



HAL
open science

Pain blanc, pain complet : fabrication et intérêt diététique

Raphaëlle Curtet

► **To cite this version:**

Raphaëlle Curtet. Pain blanc, pain complet : fabrication et intérêt diététique. Sciences pharmaceutiques. 1998. dumas-01633850

HAL Id: dumas-01633850

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01633850>

Submitted on 13 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il n'a pas été réévalué depuis la date de soutenance.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact au SID de Grenoble :
bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

<http://www.cfcopies.com/juridique/droit-auteur>

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

B.U.M GRENOBLE



D

115 022549 6

2^e exemplaire

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
FACULTÉ DE PHARMACIE DE GRENOBLE

Année : 1998

N° d'ordre 7009

**PAIN BLANC, PAIN COMPLET :
FABRICATION ET INTÉRÊT DIÉTÉTIQUE**

THÈSE
PRÉSENTÉE POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN PHARMACIE
DIPLÔME D'ÉTAT

Raphaëlle CURTET

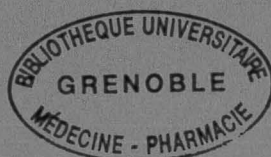
[Données à caractère personnel]

THÈSE SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 31 MARS 1998 A 18 HEURES
DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

Madame le Professeur **Anne-Marie ROUSSEL**, Président du jury

Madame **Annick VILLET**, Maître de conférence

Madame **Anne GARÉ**, Pharmacien d'officine.



UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
FACULTÉ DE PHARMACIE DE GRENOBLE

Année : 1998

N° d'ordre **7009**

**PAIN BLANC, PAIN COMPLET :
FABRICATION ET INTÉRÊT DIÉTÉTIQUE**

THÈSE
PRÉSENTÉE POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN PHARMACIE
DIPLOME D'ÉTAT

Raphaëlle CURTET

[Données à caractère personnel]

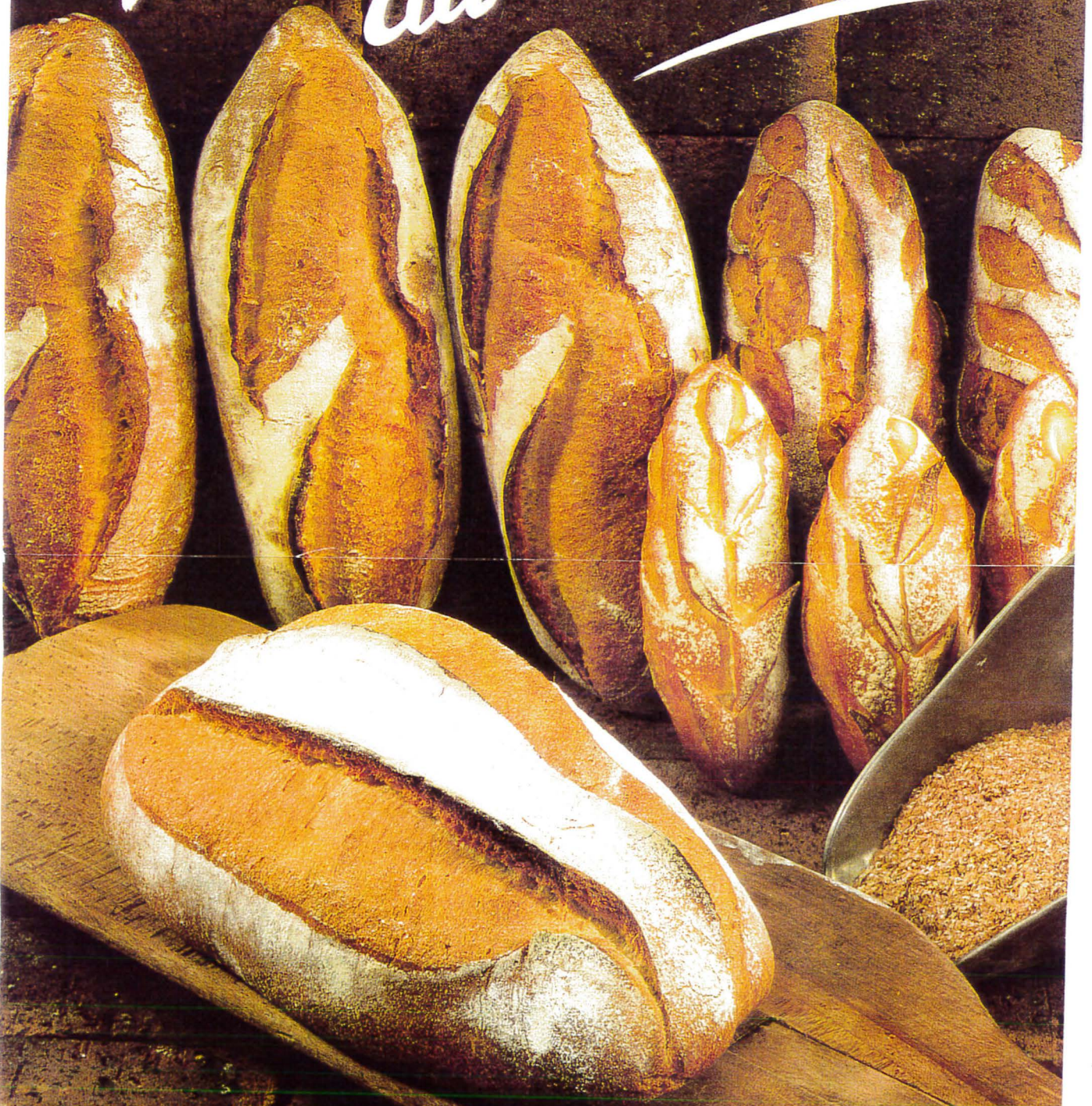
THÈSE SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 31 MARS 1998 A 18 HEURES
DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

Madame le Professeur **Anne-Marie ROUSSEL**, Président du jury

Madame **Annick VILLET**, Maître de conférence

Madame **Anne GARÉ**, Pharmacien d'officine.

*Tradition
du bon pain*



LES ARTISANS BOULANGERS



Merci à mes **parents** et mes **grands-parents**

Pour leur soutien pendant mes études et leur aide précieuse pour la réalisation de
ma thèse.

Merci à Frédéric

Merci à ma sœur Cécile, et à Éric, ainsi qu'à toute ma famille

Pour leur soutien affectif.

Merci à **Madame le Professeur ROUSSEL**

Merci à **Madame VILLET**

Pour leur disponibilité et leur aide précieuse.

Merci à **Madame GARE**

De m'avoir accueillie dans son officine pour mon stage officinal.

Merci aux Moulins du Bion
Route de Saint Jean 38300 MAUBEC
Pour leur accueil et les informations mises à ma disposition.

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
FACULTE DE PHARMACIE DE GRENOBLE
Domaine de la Merci 38700 LA TRONCHE

Doyen de la Faculté

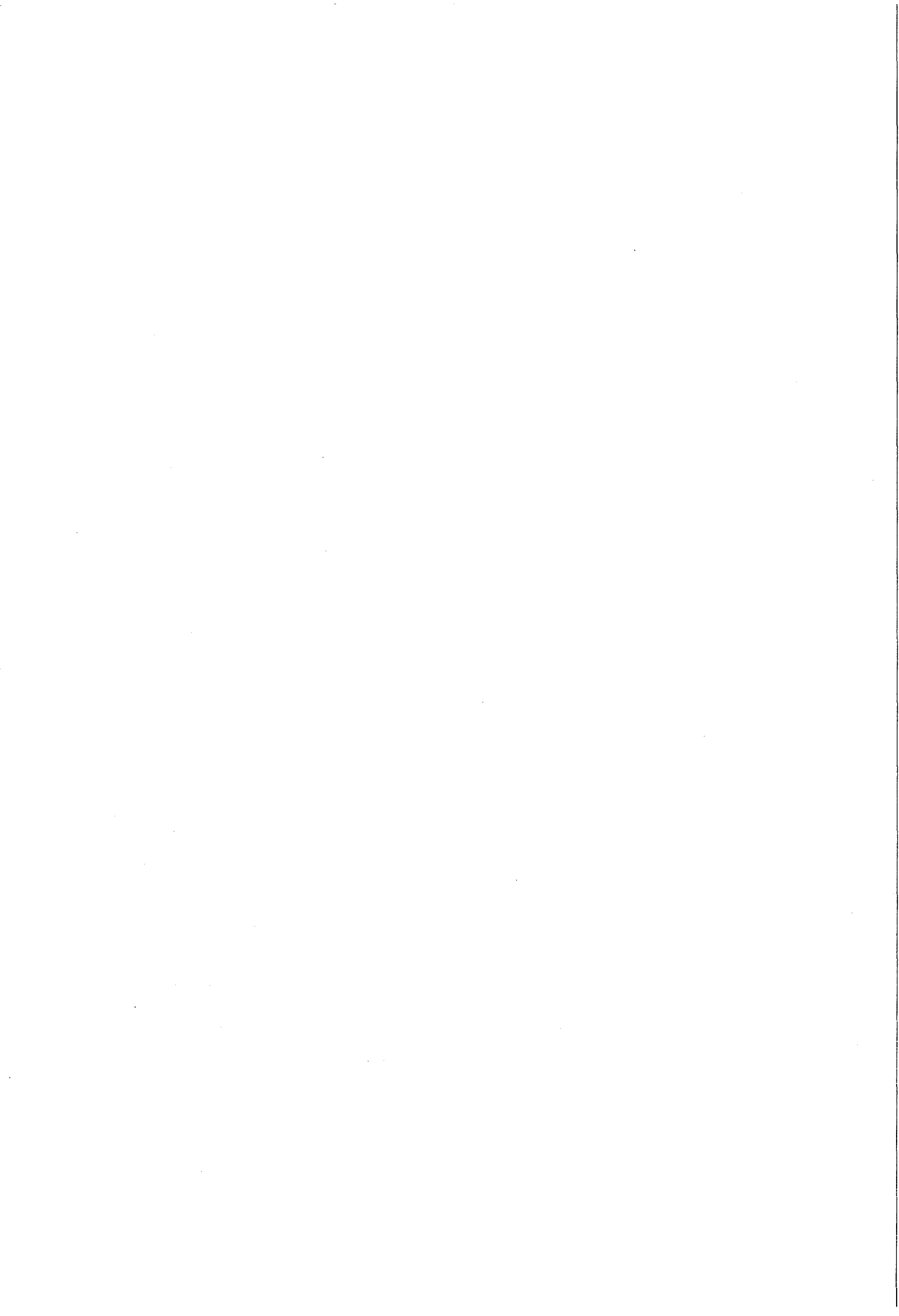
M. le Professeur A. FAVIER

Vice Doyen

M. le Professeur J. CALOP

PROFESSEURS DE PHARMACIE

| | | |
|-----------------------|-------------------|--|
| <i>AGNIUS-DELORD</i> | <i>Claudine</i> | <i>Physique Pharmacie</i> |
| <i>ALARY</i> | <i>Josette</i> | <i>Chimie Analytique</i> |
| <i>BAKRI</i> | <i>Abdelaziz</i> | <i>Pharmacie Galénique</i> |
| <i>BENOIT-GUYOD</i> | <i>Jean-Louis</i> | <i>Chimie Toxicologie et Eco-toxicologie</i> |
| <i>CALOP</i> | <i>Jean</i> | <i>Pharmacie Clinique et Bio-technique</i> |
| <i>CUSSAC</i> | <i>Max</i> | <i>Chimie Thérapeutique</i> |
| <i>DEMENGE</i> | <i>Pierre</i> | <i>Physiologie/Pharmacologie</i> |
| <i>DROUET</i> | <i>Emmanuel</i> | <i>Microbiologie-Immunologie</i> |
| <i>FAVIER</i> | <i>Alain</i> | <i>Biochimie</i> |
| <i>GOULON</i> | <i>Chantal</i> | <i>Physique-Pharmacie</i> |
| <i>GRILLOT</i> | <i>Renée</i> | <i>Parasitologie</i> |
| <i>LECLERC</i> | <i>Gérard</i> | <i>Chimie Organique</i> |
| <i>MARIOTTE</i> | <i>Anne-Marie</i> | <i>Pharmacognosie</i> |
| <i>ROCHAT</i> | <i>Jacques</i> | <i>Hygiène environnement Droit et Economie Pharmaceutiques</i> |
| <i>ROUSSEL</i> | <i>Anne-Marie</i> | <i>Biochimie</i> |
| <i>SEIGLE-MURANDI</i> | <i>Françoise</i> | <i>Botanique et Cryptogamie</i> |
| <i>STEIMAN</i> | <i>Régine</i> | <i>Biologie Cellulaire</i> |
| <i>WOUESSIDJEWÉ</i> | <i>Denis</i> | <i>Pharmacie Galénique</i> |



SOMMAIRE

INTRODUCTION

9

| | |
|---|----|
| 1. Du blé à la farine et de la farine au pain | 11 |
| 1.1. Historique | 12 |
| 1.2. Analyse des différents constituants du blé et de la farine. | |
| Contrôle qualité en minoterie. | 18 |
| 1.2.1. Le blé : nature, propriétés et teneurs | 18 |
| 1.2.1.1. Composition globale du grain | 20 |
| 1.2.1.2. Analyse détaillée des constituants du blé | 24 |
| 1.2.2. Fabrication de la farine | 35 |
| 1.2.2.1. Le nettoyage et le mouillage | 35 |
| 1.2.2.2. Le broyage | 36 |
| 1.2.2.3. Le tamisage | 37 |
| 1.2.2.4. Les diagrammes de mouture | 38 |
| 1.2.2.5. Les mélanges de farine | 40 |
| 1.2.3. Composition de la farine | 40 |
| 1.2.3.1. Caractérisations des farines | 40 |
| 1.2.3.2. Composition chimique | 41 |
| 1.2.3.3. Valeur nutritive | 42 |
| 1.2.4. Les contrôles sur les blés et les farines | 44 |
| 1.2.4.1. Contrôles sur les blés | 44 |
| 1.2.4.2. Contrôles sur la farine | 47 |
| 1.2.4.3. Contrôles toxicologiques particuliers : mycotoxines, pesticides, métaux lourds. | 50 |
| 1.3. Le pain | 57 |
| 1.3.1. La panification | 57 |
| 1.3.1.1. Les ingrédients | 57 |
| 1.3.1.2. La fabrication du pain : fabrication artisanale | 60 |
| 1.3.1.3. Le pain complet : différences de fabrication | 64 |
| 1.3.1.4. La fabrication industrielle du pain | 65 |
| 1.3.2. Valeur nutritionnelle du pain | 66 |

| | |
|---|---------|
| 2. Analyse des répercussions diététiques | 71 |
| 2.1. Les constituants importants | 72 |
| 2.1.1. Qualités nutritionnelles des amidons | 72 |
| 2.1.1.1. Le grain d'amidon | 72 |
| 2.1.1.2. La digestion et la réponse glycémique | 74 |
| 2.1.2. Les fibres alimentaires | 80 |
| 2.1.2.1. Définition | 80 |
| 2.1.2.2. Origine | 81 |
| 2.1.2.3. Propriétés physiques et chimiques | 83 |
| 2.1.2.4. Propriétés physiologiques | 85 |
| 2.1.3. Les vitamines | 98 |
| 2.1.3.1. La vitamine B1 ou thiamine | 98 |
| 2.1.3.2. La vitamine B2 ou riboflavine | 99 |
| 2.1.3.3. La vitamine PP ou niacine ou vitamine B3 | 100 |
| 2.1.3.4. La vitamine B6 ou pyridoxine | 100 |
| 2.2. Les besoins nutritionnels : ce que le pain peut nous apporter | 102 |
| 2.2.1. Équilibre alimentaire et évolution de la consommation du pain. | |
| Place dans la société. | 102 |
| 2.2.1.1. Évolution de la consommation et substitution | |
| du pain par d'autres glucides | 102 |
| 2.2.1.2. Le régime alimentaire « idéal » contient-il du pain ? | 108 |
| 2.2.2. Qualités nutritionnelles du pain et effets sur la santé | 110 |
| 2.2.2.1. Fibres et bilan minéral : | |
| action favorable ou défavorable ? | 110 |
| 2.2.2.2. Alimentation et cancer | 114 |
| 2.2.2.3. Les protéines végétales | 116 |
| 2.2.2.4. Le pain et le diabète | 118 |
| CONCLUSION | 120 |
| BIBLIOGRAPHIE | 124 |

INTRODUCTION

Le pain, depuis toujours, est symbole de vie et de bonheur, désir et espoir. Le pain, ce n'est pas un objet comme un autre, c'est l'aliment essentiel, le principe de vie. Le bon pain est un élément important de notre bonheur de vivre, un des acquis de notre civilisation. Chacun a quelque chose à en dire, un souvenir qui remonte, agréable.

Le pain, ce n'est pas seulement du pain, c'est le symbole de l'existence et du travail des hommes, de leur bonheur ou de leur désespoir. Le pain est espéré et appelé, vénéré et craint, objet de culte et d'attentions à nulles autres pareilles. Le pain incarne tout le cycle de la vie et des saisons.

Mais le pain est également pour moi symbole de travail physique et de nuits passées debout. Alors que dans toutes les autres familles le père est présent au repas du soir, avoir un père boulanger implique des sacrifices de tous les membres de la famille et tout le monde doit « mettre la main à la pâte ». Vivre au rythme de la fabrication du pain a également ses charmes : se réveiller en même temps que le pain est défourné, grâce à cette bonne odeur qui grimpe les étages, restera à jamais enfouis dans ma mémoire. Cette thèse est un hommage à mon père et mon grand-père, tous les deux artisans boulangers, amoureux du travail bien fait, dans le respect des traditions de fabrication et de leur clientèle.

En tant que pharmacien, maintenant, je sais combien une alimentation saine est importante, et grâce à une consommation régulière de pain nous pouvons entretenir notre santé. Ce message, j'espère le transmettre aux personnes qui m'entourent, mais j'espère aussi que ces connaissances seront utiles tout au long de ma carrière professionnelle.

Mais quelle est la place du pain dans notre société actuellement, comment est-il fabriqué, l'artisanat a-t-il résisté à notre monde moderne, quelle est la qualité nutritionnelle du pain que nous mangeons de nos jours, le pain peut-il être bénéfique sur notre santé ?

Nous nous intéresserons dans cette thèse à deux types de pain : le pain blanc et le pain complet. Nous aborderons successivement la fabrication de la farine et du pain ainsi que les contrôles de qualité effectués à chaque étape de transformation, puis nous nous intéresserons aux qualités nutritionnelles de ces deux types de pains. Enfin nous verrons, si d'un point de vue diététique, il est préférable de consommer du pain complet plutôt que du pain blanc.

PARTIE I

DU BLÉ À LA FARINE, ET DE LA FARINE AU PAIN

1.1. HISTORIQUE

(DUPAIGNE, 1979)

En France, le froment a été jusqu'à une date récente, une céréale minoritaire : c'est la Révolution Française qui a imposé l'idée du pain de blé, le même pain et le meilleur pour tous : aristocrates, bourgeois et ouvriers. Avant, les gens se nourrissaient d'orge, de millet, d'avoine, de sarrasin, de sorgho, de manioc, de seigle, et non de blé.

Pourtant le blé est connu depuis une dizaine de millénaires, grâce à la domestication des céréales sauvages qui eurent lieu dans les monts et piémonts du Croissant Fertile de l'Asie mineure. C'est là que se produisit cette « révolution néolithique », passage de l'appropriation des ressources spontanées à la production de ressources domestiquées, dont sont issues nos sociétés et civilisations. Nos variétés modernes de céréales constituent une descendance très transformée et améliorée par des sélections humaines, de ces céréales spontanées. Depuis leur foyer initial proche oriental, les céréales furent transportées vers l'Europe par deux voies : l'une danubienne, l'autre péri-méditerranéenne. Cette dernière voie les fit pénétrer en Afrique du Nord et, il existe en Éthiopie un refuge de formes domestiquées archaïques de certaines d'entre elles. Les céréales progressèrent aussi jusqu'en Chine. Elles suivirent les colonisations européennes et furent des outils de la conquête des espaces tempérés, notamment en Amérique du Nord et, dans l'hémisphère sud, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Le grand progrès fut celui de la domestication de la fermentation par la préparation contrôlée du levain et cela en Babylonie, puis dans l'ancienne Égypte. A Babylone, près de trois mille ans avant notre ère, on maîtrisait déjà la fermentation des bouillies de bière et, selon toute vraisemblance, on préparait aussi avec un levain domestiqué des galettes fermentées qui étaient du pain ou presque.

Mais qu'est-ce que le pain ? D'abord il n'y a pas de pain sans céréales ; ensuite il n'y a pas de pain bien levé sans céréales contenant suffisamment de gluten pour permettre une bonne tenue, une bonne élasticité de la pâte de farine et d'eau, pétrie, fermentée et cuite, qui constitue le pain au sens strict. Ainsi la maîtrise de la fermentation et la sélection de céréales de plus en plus panifiables (blé et seigle) permit l'affirmation du pain comme mode majeur de consommation de céréales.

En France le pain fut amené par les romains, qui eux même avaient appris sa fabrication lors de leurs conquêtes en Perse et en Grèce. Il resta longtemps de fabrication domestique, et ce n'est qu'au XI^{ème} siècle que les boulangers s'organisèrent en corporation à Paris. En 1372, sous Charles X, les boulangers ont le droit de fabriquer trois sortes de pains correspondant à des farines dont le taux de blutage était différent : pain blanc bourgeois, pain brun et pain noir de seigle. Le mot *boulangier* lui même est apparu à la fin du XII^{ème} siècle, du mot picard *boulenc*, « celui qui fait le pain en boule ». C'est également à cette époque, où le pouvoir féodal s'établit que le paysan doit porter son blé à moudre dans le moulin possédé par le seigneur et cuire son pain dans le four collectif « banal ».

Le four qui est le plus répandu dans les campagnes européennes est celui qui est inspiré du four de Pompéï, où la cloche en terre cuite, qui limite par trop la capacité d'enfournement, et qui est fragile, est remplacée par une voûte en pierre ou en briques posée sur une sole plate. Ces fours peuvent être de grandes dimensions et servir à tout le village, et sont très solides. Ils existent partout où les campagnes gardent l'habitude de faire leur pain une fois par semaine : en France et dans toute l'Europe, jusqu'à la Sardaigne et la Grèce, si bien qu'on pourrait affirmer qu'un pays ne fait partie de l'Europe que s'il cuit son pain dans un four romain. Il a gagné les fermes du Canada et des États-Unis. Ce four n'a qu'une ouverture, qui sert à la fois à charger le four en bûches de bois, à enlever les braises quand il est chaud, et à enfourner le pain. Les braises sont attirées vers l'extérieur avec une raclette ; souvent on les enlève du four, mais aussi, quelquefois, on peut les laisser à l'entrée du four. La fumée de combustion du bois, dans la phase de chauffage, s'échappe par la même ouverture : souvent donc, et aussi par crainte des incendies, le four est installé à l'extérieur de la maison. Ce four, défini comme *four à chauffage intermittent* (puisqu'on enlève les braises quand le four est assez chaud), *direct* (puisque les flammes agissent directement sur l'emplacement où seront placés les pains), cède ensuite sa place à un four plus perfectionné, qui présente l'énorme avantage qu'il n'y a plus à vider et nettoyer le four avant chaque enfournement. Pour ce *four à chauffage intermittent indirect*, le combustible est placé dans un foyer situé sous la sole, qui communique avec le four par une ouverture, le *gueulard*, munie chez les boulangers d'un dispositif permettant de diriger les flammes vers tel ou tel endroit du four.

C'est au XVIII^{ème} siècle que les pains, qui jusque là étaient restés de forme ronde, s'allongent et se diversifient ; et c'est à cette époque que le pain complet apparaît : « un pain dans la composition duquel entrent de la farine brute, du *rebulet* ou petit son ». Mais c'est le pain

blanc qui est alors recherché, un pain fabriqué à partir d'une farine débarrassée des enveloppes du grain de blé. Ce n'est que depuis les années 1970 que le pain complet redevient à la mode, et cela grâce au cancérologue anglais, le docteur Burkitt. Il prône en effet les bienfaits des fibres alimentaires.

Mais qu'en est-il de la qualité gustative et nutritionnelle du pain ? Au Moyen-Age, le pain consommé dans les campagnes était noir, mauvais au goût car contenant beaucoup trop de son, et en période de disettes, de l'argile ou de la paille sont ajoutés à la farine. Par contre dans les châteaux, le pain blanc existe déjà au début du XIV^{ème} siècle. Aux XII^{ème} et XIII^{ème} siècle, les pains sont plus ou moins blancs, mélangés ou non d'orge et de seigle, suivant la classe dans la société. Le pain brun va représenter du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle les 4/5^è de la production boulangère totale : le pain blanc est un luxe en ces périodes de disette, de rendements médiocres et d'inflation économique, et le peuple a faim. En effet au XVII^{ème} siècle, les dix setiers de méteil (moitié froment, moitié seigle) nécessaires à un manoeuvre parisien pour nourrir sa famille représente plus de la moitié de son salaire. De même en 1870, pendant le siège de Paris par les prussiens, le pain manque. Et à la fin du siècle, le pain *Ferry*, du nom du ministre, n'est plus qu'un mélange de blé, de riz et de paille. Non le pain bis mangé par le peuple français n'a jamais été d'un goût et d'une qualité remarquable, et il ne faut pas être nostalgique de ce pain là ! Par contre il est intéressant de constater, que chaque région avait au début du siècle sa particularité et sa spécialité boulangère : la Normandie a le *pain à soupe* (pain rond et circulaire très plat), la région lyonnaise a sa *couronne*, le Midi est célèbre pour sa *fougasse* et l'Alsace est particulièrement riche en types de pain.

