jeunes enfants. Bien que les quantités de bouillie ingérées soient plus faibles, la consommation de deux bouillies par jour préparées à partir de ces deux types de farines -instantanée ou à cuisson rapide- permet, chez des enfants de 6 à 10 mois, des ingérés énergétiques moyens de, respectivement, 37% et 65% supérieurs à ceux de bouillies de faible densité énergétique préparées à partir d'une farine de même composition mais non extrudée et sans ajout d'amylases. Par ailleurs, consommées deux fois par jour par des enfants continuant à avoir accès à leur alimentation habituelle, les bouillies préparées à partir de la farine instantanée permettent d'augmenter de 58% leurs apports énergétiques par rapport à ceux d'enfants de même âge ne consommant que les aliments de complément habituellement distribués par leurs mères.

---

**Title:** Conditions of use of a very-low-cost extruder for the production of infant flours in Vietnam.

---

## ABSTRACT

The main objectives of the thesis were to complete the knowledge required for having a sufficient mastery of use and for transferring abroad the "Very-low-cost extruder" (VLCE) designed in Vietnam for the production of infant flours from locally available raw materials and to compare intakes of 6-10 month old children consuming flours prepared with or without using the VLCE.

The effects of the variation of some extrusion conditions (*starch, lipid and water contents of blends before extrusion; nature of starchy raw materials; length and erosion of the screw and barrel*) on extrusion behavior (*temperature, pressure*) and some characteristics of extrudates (*expansion, water absorption, water solubility, lipid loss and gelatinization rate*) and on apparent viscosity of gruels prepared from extruded flour, used for the calculation of an instant index, were studied. This work allowed us to determine the processing conditions to obtain either instant flour or ready-to-cook flour.

The fortified gruels from instant flour prepared from rice, soybean, sesame, sugar and vitamin-mineral premix or the ready-to-cook flour with the same composition (+ *amylase*) have appropriate consistency and energy density. Despite lower gruel intakes, the high energy density (ED) of the gruels prepared from extruded instant flour or ready-to-cook flour allowed an increase in energy intakes of 37% and 65%, respectively, in comparison with low ED gruels prepared from raw flour. In addition, when consumed twice a day with the opportunity to also eat their usual foods, ED gruels prepared from the instant flour resulted in a 58% increase of energy intakes from all complementary foods in comparison with energy intakes of infants consuming only usual complementary foods.

**Key words:** Infant flour, very-low-cost extruder, starch, lipid, viscosity, instant property, infant, energy density, energy intake, Vietnam.

---

## DISCIPLINE: NUTRITION ET SCIENCES DES ALIMENTS

---

**Mots-clés:** Farine infantile, ciseur-extrudeur à très faible coût, amidon, lipides, viscosité, caractère instantané, nourrisson, densité énergétique, ingéré énergétique, Vietnam.

---

**INTITULE DU LABORATOIRE:** UR 106 «Nutrition, Alimentation, Sociétés» de l'Institut de recherche pour le Développement (IRD)

---