Mais le XX^{ème} siècle a connu de grands changements dans la culture du blé et la panification. La boulangerie industrielle a des exigences techniques très précises ; la qualité de la farine doit être constante et seules quelques variétés de blé à hauts rendements sont cultivées actuellement. Ces variétés sont souvent fragiles et il faut utiliser plus de pesticides. Autrefois chaque variété était idéalement adaptée au sol et au climat. Elle avait inscrit dans ses gènes un certain nombre de caractères acquis, d'où sa résistance. La sélection des semences est récente et date de la fin du siècle dernier. L'objectif était d'augmenter les rendements et de sélectionner des semences bon marché. Ces dernières années les entreprises de semences, qui intéresse les grands trusts internationaux, ont breveté leurs graines et toute culture de semences personnelle est interdite.

Dans les boulangeries, la standardisation est également devenue un gage de bénéfices sûrs et faciles : fours automatiques, levures rapides, pétrins mécaniques ; on triture la pâte, on la force, on la maltraite, on la congèle et on la réchauffe. Alors le pain se venge, il est blanc, triste et sans matière, semblant n'être fait que d'eau et d'air. Trois heures après l'avoir acheté, il est rassis, et on n'a plus qu'à le jeter. De plus les pains régionaux sont en disparition, tués par le conformisme des gens et vaincus par la baguette parisienne, forte de son prestige de citadine.

Cultures intensives des blés, standardisation des farines, modes de fabrications industrielles du pain, de goût fade et de texture spongieuse ; n'y aurait-il plus de boulangers en France ?



Boulangerie de Pompeï : le four et les
moulins à bras

Enfournement du pain au
Moyen Age





Préparation des pâtons pour
faire les baguettes

Pains de campagne traditionnels



1.2. ANALYSE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS DE LA FARINE : CONTRÔLE QUALITÉ EN MINOTERIE.

1.2.1. Le blé : nature, propriétés et teneurs

(GUIGNARD, 1993) (GODON, 1991) (Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse)

Le blé appartient à la famille des Graminées, sous famille des poacées (l'épillet est articulé au dessus des glumes, et possède un nombre variable de fleurs), genre triticu (l'épillet est sessile en épis, il possède plusieurs fleurs par épillet, et les glumes sont larges et ventruées). L'espèce *Triticum vulgare* ou blé tendre est utilisée pour la fabrication du pain. Il existe de nombreuses variétés qui sont classées selon leurs exigences de développement : variété d'hiver ou de printemps, résistant au froid, aux maladies. Le blé dur (ou *Triticum durum*) est utilisé pour la fabrication des semoules et pâtes alimentaires. Ce sont les espèces les plus cultivées.

Dans les céréales, ce sont classiquement les grains que l'on utilise pour l'alimentation humaine et animale. Le reste de la plante est parfois valorisé en alimentation animale, soit à l'état sec sous forme de paille pour certaines céréales, soit à l'état frais ou en ensilage pour les autres.

Physiologiquement, le grain joue le rôle d'un fruit renfermant une graine : il doit donc protéger le germe pendant la période d'attente et nourrir la plantule pendant la germination. Ceci explique d'une part que les grains aient leur périphérie formée d'enveloppes sèches et dures, constituées essentiellement de cellulose, d'autre part que le cotylédon qui représente 82 à 85 % du grain, accumule toutes les substances nutritives nécessaires : glucides, protides, lipides, substances minérales, vitamines.

Pour permettre leur conservation correcte, les grains sont naturellement peu hydratés : leur teneur en eau varie avec le taux d'humidité de l'air. L'équilibre se situe entre 16 et 13 % selon la température et l'humidité ambiante. Les valeurs courantes sont aux environs de 14 % d'eau. Mais par séchage ou ventilation, cette teneur est ramenée vers les valeurs indiquées

précédemment. Cette siccité offre l'avantage de la facilité de transport, de conservation et de la possibilité de traitements par voie sèche.

Le grain de blé mesure environ 6 mm, sa couleur varie du jaune pâle au roux et sa forme est particulière :

- sa face dorsale est plus ou moins bombée,
- sa face ventrale comporte un sillon profond
- sa partie supérieure est recouverte de courts poils qui forment la brosse
- sa partie inférieure laisse apparaître sur sa face dorsale le germe.

Il est constitué de trois éléments principaux : les enveloppes (14 à 16 %), le germe (2,5 à 3 %) et l'amande farineuse (81 à 88 %).

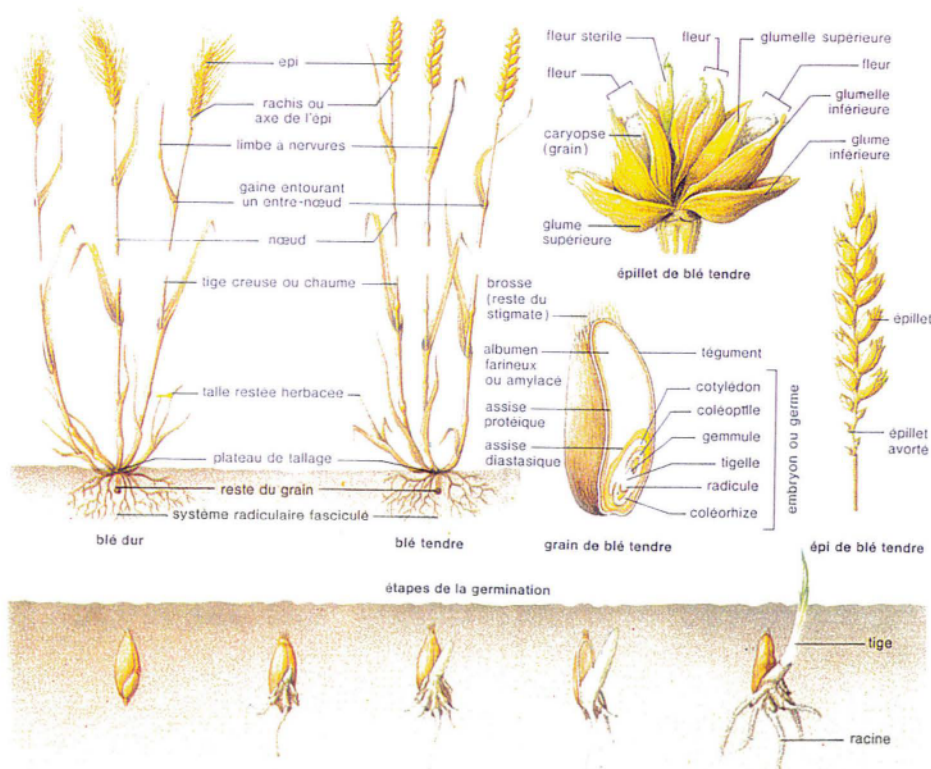


Schéma 1 : Blé dur et blé tendre : épi, épillet, grain, germination
(Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse)

1.2.1.1. Composition globale du grain

Dans le grain de toutes les céréales, le constituant nettement majoritaire est l'amidon qui constitue environ les trois quarts de la matière sèche. Cette proportion subit quelques variations suivant que la teneur en produits pariétaux est plus ou moins élevée. Les variations de cette dernière dépend de la présence ou non de glumelles attachées au grain et de l'état d'avancement de la sélection pour obtenir de gros grains dont la proportion d'enveloppes diminue. Ainsi les pourcentages de constituants pariétaux sont très variables d'une céréale à l'autre, allant de 5,7 % dans le cas du blé à 16,0 % dans celui de l'avoine.

La famille de constituants qui vient en deuxième position est celle des protéines dont la teneur dans le grain varie de 12 à 14 % de la matière sèche. La plus grande partie de celles-ci sont des constituants de réserve du grain hautement polymérisés dont le pourcentage par rapport aux protéines totales est de 80 % pour le blé. Ces protéines sont capables de s'associer en un réseau viscoélastique de gluten : leurs propriétés mécaniques et rhéologiques sont donc bien spécifiques.

Les lipides présentent une teneur encore plus faible qui représente un minimum : 2 %

Les grains contiennent de 2 à 3 % d'éléments minéraux parmi lesquels tous sont représentés, mais avec une prépondérance très nette de potassium, de phosphore, de soufre et de magnésium.

Diverses vitamines, surtout du groupe B (B1, B2, B6), sont présentes dans les grains mais à des concentrations beaucoup plus faibles que dans les organes végétatifs ou les fruits. Le germe présente une richesse plus élevée, surtout en vitamine E et B. Les grains ne peuvent pas constituer une source par leur extraction, même si, du point de vue nutritionnel, l'apport de vitamines par les céréales peut ne pas être négligeable du fait de la proportion de produits céréaliers dans l'alimentation.

| | Glucides (dont amidon) | Protéines | Lipides | Cellulose Hémicellulose Pentosanes | Minéraux |
|-----|---------------------------|--------------|-------------|--|---------------|
| BLÉ | 75,6 (+/- 5) | 14,5 (+/- 4) | 2,0 (+/- 1) | 5,7 (+/- 1) | 2,2 (+/- 0,3) |

Tableau 1 : Composition globale des grains de blé.

Valeur moyennes et écarts courants exprimés en pourcentage du grain sec.

(GODON, 1991)

Les diverses familles de constituants sont représentées dans toutes les parties du grain. Cependant, les composés pariétaux sont à peu près complètement absents de la partie la plus centrale de l'amande tandis que l'amidon fait défaut dans les tissus externes. Les autres constituants présentent des teneurs très variables selon la situation du tissu considéré.

La zone externe du grain constituée par les enveloppes (péricarpe et tégument séminal) est particulièrement riche en cellulose, hémicellulose et pentosanes ainsi qu'en éléments minéraux bien qu'en proportion plus faible. La partie externe de l'amande (ou albumen) formée essentiellement par l'assise protéique (ou aleurone) voit une accumulation de protéines, lipides, pentosanes, hémicellulose et minéraux par rapport à l'ensemble du grain. Mais la proportion relativement faible de cette partie du grain (seulement 8 %) limite les quantités ainsi accumulées. Il en va de même pour le germe, partie du grain nettement la plus riche en lipides et en protéines, mais qui ne constitue que 3 % du grain de blé. La zone interne de l'amande, constituée par l'endosperme, qui constitue 82 à 84 % du grain, est particulièrement riche en glucides surtout sous forme polymérisée, l'amidon. La teneur en protéines y est de 2 à 3 fois plus faible que dans l'assise protéique mais la proportion importante que représente cette partie dans le grain, entraîne une accumulation pondéralement majoritaire à ce niveau.

Pour résumer :

| Parties du grain (% de la masse du grain) | Glucides (dont amidon) | Protéines | Lipides | Cellulose Hémicellulose Pentosanes | Minéraux |
|---|------------------------|------------|-------------|--|---------------|
| Péricarpe (4) | 16 (+/- 2) | 12 (+/- 2) | 1 (+/- 0,2) | 67 (+/- 7) | 4 (+/- 1) |
| Tégument séminal (1) | 10 (+/- 1) | 16 (+/- 3) | 4 (+/- 1) | 58 (+/- 5) | 12 (+/- 3) |
| Assise protéique (8) | 12 (+/- 2) | 32 (+/- 3) | 8 (+/- 1) | 38 (+/- 3) | 10 (+/- 5) |
| Germe (3) | 20 (+/- 1,5) | 38 (+/- 2) | 15 (+/- 2) | 22 (+/- 2) | 5 (+/- 1) |
| Amande (84) | 85 (+/- 10) | 11 (+/- 3) | 2 (+/- 0,1) | 1,5 (+/- 1,5) | 0,5 (+/- 0,2) |

Tableau 2 : Composition chimique des différentes parties d'un grain de blé :
valeurs moyennes et écarts courants exprimés en pourcentage de la matière sèche de la partie considérée.

(GODON, 1991)

Le tableau suivant montre que l'on peut isoler 97 % de l'amidon, 68 % des protéines et 59 % des lipides du grain en séparant l'amande des autres parties, alors que 82 % des constituants pariétaux se trouvent dans les tissus plus périphériques dont seulement 35 % dans la partie protectrice formée par le péricarpe. Nous voyons donc qu'une séparation mécanique des parties internes et périphériques des grains peut servir à éliminer les constituants cellulosiques mais ne peut être utilisée pour un fractionnement poussé des constituants majeurs.

| Parties de grain | Glucides (dont amidon) | Protéines | Lipides | Cellulose Hémicellulose Pentosanes | Minéraux |
|---------------------|---------------------------|-----------|---------|--|----------|
| Péricarpe | 0,8 | 3,7 | 1,4 | 35,0 | 9,7 |
| Tégument séminal | 0,2 | 1,5 | 1,4 | 7,8 | 7,3 |
| Assise protéique | 1,4 | 18,5 | 22,4 | 38,9 | 48,4 |
| Germe | 0,7 | 8,3 | 15,8 | 2,0 | 9,1 |
| Amande | 96,9 | 68 | 59,0 | 16,3 | 25,5 |
| | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

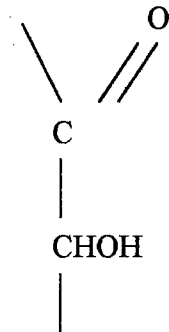
Tableau 3 : Répartition des constituants dans les différentes parties d'un grain de blé :
valeurs de chacun des constituants exprimés en pourcentage de la matière sèche totale de ce
constituant dans le grain.

(GODON, 1991)

1.2.1.2. Analyse détaillée des constituants du blé

LES GLUCIDES

Les glucides ou sucres, sont des composés constitués d'oxygène (O) de carbone (C) et d'hydrogène (H) renfermant le groupement « OSE » représenté ci-après :



Dans les grains de céréales, ce sont de hauts polymères d'oses que l'on trouve. Parmi ceux-ci il y a l'amidon, et les constituants pariétaux : cellulose et hémicellulose. Les oses constitutifs de ces polymères sont, en majorité, des oses à six atomes de carbone appelés hexoses. Le plus répandu de cette classe est le glucose.

Cependant, dans les hémicelluloses, se trouvent aussi des oses à cinq atomes de carbones, appelés pentoses, tels que l'arabinose ou le xylose.

L'amidon est une forme de réserve des sucres, spécifique du règne végétal. On le trouve dans les grains où il est le constituant majeur. Des substances non glucidiques se trouvent présentes dans les amidons, quel que soit le degré de purification. Ce sont essentiellement des lipides (0,50 % de la matière sèche) auxquelles s'ajoutent des protéines (0,20 %) et des matières minérales (0,20 %).

| | Amidon pur | Matières minérales | Lipides | Protides |
|---------------|------------|--------------------|---------|----------|
| Amidon de blé | 98,9 | 0,3 | 0,6 | 0,2 |

Tableau 4 : Composition en % de matière sèche
(GODON, 1991)

L'amidon pur est constitué de chaînes polymérisées de glucose : les unités d-glucopyranoses sont reliées principalement par des liaisons α -(1,4) selon des chaînes linéaires. De plus il existe environ 5 % de ramifications en α -(1,6) placées de la façon suivante :

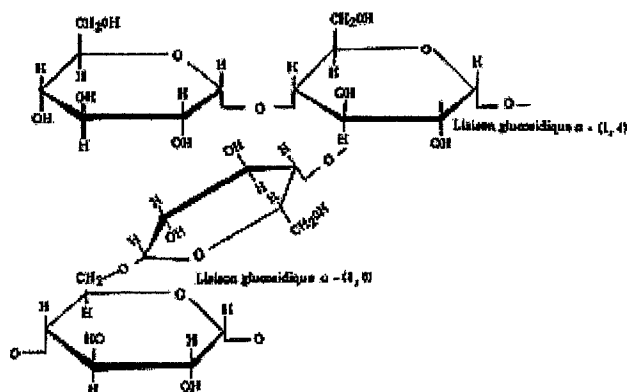


Schéma 2 : Formule développée d'une ramification d'amylopectine

Ainsi les chaînes de glucose peuvent être de deux types :

- les unes sont de longues chaînes flexibles uniquement linéaires. Elles sont constituées de plusieurs milliers de d-glucose liés en α -(1,4). Elles forment ce que l'on appelle couramment l'amylose qui représente 18 à 30 % des amidons. Les représentations de ces chaînes montrent qu'une des extrémités est formée par un ose portant un groupement réducteur libre alors que l'autre extrémité est une unité sans groupe réducteur.
- Les autres chaînes sont ramifiées. Elles sont aussi beaucoup plus importantes puisqu'elles peuvent rassembler jusqu'à 100 000 unités glucose. On appelle ces ensembles l'amylopectine qui représente 70 à 80 % de l'amidon. L'amylopectine est composée d'une multitude de ramifications de 20 à 40 unités glucose liées en α -(1,4), greffées sur une chaîne plus longue par des liaisons α -(1,6) pour former une sorte d'arborescence.



Schéma 3 : Amylopectine en arborescence

LES CONSTITUANTS PARIÉTAUX

Ils sont concentrés dans les parties périphériques des grains, se retrouvent surtout dans les issues de mouture, cependant, certains d'entre eux existent dans les parois de toutes les cellules de l'amande et sont donc présents dans la farine.

Le son contient en moyenne 20 % de cellulose, 35 % d'hémicellulose et 5 % de lignine. Les deux premiers sont des polymères glucidiques.

La cellulose constitue l'élément majoritaire de la paroi cellulaire. C'est un polymère glucidique de haut poids moléculaire, constitué en moyenne de 3 000 unités glucose, liées en β -(1,4). L'existence de liaisons β -(1,4) confère à cette structure une forme linéaire, permettant la formation de liaisons hydrogène entre les unités osidiques de la chaîne et entre celles de chaînes voisines, donnant ainsi une structure cristalline.

De part sa constitution et sa structure physique, la cellulose possède certaines propriétés physico-chimiques, telles que la capacité de rétention d'eau ou de gonflement.

La cellulose ainsi que les autres constituants (hémicellulose, lignine) ne sont pas attaqués par les enzymes endogènes de l'intestin des espèces animales supérieures. Cependant, ils sont dégradés par les enzymes de la flore intestinale des herbivores, des omnivores et de l'homme.

Les hémicelluloses peuvent être définies comme un ensemble complexe de polysides de natures très variées. Ce sont des homopolysaccharides ou des hétéropolysaccharides. La classification des hémicelluloses est basée sur la nature du monomère dominant. Le squelette central est généralement constitué d'un polymère de xylose ou de glucose liés en β -(1,4). Il porte des ramifications mono ou polysidiques d'arabinose, de mannose, de galactose ou d'acide galacturonique et glucuronique.

Les hémicelluloses de degré de polymérisation moyen (150 à 200 unités) se présentent sous la forme d'une hélice, cette structure leur conférant une certaine flexibilité. Elles ont un fort pouvoir de rétention d'eau. Celles qui contiennent des groupements acides ont un pouvoir

d'échange d'ions. Elles sont généralement plus digestibles que la cellulose. Leur digestibilité est en moyenne chez l'homme de 60 % contre 30 % pour la cellulose.

Les pectines sont localisées au niveau de la paroi et forment ainsi un ciment intercellulaire. En quantité moindre que les autres substances polysaccharidiques non amylacées, les pectines sont cependant présents dans toutes les cellules végétales.

Leur squelette principal est formé par l'enchaînement de motifs monomères d'acide galacturonique, liés en $\alpha(1-4)$, interrompu par des unités rhamnose qui forment des coudes pectiques. Ceux-ci sont à l'origine de la structure non linéaire des pectines. Des chaînes latérales constituées d'arabinoses, de glucanes et de galactanes sont liées en $\beta(1-3)$ aux extrémités d'acide α -D-galacturonique de la chaîne de rhamnogalacturonanes.

Les caractéristiques physico-chimiques des pectines semblent expliquer certaines de leurs propriétés physiologiques. Outre leur capacité à former des gels, elles ont également un fort pouvoir d'échange d'ions.

Les lignines ne sont pas de nature glucidique, mais sont très hétérogènes. C'est le composé le plus abondant, après la cellulose, au niveau de certaines parois végétales. Elles se présentent sous forme de polymères de phényl-propane, liés par des liaisons carbone-carbone. La lignification est limitée à des cellules spécialisées ; elle accroît leur résistance mécanique et ralentit leur perméabilité à l'eau. Ce processus les protège également contre d'éventuelles dégradations microbiennes.

LES PROTIDES

Les protides sont constitués par l'ensemble des composés biochimiques azotés que sont les acides aminés et leur association sous forme des chaînes peptidiques ou protéiques.

Dans les grains de céréales, les protides sont représentés essentiellement par des protéines. Leur teneur est relativement faible puisqu'elle varie de 8 à 18 % de la matière sèche, avec une

valeur courante voisine de 14 % en France. Ces protéines sont classées selon OSBORNE (1907) d'après leur solubilité en : (OSBORNE, 1907)

- albumines (2 à 10 % des protéines totales) solubles dans l'eau,
- globulines (5 à 20 %) solubles dans les solutions salines,
- prolamines (40 à 50 %) solubles dans les solutions alcooliques,
- gluténines (30 à 45 %) solubles dans les solutions diluées d'acides ou dans des solvants organiques (détergents).

Les prolamines portent des noms différents selon l'espèce végétale (gliadines du blé, zeines du maïs, hordeines de l'orge). Celles du blé sont subdivisées en quatre groupes suivant leur mobilité électrophorétique à pH acide : α , β , γ et ω .

Mais pour tenir compte des propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des prolamines FIELD, SHEWRY et MIFLIN ont proposé une autre classification : (FIELD, 1983)

- en protéines de réserve : prolamines
 - de haut poids moléculaire : supérieur à 90 000 daltons (D)
 - riches en soufre : α , β , prolamines et sous unités de 35 000 à 40 000 D,
 - pauvres en soufre : ω prolamines ;
- en protéines de structure ou ayant une activité biologique : gluténines.

Les albumines et les globulines que l'on appelle classiquement les « protéines solubles » sont constituées par un nombre important de protéines différentes possédant, en général, des activités biologiques telles que les activités enzymatiques (ou inhibitrices) mais elles ont peu d'intérêt technologique.

Les albumines possèdent un poids moléculaire moyen de 16 000 daltons avec des variations de 10 000 à 30 000. Certaines de leurs macromolécules peuvent s'associer en complexe plus important. Elles se distinguent des protéines de réserve ou de structure par leur relative richesse en acides aminés basiques (surtout lysine et arginine), et leur moindre teneur en acide glutamique et en proline.

Les globulines ont été moins étudiées à cause de leur intérêt restreint : leur masse moléculaire moyenne se situe aux environs de 100 000 daltons avec des constituants de masse supérieure à 200 000. De composition proche de celle des albumines, les globulines sont encore plus riches que celles-ci en lysine et arginine mais plus pauvre en tryptophane et acides aminés amidés.

Les prolamines sont des protéines assez particulières puisqu'elles sont solubles en milieu alcoolique, ce qui est rare pour cette famille de substance. Elles forment un ensemble de constituants que l'on peut séparer par électrophorèse en gel d'amidon ou de polyacrylamide : c'est-à-dire par migration au travers de ces gels sous l'action d'un champ électrique, dans une solution à pH acide. La mobilité d'un constituant est proportionnelle à sa charge, mais inversement proportionnelle à sa taille. AUTRAN et BOURDET ont ainsi observé la présence de 17 à 25 constituants par variété de blé. Ceci leur a permis de proposer une méthode d'identification de la variété d'un blé d'après son diagramme électrophorétique. Cette méthode est utilisée officiellement en cas de litige. (AUTRAN, 1975)

Nous avons vu que les différences de migration électrophorétique permettent de répartir les gliadines du blé en quatre familles :

- α gliadines : de masse moléculaire variant de 27 à 38 000 daltons
- β gliadines : de masse moléculaire variant de 27 à 41 000 daltons
- γ gliadines : de masse moléculaire de 18 000 daltons
- ω gliadines de masse moléculaire variant de 65 000 à 75 000 daltons

Toutes les gliadines sont caractérisées par une faible teneur en acides aminés basiques et une grande richesse en proline et en acide glutamique sous la forme de glutamine.

Les gluténines forment le dernier groupe des protéines du grain. Elles sont composées de 15 sous-unités liées entre elles par des ponts disulfures et de poids moléculaire variant de 11 600 à 133 000 daltons. Globalement, les gluténines ont une teneur en lysine, glycine, alanine, sérine et tyrosine fortement supérieure à celle des gliadines tandis que leur teneur en acide glutamique, proline et cystéine est inférieure.

Il faut distinguer trois types de gluténines :

- Masse moléculaire supérieure à 200 000 : composition type albumine et globuline.
- Masse moléculaire comprise entre 100 000 et 200 000 : formées essentiellement de sous-unités de haut poids moléculaire avec une composition caractéristique contenant beaucoup de d'acides glutamiques, de glycine et peu d'acides aminés basiques.

- Masse moléculaire comprise entre 35 000 et 50 000 : composition voisine de celle des gliadines avec une faible proportion de glycine. Elles diffèrent par leur richesse plus forte en sérine et plus faible en cystéine.

Des petites protéines spécifiques ont été mises en évidence par divers auteurs :

- La purothionine : poids moléculaire de 5 200 daltons, riche en soufre, lysine, arginine, cystéine et dépourvue de tryptophane. Elle pourrait avoir des fonctions bactériostatiques ou bactéricides (FERNANDEZ DE CAYELA, 1972).
- La ligoline : poids moléculaire de 9 000 D, riche en cystéine et possédant une grande affinité pour les triglycérides (FRAZIER, 1981).
- La protéine S : poids moléculaire de 16 500 D avec une forte teneur en acides aminés basiques. Elle se montre fortement liée aux lipides. Elle serait d'origine membranaire. (ZAWISTOWSKA, 1985).

Les travaux de LEROUX confirment bien l'origine membranaire de certaines au moins de ces protéines spécifiques. De plus, ces résultats montrent que dans la pâte, ce sont les seules protéines qui s'associent aux lipides et servent ainsi d'intermédiaire entre eux et les protéines de réserves. Ces protéines de bas poids moléculaire peuvent former des édifices macromoléculaires avec les lipides. (LEROUX, 1987)

Le gluten est extrait de la pâte de farine de blé par lixiviation sous un filet d'eau. C'est une masse grise, viscoélastique. Sa matière sèche est composée de 75 à 80 % de protéines, 5 à 10 % d'amidon résiduel dont la teneur varie avec les conditions de lavage, 1 à 2 % de sucres réducteurs, 2 % de cellulose et 1 % de matières minérales. A l'état humide, il contient 66 à 67 % d'eau, c'est à dire à peu près deux parties d'eau pour une partie de substances sèches. Les divers constituants sont liés entre eux pour donner un réseau très serré et tenace, mais possédant aussi une grande élasticité. Ces propriétés rhéologiques sont conditionnées de façon importante par la teneur en eau, la durée du temps de repos, la température. Les lipides possèdent un rôle fonctionnel en s'associant aux protéines.

Les constituants protéiques majeurs du gluten sont les gliadines et les gluténines à parts à peu près égales. Des faibles proportions d'albumines et de globulines sont présentes.

Les propriétés chimiques, rhéologiques et fonctionnelles de ce complexe sont la résultante des propriétés de ses constituants et des interactions apparues entre eux. Les gluténines semblent jouer un rôle essentiel dans la structure du gluten à cause de leurs propriétés agrégatives. En effet, la macromolécule de gluténine développe une grande surface sur laquelle de nombreuses liaisons non covalentes peuvent apparaître avec des gliadines ou d'autres gluténines. On observe facilement que les gliadines seules, relativement peu associées, forment un ensemble extensible alors que les gluténines, beaucoup plus fortement agrégées, sont plus tenaces.

Il existe six types de protéines dans le gluten : (BIETZ 1980)

- les gluténines de hauts poids moléculaires (sous unités de 80 000 à 130 000 D) ont pour origine probable le réticulum endoplasmique,
- Les gluténines agrégantes (sous unités de 20 000 à 70 000 D) ont une composition en acides aminés comparable à celles des albumines et globulines, elles seraient d'origine membranaire,
- Les gliadines de hauts poids moléculaires (sous unités de 44 000 à 36 000 D) ayant pour origine les corpuscules protéiques, ont une composition voisine des gliadines mais une capacité à former des ponts disulfures comme les gluténines,
- Les gliadines de faibles poids moléculaires (α , β et γ), synthétisées dans les ribosomes du réticulum endoplasmique, s'accumulent dans les corpuscules protéiques et s'agrègent facilement,
- Les ω -gliadines de poids moléculaire plus élevé ne renferment pas de cystéines,
- Les albumines et globulines.

L'association entre gluténines de hauts poids moléculaires et gliadines de hauts poids moléculaires se ferait par des ponts disulfures. Cet ensemble peut s'associer avec des gluténines agrégantes par des liaisons non covalentes et avec des gliadines par les mêmes liaisons et des ponts disulfures par un mécanisme d'échange de sulfhydriles.

Dès l'hydratation de la pâte, il se forme des fibrilles possédant des propriétés proches de celle du gluten. Au cours du pétrissage, il se formerait un enchevêtrement de fibrilles avec l'établissement de liaisons diverses selon la nature de ces fibrilles : après une déformation importante, les liaisons covalentes rétabliraient la structure (élasticité) alors que les liaisons non

covalentes permettent de petits déplacements des fibrilles entre elles (viscosité). Ce schéma est encore bien imparfait et d'autres éléments doivent intervenir.

Les lipides se trouvent dans le gluten sous forme de vésicules de diamètre inférieur à 300 nm insérés dans le réseau protéique. Par simple effet stérique, ces vésicules modifieraient l'agrégation des gliadines et des gluténines au cours des traitements technologiques. Le gluten serait alors une microémulsion stabilisée par réseau protéique. (MARION 1987)

LES LIPIDES

Parmi les lipides qui représentent en moyenne 2 à 3 % du grain sec des céréales, certains sont libres, mais la majorité est associée aux protéines et à l'amylose. Ces derniers influencent les propriétés physiques des constituants auxquels ils sont associés et leurs caractéristiques structurales varient en conséquence.

Les chimistes céréaliers ont plutôt l'habitude de classer les lipides des céréales d'après leur différence d'extractibilité. Ainsi les lipides extraits par des solvants apolaires anhydres (pentane, hexane, benzène, chloroforme) sont appelés « libres ». Ils représentent 1 à 2,6 % de la matière sèche. Les lipides « liés » peuvent alors être extraits par des solvants à constante diélectrique plus élevée (éthanol, méthanol, butanol saturé d'eau...). Ils constituent 0,45 % de l'ensemble des lipides, en moyenne. Ce chiffre peut être entaché d'erreurs, car il est exclu d'en récupérer la totalité sans détruire par hydrolyse les constituants glucidiques et protidiques. Les lipides libres et liés sont constitués respectivement de 70 % et 30 % de lipides non polaires et inversement de 30 % à 70 % de lipides polaires. Ainsi, la fraction libre contient environ 82 % de l'ensemble des lipides non polaires et 45 % des lipides polaires de la farine. Les variétés de blé de mauvaise valeur boulangère renferment systématiquement environ 0,20 % de moins de lipides polaires que les bonnes variétés : plusieurs auteurs pensent qu'il y a une relation directe.

Les lipides contiennent majoritairement des acides gras à 16 et 18 carbones, saturés et insaturés :

- C 16 : 0 acide palmitique
- C 18 : 0 acide stéarique

- C 18 : 1 acide oléique
- C 18 : 2 acide linoléique
- C 18 : 3 acide linoléique

(le chiffre après les deux points indique le nombre de doubles liaisons)

Les lipides des céréales sont constitués de glycérides (esters du glycérol, mono, di- et surtout trisubstitués par des acides gras), de phospholipides et de glycolipides. Parmi les phospholipides se trouvent surtout de la phosphatidylcholine, accompagnée d'un peu de lysophosphatidylcholine et lysophosphatidyléthanolamine, et en quantité presque aussi importante de la phosphatidyléthanolamine surtout sous la forme de ses dérivés N-acylés. Cette proportion assez exceptionnelle dans le monde vivant de cette dernière forme a fait penser pendant longtemps que sa présence était un artefact d'extraction. Ces constituants ont été peu étudiés alors qu'en fait ils doivent avoir de grandes influences sur les propriétés des ensembles auxquels ils se trouvent associés.

Les glycolipides sont constitués essentiellement de digalactosyl diglycérides accompagnés de monogalactosyl mono ou diglycéride dont certains sont sous des formes N-acylés et d'un peu de mono ou diglycosides.

1.2.2. Fabrication de la farine

La farine est le produit de transformation le plus usuel du blé. Elle est le résultat de la mouture de l'amande du grain de blé nettoyé et purifié. Je décris dans cette partie la transformation du blé en farine, telle que j'ai pu l'observer en visitant un moulin (Moulin du Bion, MAUBEC).

La mouture est réalisée par voie sèche, c'est-à-dire a une hydratation limitée des grains (entre 16 et 18 % selon leur dureté). Les céréales doivent être propres et convenablement hydratées pour donner un rendement maximal en farine. Comme, bien souvent, elles contiennent diverses impuretés, il va être nécessaire d'effectuer un nettoyage préalable comprenant plusieurs traitements pour éliminer les impuretés de nature différente. La transformation du blé en farine comprend plusieurs étapes distinctes et successives : le nettoyage et le mouillage, le broyage, le tamisage et le stockage en sacs ou en silos.

1.2.2.1. Le nettoyage et le mouillage

La première phase est constituée par le nettoyage à sec. Par passage sur plusieurs grilles, fixes, oscillantes ou vibrantes, dont les ouvertures ont des dimensions différentes, sont successivement éliminés du lot de grains, les pierres, les mottes de terre, les ficelles, les gros morceaux métalliques, les fragments d'animaux ou les petits animaux entiers, certaines graines étrangères dont les dimensions sont différentes de celles des grains. Ce nettoyage est souvent effectué, au moins partiellement, par les organismes stockeurs qui livrent des blés relativement propres.

L'aspiration à la surface du lot de grain en mouvement par un courant d'air ascendant, permet de retirer les impuretés légères : poussières, petites graines, grains cassés et échaudés. Le

passage sous un fort aimant permet de s'assurer qu'il ne reste aucun débris métalliques dont la présence endommagerait fortement les cylindres du moulin.

La seconde phase est la préparation ou le mouillage du blé. Pour cela, il convient d'apporter la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau souhaitée, de brasser énergiquement le blé et de le laisser au repos le temps voulu pour la migration correcte de l'eau à l'intérieur des grains. Le comportement du blé lors de la mouture dépend beaucoup du taux d'hydratation. Le choix de la teneur en eau est fonction de la dureté des grains : les valeurs classiques sont de 16,5 % pour des grains farineux et de 17,5 % ou plus pour des grains vitreux. Les durées de repos sont de 24 à 48 heures selon la dureté. Dans le cas de grains très compacts, il est préférable d'apporter, dans un premier temps, une quantité d'eau un peu plus faible qu'il ne faudrait, et, après un repos de 48 heures, de compléter 2 à 3 heures avant la mouture. Ainsi les parties périphériques des grains sont plus humides et se détachent mieux sous la forme de plaquettes.

1.2.2.2. Le broyage

C'est une opération qui est destinée à réduire les dimensions des grains par la mise en jeu d'énergie mécanique. Les fragments obtenus vont de 0,4 à 6,34 mm.

Le choix d'un appareil de broyage dépend de deux facteurs principaux : le degré de réduction désiré, et la dureté et la friabilité des grains.

L'emploi des appareils à cylindres est généralisé dans les moulins parce qu'ils sont particulièrement intéressants pour réduire les matériaux friables comme les grains. La réduction se fait par compression entre deux cylindres métalliques cannelés ou lisses, tournant en sens inverse à des vitesses égales ou différentes. Historiquement les cylindres métalliques ont été précédés par des cylindres en pierre. A l'action de compression est associée celle de frottement lorsque les cylindres sont lisses (d'où échauffement) ou d'incision avec des cylindres cannelés ou dentelés.

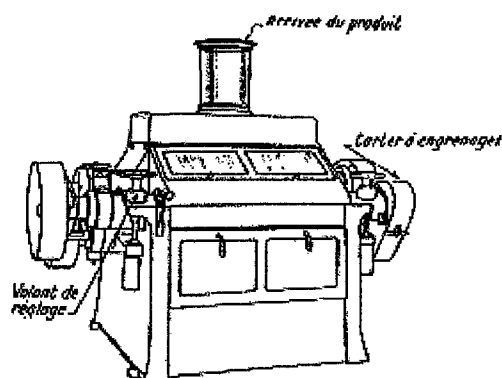


Schéma 4 : Machine à cylindre
(CALVEL 1952)

1.2.2.3. Le tamisage

Après les opérations précédentes, toutes les parties des grains restent en mélange. Il convient donc de les séparer par tamisage suivant leur granulométrie. La séparation selon la granulométrie s'appelle le blutage.

Ce traitement consiste à séparer les particules de tailles différentes grâce à des tamis (tissu de soie, de Nylon, dont les fils sont répartis de façon très régulière pour former des mailles de surface rigoureusement contrôlées). Les particules dont la taille est inférieure à la grosseur des mailles passent au travers tandis que les autres sont retenues et forment ce que l'on appelle « le refus ».

Divers appareils ont été réalisés pour effectuer ce blutage de façon continue. Dans les moulins, des plansichters cubiques ayant des côtés de l'ordre du mètre contiennent une série de 20 à 30 tamis horizontaux. Suspendus à l'aide de joncs, ils sont agités par un moteur électrique. Le rendement de tamisage d'un plansichter dépend beaucoup du taux de remplissage de ses tamis.

Le débit d'alimentation doit donc être bien réglé et les tamis ne doivent jamais être obstrués. Pour éviter l'obstruction, des petites masses plates ou sphériques sont placées sur les tamis. Par mouvement d'agitation, elles se déplacent à leur surface en les faisant vibrer. Elles entraînent alors les particules trop grosses qui auraient tendance à obstruer les mailles.

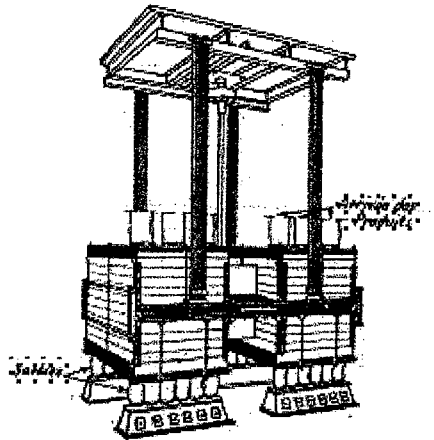


Schéma 5 : Plansichter
(CALVEL 1952)

1.2.2.4. Les diagrammes de mouture

Chaque opération de broyage est suivie d'un tamisage de façon à récupérer les particules suffisamment réduites en farine, des autres particules plus grosses qui sont soumises à un autre broyage pour réduire leur taille. Les particules plus grosses que celles de la farine, sont réparties en fonction de leur granulométrie croissante, en finots, semoules et gruaux. Les semoules sont rebroyées sur des cylindres lisses en une opération appelée claquage et donnent des gruaux. Ceux-ci réunis avec les finots sont de nouveau broyés sur des cylindres lisses au

cours de convertissage. Les refus de tamisage sont les gros sons, les fins sons, les rémouages bis et les rémouages blancs selon leur teneur décroissante en cellulose.

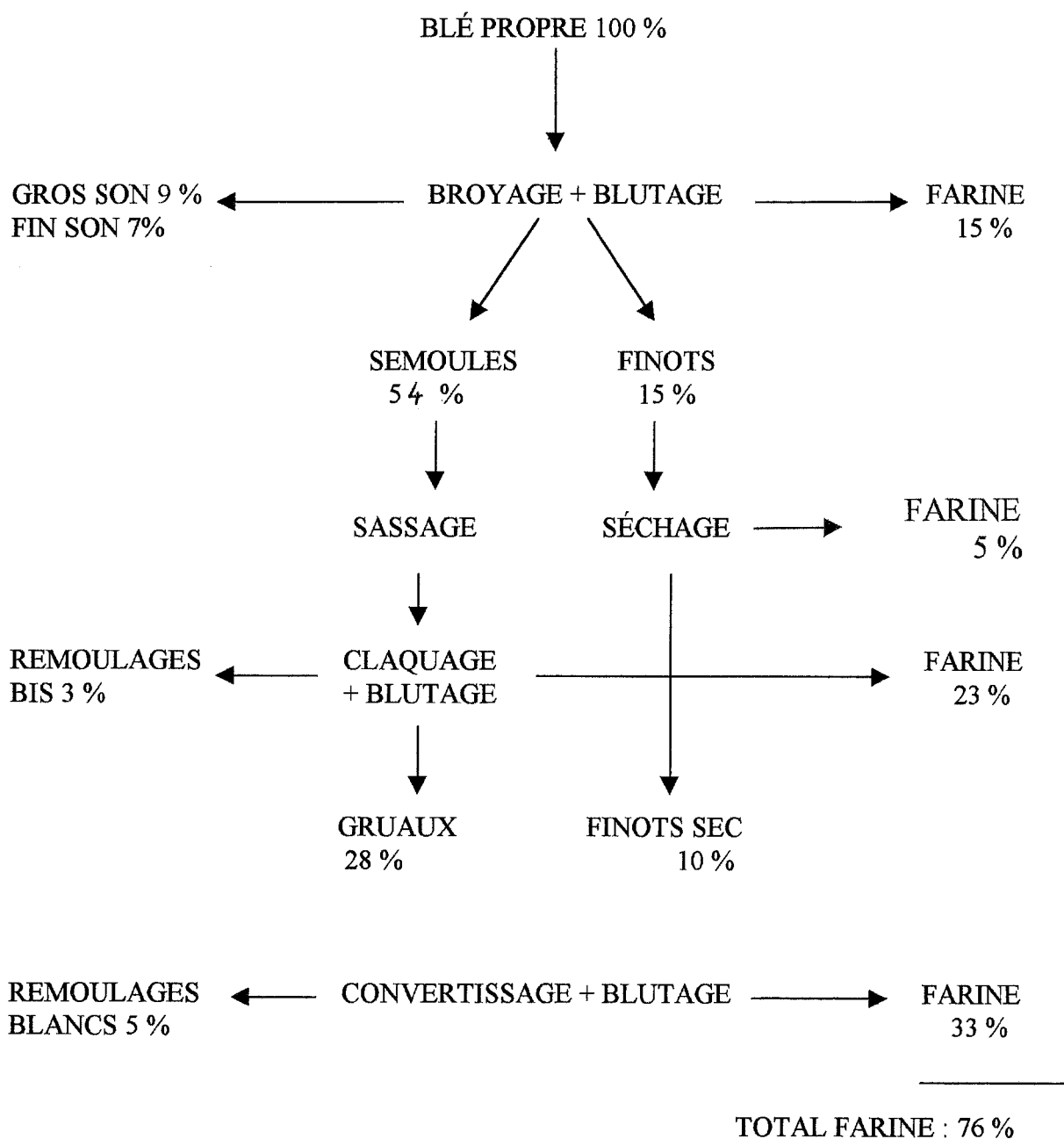


Schéma 6 : Diagramme de mouture
(CALVEL, 1952)

1.2.2.5. Les mélanges de farines

Les moulins ont à leur disposition différents types de blés. La mouture du blé fournit d'une part les issues ou sons et d'autre part des fractions de farine, produits intermédiaires différenciés, qui pourront être mélangés pour la production de farines alimentaires (avec ou non l'incorporation d'additifs achetés à l'extérieur). Ainsi, la formulation de chaque farine fait appel à des quantités précises des différentes fractions et d'additifs.

1.2.3. Composition de la farine

1.2.3.1. Caractérisation des farines

(LEDERER; 1995)

Les farines se définissent par leur taux de cendres ou leur taux d'extraction.

Le taux de cendre est exprimé en fonction du poids de cendre contenu dans 100 grammes de matière sèche. Ceci sert à désigner les grands types de farine. Les cendres sont les matières minérales principalement contenues dans le son. Plus la farine est blanche, faite essentiellement avec l'amande du grain, plus le taux sera faible.

Le taux d'extraction est le poids de farine que l'on tire de 100 kg de blé. Avec 100 kg de blé la quantité moyenne de farine recherchée, le plus souvent est de 75 kg. Il y a 2 % de perte, les 23 kg restants forment les issues. Le taux d'extraction est alors de 75%.

| Types de farines | Cendres (% ramené à la matière sèche) | Humidité maximale (%) | Taux moyen d'extraction |
|------------------|---|--------------------------|----------------------------|
| 45 | < 0,50 | 15,5 | 68 |
| 55 | De 0,50 à 0,60 | 15,5 | 74 |
| 65 | De 0,62 à 0,75 | 15,5 | 78 |
| 80 | De 0,75 à 0 90 | 15,5 | 80 à 85 |
| 110 | De 1,00 à 1,20 | 15,5 | 85 à 90 |
| 150 | > 1,40 | 15,5 | 90 à 98 |

Tableau 5 : Classification des farines par type
(DEHOVE,1996, étude 431))

1.2.3.2. Composition chimique

On retrouve dans la composition de la farine les constituants du blé : glucides, lipides, protéines et enzymes.

Quantitativement, l'amidon est l'élément le plus important (55 à 72 %). L'amylose représente 17 à 25 % de l'amidon, et l'amylopectine, 70 à 80%.

Les protéines représentent 9 à 15 % du poids de la farine et sont classées en albumines, globulines, gliadines et gluténines.

Les lipides représentent seulement 1 à 2 % de la farine. Ils jouent un rôle important dans la cohésion et les propriétés du gluten.

1.2.3.3. Valeur nutritive

(VEYER, 1987)

Étant donné la structure du grain et la composition de ses différentes parties, la valeur nutritive de la farine est fortement influencée par le taux d'extraction.

| Types de farine | 70 à 75 % d'extraction | 98 % d'extraction |
|---|---------------------------|----------------------|
| Composition | | |
| Valeur calorique (pour 100g) | 353kcal 1477kJ | 340kcal 1423kJ |
| <u>En g/100g de produit</u> | | |
| Eau | 12 | 12 |
| Protides | 9,5 | 10,5 |
| Lipides | 1,2 | 1,5 |
| Glucides | 75 | 71 |
| Fibres | 0,3 | 2,1 |
| <u>Éléments minéraux</u> <u>en mg/100g</u> | | |
| Soufre | 60 | 180 |
| Phosphore | 120 | 300 |
| Chlore | 15 | 50 |
| Sodium | 3 | 10 |
| Potassium | 135 | 450 |
| Magnésium | 20 | 140 |
| Calcium | 16 | 40 |
| Fer | 1,2 | 4 |
| Zinc | 1,7 | 5,5 |
| Cuivre | 0,2 | 0,7 |

| | | |
|---|-------|---------|
| Manganèse | 0,9 | 3 |
| Iode | 0,001 | 0,003 |
| | ————— | ————— |
| TOTAL | 373 | 1183 |
| <u>Vitamines en</u> <u>mg/100g</u> | | |
| Ac ascorbique (C) | 0 | 0 |
| Thiamine (B1) | 0,10 | 0,35 |
| Riboflavine (B2) | 0,08 | 0,20 |
| Ac nicotinique (PP) | 0,60 | 4 à 8 |
| Ac pantothénique | | 0,5 à 2 |
| Pyridoxine (B6) | 0,20 | 0,50 |
| Tocophérols (E) | 1 | 2 |

Tableau 6 : Valeurs nutritives de deux types de farines
(VEYER, 1987°)

Remarques

- Le germe de blé est éliminé au cours des opérations de meunerie car sa richesse en acides gras polyinsaturés explique sa mauvaise conservation.
- Le son n'a pas de valeur nutritionnelle. Il est employé parce qu'il augmente la masse fécale et l'élimination des sels biliaires. En effet, il est riche en cellulose et hémicellulose qui lui confèrent un grand pouvoir hygroscopique : il peut absorber jusqu'à six fois son poids d'eau.

1.2.4. Les contrôles sur les blés et les farines

Les moulins analysent eux-mêmes la composition de toutes les farines fabriquées sur place. Dès réception du blé, et même avant la récolte, des échantillons sont prélevés et des analyses permettront de connaître la valeur boulangère d'une récolte et sa conformité avec la réglementation.

1.2.4.1. Contrôles sur le blé

(DEHOVE, 1996, étude 430)

Lors de leur arrivée dans les moulins, les blés sont stockés dans des silos (un silo par variété de blé). Le mélange des différents blés ne se fera qu'au moment de la fabrication de la farine.

Des qualités type de blé sont définies selon des critères physiques et technologiques. Les critères physiques sont les suivants :

- le froment tendre doit être sain, loyal et marchand, exempt de flair et de prédateurs vivants (y compris les acariens) et d'une couleur propre à cette céréale.
- Le taux d'humidité doit être inférieur à 14 %. Dans le cas contraire, le minotier rencontrerait des problèmes de conservation des grains (moisissures, germination).
- Le pourcentage d'impuretés constituées par des grains doit être inférieur à 1,5 %. On entend par « impuretés constituées par des grains » les grains échaudés, les grains d'autres céréales, les grains attaqués par des prédateurs, les grains présentant des colorations du germe et les grains chauffés par séchage.
- Le pourcentage de grains germés doit être inférieur à 1 %.
- Le pourcentage d'impuretés diverses doit être inférieur à 0,5 %. On entend par « impuretés diverses » les graines étrangères, les grains avariés, les impuretés

proprement dites (balles, ergot, grains cariés, insectes morts et fragments d'insectes).

- Le poids spécifique doit être de 76 Kg à l'hectolitre.

Les critères de qualité technologiques sont les suivants :

- La pâte obtenue de ce froment ne colle pas lors du travail manuel.
- Le taux de protéines rapporté à la matière sèche est supérieur ou égal à 11,5 %.
- L'indice de Zélény est supérieur ou égal à 25. Ce test permet d'apprécier de façon rapide la force des blés, il est largement dépendant de la teneur en protéines et de la vitrosité du grain.
- L'indice de chute d'Hagberg est supérieur ou égal à 230 (les 60 secondes de temps de préparation sont inclus). Cet indice représente le degré d'activité amylasique de la pâte issue de ce froment.

Ces quatre derniers critères permettent de déterminer la qualité panifiable moyenne. La qualité panifiable minimale est décrite de cette façon :

- L'activité amylasique du froment tendre panifiable est considérée comme acceptable lorsque l'indice de chute est supérieur à 180 secondes, y compris le temps de 60 secondes de préparation.
- La teneur en protéines est considérée comme acceptable lorsque, ramenée à la matière sèche, elle est égale ou supérieure à 10,5 %.
- Pour être considérée comme non collante et machinable, la pâte doit, à la fin du pétrissage, constituer une masse cohérente qui n'adhère pratiquement pas aux parois de la cuve et à l'axe du pétrin, cette masse devant pouvoir être facilement rassemblée avec les mains et retirée de la cuve en une seule fois sans pertes appréciables. Durant le façonnage, la pâte ne doit adhérer que peu ou pas du tout aux parois de la chambre de boulage, de sorte que le pâton soit bien animé d'un mouvement de rotation sur lui-même permettant à la boule de se former. A la fin de l'opération la pâte ne doit pas coller aux parois de la chambre lorsque le couvercle est soulevé.

Ainsi pour chaque type de blé, des contrôles sont effectués à partir d'échantillons : (CALVEL, 1952)

- Le contrôle de l'humidité permet de prévoir les problèmes de conservation,
- Le dosage du gluten permet de fournir des renseignements sur la valeur boulangère des blés et de la farine qui en résulte,
- Le dosage des matières grasses permet de connaître le taux d'extraction de la farine obtenue et de prévoir l'éventuel rancissement de cette farine.
- Le dosage des cendres fournit des renseignements sur la pureté d'une farine,
- Le dosage du gaz carbonique dégagé pendant la fermentation panaière permet d'apprécier les qualités plastiques de blés et des farines. (Alvéographe de Chopin),
- Le dosage des amylases (indice de chute d'Hagberg)
- La granulométrie des farines par tamisages successifs : on note le refus à chaque tamisage, les résultats sont notés sur un graphique appelé courbe de tamisage,
- Le contrôle de la cellulose pour connaître le pourcentage de fibres alimentaires.

Pendant le stockage des céréales et pour améliorer leur conservation, certaines substances sont autorisées (bromure de méthyl, chlorpyriphosméthyle, deltamétrine, dichlorvos, malathion, phosphore d'hydrogène, pyrèthres et pyrimiphos-méthyle). Les teneurs maximales admissibles en résidu et produits de dégradation dans les produits céréaliers sont codifiées. Voici ci-joint un exemple pour quelques produits de fumigation. (DEHOVE, 1996, étude 430)

| Substances | Produits stockés | Teneurs maximales (mg/kg) |
|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| bromure de méthyl | Produits céréaliers | 0,1 |
| chlorpyriphosméthyle | Farine blanche | 0,5 |
| | Pain blanc et complet | 0,2 |
| | Son de blé | 5 |
| deltamétrine | Farine blanche | 0,2 |
| | Son de blé | 3 |
| malathion | Farine | 2 |

Tableau 7 : Produits de fumigation, teneurs maximales autorisées
(DEHOVE, 1996, étude 430)

1.2.4.2. Contrôles sur les farines

(DEHOVE, 1996, étude 430) (VEYER, 1987)

Les farines panifiables sont destinées à la consommation humaine et à la fabrication du pain.

Les farines panifiables ne peuvent circuler que sous l'une des trois dénominations suivantes :

- farine de froment (ou de blé)
- farine de seigle
- farine de méteil (mélange de blé et de seigle).

La qualité type de la farine de froment est définie comme suit : farine de froment ayant une teneur en cendres de 550 mg pour 100 g de farine et un taux d'humidité de 15,50 %, dénommée « farine de froment de type 55 ».

La teneur en cendre est obtenue par chauffage de la farine à 900° pendant 1heure 30, puis pesée du résidu. Le pourcentage obtenu représente la quantité de matière minérale contenue dans l'échantillon, cela correspondant au taux d'extraction des farines.

Plusieurs types de farine sont homologués : 45, 55, 65, 80, 110, et 150. Le tableau suivant permet de mettre en parallèle le taux de cendres et le taux d'extraction des farines.

| Dénomination | Taux de cendres de la farine (% ms) | Pourcentage d'extraction des farines | Limites normales des % d'extraction | Poids limites de blé correspondant à 100 kg de farine (en kg) |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Type 45 | <0,50 | 68 | 65-75 | 153,8-133,3 |
| Type 55 | 0,50 à 0,60 | 74 | 70-78 | 142,8-128,2 |
| Type 65 | 0,62 à 0,75 | 78 | 74-82 | 135,1-121,9 |
| Type 80 | 0,75 à 0,90 | 82 | 79-85 | 126,6-117,6 |
| Type 110 | 1,00 à 1,20 | 85 | 82-89 | 121,9-112,3 |
| Type 150 | >1,40 | 94 | 90-98 | 111,1-102,2 |

Tableau 8 : Dénomination des farines et taux de cendres en pourcentage de la matière sèche
(DEHOVE, 1996, étude 431)

Certains additifs sont autorisés et peuvent être mélangés à la farine de froment. Tout améliorant quel qu'il soit est interdit.

- farine de fève : sa quantité ne doit pas dépasser 2%. L'incorporation de la farine de fève augmente la teneur en cendre du mélange. Or les taux de cendre indiqués précédemment correspondent à des analyses de blé pur. Dans ces conditions, il est admis que les pourcentages maximaux pourraient augmenter à raison de 0,03 g par 1 % de farine de fève incorporée. La farine de fève est riche en lipooxygénase et

permet le blanchiment de la mie, l'amélioration de la force, de l'élasticité et de la tolérance des pâtes.

- Farine de malt : sa quantité ne doit pas dépasser 0,3%. Cette farine est riche en alpha-amylase, et son adjonction a pour effet de compenser une insuffisance diastasique des blés et de maintenir constantes les propriétés fermentatives de la pâte. Elle est susceptible d'entraîner une amélioration du travail en boulangerie et de la qualité du pain.
- Gluten : l'addition de gluten de blé aux farines panifiables est autorisée en minoterie. Le gluten est normalement présent dans la farine de blé, il est composé essentiellement de protéines (75 à 85 %), mais également de lipides (5 à 12 %), de glucides (8 à 10 %) et de cellulose (2 %). Le gluten joue un rôle important dans l'élasticité et la viscosité de la pâte lors du pétrissage.
- Farine de soja : son addition en tant qu'apport enzymatique est autorisé à la dose maximale de 0,5%. La lécithine de soja est un émulsifiant qui confère plus de souplesse à la pâte.
- Les antioxygènes à raison de 300 mg/kg seul ou en mélange
 - acide L-ascorbique (E 300) joue un rôle d'améliorant à la suite d'une transformation chimique qu'il subit, après addition dans la pâte au contact de catalyseurs spécifiques présents dans la farine ; il est transformé en acide déhydro-ascorbique et devient sous cette forme un agent oxydant. Il agit ainsi sur la ténacité et l'élasticité des pâtes, sur la coloration de la croûte qu'il atténue dans le cas du pain fabriqué avec des farines fort diastasiques, et sur la blancheur de la mie qu'il augmente. L'acide ascorbique est détruit par la cuisson.
 - ascorbate de sodium (E 301)
 - ascorbate de calcium (E 302)
 - acide palmityl 6L ascorbique (E 304)
- Les stabilisants : pyrophosphate acide de sodium (E 450)

Dans les moulins ces contrôles sont effectués sur chaque lot de grains reçus. Les contrôles sont effectués sur les grains, sur la farine, et des essais de panification sont réalisés à l'intérieur même du moulin. Chaque échantillon testé est conservé un mois dans le moulin, sous forme de grains et de farine, ce qui permet ainsi la traçabilité des échantillons.

1.2.4.3. Contrôles toxicologiques particuliers : les mycotoxines, les pesticides et les métaux lourds

Les blés sont produits en grande quantité et à grande échelle, destinés à l'alimentation humaine, leur qualité sanitaire doit être irréprochable. Ils sont menacés par la maladie, les intempéries, les champignons et les rongeurs, mais également par l'homme : sa pollution et ses traitements chimiques peuvent rendre les grains non commercialisables.

Risquons nous de retrouver des produits indésirables et dangereux dans nos assiettes, tels des mycotoxines, des pesticides ou des métaux lourds ?

- les mycotoxines (FRAYSSINET, 1990) (DERACHE, 1989)

Les mycotoxines, toxines fabriquées par des moisissures, comptent parmi les toxiques naturels les plus puissants que l'on connaisse. Elles sont présentes dans de nombreux aliments de base à des concentrations plus ou moins fortes, et les effets physiopathologiques qu'elles entraînent sont connus : mutagenèse, cancérogenèse, cytotoxicité, nécrose des tissus, troubles de la coagulation, néphrotoxicité, effets neurotoxiques et effets sur les systèmes de défense immunitaires. Ces effets ont été démontrés chez l'animal et sont loin d'être démontrés chez l'homme aux doses autorisées dans les aliments. De plus, la présence d'une mycotoxine dans l'aliment n'est pas toujours reliable à un syndrome précis.

Les aliments qui peuvent être contaminés sont de nature variée et l'origine des moisissures tout aussi diverse. Les champignons du sol et des champs pourront contaminer les produits de base comme les céréales, les plantes oléagineuses et les fruits (contamination primaire); la contamination peut aussi se faire par l'air pour les produits élaborés, comme le pain, les produits laitiers, les plats cuisinés ou encore par l'intermédiaire des épices (contamination secondaire). Mais cette deuxième source de contamination est relativement faible par rapport à la première, qui risque de se produire surtout au cours du stockage.

Les céréales constituent un vecteur de mycotoxines extrêmement important. Cela s'explique par leur mode de culture, leurs conditions de stockage et l'importance de leur apport alimentaire dans le monde. C'est aussi un milieu favorable à la croissance des moisissures et à la production de mycotoxines. Le blé, le maïs, l'avoine, le riz, peuvent être contaminés et l'on rencontre toutes sortes de mycotoxines comme les aflatoxines, les ochratoxines A et B, l'acide pénicillique, les alcaloïdes de l'ergot, la zéaralénone, les trichotécènes. La liste des mycotoxines réellement présentes et détectées et la liste des mycotoxines probablement présentes dans les produits céréaliers (d'après les champignons présents) sont impressionnantes. Les doses de mycotoxines sont très variables, mais ce sont les conditions chaudes et humides des pays africains, sud-asiatiques et sud-américains qui favorisent le plus la croissance des champignons toxigènes, surtout ceux producteurs d'aflatoxines ; ainsi le riz et le millet sont souvent pollués.

En France, les céréales de base sont en général peu contaminées, les conditions de récolte et de stockage étant généralement de bonnes qualités. Les contrôles effectués sur les farines sont rassurants, y compris sur le son.

On connaît à l'heure actuelle une centaine de mycotoxines, produites par environ deux cents espèces fongiques. Leur classification chimique est très difficile à établir et leurs effets toxicologiques sont souvent peu spécifiques. Mais il est possible de déterminer une dose sans effet (dose journalière admissible) et une limite résiduelle minimale dans les aliments.

Voici un tableau rassemblant quelques mycotoxines, leur origine fongique ainsi que leurs effets toxiques :

| Mycotoxines | Moisissures responsables | Toxicité |
|---------------------------------------|--|---|
| Aflatoxines B1, B2, G1, G2, M1, M2 | <i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus parasiticus</i> | Mutagénicité, tératogénicité, cancérogénicité, hépatotoxicité, néphrotoxicité, neurotoxicité |
| Acide pénicillique | <i>Penicillium puberulum</i> <i>Penicillium cyclopium</i> <i>Aspergillus ochraceus</i> | Cytotoxicité |
| Ochratoxines A et B | <i>Aspergillus ochraceus</i> <i>Penicillium viridicatum</i> | Tératogénicité, hépatotoxicité, néphrotoxicité, neurotoxicité |
| Zearalenone | <i>Fusarium gramineum</i> | Effets endocriniens |
| Trichothécènes | <i>Fusarium divers</i> | Effets leucopéniques, neurotoxiques, immunosuppresseurs et émétiques |

Tableau 9 : Mycotoxines, moisissures responsables et toxicité
(DERACHE, 1989)

La concentration maximale en mycotoxine doit être la suivante :

- Aflatoxine B1 : 5 µg/kg de céréales (soit 5 ppb), 3 ppb dans la farine blanche et 10 ppb dans le son de blé. L'aflatoxine B1 est toujours présente dans les contaminations primaires, et dans la grande majorité des cas, c'est le produit le plus abondant. Comme c'est par ailleurs celui qui est doué de la toxicité la plus grande et du pouvoir cancérogène le plus puissant, sa détermination doit être réalisée avec le plus grand soin. En première approximation, sa teneur donne une idée valable de l'importance de la contamination totale, c'est le seul dont le taux soit pris en compte par la législation française.
- Ochratoxine : 30 ppb dans le maïs, le blé et les céréales. Elle contamine essentiellement l'orge.

- Zéaralénone : 200 ppb dans le maïs, le blé et les céréales. Elle possède des effets œstrogéniques puissants. Elle contamine essentiellement le maïs.
- Trichothécènes : 100 ppb dans le blé et les céréales. Leur détection est difficile car il existe une trentaine de dérivés de polarité différente.

Ainsi, il existe une multitude de mycotoxines produites dans la nature, toutes ces substances sont difficiles à rechercher et à doser. Peu d'informations sont à notre disposition sur l'incidence de ces produits sur notre santé, d'autant plus qu'il paraît très difficile de définir une dose maximale admissible et il convient donc de rester prudent quand à l'innocuité de nos céréales.

- Les pesticides (MOUILLET, 1990)

Parmi les diverses actions humaines susceptibles de provoquer des nuisances, il faut citer la mise en place des techniques agricoles modernes. L'utilisation plus ou moins intensive des pesticides est un facteur de pollution indéniable des aliments et des chaînes biologiques en général, par suite des résidus résultant de ces traitements. Il est important de souligner que si l'emploi des pesticides s'est largement répandu ces dernières années, c'est que ces produits sont indispensables à la protection des cultures et des récoltes dont ils contribuent à améliorer la quantité, la qualité et la conservation. La parfaite connaissance des problèmes posés par l'emploi des pesticides nécessite une maîtrise absolue des techniques d'analyse des résidus.

Mais qu'en est-il de leur présence dans le grain de blé et donc dans le pain ?

La cuisson en détruit une grande partie, mais les produits résiduels sont encore mal connus. La plus grande concentration de produits chimiques se trouvant en périphérie du grain, ils sont donc éliminés lors du blutage du pain blanc. En revanche, pour le pain complet, il convient d'être vigilant quant à ce potentiel toxique.

Actuellement, la principale source de pollution réside dans la désinfection des locaux de stockage. Deux sortes de pesticides existent :

- les pesticides de surface.

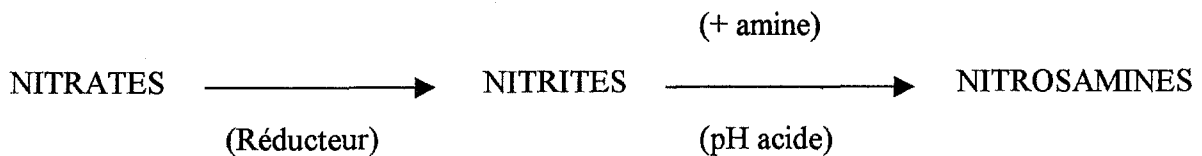
Le lindane par exemple est un hydrocarbure cyclique chloré qui se caractérise par une grande stabilité chimique. Il est insoluble dans l'eau, mais soluble dans les graisses et les solvants organiques. Il s'accumule dans les graisses animales. Sa rémanence (plusieurs années) a conduit à une accumulation des résidus et à une pollution progressive de nombreux milieux naturels et à une accumulation dans les organismes vivants par l'intermédiaire des chaînes alimentaires. Il présente donc une toxicité par accumulation. Le malathion est un pesticide organophosphoré . Il est plus toxique que le précédent (inhibition cholinestérasique), mais il est plus hydrolysable donc biodégradable. C'est d'ailleurs là la raison principale de l'accroissement de son utilisation.

- Les fumigants.

Le traitement des céréales brutes stockées est autorisé avec certaines substances comme le bromure de méthyle. Les résidus se retrouvent dans le pain sous forme de brome inorganique.

Leurs teneurs maximales dans le blé, le son et la farine sont réglementées et ne doivent être dépassées pour que ces produits soient commercialisables. La détermination qualitative et quantitative des résidus de pesticides est le plus souvent effectuée par chromatographie en phase gazeuse avec emploi de détecteurs appropriés aux types de molécules recherchés.

En plus des pesticides, les agriculteurs utilisent des engrais pour améliorer toujours plus leurs rendements. Une utilisation excessive de nitrates comme engrais, certains herbicides (comme l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique) ou la carence du sol en molybdène qui favorise le développement de bactéries réduisant les nitrates en nitrites, sont des facteurs favorisant l'accumulation de nitrates dans les plantes. Or les nitrates et les nitrites sont des précurseurs des nitrosamines lorsqu'ils se trouvent à pH acide.



Le déroulement de cette réaction dépend de plusieurs facteurs :

- La concentration de chacun des réactants. Il a été mis en évidence de faibles traces de nitrites dans les grains de froment et dans la farine. De plus, les amines nécessaires à la réaction peuvent provenir de protéines ; elles seraient formées au cours de certains processus de cuisson ou dans certaines étapes de la conservation des aliments.
- Le pH. Les nitrosamines se forment préférentiellement aux pH 2 à 3 et en présence de réducteurs, le suc gastrique est un milieu favorable à leur formation.
- La température est importante dans la réaction de nitrosation car la cuisson est une étape favorable à la formation de nitrosamines. Le chauffage fait ainsi passer la teneur en diméthylnitrosamine de 5 ppm à 50 ppm.

Certains auteurs ont mis en évidence le pouvoir cancérigène des nitrosamines chez le rat par apparition de lésions hépatiques mortelles à haute dose (200 ppm). Il faut signaler également que le pH gastrique de l'homme étant plus acide que celui du rat, l'homme sera plus apte à former des nitrosamines que le rat. (LEDERER, 1995)

- Les métaux lourds

Les concentrations maximales en cadmium et en plomb des blés récoltés en France, admises aussi bien par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France que par le Codex Alimentarius et par plusieurs états Européens sont de :

- 0,1 mg / kg pour le cadmium, soit 0,1 ppm
- 0,5 mg / kg pour le plomb, soit 0,5 ppm.

(Actualités, concurrence, consommation et répression des fraudes 1991)

Ces normes sont générales à l'alimentation . Une teneur excessive en plomb ou en cadmium reflète une pollution de type urbaine (usines, circulation routière).

Les normes pour les autres métaux lourds sont à l'étude en ce qui concerne les farines.

Une certaine quantité de métaux lourds et de pesticides sont présents dans le pain lorsque nous le mangeons ; cela est dû bien sûr à l'activité humaine : pollution, nécessité d'augmenter toujours plus les rendements. Ces produits se concentrant dans les enveloppes du grain de blé, le pain fabriqué à partir de farine complète contiendra plus de métaux lourds et de pesticides que le pain blanc.

1.3. LE PAIN

Nous allons décrire dans ce chapitre les différentes étapes de la fabrication du pain. Je décrirai plus en détail la fabrication artisanale du pain, telle que j'ai pu l'observer auprès de mon père et de mon grand-père. Puis nous décrirons quelle est la valeur nutritive du pain.

1.3.1. La panification

(CALVEL, 1952)

1.3.1.1. Les ingrédients

- La farine

La farine est l'ingrédient le plus important du pain. Lors de la réception d'une farine, le boulanger procède, à deux vérifications sur la livraison qu'il reçoit :

- le poids des sacs en pesant deux ou trois sacs pris au hasard,
- les caractéristiques de la farine. Le boulanger appréciera la farine à la vue, au toucher, au goût et à l'odeur.

Le stockage de la farine doit se faire dans un endroit propre, sec et aéré pour éviter la prolifération des moisissures et des insectes (mites et vers).

- L'eau

L'eau est, après la farine, le plus important constituant de la pâte et joue un rôle majeur au cours de sa confection. Elle hydrate la farine, gonfle les grains d'amidon et favorise l'assouplissement et l'allongement du gluten, ce qui donne à la pâte ses propriétés de plasticité, qui lui permettent de se développer et de se laisser façonner. La présence de l'eau est, en outre, primordiale en ce qui concerne la formation du milieu humide, indispensable à la naissance et au déroulement de la fermentation alcoolique. Comme toutes les eaux destinées à la consommation humaine celle qui est utilisée en boulangerie doit être potable. Une eau potable est un liquide incolore, inodore, agréable au goût, ne renfermant pas de traces organiques, pas d'ammoniaque, pas de germes pathogènes. Si l'eau ne réferme pas toutes ces conditions, elle peut être purifiée par filtration, par adjonction d'une substance antiseptique ou par stérilisation à 120° C.

Suivant le lieu de provenance, l'eau peut être de nature différente et plus ou moins riche en sels minéraux. C'est à l'aide du degré hydrotimétrique (reflétant la teneur en calcium) que l'on détermine la qualité de l'eau et que l'on procède à sa classification :

- eaux ayant un degré hydrotimétrique inférieur à 30,
- eaux ayant un degré hydrotimétrique compris entre 30 et 60,
- eaux ayant un degré hydrotimétrique supérieur à 60.

Seules les eaux ayant un degré hydrotimétrique inférieur à 30 sont potables.

Les eaux ayant un degré hydrotimétrique élevé sont appelées eaux dures. Elles sont moins digestes et encrassent rapidement les tubes d'amenée d'eau et les chaudières. Elles renferment en grande quantité, soit du carbonate de chaux (eaux calcaires), soit du sulfate de chaux ou plâtre (eaux séléniteuses). On rencontre aussi des eaux ferrugineuses et, en moins grande quantité, des eaux sulfureuses, alcalines ou salines.

Bien que la nature de l'eau n'ait pas une influence déterminante sur les qualités plastiques des pâtes et des pains qui en résultent, l'expérience montre que ce sont les eaux ayant le degré hydrotimétriques inférieur à 30 qui conviennent le mieux à la fabrication du pain. Les eaux d'une dureté excessive, de même que les eaux pures (eaux de pluie) donnent de moins bons résultats.

- Le sel

Quoique beaucoup moins important que la farine et l'eau, le sel est aujourd'hui l'un des constituants importants de la pâte et du pain. Chimiquement, le sel est du chlorure de sodium (NaCl). On le rencontre à l'état solide dans le sel de mine ou sel gemme, et à l'état de solution dans l'eau de mer (sel marin).

La présence de sel se manifeste tout au long de la panification. Il améliore, en premier lieu, les qualités plastiques de la pâte : fermeté, ténacité, et permet ainsi d'élever légèrement l'addition d'eau. Il agit ensuite sur l'activité de la fermentation, qu'il freine un peu, et joue dans ce domaine un rôle de régulateur. Il influence également, pendant la cuisson, la coloration de la croûte, qu'il favorise. Il augmente également l'hygroscopicité du pain, ce qui, par temps humide, est plutôt fâcheux. Enfin, et ceci est le plus important, il améliore la saveur du pain. Le sel est un exhausteur de goût.

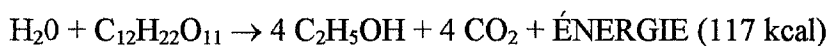
- La levure

Les levures sont des êtres vivants appartenant à la famille des champignons. La levure de boulangerie appartient à l'espèce *Saccharomyces cerevisiae*. Elle est constituée par des cellules rondes ou ovales ayant en moyenne 1/100 de millimètres de diamètre. La levure possède les facultés de tous les êtres vivants : respiration, reproduction, et provoque la fermentation en transformant les sucres en alcool et en gaz carbonique. Le gaz carbonique contribue au développement de la structure alvéolaire du pain.

La réaction est la suivante :



soit



(saccharose) (éthanol)

Cette levure est fabriquée industriellement. Elle doit être de couleur très claire ou blanche, d'odeur caractéristique et pour ainsi dire insipide. De plus une bonne levure est assez ferme et doit se conserver sans se désagréger.

Sa composition est approximativement la suivante :

| | |
|------------------------|-------|
| Eau | 70% |
| Matières azotées | 13,5% |
| Matières grasses | 1% |
| Matières cellulosiques | 1,5% |
| Glucides | 12% |
| Matières minérales | 2% |

1.3.1.2. La fabrication du pain : fabrication artisanale

Elle comprend plusieurs phases successives :

- le pétrissage
- la première fermentation : le pointage
- la mise en forme : le façonnage
- la deuxième fermentation : l'apprêt
- la cuisson
- le ressuage

- Le pétrissage

C'est la première opération de la panification qui réalise le mélange de matières premières : farine, eau, sel et levain ou levure, et la confection de la pâte avec laquelle on réalise le pain.

Le pétrissage à bras est complètement abandonné actuellement, c'est le pétrin mécanique qui assure aujourd'hui, dans tous les fournils, la fabrication de la pâte. De plus le pétrissage mécanique assure un résultat meilleur que le pétrissage à bras. Il dure entre 18 et 25 minutes et comprend deux phases :

- le frasage consiste à mélanger les ingrédients jusqu'à ce que la pâte forme un tout homogène et qu'il ne reste plus trace d'eau ni de farine.

Dans la méthode au levain on ajoute les ingrédients dans l'ordre suivant : le levain, l'eau dans laquelle le sel est dissout, puis la farine.

- le découpage, étirage, soufflage. Une fois que tous les ingrédients sont mélangés, ces trois phases ont lieu simultanément. Le boulanger peut effectuer en cours de pétrissage un bassinage si la pâte lui semble trop dure (apport d'eau) ou au contraire un contre-frasage si elle lui semble trop molle (apport de farine).

La durée du pétrissage dépend du pétrin utilisé, des caractéristiques de la farine et du mode de panification.

- La fermentation

Lors de la fermentation, les modifications chimiques sont dues surtout à l'action des enzymes et principalement des amylases alpha et bêta sur l'amidon. Les levures prendront ensuite le relais pour produire du gaz carbonique, de l'alcool éthylique et des acides organiques (lactiques et acétiques entre autres).

L'activité fermentaire et la rapidité de formation du gaz carbonique peuvent être influencés par :

- La nature des blés. L'origine et la variété des blés peuvent contribuer à augmenter ou à réduire les quantités de sucres existants ou le pouvoir diastasique,

- La nature de la farine. Les variations du taux d'extraction entraînent des modifications du pouvoir diastasique. De plus le réglage de la mouture exerce une influence sur l'évolution de la fermentation (problèmes de granulation).
- La température. La température de l'eau et la température ambiante sont très importantes et doivent être situées entre 22 et 23°.

La pâte va se transformer physiquement à cause de l'augmentation du gaz carbonique. Cette transformation dépend de son pouvoir de rétention du gaz.

La fermentation peut être obtenue à l'aide du levain de pâte ou à l'aide de la levure industrielle. Dans le premier cas, c'est un morceau de pâte, prélevé sur une fournée de la fabrication du jour qui permet d'assurer la fermentation du lendemain. Ce morceau de pâte s'appelle le levain. Dans le deuxième cas on utilise des levures fabriquées industriellement de la famille *Saccharomyces cerevisiae*. Ainsi les fournées ne sont plus dépendantes les unes des autres.

Le pointage est la période de la fermentation située entre la fin du pétrissage et le pesage de la pâte, période durant laquelle la pâte subit une fermentation de masse lui procurant les qualités physiques qui permettent de la diviser et de la tourner.

Une bonne pâte doit avoir du corps et de la souplesse à la fois. Une pâte a du corps lorsqu'elle présente à l'étirement une réaction élastique et nerveuse et qu'elle oppose par ailleurs une légère résistance à la pression de la main. Elle doit également être souple c'est à dire que l'on doit l'étirer et la plier mais elle doit toujours avoir tendance à revenir sur elle-même. De plus elle ne doit pas être collante lorsque le boulanger la travaille.

Le pointage terminé, la pâte est divisée en pâtons, pesée et façonnée. Ces opérations seront d'autant plus faciles que les caractéristiques de la pâte seront idéales. Le façonnage ou « tourne » doit éviter d'écraser la pâte, de la triturer ou de la déchirer. Chaque pâton façonné est déposé soit dans des bannetons (de forme allongé, en couronne ou en rond) soit sur couche.

L'apprêt est la phase se situant entre le façonnage et la cuisson. La fermentation se poursuit sous l'action des levures, permettant un développement important de la pâte. Chaque pâton atteint environ trois fois son volume d'origine.

Avant d'enfourner, le boulanger coupe chaque pâton avec une lame. Cette opération, appelée la grigne, a pour but de permettre une meilleure expansion de la pâte et d'éviter son éclatement sous la pression du gaz carbonique. Pour un développement maximal, les coups de lame doivent se chevaucher et couvrir toute la longueur du pâton, et l'incision doit se rapprocher de l'horizontale.

- La cuisson

Le pain est le plus souvent cuit à la buée, celle-ci étant introduite préalablement à l'enfournement. La buée permet aux pâtons d'atteindre un plus grand volume et joue sur la couleur et l'aspect de la croûte. A la surface du pâton, il se produit un durcissement par dessiccation (croûte) et un brunissement non enzymatique qui donne à la croûte une couleur jaune doré, d'un aspect légèrement brillant et glacé. Le brunissement non enzymatique, appelé aussi « réaction de Maillard », désigne un ensemble très complexe de réactions aboutissant à la formation de pigments bruns ou noirs, et à des modifications de l'odeur et de la saveur. (CHEFTEL, 1976)

Le pain cuit à une température de 250° C environ. Tout d'abord la fermentation à l'intérieur du pâton poursuit son activité jusqu'à ce que la chaleur interne atteigne 45 à 50°, ce qui provoque la destruction des ferments. Soumis à l'influence de la chaleur l'ensemble des gaz formés se dilatent et les pâtons continuent à gonfler.

Lorsque la température atteint 60°, l'amidon se gélifie en donnant un empois, et le gluten coagule formant un squelette rigide. La paroi du pâton perd alors toute plasticité.

La cuisson dure, selon la forme et la taille des pains de 25 à 45 minutes.

- le ressuage

Le pain est défourné avec soin car il est fragile. L'intérieur du pain est encore saturé de vapeur d'eau et de gaz carbonique. Pendant le refroidissement, le gaz carbonique va diffuser à travers la croûte et sera remplacé par de l'air.

1.3.1.3. Le pain complet : différences de fabrication.

Le pain blanc (pain courant) est fabriqué à partir de farine type 55. Le pain complet est fabriqué à partir de farine contenant du son. La présence de son entraîne des modifications dans les qualités plastiques de la pâte et rend la fermentation plus active. La conduite du travail se trouve sensiblement modifiée et les pains sont eux aussi différents.

Les modifications sont les suivantes :

- Jusqu'à 80 % d'extraction il n'y a pas de modifications notables par rapport au pain blanc. Seule la fermentation est légèrement plus active.
- De 80 à 85 %, la fermentation augmente sensiblement d'activité, les temps de pointage et d'apprêt doivent donc être diminués. Le boulanger a intérêt à couler l'eau un peu plus froide et à diminuer la dose de levure : la fermentation s'en trouvera ralentie, et les résultats seront meilleurs. On obtient ainsi un pain relativement volumineux, dont la mie est assez aérée et qui s'approche assez de celui qui résulte de l'emploi d'une farine blanche.
- A partir de 85 %, les qualités physiques des pâtes s'amointrissent encore. L'activité fermentative croît toujours. Le pain sera lourd et moins bien développé, la mie plus humide. La durée de cuisson devra être rallongée et la température du four devra être plus douce.

Le pain complet sera donc plus dense que le pain blanc car le son contient une enzyme, la glutinase, qui fait perdre au gluten une partie de son élasticité, empêchant partiellement la levée de la pâte.

1.3.1.4. La fabrication industrielle du pain

La boulangerie industrielle se distingue de la boulangerie artisanale, à la fois, par le volume de sa production et les moyens mis en œuvre pour la réaliser. Pour justifier une installation automatique, la fabrication doit être d'au moins 70 à 80 quintaux par jour : On arrive dans le domaine de l'usine à pain.

La farine est stockée dans de grands silos et elle arrive automatiquement au niveau des pétrins, de même que l'eau. Le pointage de la pâte a lieu à l'intérieur d'une chambre de fermentation à atmosphère conditionnée, soit dans les cuves des pétrins mécaniques, soit dans des bacs sur roues, spécialement conçus à cet effet. La pâte est ensuite mise en forme grâce à une diviseuse (elle coupe la pâte en pâtons de poids identiques), une mouleuse (elle met les pâtons en forme de boules) et une façonneuse (les pâtons subissent un laminage, un pliage et un allongement). Un système de réglage permet d'obtenir des pâtons plus ou moins longs et à section plus ou moins grande. Puis les pâtons sont mis dans des bannetons et sont acheminés dans la chambre de fermentation de l'apprêt. Bien entendu le four est lui aussi automatique et les pains terminent leur course en salle de refroidissement.

Mais la fabrication industrielle ne donne pas les mêmes résultats que la fabrication artisanale : les pains sont moins beaux, moins bien développés et la texture de la mie est différente. Cela peut être expliqué par la fabrication elle-même : la diviseuse provoque une pression excessive sur la pâte, ce qui lui enlève une partie de sa souplesse en augmentant fâcheusement sa force. Cette pression excessive sur la pâte oblige les boulangers à augmenter la quantité de levure pour obtenir une pâte plus gonflée et plus résistante aux traitements que l'on veut lui faire subir. Le goût du pain s'en ressent bien sûr : il est plus acide.

1.3.2. Valeur nutritionnelle du pain

(VEYER, 1987) (APFELBAUM, 1997)

Le pain est avant tout un aliment énergétique. L'apport calorique du pain augmente légèrement quand le taux d'extraction s'abaisse, ce qui veut dire que le pain complet est moins énergétique que le pain blanc.

Le pain est un aliment composé de 55 % de glucides, constitués essentiellement d'amidon. L'amidon est une molécule hautement polymérisée qui exige pour être absorbée un travail digestif plus long que pour les sucres raffinés à chaîne courte. L'amidon est donc absorbé lentement et durablement et ce caractère de glucide lent est très favorable à l'équilibre entre l'utilisation et le stockage.

Le pain fournit également une quantité non négligeable de protéines. Mais leur valeur biologique est médiocre car le pain manque de certains acides aminés indispensables : la lysine est, en particulier, le facteur limitant. Mais cela est un problème mineur dans une alimentation de type occidentale où ces acides aminés sont fournis en quantité suffisante par les viandes et les laitages. Le pain est complémentaire des autres sources d'apport protéiques.

| Constituants | Pain blanc | Pain complet |
|-----------------------|--------------------|---------------------|
| Valeur calorique | 255 kcal 1067kJ | 230 kcal 962kJ |
| Eau | 35 g | 36 g |
| Protéines | 7 g | 8 g |
| Lipides | 0,8 g | 1,2 g |
| Glucides | 55 g | 50 g |
| Cellulose | 0,3 g | 1,5 g |
| <u>Vitamines</u> : B1 | 0,06 mg | 0,30 mg |
| B2 | 0,06 mg | 0,15 mg |
| PP | 0,50 mg | 3,00 mg |
| C | 0 | 0 |
| E | 0,20 mg | 1,30 mg |
| <u>Minéraux</u> : Na | 500 mg | 650 mg |
| K | 100 mg | 224 mg |
| Ca | 20 mg | 50 mg |
| Mg | 30 mg | 90 mg |
| Fe | 1 mg | 2,20 mg |
| P | 90 mg | 200 mg |
| S | 100 mg | 120 mg |
| Cu | 0,12 mg | 0,40 mg |

Tableau 10 : Composition pour 100 g de pain
(GUIGNARD, 1993)

| Acides aminés | Blé (grain entier) | Son | Farine (extraction 70 à 80 %) |
|----------------------|------------------------------|------------|---|
| Alanine | 602 | 1058 | 422 |
| Acide aspartique | 322 | 363 | 304 |
| Acide glutamique | 299 | 421 | 248 |
| Arginine | 426 | 451 | 453 |
| Cystine | 871 | 896 | 840 |
| Glycocolle | 374 | 583 | 248 |
| Histidine | 196 | 220 | 174 |
| <u>Isoleucine</u> | 589 | 568 | 581 |
| <u>Leucine</u> | 382 | 482 | 321 |
| <u>Lysine</u> | 210 | 90 | 130 |
| <u>Méthionine</u> | 391 | 425 | 277 |
| <u>Phénylalanine</u> | 577 | 680 | 493 |
| Proline | 472 | 749 | 367 |
| Sérine | 644 | 1108 | 491 |
| <u>Thréonine</u> | 3900 | 2769 | 4171 |
| <u>Tryptophane</u> | 512 | 875 | 424 |
| Tyrosine | 1298 | 853 | 1387 |
| <u>Valine</u> | 600 | 667 | 532 |

Les acides aminés soulignés sont les acides aminés essentiels

Tableau 11 : Teneur en acides aminés (en mg pour 100 g)
(GUIGNARD, 1993)

La faible teneur en lipides du pain lui confère un intérêt nutritionnel exceptionnel dans notre type d'alimentation actuel. Il en apporte moins de 1 g pour 100 g de pain. De plus les céréales sont riches en acide linoléique, acide gras essentiel. Mais ce second intérêt est en fait très réduit car lors de la fabrication du pain selon les méthodes actuelles, la farine de fève ajoutée à la farine de blé provoque la disparition quasi complète de l'acide linoléique sous l'action de la lipooxygénase.

L'apport en éléments minéraux varie beaucoup avec le taux d'extraction de la farine : à 85 % la farine contient seulement la moitié des matières minérales du blé, et à 75 % elle n'en contient qu'un quart. Cela s'explique par le fait que ces éléments sont surtout présents dans les couches périphériques du grain de blé. La teneur en sels minéraux du blé varie également en fonction de la nature du terrain de culture, du climat et même de la lignée génétique du grain

Le pain est pauvre en calcium, mais riche en phosphore. Le rapport Ca/P est variable selon les céréales mais toujours mauvais. En effet un apport excessif en phosphore (alimentation à base de riz, de poissons et de farines non blutées, caractéristiques des pays asiatiques) peut provoquer une hypocalcémie sévère. De plus le phosphore, présent en partie sous forme d'acide phytique, forme avec le calcium, le magnésium et le fer un sel insoluble éliminé par les selles. L'intérêt minéral du pain est donc moindre que ce que les études quantitatives permettaient d'espérer. Cependant l'organisme semblerait capable de s'adapter grâce à la production d'une enzyme : la phytase.

Les apports en fer ou en magnésium sont modestes, avec en outre un coefficient de résorption plus faible que pour le fer présent dans les viandes.

Les vitamines contenues dans le blé sont essentiellement des vitamines du groupe B (thiamine, riboflavine, niacine). Ce sont des co-enzymes qui interviennent dans le métabolisme des hydrates de carbone. Leur teneur dans le pain varie beaucoup selon le taux d'extraction des farines.

Une ration de 300 g de pain fabriqué à partir de farine ayant un taux d'extraction de 75 à 78 %, couvre 14 % des besoins moyens en vitamine B1, 7 % en vitamine B 2 et 13 % en vitamine PP.

Les fibres alimentaires sont des résidus non digestibles provenant de la paroi des végétaux. Il est donc logique que leur proportion soit bien supérieure dans le pain complet que dans le pain blanc.

PARTIE II
ANALYSE DES RÉPERCUSSIONS DIÉTÉTIQUES

2.1. LES CONSTITUANTS IMPORTANTS

Le pain est un aliment énergétique intéressant de part sa teneur élevée en amidon ; il fournit également des fibres et des vitamines en quantité relativement importante.

2.1.1. Qualités nutritionnelles des amidons

(CHAMP, 1992) (MESSING, 1995)

2.1.1.1. Le grain d'amidon

L'amidon est le polysaccharide le plus abondant dans l'alimentation de l'homme. Il est présent dans une grande variété de végétaux tels que les légumineuses, les céréales, les tubercules ou les fruits.

| SOURCE | AMIDON (% de matière sèche) | AMYLOSE (% de l'amidon) | FORME | TAILLE (diamètre en μm) |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| Blé | 65-70 | 25-30 | Polyédrique Lenticulaire | 2-38 |
| Riz | 75-90 | 20-35 | Polyédrique | 3-8 |
| Pomme de terre | 60-65 | 20 | Ellipsoïdale | 15-100 |
| Haricot | 30-35 | 33-35 | Réniforme | |

Tableau 12 : Teneur en amidon de quelques aliments

Teneur en amylose des amidons

(CHAMP, 1992)

A l'état natif, l'amidon se présente sous forme de granules de tailles et de formes variables. La plupart des amidons consommés par l'homme ont une teneur en amylose comprise entre 15 et 30 % ; les amidons des légumineuses sont les plus riches en amylose.

L'amidon présente en lumière polarisée, une croix noire de biréfringence témoignant d'une organisation semi-cristalline des macromolécules. Les amidons sont classés en fonction de leur spectre de diffraction des rayons X :

- les céréales sont de types A (cette classe comprend également l'amidon de manioc)
- les tubercules sont de type B (cette classe comprend également l'amidon de maïs et de pois ridé)
- les légumineuses sont de type C.

D'autres types cristallins peuvent apparaître lors des traitements technologiques.

Les amidons sont différemment attaqués par les amylases selon leur origine botanique, mais d'une façon générale, cette hydrolyse est très lente.

Soumis à un chauffage (50 à 100 °C) en excès d'eau, l'amidon perd sa structure cristalline. Les grains d'amidon, en s'hydratant, gonflent tandis qu'une fraction de l'amylose passe en solution. La solubilisation progressive de l'amylose puis de l'amylopectine provoque une augmentation de la viscosité apparente de la suspension : c'est l'EMPESAGE ou GELATINISATION de l'amidon. L'amidon devient plus aisément hydrolysable par les alpha-amylases.

Lorsque la température diminue, le gel évolue vers une nouvelle organisation semi-cristalline des macromolécules d'amylose et l'amylopectine. C'est le phénomène de RÉTROGRADATION. Il y a formation de cristallites d'amylose, d'amylopectine et de cristallites mixtes

Lors de l'empesage, des complexes de fusion peuvent se former entre l'amylose et des monoglycérides. La résistance de ces complexes à l'action des amylases est d'autant plus importante que le lipide complexant est à chaîne longue et saturée. Il s'agit d'AMIDONS COMPLEXES.

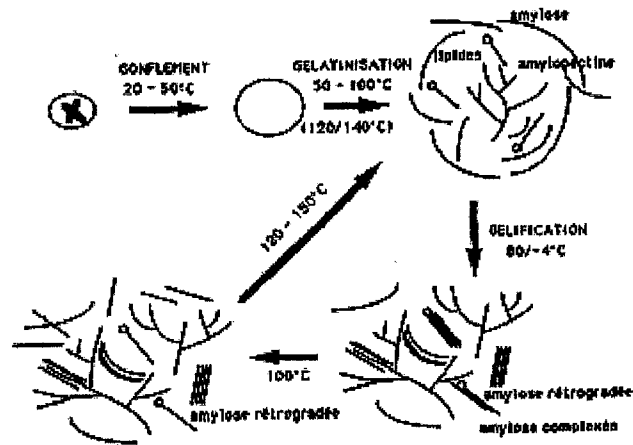


Schéma 7 :

Représentation schématique de l'évolution de la structure de l'amidon au cours de son chauffage (en excès d'eau)
(CHAMP 1992)

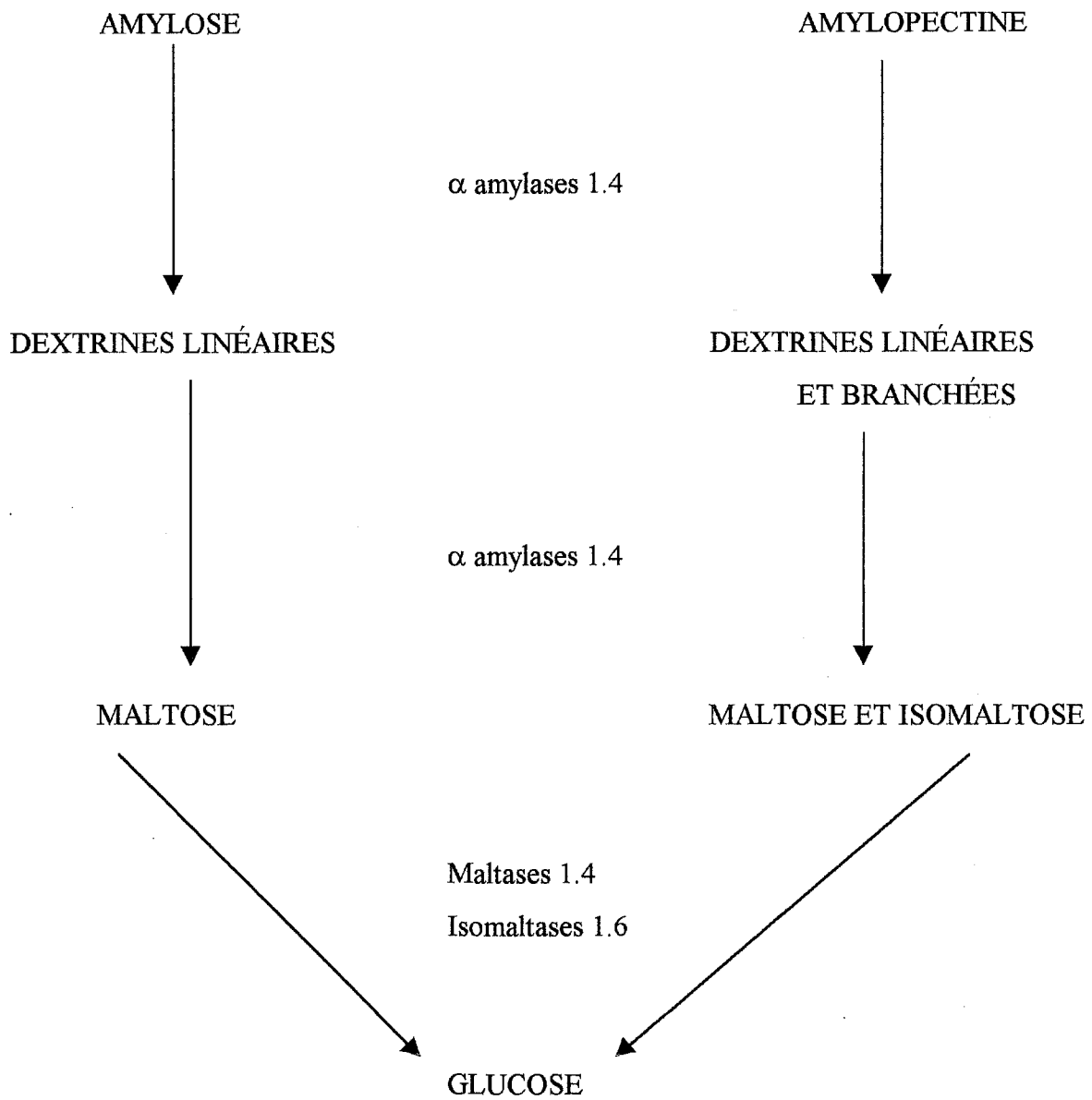
Pendant la panification, l'amidon subit donc des modifications. Au cours de la fermentation, les amylases de la farine et les enzymes de la levure hydrolysent partiellement les glucides. Cela produit de l'alcool et du gaz carbonique. Lors de la cuisson, l'amidon en périphérie du pain subit un début de pyrolyse, du fait de l'évaporation rapide de l'eau, et interagit avec les dérivées protéiques pour former la croûte. La croûte contient ainsi de l'amidon non gélatinisé, intacte. Dans la mie, par contre, l'amidon gonfle et se gélifie partiellement, le réseau de gluten coagule. A la sortie du four, le pain refroidit et l'amylose rétrograde.

2.1.1.2. La digestion et la réponse glycémique

La digestion de l'amidon débute au niveau de la bouche, grâce à l' α -amylase salivaire dont l'action se poursuit dans l'estomac jusqu'à dénaturation de l'enzyme par les sécrétions d'acide chlorhydrique. L' α -amylase pancréatique qui se déverse au niveau du duodénum est responsable de la majeure partie de l'amylolyse d'origine endogène ; son action est complétée

par celle de deux enzymes de la bordure en brosse synthétisée par les entérocytes : la maltase 1.4 et l'isomaltase 1.6.

Le schéma de la digestion est le suivant :



Les quantités d'amylase sécrétées au niveau du pancréas sont en large excès par rapport à la quantité d'amidon potentiellement hydrolysable. Une fraction d'amidon peut cependant échapper à la digestion par les enzymes endogènes et devenir un substrat de fermentation pour les bactéries caeco-coliques : cette fraction est communément appelée amidon résistant. Cet amidon sera métabolisé par la flore colique et produira des gaz (CO_2 , H_2 , CH_4) et des acides gras volatils (acétate, propionate, butyrate). Absorbés par la muqueuse colique, ils seront un substrat énergétique pour l'épithélium colique et le reste de l'organisme. Le butyrate est un facteur trophique et antimototique pour l'épithélium colique.

Ces amidons résistants sont :

- Amylose complexée à des lipides : cette fraction peut dans certains cas être indigestible.
- Amidon natif : il peut persister sous cette forme après cuisson lorsque la teneur en eau du produit a été localement insuffisante pour permettre la gélatinisation. C'est le cas de la croûte du pain où la structure granulaire de l'amidon persiste après cuisson avec 50 % des grains présentant encore le phénomène de biréfringence.
- Amidon rétrogradé : lorsque le pain rassit, l'eau migre de la mie vers la croûte favorisant la rétrogradation de l'amidon de la mie.

La digestibilité dite « totale » de l'amidon est la fraction de l'amidon (exprimée en % de l'amidon ingéré) qui n'apparaît pas dans les selles ; cette mesure, très globale, ne permet pas de connaître le devenir de l'amidon ingéré.

La mesure de la digestibilité iléale permet de déterminer la fraction d'amidon digéré dans l'intestin grêle et par conséquent absorbée sous forme de glucose. Cette mesure peut être effectuée chez des sujets iléostomisés.

La technique du « breath test », appelée aussi test respiratoire à l'hydrogène permet d'estimer la quantité d'amidon « malabsorbée ». Il s'agit d'utiliser la capacité qu'ont les bactéries de fermenter les substrats fermentescibles dès leur arrivée au niveau colique et le fait que la quantité d'hydrogène expiré reflète la production d'hydrogène au niveau colique. La quantité d'hydrogène expiré après un repas expérimental est comparée à celle obtenue après ingestion d'un sucre inabsorbable mais complètement fermentescible : le lactulose.

Chez des sujets sains, il ressort qu'une faible fraction des amidons cuisinés, provenant d'aliments céréaliers ou de pommes de terre, n'est pas digérée dans l'intestin grêle.

| ALIMENT | AMIDON INGÉRÉ (g) | AMIDON NON DIGÉRÉ (%) |
|---------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Pain | 62 | 2 |
| Pommes de terre fraîchement cuites | 45 | 4 |
| Pommes de terre refroidies | 47 | 12 |
| Riz | 100 | 1 |
| Bananes | 19 | 90 |

Tableau 13 : Pourcentage d'amidon non digéré en fin d'intestin grêle chez l'homme par la technique de l'iléostomie
(CHAMP, 1992)

Une classification des amidons basée sur leur dégradabilité enzymatique dans des conditions opératoires bien précises a été proposée en 1987 :

- l'amidon rapidement digestible (ARD)
- l'amidon lentement digestible (ALD)
- l'amidon résistant (AR).

L'ARD est principalement de l'amidon amorphe et dispersé. Il est trouvé en grande quantité dans les aliments amylicés qui ont été cuits en présence d'eau (pain, pomme de terre).

L'ALD est, comme l'amidon rapidement digestible, supposé être totalement digéré dans l'intestin grêle mais il est digéré plus lentement. Cette catégorie regroupe les amidons crus de type A ou C ainsi qu'une fraction des amidons de type B.

L'AR est l'amidon qui peut potentiellement résister à la digestion dans l'intestin grêle. Il représente chimiquement la différence entre l'amidon total (AT) et la somme des amidons lentement et rapidement digérés.

Ainsi, l'amidon est en grande partie digéré dans l'intestin grêle et absorbé sous forme de glucose, une fraction est éventuellement fermentée au niveau colique, enfin un résidu est parfois excrété dans les selles. La vitesse d'hydrolyse de l'amidon au niveau de la bouche, de l'estomac et surtout de l'intestin grêle supérieur (duodénum) varie d'un aliment à l'autre. Cette cinétique de digestion affecte à la fois la cinétique d'apparition du glucose au niveau du sang porte puis périphérique et l'insulinémie post prandiale.

Les pommes de terre cuites sont aussi hyperglycémiantes et insulinémiantes que le glucose ou la saccharose. Le riz, le maïs et le pain blanc provoquent des réponses glycémiques et insulinémiques plus faibles que le glucose ou la pomme de terre, mais sont tout de même considérés comme des aliments ayant un index glycémique élevé (80 à 70 %). Par contre les pâtes ont un index glycémique moyen (50 à 40 %) et les légumes sec un index faible (50 à 15 %). Ainsi on peut dire que la consommation d'aliments à faible index glycémique par les malades diabétiques insulino-dépendants conduit à une amélioration significative du contrôle métabolique de ces sujets.

| ALIMENT | INDEX GLYCEMIQUE |
|---------------------------|------------------|
| Glucose | 100 |
| Pain blanc | 69 |
| Pain complet | 72 |
| Spaghetti | 50 |
| Pommes de terre nouvelles | 70 |
| Lentilles | 29 |

Tableau 14 : Index glycémique de quelques aliments
(CHAMP, 1992)

La réponse glycémique à un aliment amylicé dépend de plusieurs facteurs :

- facteurs liés à l'aliment :

- La nature de l'amidon (caractéristiques physiques et chimiques).
- Sa teneur en amylose. Plus la teneur est faible, plus la réponse glycémique est élevée. Cela peut s'expliquer par le comportement particulier des amidons riches en amylose lors de la gélatinisation, mais aussi par leur capacité marquée à la rétrogradation et à la formation de complexes avec les monoglycérides.
- La nature et l'intensité des traitements qu'il a subi (broyage, traitement hydrothermique, mode de conservation).
- La nature des aliments consommés avec l'aliment amylicé (présence de matières grasses, de protéines, de fibres). Les protéines et les lipides diminuent la réponse glycémique par une diminution de la vidange gastrique, les fibres améliorent la tolérance au glucose.
- la présence d'antinutriments ayant un rôle inhibiteur enzymatique (phytates, lectines, saponines, tanins).
- Le mode de consommation. La réponse est différente selon que l'aliment est consommé seul ou au cours d'un repas. Le repas glucido-lipido-protéique diminue le pic plasmatique de glucose.

- facteurs liés à la physiologie :

- Il existe une grande variabilité intra et interindividuelle
- La fréquence des prises alimentaires. L'augmentation du nombre de prises diminue les réponses glycémiques.
- La cinétique de vidange gastrique. Elle dépend de la qualité et du temps de mastication, de la nature de l'aliment, de la densité énergétique, de la teneur en glucides, lipides et protéines, et de la température de consommation de l'aliment.

La structure et les propriétés physico-chimiques des amidons évoluent constamment dans l'aliment, sous l'influence de l'eau, des variations de température, et du temps. Chaque traitement hydrothermique, industriel ou culinaire le transforme et lui confère une digestibilité

et des propriétés nutritionnelles spécifiques. Le pourcentage d'amylose est un des facteurs qui conditionne les propriétés rhéologiques de l'amidon au cours des différentes étapes de transformation hydrothermique.

L'amidon digéré au niveau de l'intestin grêle a une valeur énergétique de 3,72 kcal/g glucose. La valeur énergétique de la fraction d'amidon fermentée au niveau colique est comprise entre 2,15 et 2,35 kcal/g car les acides gras volatils formés sont source d'énergie.

2.1.2. Les fibres alimentaires

2.1.2.1. Définition

Le terme « dietary fiber », traduit en français par « fibres alimentaires », a été proposé pour la première fois par HIPSLEY en 1953. (HIPSLEY, 1953) Ce terme a été défini ultérieurement par TROWELL et coll. comme le résidu des plantes résistant aux enzymes digestives de l'homme. (TROWELL, 1976) (TROWELL, 1978)

Cette définition est à opposer à celle des « fibres brutes » (« crude fiber ») des auteurs anglais, qui correspond à la portion des glucides ayant résisté à l'extraction après ébullition avec H_2SO_4 puis NaOH dans des conditions bien précises. Cette méthode ne mesure cependant qu'une partie des fibres totales et les valeurs sont grandement sous-estimées. (SOUTHGATE, 1976)

Les fibres alimentaires peuvent être divisées en deux groupes en fonction de leur nature chimique : (GIERSH, 1983)

- les glucides non assimilables de la famille des polysaccharides comprenant :

- la cellulose
- et des polysaccharides non cellulosiques : hémicelluloses, pectines, gommés, mucilages
- une fraction non glucidique, la lignine, substance polymérique composée d'unités de phénylpropane.

La cellulose est un polymère linéaire de molécules de glucose; les hémicelluloses sont formées d'une grande variété de polysaccharides linéaires et ramifiés (arabino-galactose, xylose, mannose); les pectines sont des polymères de l'acide galacturonique auxquels sont associés d'autres polysaccharides (arabinose, galactose, arabino-galactose); les gommés et mucilages sont formés de glucose, galacturono-rhamnose, galactose, glucuronomannose et xylose.

On distingue également : (DUPIN, 1992)

- Les fibres insolubles dans l'eau composées de cellulose et de lignine; elles sont incomplètement fermentescibles et sont un constituant des selles,
- Les fibres solubles qui forment avec l'eau des gels ou des solutions plus ou moins visqueuses. Elles ont des propriétés plus intéressantes : elles sont entièrement dégradées dans le côlon, donc fermentescibles, ralentissent l'absorption intestinale des nutriments et ont un effet hypocholestérolémiant.

Dans les aliments, le pourcentage de fibres solubles est souvent inférieur à 50 % mais plus élevé dans les fruits et légumes que dans les céréales.

2.1.2.2. Origine

Les principaux aliments riches en fibres sont les céréales et les produits céréaliers (son de blé, farine de blé complet, etc.), certains fruits (noix, abricots, figes, pruneaux) et légumes (haricots secs, lentilles, pois), (dictionnaire médical Larousse). Les fruits et légumes contiennent surtout de la cellulose et de la pectine. (GIERSH, 1983)

Les céréales beaucoup moins hydratées que les fruits et les légumes apportent pour un même poids frais une quantité de fibres beaucoup plus grande. Celles-ci sont riches en hémicelluloses et sont contenues dans les enveloppes externes des graines (GIERSH, 1983)

La teneur en fibre d'une farine varie donc avec son taux de blutage. Une farine non raffinée contient 10% de son poids sous forme de cellulose, 6% en hémicellulose et 4% en lignine. (LIRON 1987)

Le son, résidu de la mouture des céréales est très riche en fibres, mais il contient en outre de nombreuses vitamines, protéines et est riche en minéraux.

| | fibres totales (g/100g) | | cellulose % | polysaccharides non cellulosiques % | lignine % |
|--------------------|-------------------------|-----------|-------------|--|-----------|
| | poids frais | poids sec | | | |
| farine blanche | | 3,45 | 19 | 80 | 1 |
| farine complète | | 8,70 | 18 | 72 | 10 |
| son de blé | | 48 | 18 | 74 | 7 |
| carotte | 3,70 | 28,6 | 40 | 60 | traces |
| chou | 2,83 | 32,6 | 63 | 37 | traces |
| pomme | 1,42 | 9,2 | 33 | 66 | <1 |

Tableau 15 : Proportion des différents types de fibres dans quelques aliments
(SOUTHGATE, 1976),(Fiber analysis table, 1978)

2.1.2.3. Propriétés physiques et chimiques des fibres alimentaires :

- Capacité d'absorption de l'eau :

La capacité d'absorption d'eau est liée au pouvoir de gonflement des fibres ; cette propriété est liée à la présence des polysaccharides, la lignine n'ayant pratiquement pas de pouvoir hydrophile. Elle décroît des pectines, gommés et mucilages qui ont une grande affinité pour l'eau, aux hémicelluloses, puis à la cellulose, à faible affinité pour l'eau. En effet lorsque le son de blé est riche en cellulose et hémicellulose, il peut absorber jusqu'à six fois son poids d'eau. La gélification des fibres est la résultante de l'association non ordonnée de polymères en solution formant de vastes réseaux tridimensionnels rigides entre les mailles desquels peuvent être piégés diverses molécules. Le pH, la force ionique, la température, influencent la formation des gels. Les pectines et l'amylose peuvent former des gels.

Cette hydratation entraîne une augmentation du poids des selles et une diminution de leur consistance. Ces effets rendent compte de l'action régulatrice des fibres sur le transit intestinal. (GIERSH, 1983), (APFELBAUM, 1997)

- Production d'acide gras volatils (AGV)(acétate, propionate et butyrate)

Elle est due à la dégradation des fibres dans le côlon par les enzymes bactériennes. Cette dégradation est presque complète pour les substances pectiques, de l'ordre de 85% pour les hémicellulose, 15% pour la cellulose et nulle pour la lignine. Ces acides gras ont un effet cathartique renforçant l'action laxative propre des fibres, et seront un substrat énergétique pour l'épithélium colique et le reste de l'organisme. Le butyrate est un facteur trophique et antimutogène pour l'épithélium colique. (GIERSH, 1983), (MESSING, 1995)

- Adsorption des sels biliaires

Cette propriété est d'autant plus importante que la fibre est riche en lignine. Les fibres contribuent ainsi à augmenter l'élimination des sels biliaires, à diminuer leur cycle entérohépatique et à augmenter leur synthèse hépatique. (HEATON, 1975) La répercussion de ces effets sur la composition de la bile et sur les taux de lipides sanguins reste encore discutée.

- Apport énergétique faible en raison de leur dégradation et absorption réduite. Cet apport est difficile à estimer avec précision. (GIERSH, 1983)
- Augmentation de la teneur en graisses et en dérivés azotés des selles lors de l'augmentation de la ration alimentaire en fibres. (GIERSH, 1983)
- Élimination accrue de certains minéraux dûe à l'action chélatrice de l'acide phytique ; celui-ci est associé aux fibres dans les enveloppes des grains de céréales. (GRENIER-GIERSH 1983), (APFELBAUM, 1997)
- Amélioration de la tolérance glucidique car les fibres augmentent le volume et la viscosité du bol alimentaire, diminuent la vidange gastrique, modifient la réponse de l'axe entéro-insulaire et diminuent l'absorption intestinale. Les fibres visqueuses (gomme, pectine) ont un effet marqué sur la glycémie. (MESSING, 1995) (BJORCK, 1994)

2.1.2.4. Propriétés physiologiques des fibres

(MESSING, 1992)

L'intérêt porté aux fibres alimentaires est relativement récent. Il est né il y a une quinzaine d'années, à partir d'observations épidémiologiques. Des auteurs comme Burkitt, Trowell (BURKITT, 1974) (TROWELL H.C., 1976), promoteurs de « l'hypothèse fibres », ont comparé l'incidence des maladies digestives chez les Européens et chez les Africains et ont relié les différences observées à la consommation en fibres alimentaires de chacune de ces populations.

Cette hypothèse sera à l'origine de nombreux travaux expérimentaux et cliniques. C'est essentiellement en pathologie digestive, que les fibres alimentaires ont suscité le plus d'espoir. De plus, leurs propriétés potentielles hypoglycémiantes et hypocholestérolémiantes ont ouvert des perspectives d'avenir.

L'intérêt pour les substances de charge est encore plus récent. Il a été suscité par l'augmentation des troubles métaboliques liés à une alimentation hypercalorique (obésité, maladies cardio-vasculaires...) et d'autre part l'engouement du consommateur pour les produits allégés.

Quelles sont les répercussions nutritionnelles des fibres alimentaires ? Et comment évaluer leurs conséquences pour la santé du consommateur ?

- Fibres et constipation (CHERBUT, 1989)

Bien que les facteurs responsables de la constipation soient multiples, ce trouble est en grande partie lié à un mode de vie et à un régime déficient en fibres alimentaires.

En augmentant la sécrétion fécale, les fibres alimentaires permettent de prévenir et même de guérir la constipation. En effet les fibres de céréales, peu fermentescibles, augmentent le poids

humide des selles. De plus leur poids moléculaire, lorsqu'il est peu élevé, leur confère un pouvoir osmotique, ce qui a pour effet d'attirer l'eau dans la lumière intestinale.

Cet excès d'eau, éliminé dans les fèces, peut entraîner l'apparition de diarrhées lorsque les substances de charges sont consommées à des doses trop importantes.

A cette augmentation du volume des selles est généralement associée une accélération de la vitesse du transit intestinal par stimulation des contractions du côlon favorisant la défécation. Il a été établi une corrélation entre le poids des fèces et le temps de transit. Il montre que :

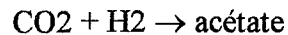
- 1) le temps de transit diminue rapidement lorsque le poids des selles augmente jusqu'à 200g/jour chez l'homme ; ce ralentissement est dû à la résistance physico-chimique qu'exercent les fibres sur les mouvements de propulsion.
- 2) l'augmentation du poids fécal au dessus de cette valeur ne modifie que peu significativement le temps de transit; la droite de corrélation devient alors quasiment parallèle à l'abscisse.

Cette observation explique que les effets des fibres soient plus marqués lorsque le transit est lent. Les individus présentant un transit ralenti ont une excrétion fécale très réduite. La consommation de fibres peu dégradables permet l'accroissement du volume fécal et ainsi l'accélération du transit. En revanche, chez les individus avec un transit bien régulé, l'excrétion fécale est suffisamment importante et l'apport de fibres alimentaires, bien qu'augmentant le poids des selles, modifie peu le temps de transit.

Le transit intestinal, bien que contrôlé en grande partie par cet effet mécanique des fibres (effet d'encombrement), est également régulé par les produits de la fermentation bactérienne. Les fibres fermentescibles exercent aussi un effet d'encombrement dû à l'augmentation de la masse bactérienne dans le côlon. Leur action est renforcée par la production d'acides gras volatils qui favorisent la motricité gastrique. Il est donc établi que globalement, un régime riche en fibres complexes apportées par un ensemble de produits végétaux, accélère le transit digestif.

Les principaux gaz apparaissant dans le côlon sont l'hydrogène, le dioxyde de carbone et le méthane. Le volume de gaz produit ainsi que les quantités relatives de chaque gaz sont très variables selon les individus. L'importance de la production gazeuse est surtout liée aux symptômes digestifs qu'elle provoque. Ceux-ci incluent les coliques abdominales, les

sensations de distension, les désordres coliques. Cependant, l'acétogénèse permet de récupérer une partie de l'énergie qui serait autrement éliminée sous forme de gaz :



Les principaux acides gras volatils (AGV) (acides acétique, propionique et butyrique) sont absorbés par la muqueuse colique. Le mécanisme de transport est mal défini, mais l'absorption des acides gras volatils stimule l'absorption de l'eau et du sodium et la sécrétion de bicarbonate. Après leur absorption par les cellules épithéliales, les acides gras volatils, en particulier l'acide butyrique, fournissent une source importante d'énergie. Les acides acétique et propionique sont transportés dans le foie où ils sont disponibles pour le métabolisme énergétique. La quantité totale et la proportion des acides gras volatils produits varient en fonction des caractéristiques physiques et chimiques des substrats fermentés. En moyenne un gramme de fibres fermentescibles fournit 0,65 grammes d'acides gras volatils.

- Fibres et cancer colo-rectal (CHERBUT, 1989) (LEDERER, 1995)

Les effets importants qu'ont les fibres alimentaires sur les fonctions du côlon ont des conséquences démontrées sur la santé des consommateurs.

La consommation de fibres alimentaires permet de diminuer la pression intraluminaire dans le côlon et prévient ainsi la formation de diverticules dans la paroi colique. En revanche, l'implication d'un régime pauvre en fibres alimentaires dans l'étiologie du syndrome du côlon irritable n'a jamais été démontré de façon incontestable. De la même façon, il paraît peu probable que les fibres alimentaires aient une valeur thérapeutique pour les maladies inflammatoires du côlon.

La consommation de fibres alimentaires est seulement une des nombreuses variables alimentaires qui pourrait être impliquées dans l'étiologie du cancer du côlon. Il semblerait

toutefois qu'il existe une relation inverse entre la ration de fibres et la fréquence de cancer colorectal. Cinq facteurs permettraient de l'expliquer :

- 1) Le volume des selles : plus la ration de fibres est importante, plus le volume des selles est important, or l'impact des substances cancérigènes sur la muqueuse intestinale dépend de leur concentration.
- 2) Le temps de transit : l'impact d'une substance cancérigène présente dans le tube digestif dépend du temps de contact.
- 3) Le pouvoir d'adsorption des fibres : les fibres alimentaires diluent et captent les substances cancérigènes présentes dans le tube digestif et les éliminent avec elles. Dans le son de blé, c'est la cellulose qui a ce pouvoir d'adsorption.
- 4) L'inhibition de la β -glycuronidase : cette enzyme, surtout présente chez les personnes ayant un régime riche en graisse, détache l'acide glycuronique des substances auxquelles il était attaché. Or beaucoup de substances sont estérifiées avec l'acide β -glycuronique, ce qui a pour effet de diminuer leur activité. Un régime riche en fibres permet de diminuer l'activité de cette enzyme d'où plusieurs conséquences :
 - certaines substances cancérigènes resteraient estérifiées à l'acide glycuronique et seraient ainsi éliminées
 - le cholestérol serait de la même façon éliminé dans les selles, d'où un effet bénéfique sur la cholestérolémie.
- 5) La production de butyrate : le butyrate est un substrat énergétique pour les colocytes. Il stimule la prolifération des cellules intestinales normales. In vitro, il est clairement établi que le butyrate exerce un effet antiprolifératif puissant sur de nombreuses lignées cellulaires, tout en favorisant la différenciation cellulaire

Le risque relatif d'apparition du cancer du côlon chez l'homme pourrait diminuer avec une consommation importante de glucides complexes, en particulier de fibres alimentaires. Ainsi ce risque est égal à 1 pour une consommation quotidienne en fibres inférieure à 19g; il diminue à 0,29 lorsque la consommation devient supérieure à 19g. Ce risque est plus particulièrement diminué par les fibres de céréales et les fibres de légumineuses.

Les fibres alimentaires ont donc des effets connus et incontestables sur la physiologie du côlon. Les conséquences de ces effets sont en grande partie bénéfiques pour la santé du consommateur.

- Fibres et tolérance glucidique (CHERBUT, 1989)

Le concept selon lequel une ingestion régulière et importante de fibres alimentaires pourrait protéger l'homme du diabète a été émis durant les vingt dernières années à partir d'observations épidémiologiques, cliniques et expérimentales. Plus récemment, le lien entre fibres et diabète a été renforcé, démontrant le bénéfice thérapeutique des fibres chez les patients diabétiques.

Les fibres de céréales semblent avoir un faible effet sur la réponse glycémique post prandiale immédiate : la glycémie ne semble diminuer que 2 heures après le repas. En revanche une ingestion chronique de son, pendant plusieurs mois, semblerait capable d'améliorer la tolérance glucidique, le son d'avoine étant plus actif que le son de blé. (GIERSH, 1983)

La glycémie et les besoins en insuline peuvent être modifiés par les fibres par divers mécanismes :

1) digestif : les fibres peuvent ralentir l'absorption des sucres en les adsorbant ou en altérant l'activité enzymatique du tube digestif. Le ralentissement de l'évacuation gastrique et du débit intestinal pourraient être des facteurs importants de cette diminution de l'absorption. Dans les légumineuses, et dans une moindre mesure pour le pain complet, la digestion de l'amidon est ralentie par les structures cellulaires qui englobent les grains d'amidon.

2) hormonal : la diminution de la sécrétion d'insuline, malgré l'amélioration apparente de l'utilisation du glucose, suggère une sensibilité accrue par les fibres. On observe également une réduction de la sécrétion de glucagon. Les produits de la fermentation des fibres affectent également la production hépatique de glucose : les acides gras volatils stimulent la glycolyse, c'est-à-dire le métabolisme du glucose. L'intérêt de l'utilisation de glucides complexes,

incluant les fibres, dans l'alimentation du diabétique (pain complet, pâtes, légumineuses, ...) est désormais reconnu. En effet, si l'alimentation des diabétiques est restreinte en aliments glucidiques, une part plus élevée de l'énergie sera apportée sous forme de lipides et de protéines, ce qui risque d'aggraver les effets secondaires du diabète.

Les fibres alimentaires pourraient donc jouer un rôle dans la prévention et le traitement de certaines maladies du métabolisme glucidique. Toutefois les mécanismes d'action restent à élucider.

- Fibres et métabolisme lipidique

Parmi les paramètres impliqués dans l'étiologie des maladies cardio-vasculaires, la nature de l'alimentation joue un rôle prépondérant. Les excès de graisses et de cholestérol ont été dénoncés depuis longtemps.

Quelle que soit son origine, le cholestérol n'est pas directement oxydé par les cellules ; il ne peut être éliminé que par la voie biliaire sous forme de sels biliaires (synthétisés à partir du cholestérol) ou directement sous forme de cholestérol.

Le taux de mortalité par maladies cardio-vasculaires serait inversement corrélé à l'ingestion de fibres alimentaires. Il existerait une baisse des taux sériques de cholestérol et de triglycérides après un enrichissement du régime alimentaire en fibres de son de blé. Toutefois cette diminution semble significative seulement chez les sujets hypercholestérolémiques ou avec des triglycéridémies élevées. (GIERSH, 1983)

Les mécanismes d'action des fibres alimentaires sont mal connus et probablement multiples. Les fibres agiraient en affectant l'absorption lipidique intestinale, en augmentant l'excrétion des sels biliaires ou en affectant le métabolisme des lipides. Certaines fibres semblent susceptibles de modifier l'activité des enzymes pancréatiques impliquées dans la digestion des lipides. Comme pour les glucides, les fibres contribuent à étaler l'absorption des glycérides sans affecter sensiblement leur absorption globale dans l'intestin grêle. (Cette action semble peut souhaitable car elle amènerait dans le gros intestin des quantités importantes d'acides gras

potentiellement cytotoxiques). Les fibres ralentissent l'absorption des lipides et la prolongent à un niveau plus distal dans l'intestin grêle. Ainsi, elles peuvent conduire à une altération de la taille et de la structure des lipoprotéines (riches en triglycérides) libérées par l'intestin, cela influencerait leur vitesse de dégradation dans l'organisme. Il est intéressant que les fibres diminuent la lipémie post prandiale puisque certaines particules riches en triglycérides pourraient avoir un rôle athérogène.

Les effets des fibres sur la digestion des lipides exogènes sont sans doute mineurs par rapport à ceux sur le cycle entérohépatique des sels biliaires. Quel que soit l'apport lipidique, les fibres sont susceptibles de favoriser l'élimination du cholestérol, en particulier en diminuant l'absorption iléale des sels biliaires. Cette propriété semble corrélée avec la viscosité des fibres, cependant, d'autres facteurs (degré de méthylation, cations véhiculés par les fibres, polyphénols associés) peuvent interférer sur le recyclage entéro-hépatique du cholestérol et des sels biliaires. Des amidons résistants ou certains oligosaccharides ont aussi un effet d'entraînement des sels biliaires vers le gros intestin.

Dans le gros intestin, les fibres alimentaires sont détruites et les sels biliaires libérés pourraient devenir cytotoxiques si les conditions du milieu favorisaient la production d'acides biliaires secondaires. Il semble justement que les fermentations empêchent cette production, mais il est bien évident que l'effet des fibres sera facilité si la ration n'est pas trop riche en cholestérol exogène.

Il faut noter que lorsqu'une fibre a une action hypocholestérolémiant efficace (le son d'avoine peut la faire baisser de 20 %) elle tend à élever en retour la cholestérogénèse hépatique, voire intestinale, ce que reflète l'élévation de l'activité de l'HMG CoA réductase (enzyme limitante pour la synthèse du cholestérol). Dans la mesure où l'expression de l'HMG CoA réductase est liée à celle des récepteurs aux lipoprotéines (récepteur apoB/E des LDL), on peut considérer que cette adaptation est favorable puisque les hypercholestérolémies les plus graves sont liées à l'inverse à un déficit d'activité des récepteurs aux lipoprotéines. (REMESY, 1994)

Toutefois il ne faut pas surestimer l'influence des fibres alimentaires sur les paramètres du métabolisme des lipides. Ceux-ci semblent pouvoir être plus facilement modifiés par un changement simple de la nature des graisses alimentaires que par une forte consommation de fibres alimentaires. Mais un régime riche en fibres est souvent pauvre en lipides ; cette influence indirecte sur le métabolisme des lipides est probablement considérable.

- Fibres et métabolisme énergétique

Les fibres alimentaires semblent capables de modifier la prise énergétique. Ce contrôle de la prise énergétique est probablement dû à plusieurs mécanismes indirects. Les fibres alimentaires changent la texture et la palabilité des aliments, elles diminuent leur densité énergétique. De plus, les effets physiologiques des fibres, tels que le ralentissement de la vidange gastrique, la distension de l'intestin grêle due à l'augmentation du volume du chyme, l'étalement de la digestion, la modification de la cinétique de glycémie post prandiale, peuvent contribuer à la satiété plus rapide du consommateur.

La valeur énergétique des fibres est directement liée à leur fermentescibilité et à la production d'acides gras volatils qui en résulte. Ainsi les fibres de céréales pourraient fournir environ 2,5 kcal/g d'énergie métabolisable et les fibres de fruits et légumes fourniraient 3,1 kcal/g. Sachant que la consommation moyenne de fibres de céréales et de fibres de fruits/légumes est respectivement de 8 g/jour et de 16 g/j en France, cela signifie que les fibres alimentaires pourraient contribuer pour environ 70 kcal/jour, soit 2,8 %, à l'énergie métabolisable d'un régime équilibré à 2500 kcal/jour ; cela reste négligeable chez l'homme sain.

- Fibres et biodisponibilité des minéraux (POINTILLART, 1992)

Un des effets négatifs possible d'une forte consommation de fibres alimentaires est une diminution de la biodisponibilité des minéraux apportés par l'aliment (Ca, Mg, Zn, Fe, Cu). Les fibres sont capables de fixer les minéraux, soit par échange cationique, soit en les piégeant dans leur structure. D'autre part, elles peuvent agir en diluant la concentration des minéraux dans le chyme intestinal ou en accélérant le transit de celui-ci.

La capacité des fibres à adsorber des minéraux dépend de leur composition chimique : elle est directement liée à la présence de groupements ionisables, en particulier d'acide uronique (dans les fruits et les légumes), et de phytates (surtout dans les céréales). Les pectines possèdent une importante capacité d'échange de cations et, leurs capacités à adsorber le calcium est inversement proportionnel à leur degré de méthylation ou d'acétylation. Pour la cellulose, cette

capacité est faible, contrairement aux hémicelluloses qui possèdent quelques groupements uroniques.

Les phytates sont des sels de l'acide phytique ou acide myo-inositol hexaphosphorique. Les aliments riches en fibres sont également souvent riches en phytates : c'est le cas notamment des pains complets, des flocons d'avoine, des céréales complètes mais aussi des fruits secs (noisettes, cacahuètes). Par contre, les légumes et les fruits, s'ils contiennent des fibres, ne contiennent pas (ou peu) de phytates.

| ALIMENT | FIBRES | PHYTATES |
|------------------|--------|----------|
| Pain blanc | 1,9 | 0,03-0,2 |
| Pain complet | 6,3 | 0,3-0,8 |
| Son de blé | 45 | 3 |
| Flocons d'avoine | 6,7 | 0,5-1 |
| Noisettes | 6,1 | 1 |
| Pommes | 2,5 | 0,06 |

Tableau 16 : Richesse en fibres et en phytates de quelques aliments

(en % du produit brut)

(POINTILLART, 1992)

Les effets néfastes des phytates sont largement conditionnés par la présence ou l'absence d'une phosphatase particulière : la phytase. Cette enzyme, en déphosphorylant progressivement l'acide phytique (6 radicaux phosphates, aboutissant à des produits de dégradation variés : inositol penta-, tétra-, tri-, di- et monophosphates, ces trois derniers pouvant franchir la barrière intestinale) lui ôte ses capacités de chélation avec les cations et en particulier la propriété de former des chélates insolubles avec le zinc et le calcium, rendant ceux-ci difficilement absorbables.

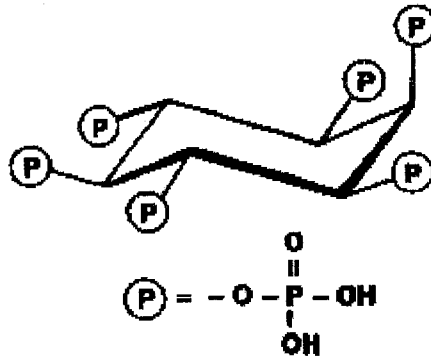


Schéma 8 : Structure de l'acide phytique
(PONTILLART 1992)

Il existe deux types de phytases :

- la phytase végétale

Lorsque les céréales et les graines renferment à l'état quiescent une forte activité phytasique, celle-ci peut s'exercer à deux niveaux : soit au cours de la fabrication des aliments à partir des matières premières végétales (cuisson, autoclave, trempage, fermentation, panification, etc...), soit au cours de la première étape de la digestion, dans l'estomac, car la phytase végétale a un pH optimal acide (vers pH = 5) ; cependant, elle est généralement inhibée à des pH trop bas (de 3 à 1). Les céréales à forte activité phytasique sont le seigle, le blé et les sous produits tels que les sons, du fait de la présence de la phytase dans les enveloppes du grain. Toutefois, la phytase est plus dispersée dans le grain que ne le sont les phytates, le plus souvent localisés dans la couche d'aleurone (protéines de réserve du grain).

Ainsi, pour le grain de blé, 34 % de l'activité phytasique se trouve dans l'endosperme, et 40 % dans l'aleurone, alors que 87 % des phytates se trouvent dans l'aleurone.

Les phytases ont une activité optimale autour d'une température moyenne de 50°C mais elles sont vraisemblablement inactivées au cours de la cuisson. Ainsi pour le blé, 100 % de l'activité est perdue après un chauffage de 10 minutes à 70°C.

La préparation et l'utilisation des céréales ont donc une grande influence sur l'hydrolyse préalable des phytates avec vraisemblablement des influences contradictoires : au cours de la

panification, la phytase du blé peut hydrolyser tout ou une partie des phytates (mais, la cuisson détruisant les phytases, les pains non levés conserveront leurs phytates). En effet, le levage de la pâte à pain se fait avec des levures à forte activité phytasique, laquelle s'ajoute à celle en provenance du blé (ou du son).

Toutefois d'autres facteurs interfèrent avec l'activité de la phytase. Par exemple le calcium forme des sels stables, résistant à l'attaque de l'enzyme ; la combinaison des phytates avec certaines protéines sous forme de complexes dans les graines les rend moins vulnérables à l'attaque phytasique, et la teneur élevée en phytates de certaines farines complètes peut en elle-même inhiber l'action de la phytase. Le taux d'extraction influe donc grandement sur la phytase et par la suite sur les effets négatifs des phytates. Il y a peu de probabilité par exemple pour que le pain blanc conserve beaucoup de phytates après panification avec levures alors que le pain complet, dans les mêmes conditions, conserve près de 70 % de ses phytates.

- La phytase intestinale

L'autre phytase à prendre en considération est celle éventuellement présente dans le tube digestif. Cette enzyme a été mise en évidence chez le rat et le poulet, mais aucune valeur n'a été rapportée chez l'homme.

En résumé, on peut affirmer que le blé présente une possibilité importante de réduire le pouvoir antinutritionnel des phytates grâce à l'action de la phytase contenue dans la farine et le pain. Et il est important de constater que la majorité des problèmes de déficit en calcium, fer et zinc ont été observés chez l'homme, dans les régions à forte consommation de pains plats non levés et cuits à partir de farines peu blutées, conditions dans lesquelles la phytase avait peu de chances d'agir ou risquait d'être détruite.

Les études épidémiologiques comparant le statut des populations consommant de grandes quantités de fibres à celui de populations adaptées à des régimes carnés, pauvres en fibres, ne montre pas de différences significatives. Ainsi, si les fibres alimentaires peuvent fixer des minéraux et des oligo-éléments de l'aliment, en revanche une consommation élevée de produits

naturellement riches en fibres augmente généralement l'apport de minéraux et d'oligo-éléments. Ainsi, lorsqu'un régime équilibré riche en fibres est consommé, l'effet net sur la balance minérale n'est pas forcément négatif. (GIERSH, 1983)

Il ne faut pas uniquement considérer la digestibilité dans l'intestin grêle, mais aussi tenir compte du rôle des minéraux dans le gros intestin : le développement des fermentations nécessite une accumulation de cations dans le gros intestin qui contribuent au maintien du pH en neutralisant la production d'acides organiques. Il semble exister au niveau du gros intestin, un système tampon particulier impliquant le phosphate de calcium insoluble et les acides organiques majeurs (AGV normalement). La production d'acides organiques solubilise une partie du calcium et du phosphate et contribue en retour à maintenir le pH. Ce système ne fonctionne que parce que l'excès de calcium total ingéré est largement éliminé par voie fécale. Chez l'homme, les concentrations fécales en calcium total seraient de 150 mM, avec environ 10 % sous forme soluble.

Les flux ioniques au niveau du côlon sont complexes puisque, parallèlement à l'absorption des acides gras volatils, il existe une sécrétion d'anions (chlorures, bicarbonates) concomitante à l'absorption de certains cations (potassium, calcium, magnésium). La partie distale du côlon est le site d'une réabsorption notable de sodium qui peut être affectée par les acides gras volatils ; de plus ces acides peuvent favoriser l'absorption du calcium et du magnésium chez l'homme. Il ne faut pas simplement voir l'absorption dans le gros intestin comme un processus compensant une digestibilité moindre dans l'intestin grêle mais aussi comme un processus important pour la physiologie du gros intestin grâce à la présence de concentrations élevées en calcium dans la lumière colique, qui semble jouer un rôle protecteur vis-à-vis du risque de cancers recto-coliques. On a attribué pendant longtemps un rôle antinutritionnel à l'acide phytique : des travaux récents indiquent, au contraire, qu'il pourrait avoir un rôle protecteur très significatif au niveau du côlon, peut-être en inhibant la production de radicaux libres.

D'une manière générale, les fibres pourraient contribuer à déplacer les sites d'absorption vers les parties distales du tube digestif ; ceci se conçoit puisque de nombreux minéraux sont associés aux fibres alimentaires (magnésium) et ne seront disponibles qu'après la dégradation microbienne des fibres. La digestibilité de certains oligo-éléments présents dans les aliments végétaux (Fe, Zn, ...) est moindre que celle observée à partir d'éléments d'origine animale ;

cependant, les végétaux contribuent de manière significative au statut minéral. (REMESY, 1994)

Actuellement, il n'existe pas de recommandation nutritionnelle pour les fibres alimentaires. Les raisons sont multiples. Les réponses physiologiques chez l'homme à une augmentation de la consommation de fibres dépendent de la nature des fibres (fibres de céréales *versus* fibres de fruits/légumes). Il est actuellement difficile de déterminer quelle quantité de fibres est nécessaire à un fonctionnement optimal du tube digestif. De plus, il existe une grande variabilité des réponses entre les individus. Il n'a pas été établi à partir de quel taux de fibres, la diminution de la digestibilité des minéraux pouvait modifier le statut minéral de l'homme.

Mais il existe un consensus général pour penser qu'une augmentation de la consommation des fibres est désirable dans les pays industrialisés. Les effets positifs des fibres sont probablement plus importants que de possibles effets négatifs. Ainsi une consommation régulière de pain complet peut avoir des effets bénéfiques sur la santé : effet favorable sur la constipation sans effets agressifs sur le tube digestif, effet favorable sur la digestion, et possible effet positif sur l'incidence des cancers côlo-rectaux.

2.1.3. Les vitamines

Les vitamines contenues dans le blé sont essentiellement des vitamines du groupe B (vitamines B1, B2 et PP). Elles agissent comme co-enzymes et interviennent dans le métabolisme des hydrates de carbone en particulier. La proportion en vitamines est très différente entre le pain blanc et le pain complet. En effet, les vitamines sont contenues dans les enveloppes du grain de blé, et plus on augmente le taux d'extraction de la farine, moins on retrouve de vitamines dans le pain. L'enrichissement du pain par addition de divers facteurs vitaminiques et minéraux est interdit en France, contrairement à certains pays, comme les États-Unis par exemple. (Dictionnaire Médical Larousse)

2.1.3.1. La vitamine B1 ou thiamine

C'est une vitamine hydrosoluble qui intervient notamment dans le métabolisme énergétique des cellules. Les apports recommandés sont de 0,4 à 1,2 mg par jour pour les enfants, de 1,3 mg pour les adolescents et les femmes, et de 1,5 mg pour les hommes. Les besoins en vitamine B1 sont plus élevés en cas de grossesse, d'allaitement et aussi en cas d'alcoolisme chronique (car alors, les besoins augmentent tandis que les apports alimentaires sont souvent insuffisants).

Si le béribéri, dû à une carence extrême en vitamine B1, est devenu rare dans les pays industrialisés, on y rencontre des cas, moins graves, de carences, liés à un apport alimentaire insuffisant chez les sujets alcooliques, ou à une nutrition par perfusions non supplémentée ; ces carences entraînent une fatigue, une perte d'appétit et de poids, et des troubles neurologiques (polynévrites), psychiques, cardiaques et digestifs, réversibles par l'administration de vitamine B1. Le risque d'hypervitaminose est très faible, la vitamine B1 ne devenant toxique qu'à des doses très élevées (supérieures à 100 fois l'apport quotidien conseillé).

Une ration de 300 g de pain blanc chez l'homme (taux d'extraction oscillant entre 75 et 78 %) couvre 15 % des besoins quotidiens en cette vitamine, et cette même ration en pain complet couvre 50 % de ses besoins.

La vitamine B1 est également trouvée dans de nombreux aliments : levure de bière, légumes secs, viande (surtout le porc et les abats comme le foie et les rognons), poissons, œufs, lait et produits laitiers.

2.1.3.2. La vitamine B2 ou riboflavine

C'est une vitamine hydrosoluble intervenant dans les réactions qui libèrent l'énergie nécessaire aux cellules, ainsi que dans le métabolisme des lipides, des protéines et des glucides. Les apports journaliers conseillés sont de 0,6 à 1,4 mg par jour pour les enfants, de 1,5 mg pour les femmes et les adolescentes, et de 1,5 mg pour les hommes, les adolescents, les femmes enceintes et allaitant.

La carence en vitamine B2, essentiellement liée à une malabsorption digestive, à un apport alimentaire insuffisant ou à une consommation excessive d'alcool, peut entraîner des lésions de la peau et des muqueuses ainsi que des troubles oculaires. L'administration de vitamine B2 est indiquée dans la carence correspondante et en cas de perlèche (inflammation de la commissure de lèvres) et de crampes musculaires.

Une ration de 300 g de pain blanc assure 7 % de besoins quotidiens et 300 g de pain complet 20 %.

La vitamine B2 est également trouvée dans le lait et les produits laitiers, les œufs, la viande (surtout les abats), le poisson, les légumes à feuilles vertes et la levure.

2.1.3.3. La vitamine PP ou niacine ou vitamine B3

C'est une vitamine hydrosoluble impliquée dans les réactions d'oxydoréduction de la cellule. Cette vitamine correspond en fait à deux composés : l'acide nicotinique et le nicotinamide.

Les apports nutritionnels conseillés sont de 6 à 14 mg par jour pour l'enfant, de 15 à 18 mg pour l'adulte, de 20 mg lors de la grossesse ou l'allaitement.

La carence en vitamine PP, décrite sous le terme de pellagre, est rare et résulte, soit d'apports alimentaires insuffisants, soit d'interactions médicamenteuses (certains antituberculeux et antiparkinsoniens). Dans les pays industrialisés, elle atteint surtout les sujets âgés, alcooliques ou soumis à une nutrition parentérale non supplémentée. Elle se traduit par des troubles cutanés, digestifs, psychiques et hématologiques et se traite par administration médicamenteuse de vitamine PP.

Une ration de 300 g de pain blanc par jour permet de couvrir 13 % des besoins en cette vitamine, alors que le pain complet couvre 80 % des besoins.

Les principales sources alimentaires de la vitamine PP sont les céréales bien sûr, mais aussi les viandes (foie et rognon), les poissons, les œufs, la levure et les champignons.

2.1.3.4. La vitamine B6 ou pyridoxine

C'est une vitamine hydrosoluble intervenant notamment dans le métabolisme des acides aminés, du glycogène, des stéroïdes, de l'hémoglobine, des enzymes et dans la synthèse de certains neurotransmetteurs, ainsi que dans les réactions immunitaires. Le terme de vitamine B6 regroupe trois substances apparentées, dont la plus répandue est la pyridoxine, les deux autres étant le pyridoxamine et le pyridoxal.

Les apports journaliers conseillés sont de 0,6 à 1,6 mg pour les enfants, de 2 à 2,2 mg pour les adolescents et les adultes ; ils sont légèrement supérieurs pour les femmes enceintes, allaitant ou prenant des contraceptifs oraux (2,5 mg).

De rares carences peuvent apparaître en cas de malabsorption digestive, d'augmentation des besoins, lors de certaines maladies génétiques ou au cours de certains traitements (prise d'isoniazide ou d'oestroprogestatifs, hémodialyse). Elles se manifestent par un amaigrissement, des atteintes cutanées (peau sèche et prurigineuse), des troubles neurologiques, une glossite, une anémie, une irritabilité, voire une dépression.

Une ration de 300 g de pain blanc chez l'homme permet de couvrir 15 % des besoins quotidiens en vitamine B6, et une ration identique de pain complet couvre 60 % des besoins.

La vitamine B6 est présente dans de nombreux aliments : la levure, la viande (foie et rognon surtout), le poisson, les légumes frais et secs, les fruits (oléagineux en particulier) et le lait. Par ailleurs, la flore du tube digestif en synthétise une certaine quantité.

2.2. BESOINS NUTRITIONNELS : CE QUE LE PAIN PEUT NOUS APPORTER

Un repas sans pain nous paraît inconcevable, mais considérons nous le pain comme un aliment à part entière ou comme un produit d'accompagnement ?

Notre consommation en pain a évolué dans le temps, mais quelle incidence cette évolution a-t-elle sur notre santé ?

2.2.1. Équilibre alimentaire et évolution de la consommation du pain.

Place dans la société.

Dans tous les pays industrialisés, les habitudes alimentaires ont beaucoup plus changé durant les 40 ou 50 dernières années, qu'au cours des siècles précédents. De nouveaux aliments ont été introduits dans la ration, d'autres ont pratiquement disparu de la composition des repas. Ces profondes modifications comportent des aspects positifs et des aspects négatifs. Elles accompagnent les transformations de la société que ce soient des évolutions technologiques, économiques, culturels, sociologiques, et même politiques.

2.2.1.1. Évolution de l'alimentation en France et évolution de la consommation en pain. (HERCBERG 1985)

- Évolution de la consommation des aliments dans la population globale

Les quantités de pain consommés en France par personne et par jour ont considérablement chutées au cours du siècle dernier : (INSEE 1997)

| Année : | Consommation (g/personne/jour) : |
|---------|----------------------------------|
| 1900 | 900 |
| 1920 | 630 |
| 1950 | 325 |
| 1960 | 265 |
| 1970 | 200 |
| 1980 | 175 |
| 1990 | 160 |
| 1995 | 160 |

Ces données moyennes masquent d'importantes différences de consommation entre les ruraux et les citadins, mais également entre les diverses catégories socio-professionnelles. Mais l'évolution semble se faire dans le même sens dans tous les groupes de population.

Par contre la consommation de biscottes a beaucoup augmenté de 1950 à 1974. Depuis, elle semble stabilisée tandis que celle des pains grillés, pains de mie et pâtisseries, continue de progresser.

La quantité totale de blé (blé tendre et blé dur) utilisée en alimentation humaine est passée de 99 kg par personne et par an en 1960 à 74 kg en 1978.

Dans tous les pays industrialisés, la tendance est la même, les céréales sont moins consommées que par le passé.

De même, la consommation d'autres aliments a diminué, avec une forte baisse pour les aliments suivants :

- Les pommes de terre. Leur consommation est passée de 153 kg / an / habitant en 1950 (420 g par jour) à 62 kg en 1990 (170 g par jour) ; soit une diminution de 59 %.

- Les légumes secs. On en consommait 3,1 kg / an / habitant en 1950 (8 g / jour) et seulement 1,6 kg en 1990 (4 h / jour), soit une diminution de 50 %.
- La consommation de bières et cidres a diminué de 8,5 % en 40 ans, celle d'apéritifs a diminué de 11 %, et celle d'eaux de vie et liqueurs, de 20 %.

Par contre la consommation d'autres groupes de denrées a considérablement augmenté :

- Les crèmes glacées (comprenant aussi les sorbets et les gâteaux glacés) présentent l'augmentation la plus spectaculaire avec une consommation multipliée par 11 entre 1960 (1,05 litres / an / habitant) et 1990 (12,4 litres).
- Le sucre acheté en l'état, le miel et les confiseries : leur consommation, qui n'était que de 13,2 kg / an / habitant en 1950 augmente de 76 % jusqu'en 1970 (23,2 kg) pour ensuite redescendre à 14,7 kg.
- Les boissons gazeuses sucrées et jus de fruits ont vu leur consommation annuelle quintupler entre 1950 (8,4 litres / an / habitant) et 1990 (42,7 litres).
- Les fromages sont consommés 3,5 fois plus en 1990 (17 kg / an / habitant) qu'en 1950 (5 kg). Par contre, la consommation de lait et de yaourts n'a augmenté que d'un tiers (35 %) entre 1950 (77,6 kg / an / habitant) et 1990 (104,5 kg).
- La consommation de beurre a augmenté de 81 % entre 1950 (5,8 kg / an / habitant) et 1975 (10,5 kg) pour redescendre en 1990 à 8,1 kg. Les autres corps gras ont connu des augmentations de consommation plus considérables encore, avec 119 % pour les huiles (de 5,2 à 11,4 kg), actuellement plus consommés que le beurre et 156 % pour les margarines, qui représentent cependant une consommation faible (0,9 kg en 1950, 2,3 kg en 1990). Pour l'ensemble des matières grasses, l'évolution est de 85 % entre 1950 et 1990.
- La consommation des produits carnés a plus que doublé de 1950 à 1990 (44,4 à 90,9 kg / an / habitant), de même que le poisson qui est passée de 10,5 à 23,4 kg / an / habitants, soit une augmentation de 123 %.
- Contrastant avec la baisse de la consommation de pommes de terre, pain et légumes sec, les légumes et les fruits ont connu un succès toujours croissant avec une augmentation de 97% pour les légumes (de 59,6 à 117,2 kg / an / habitant de 1950 à 1990) et de 90 % pour les fruits (de 37,7 à 71,7 kg).

Ainsi, la structure de la consommation alimentaire a connu une transformation spectaculaire au cours des quatre dernières décennies. L'évolution la plus frappante est la diminution de la consommation de pain, de pommes de terres, de légumes secs et de vins, ainsi que l'augmentation de la consommation de produits carnés, de poisson, de fromages, de légumes, de fruits et de matières grasses. L'augmentation de la consommation de produits sucrés est considérable sous forme de crèmes et autres desserts glacés ainsi que de boissons sucrées tandis que la consommation de sucre acheté en l'état connaît une baisse depuis 1970, de même que la consommation totale de sucres depuis 1975.

- Les différences à l'intérieur du modèle de consommation français

La consommation diffère selon les régions : le pain est consommé à domicile, en 1991, en quantités qui varient de 40,7 kg / an / habitant dans le Nord à 46,5 kg dans le sud-ouest avec une consommation moyenne de 42,2 kg pour l'ensemble de la France. Cette consommation en 1991 ne représente que 46 à 60 % de la consommation des années 1965-1967, à une époque où les différences régionales de consommation étaient plus importantes : 69 kg / an / habitant dans le Nord, et 100,8 kg dans le sud-ouest.

En ce qui concerne les autres aliments, chaque région conserve des spécificités en matière de consommation alimentaire : le Nord se caractérise toujours par une forte consommation de pommes de terre et de beurre alors que la région Méditerranée privilégie les fruits et légumes (en dehors des pommes de terre), le poisson, les huiles à la place du beurre et une consommation de vin supérieure à la moyenne nationale. Mais le développement des méthodes modernes en agriculture et dans l'élevage, les progrès accomplis en technologie alimentaire, le développement des transports, les mouvements de population, l'urbanisation croissante, enfin l'organisation de sociétés de distribution solidement implantées sur l'ensemble du pays, ont contribué tout à la fois à assurer l'abondance alimentaire et à estomper les différences entre régions.

La comparaison de l'évolution des consommations en fonction du degré d'urbanisation met en évidence de grandes différences entre les zones rurales et les zones urbaines et, dans les zones urbaines, en fonction de la taille des agglomérations.

En 1965, le parisien a une ration énergétique inférieure de 29 % en comparaison avec celle des communes rurales. Sa ration glucidique est inférieure de 40 %, sa ration protéique est inférieure de 25 % et sa ration lipidique est inférieure de 13 %. Le pourcentage de calories lipidiques est donc nettement plus élevé, alors que la part des calories glucidiques est plus basse. La ration globalement plus faible des parisiens est liée principalement à une consommation moindre d'aliments végétaux.

Depuis 1965 il a été observé dans l'ensemble du pays une diminution de la ration énergétique, la consommation de lipides est stable, tandis que celle des protéines décroît légèrement, et que celle des glucides diminue fortement. Il en résulte une part plus importante du pourcentage des calories d'origine lipidique, un pourcentage de protéines stable ou légèrement croissant et un pourcentage de glucides qui se réduit. Pour la population agricole des communes rurales, les rations énergétiques et protéiques sont stables alors que la ration de lipides augmente et que celle des glucides diminue.

L'analyse des consommations en fonction de la taille des agglomérations montre que le pourcentage de calories lipidiques augmente en fonction de la taille des agglomérations, tandis que le pourcentage de calories protidiques varie peu et que la part des calories glucidiques diminue.

Les différences observées sont le reflet de l'évolution dans le temps du pourcentage de calories lipidiques dans l'apport énergétique pour la France entière. En effet, au cours de la période récente, l'accroissement de la part des lipides dans la ration est lié à la diminution de la part des glucides et peu à l'augmentation de celle des protides.

Il est également intéressant de noter que les « modèles de consommation » sont nettement différents entre catégories sociales dont les revenus sont pourtant voisins : les employés, comparés aux ouvriers, consomment moins de pain, moins de porc, nettement moins de sucre et de corps gras, mais plus de poulet et de poisson.

| ALIMENTS | AGRICULTEURS | OUVRIERS | CADRES SUP. | PROFESSIONS LIBÉRALES |
|------------------------|--------------|----------|-------------|--------------------------|
| Pain | 91,5 | 56,4 | 36,9 | 42,2 |
| Fruits | 66,3 | 59,5 | 78,2 | 95,0 |
| Viande de boucherie | 21,5 | 21,5 | 24,6 | 28,6 |
| Poisson frais | 5,6 | 4,8 | 6,1 | 8,7 |

Tableau 18 : Consommation d'aliments (kg / personne / an) en fonction des catégories socioprofessionnelles (INSEE, 1980)
(HERCBERG, 1985)

- Évolution qualitative de la consommation en France

L'évolution de l'alimentation dans les pays industrialisés s'est avérée positive sur certains points et négative sur d'autres. Manger beaucoup plus que ce qui est nécessaire pour couvrir les besoins, consommer trop de lipides ou trop d'alcool, avoir une alimentation déséquilibrée accroît le risque de voir apparaître des maladies métaboliques et nutritionnelles qui peuvent non seulement diminuer l'espérance de vie, mais aussi altérer notre qualité de vie. Mais notre alimentation est incontestablement plus variée, plus diversifiée qu'autrefois. Elle permet un apport en certains oligo-éléments et vitamines que l'homme ne trouvait pas jadis dans son alimentation.

2.2.1.2. Le régime alimentaire idéal contient-il du pain ?

(DUPIN, 1996)

Notre consommation de pain a considérablement diminué depuis le début du siècle. Bien entendu la consommation moyenne masque des différences selon l'âge, le sexe, les catégories socio-professionnelles ou selon les comportements individuels. Pourtant l'accroissement de la consommation de gâteaux secs, biscottes, pâtisseries et pâtes alimentaires, ne permet pas de compenser la baisse du pain. Globalement, les produits à base de blé occupent une place nettement plus faible qu'autrefois et on observe une uniformisation des consommations en France.

Heureusement depuis quelques années, la quantité de pain consommée semble se stabiliser, et même remonter un peu chez les citadins.

Aujourd'hui, tous les nutritionnistes s'accordent à dire que le pain est un aliment utile au bon équilibre de notre alimentation. Il permettrait de rééquilibrer notre alimentation (trop riche en graisses et en sucres simples), limitant ainsi l'obésité et les maladies cardio-vasculaires (athérosclérose). En effet, l'augmentation de la quantité de pain dans notre alimentation permettrait d'augmenter la ration en sucres dits lents, sans adjonction de sucres rapides ni de graisse. De plus, le pain contenant plus de 8 g de protéines pour 100 g, il permettrait de diminuer notre ration de viande, et par là même, la part de lipides apportée par la viande.

Autre avantage du pain, il permet d'obtenir une sensation de satiété plus rapide au cours du repas car il nous oblige à mastiquer plus longtemps.

Mais quel pain faut-il consommer, du pain blanc ou du pain complet ?

Nous le savons, ces deux types de pains ne diffèrent que par le taux d'extraction de la farine, qui est de 75 % pour le pain blanc habituel et de 95 % pour le pain complet. Le pain blanc est légèrement plus calorique que le pain complet. Ils contiennent en revanche une teneur en protéines équivalente. La teneur en minéraux et en vitamines est bien supérieure dans le pain complet, mais leur absorption dans le tube digestif est moins bonne que pour le pain blanc.

En réalité, l'intérêt du pain complet est lié à sa teneur nettement plus élevée en fibres d'origines végétales. Notre alimentation moderne est souvent pauvre en fibres d'où un ralentissement du

transit et l'apparition de pathologies comme la constipation. Ainsi la consommation régulière de pain complet semble préférable. Mais les pains trop riches en son ne sont pas bons pour tous car ils augmentent les déperditions en minéraux et peuvent irriter la muqueuse intestinale.

Quelle quantité de pain faut-il consommer par jour ?

Il est difficile de conseiller une ration de pain car elle va dépendre du besoin énergétique total, c'est à dire de l'âge et de l'activité physique, et de la quantité d'aliments glucidiques consommés par ailleurs (légumes secs, riz, pâtes, pommes de terres).

Le pain doit servir d'aliment d'accompagnement au cours du déjeuner et du dîner, par contre, il doit être apporté en quantité importante au petit déjeuner pour permettre de passer une matinée sans fatigue et éviter ainsi le grignotage. De plus il peut être un aliment à privilégier au moment du goûter pour les enfants, ceci permettant d'éviter la consommation trop importante de gâteaux apportant des lipides et des sucres en quantités excessives.

2.2.2. Qualités nutritionnelles du pain et effets sur la santé

Quel pain faut-il privilégier : le pain blanc ou le pain complet ? Nous savons que les fibres des céréales ont des effets bénéfiques sur notre santé mais n'offrent pas un bilan positif pour notre bilan minéral. Par contre elles peuvent nous protéger de certains cancers digestifs.

Le pain est également une source non négligeable de protéines, ce que peu de personnes savent.

Et qu'en est il des recommandations de consommations auprès de la population diabétique ?

2.2.2.1. Fibres et bilan minéral : action favorable ou défavorable ?

(POINTILLART, 1992)

L'éventuelle influence défavorable des fibres alimentaires sur l'utilisation des éléments minéraux constitue certainement la principale, sinon la seule raison, de tempérer l'enthousiasme suscité par les effets bénéfiques des fibres. Il est cependant curieux de constater que, bien après les premières observations de Mellanby en 1919 sur les troubles osseux liés à la consommation de régimes riches en céréales complètes, tant de controverses subsistent encore sur ce sujet.

Les démonstrations expérimentales de l'effet négatif du son de blé sur l'absorption du calcium et de zinc ne manquent pourtant pas, tant chez l'homme que chez l'animal. Ainsi, la recrudescence du rachitisme et des fractures osseuses spontanées pendant la seconde guerre mondiale en Grande-Bretagne et en France a-t-elle été attribuée à la consommation excessive de pain complet et la responsabilité de l'acide phytique clairement établie.

Aux résultats connus chez l'homme s'ajoute les innombrables observations faites chez les animaux consommant trop de son : rachitisme du poulet, ostéofibrose du porc et du cheval.

Les effets négatifs des fibres sur la disponibilité des minéraux sont essentiellement dus à l'apport ou à la formation de complexes insolubles ou de chélates non absorbables (ou non métabolisables).

Toutes les molécules portant des charges négatives peuvent former avec les cations (calcium, magnésium, fer, zinc, cuivre) des liaisons diverses : ioniques, covalentes ou de coordination. Cette chélation est due non seulement aux anti-nutriments associés aux fibres, comme l'acide phytique, mais aussi aux fibres elles-mêmes, par des groupements anioniques des polysaccharides non cellulosiques : carboxyles des acides uroniques des hémicelluloses et des acides galacturoniques des pectines. La cellulose et la méthylcellulose ont une faible capacité de liaison vis-à-vis des cations, mais la carboxylation de la méthylcellulose augmente considérablement cette capacité. Le pouvoir de fixation du calcium de la pectine diminue quand son degré d'estérification augmente. De plus la forte affinité de la lignine vis-à-vis du calcium et du fer est attribué aux carboxyles et hydroxyles de certaines fractions.

Dans le cas des céréales, bien que l'action propre des fractions hémicellulosiques du son soit clairement établie, c'est l'acide phytique le principal responsable de cette action défavorable sur le bilan minéral.

La chélation des cations par les fractions non cellulosiques est influencée par le pH et le maximum de liaison se produit juste sous la neutralité. Ainsi, la chélation des minéraux augmente avec le pH, et l'acidification du milieu permet de libérer les cations préalablement fixés.

- Phytates et déminéralisation

La teneur en acide phytique des aliments de l'homme se situe entre 0,5 et 1% avec deux produits exceptionnellement riches, le son de blé (jusqu'à 3 % d'acide phytique) et les aliments reconstitués à base de soja (souvent supérieur à 1 %). Grossièrement, en consommant l'équivalent de 50 grammes de son de blé (25 à 25 grammes de fibres par jour), on ingère 2 mmoles d'acides phytiques susceptibles de chélater jusqu'à 10 mmoles de calcium, soit 400 mg, apport usuel des régimes ne contenant pas de produits laitiers. On sait que l'apport de calcium est souvent insuffisant et la consommation importante de fibres, en apportant des

phytates, pourrait donc constituer un facteur de risque supplémentaire de dénutrition calcique, d'autant plus que ceux qui ingèrent ces fibres pour faciliter leur transit digestif pourraient être des sujets âgés prédisposés à l'ostéoporose.

Cela peut être atténué (ou aggravé) par d'autres éléments du régime : la richesse en calcium peut compenser largement la richesse en phytates (par contre, dans ces conditions, il y a possibilité accrue de formation de phytates mixtes Zn-Ca et danger de rendre le zinc moins disponible) ; les protéines animales (viande, lait) pourraient atténuer les effets négatifs des phytates sur le calcium mais également sur le zinc et le fer (abondants dans la viande). La vitamine D peut également protéger indirectement des effets décalcifiants des phytates. Dans ce cas il y a risque d'aggravation chez les sujet âgés dont le statut vitaminique D est souvent précaire, de même que celui des sujets jeunes maintenus à l'obscurité.

Le régime alimentaire influe sur la disponibilité des minéraux ingérés. On sait que l'affinité du zinc pour l'acide phytique est plus grande que celle du calcium, ce qui fait dépendre la carence secondaire en zinc à la fois à la richesse en phytates des régimes et du rapport Ca/Zn. L'excès relatif du calcium, lorsque le rapport Ca/Zn est élevé, facilite l'incorporation du zinc dans les phytates et leur précipitation, alors que les faibles concentrations de calcium augmentent la solubilité de zinc en présence de phytates. Toutefois, il est certain qu'avec un régime pauvre en zinc les risques de déficience s'accroissent avec la richesse en phytate et avec celle de calcium. Les sujets âgés, les femmes enceintes, les enfants et les adolescents sont susceptibles d'être marginalement déficitaires en zinc parce qu'ils consomment insuffisamment d'aliments contenant du zinc hautement disponible tels que viandes et coquillages.

De plus, les sujets qui consomment beaucoup de phytates mais peu de viandes (communautés originaires des Antilles et des Indes) ont un statut ferrique moins favorable. Par contre, les phytates, en complexant le fer ferreux (Fe^{++}), empêchent la formation de radicaux libres et la peroxydation des lipides, et auraient donc ici un rôle bénéfique pour la santé ; d'autant plus que le fer ferreux, sous forme de phytate, présente une haute disponibilité pour l'organisme comparé au fer ferrique (Fe^{+++}).

Le mode de transformation des aliments influence l'action des phytates. La fermentation dégrade les phytates, soit parce que leurs phytases propres agissent, soit parce qu'on ajoute des levures capables d'hydrolyser les phytates.

Pour le pain, l'hydrolyse dépend de la quantité de levure ajoutée et du temps pendant lequel on la laisse agir. L'influence du niveau d'extraction de la farine est également déterminante : 85 % des phytates sont hydrolysés pour la farine blanche (à 70 %) et seulement 30 % pour la farine bise (à 90 %). Ainsi, la panification est le procédé le plus efficace pour limiter les propriétés antinutritionnelles des phytates vis-à-vis des cations d'intérêt alimentaires.

Une forte consommation en phytates (son, pain complet) peut être préjudiciable à la nutrition minérale, lorsque les apports sont insuffisants, ce qui est fréquent pour le fer, le zinc et le calcium. Par contre une forte consommation en fibres ne devrait susciter aucune inquiétude lorsque le régime est diversifié et équilibré, contenant notamment des produits laitiers (pour le calcium), des produits carnés (pour le zinc et le fer) et des fruits (pour l'acide ascorbique).

- Action favorable des fibres sur le bilan minéral ?

Il ne faut tout de même pas sous estimer l'importance de l'apport en minéraux par les aliments riches en fibres. Cette quantité apportée peut alors compenser l'effet des substances inhibitrices sur leur absorbabilité intestinale.

| | Ca | Mg | Fe | Zn |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Son de blé | 110 | 520 | 13 | 16 |
| Farine de blé complète | 35 | 140 | 4 | 3 |

Tableau 19 : Apport en minéraux (en mg pour 100 g brut)

(POINTILLART, 1992)

De plus, comme nous l'avons expliqué précédemment, l'action bénéfique des fibres se situerait dans le gros intestin et résulterait des fermentations des fibres non préalablement digérées. Il est vrai que l'acidification du milieu par les acides gras volatils et l'hydrolyse des phytates par les enzymes microbiennes peuvent favoriser la libération dans le côlon de cations insolubles ou chélatés dans l'intestin grêle. Une telle libération d'ions minéraux dans le gros intestin est donc bénéfique dans la mesure où l'absorption est encore possible à ce niveau.

Ainsi, le jeu des interactions entre cations sur leur site d'absorption peut entraîner des effets paradoxalement bénéfiques des phytates. Par exemple dans les régimes pauvres en cuivre, la présence de phytates peut favoriser l'absorption de ce métal en chélatant le zinc, et certains acides organiques (citrique, ascorbique) présents dans les aliments riches en fibres peuvent favoriser l'absorption des cations, notamment de fer.

2.2.2.2. Alimentation et cancer

(RIBOLI, 1996)

A l'heure actuelle, il apparaît de plus en plus évident que les fibres alimentaires pourraient prévenir l'apparition du cancer côlo-rectal et cela grâce à trois mécanismes protecteurs.

- Le rôle du volume fécal

Le premier mécanisme protecteur supposé met en jeu le volume fécal. En fournissant un substrat énergétique aux bactéries, les fibres favorisent la prolifération de celles-ci et augmentent ainsi la masse bactérienne excrétée dans les selles. De plus les fibres qui ne sont pas dégradées au niveau du côlon augmentent non seulement la matière sèche des matières fécales, mais aussi la teneur en eau de ces fèces.

Ceci a pour conséquence d'accélérer le transit et de diluer le contenu colique, ces deux mécanismes concourant à un moindre contact des cancérrogènes potentiels avec la muqueuse colique.

- Le rôle des acides biliaires

Le deuxième mécanisme qui pourrait expliquer l'effet protecteur des fibres contre le cancer colo-rectal serait lié aux modifications métaboliques et/ou physico-chimiques des acides biliaires. Les acides biliaires sont synthétisés par le foie à partir du cholestérol et sécrétés dans la bile. Les acides primaires (cholate, chénodéoxycholate) conjugués et hydrophiles, sont conjugués par la flore et transformés partiellement par les déhydroxylases bactériennes en acides biliaires secondaires (déoxycholate, lithocholate), plus hydrophobes et plus toxiques pour la muqueuse. Cependant, les acides biliaires secondaires ne seraient pas cancérrogènes par eux-mêmes, mais auraient un rôle promoteur sur la cancérogenèse colique.

Les fibres alimentaires pourraient influencer la formation d'acides biliaires secondaires de plusieurs manières. Tout d'abord, les fibres alimentaires entraînent la dilution des acides biliaires par l'augmentation du volume des selles et sont capables de les adsorber. De plus la production d'acides gras volatils à partir des fibres entraîne une diminution du pH du côlon ; l'abaissement du pH empêche la formation des acides biliaires secondaires en inhibant l'acidité de la déhydroxylase bactérienne.

- La fermentation colique

La troisième hypothèse pour expliquer l'action bénéfique des fibres est liée à la production d'acides gras volatils au niveau du côlon, en particulier d'acide butyrique, qui est le substrat énergétique préférentiel des cellules épithéliales coliques. Ces acides gras ont plusieurs effets sur la muqueuse colique :

- effets moteurs :

Les acides gras volatils inhibent les contractions responsables du mélange des contenus mais n'influencent pas les contractions propulsives. La résultante de ces effets moteurs est que le temps de séjours des contenus dans le côlon est raccourci et donc le temps de contact entre d'éventuelles substances toxiques et la muqueuse serait ainsi diminué.

- effets cellulaires :

Les fibres insolubles telles que la cellulose et le son de blé semblent plus protectrices contre la cancérogenèse colique que les fibres solubles (pectines, gomme de guar, son d'avoine). De plus, les fibres produisant une forte proportion d'acétate favoriseraient la cancérogenèse, alors que les fibres produisant une forte proportion de butyrate en particulier au niveau distal, comme le son de blé, seraient protectrices.

Le butyrate induit de nombreuses modulations de l'activité et du phénotype des cellules. Ces modulations résultent d'un effet du butyrate sur la prolifération, la différenciation et l'équilibre oncogènes anti-oncogènes.

Ainsi il semble pertinent d'encourager une alimentation comprenant une plus forte proportion d'aliments d'origine végétale riches en fibres (légumes, fruits, céréales). Le pain complet permet d'augmenter cet apport, il suffit de le substituer au pain blanc au cours d'un ou plusieurs repas de la journée.

2.2.2.3. Les protéines végétales

Dans tous les pays du monde, l'accroissement régulier mais inexorable de la consommation en viande est un fait : il est en moyenne de 1,5 kg par habitant et par an. Depuis la Seconde Guerre mondiale, le Français ingère la même quantité de protéines, calculée à partir de l'azote qu'elles contiennent (95 à 105 g/j). Cependant, au fur et à mesure que le niveau de vie

s'améliore, la répartition de ces protéines évolue et la quantité de produits animaux consommés ne cesse de croître : les protéines d'origine animale représentent respectivement la moitié en 1950 et les 2/3 en 1980 des protéines totales consommées. A titre d'anecdote, il paraît que la consommation moyenne de viande, avant la Révolution française, était de 20 kg/an/habitant à Paris et que le pain couvrait à lui seul 80 % du besoin protéique. Il est permis de douter de l'exactitude de cette statistique ancienne, mais on sait mieux que la consommation de viande des Français a peu évolué jusqu'à la Première Guerre mondiale (30 kg de viande par habitant et par an en 1914). En revanche, le processus s'est accéléré par la suite : 40 kg entre 1920 et 1935, 50 kg en 1950, 65 kg en 1960, 80 kg en 1970, 110 kg de nos jours. (CALET, 1985)

Pourtant, les céréales constituent la source de protéines la plus importante dans le monde. Elles fournissent, en effet, 57 % des protéines consommées contre 23 % aux tubercules et aux légumineuses et 20 % aux produits animaux (viande, produits laitiers, œufs...). Parmi les céréales, le blé occupe une place très importante puisqu'en 1981 la production mondiale atteint 450 millions de tonnes, soit 40 % de la récolte de céréales. Il est utilisé pour 78 %, pour l'alimentation humaine, alors que le maïs est essentiellement destiné à l'alimentation animale et que l'orge est partagé à peu près entre ces deux utilisations.

Le pain contient environ 8 g de protéines pour 100 g de pain blanc, et 9 g pour 100 g de pain complet.

Les protéines du grain de blé ont la propriété unique de former, après hydratation, une masse cohérente, insoluble, et viscoélastique, le gluten, propriété largement mise à profit dans la panification et autres industries de cuisson.

De ce fait, le blé est la seule céréale dont on extrait actuellement les protéines industriellement sous forme de gluten pour les réincorporer dans certains aliments ; principalement pour améliorer la valeur boulangère des farines.

Les protéines ne sont pas réparties de façon uniforme dans le grain, formé de plusieurs parties distinctes du point de vue morphologique et fonctionnel. Ainsi, la couche d'aleurone est constituée de 30 à 35 % de protéines, le germe de 35 à 40 % alors que le péricarpe ne contient que 6 à 7 % de protéines et le centre de l'albumen amylicé 6 à 9 % seulement. Mais globalement et compte tenu de l'importance pondérale relative de ces différents tissus, 87 % des protéines se trouvent dans l'albumen et la couche d'aleurone ; une majorité de protéines du grain se retrouve donc dans le pain. (POPINEAU, 1985)

Mais les protéines végétales sont généralement moins bien pourvues en acides aminés essentiels que les protéines animales et présentent souvent des déséquilibres importants. En effet, la ration alimentaire doit apporter une certaine quantité d'azote indifférencié, mais surtout les acides aminés indispensables (AAI) que l'organisme ne peut synthétiser. La synthèse d'une protéine exige, au niveau du tissu où elle est effectuée, la présence simultanée des ses divers acides aminés constitutifs, en particulier des AAI. Elle sera limitée par la quantité disponible de celui d'entre eux dont l'apport représente la plus faible proportion du besoin. Cet acide aminé constitue le facteur limitant des protéines de la ration.

Les céréales sont largement déficitaires en lysine : leur valeur nutritionnelle est donc relativement faible. (VIROBEN, 1983)

2.2.2.4. Le pain et le diabète

(GRIMALDI, 1997) (ABSOLONNE, 1994)

Le régime des diabétiques a évolué dans le temps : d'un régime complètement dépourvu de sucres et très riche en graisses à la fin du siècle dernier, nous sommes arrivés de nos jours à une préconisation toute différente. La diététique est bien sûr un élément essentiel du traitement du diabète et le régime doit être normoglycémique, modérément hypocalorique, grâce à une réduction des boissons alcoolisées et des graisses. L'apport glucidique conseillé doit correspondre à au moins 55 % de l'énergie totale. De plus il est conseillé d'augmenter sa consommation en sucres complexes, c'est à dire en amidons et de réduire sa consommation en sucres simples.

Les effets des différents sucres sur la glycémie du diabétique sont différents et, s'il était classique de dire que les sucres courts étaient hyperglycémiant, on sait actuellement que le pouvoir hyperglycémiant ou non d'un glucide est influencé par différents paramètres. Ainsi, les fibres alimentaires, la densité énergétique de l'aliment peuvent diminuer l'effet hyperglycémiant reconnu suite à l'ingestion isolée de saccharose. La texture de l'aliment peut également jouer son rôle ; ainsi, la charge glucidique d'une limonade est plus hyperglycémiant que la même

charge glucidique apportée par un biscuit. La maîtrise de l'alimentation du diabétique se fait principalement par le contrôle de la quantité et de la qualité des glucides consommés journallement, mais aussi par leur répartition dans le nyctémère. Pour ce faire, différentes méthodes peuvent être utilisées, qui, toutes, reposent sur la connaissance de la quantité de glucides par 100 g d'aliments. La préférence est donnée aux aliments naturellement porteurs d'amidons, d'autant plus que leur teneur en fibres est élevée, comme celle des légumineuses (haricots, pois, lentilles) ou des céréales non blutées et leurs dérivés (pain complet). Les fibres alimentaires n'ont pas, ou peu de valeur énergétique mais possèdent l'avantage d'augmenter la mastication et la salivation et de retarder la vidange gastrique. Ceci peut contribuer à une meilleure régulation de la glycémie.

Le pain est un aliment présentant un index glycémique élevé, il est donc fortement hyperglycémiant. Ainsi il semble préférable de diminuer sa ration, et de lui préférer d'autres féculents à index glycémique plus faible comme les légumineuses, les pâtes alimentaires ou le riz. Pourtant une consommation de pain doit être conservée et peut être réduite à 150 g par jour. De plus, le pain complet, riche en fibres, peut avoir une incidence favorable sur la régulation de la glycémie.

Ainsi, à chacun des trois repas, le diabétique peut consommer 50 g de pain (ou 4 biscottes bien que celles-ci apportent des graisses). Chaque repas devra être équilibré, riche en légumes et protéines, mais pauvre en lipides et comprenant au déjeuner et au dîner 150 g de féculents en plus du pain.

CONCLUSION

Le pain, c'est le reflet de la société : il était noir et souillé chez les paysans du Moyen-Age, engendrant la famine lorsque la récolte était mauvaise, il était symbole d'égalité sous la Révolution Française, et il est aujourd'hui blanc et délaissé dans notre société individualiste et matérialiste.

Une consommation régulière de pain, associée à une alimentation équilibrée (riche en fruits, légumes et protéines animales), est certainement bénéfique pour la santé. Elle permet un apport en fibres nécessaire au bon fonctionnement du tube digestif, et cela sans risque de carence en minéraux. Elle permet d'équilibrer notre ration alimentaire et d'accélérer le phénomène de satiété au cours du repas. De plus, le pain est un aliment qui doit être privilégié chez les enfants car il est très énergétique et n'apporte ni graisses ni sucres rapides (contrairement aux biscottes, gâteaux et pains de mie industriels).

Le pain complet permet d'enrichir notre alimentation en fibres tout en diminuant la quantité de calories ingérées. Il est préconisé chez les personnes ayant des problèmes de constipation (et peut même se substituer à certains médicaments), ou chez les personnes obèses voulant suivre un régime.

Par contre, sa consommation ne doit pas être excessive chez les personnes âgées, souffrant déjà de déminéralisation, ni chez les diabétiques à cause d'un index glycémique élevé.

Les conseils hygiéno-diététiques qui peuvent être délivrés à l'officine dans le cadre de pathologies digestives et métaboliques comme la constipation, l'hypercholestérolémie, le diabète, la déminéralisation, l'obésité, doivent être des conseils encourageant une alimentation équilibrée incluant du pain. De même, le pharmacien sera amené à donner des conseils diététiques pour le sportif, l'enfant, la personne âgée ou la femme enceinte.

Ainsi, le pain, consommé tout au long de la vie, peut être un facteur de prévention de certaines maladies (métaboliques et cardio-vasculaires) parce qu'il nous aide à mieux manger, c'est à dire à manger équilibré. Les grands amateurs de pains sont souvent des personnes proches de la nature et respectueuses pour leur environnement, ayant une alimentation et une vie saine. Et cela forme un tout : il n'y a pas de blés sains sans environnement protégé.

THESE SOUTENUE PAR : **Raphaëlle CURTET**

TITRE :

**PAIN BLANC, PAIN COMPLET :
FABRICATION ET INTÉRÊT DIÉTÉTIQUE**

CONCLUSIONS

Le pain, c'est le reflet de la société : il était noir et souillé chez les paysans du Moyen-Age, engendrant la famine lorsque la récolte était mauvaise, il était symbole d'égalité sous la Révolution Française, et il est aujourd'hui blanc et délaissé dans notre société individualiste et matérialiste.

Une consommation régulière de pain, associée à une alimentation équilibrée (riche en fruits, légumes et protéines animales), est certainement bénéfique pour la santé. Elle permet un apport en fibres nécessaire au bon fonctionnement du tube digestif, et cela sans risque de carence en minéraux. Elle permet d'équilibrer notre ration alimentaire et d'accélérer le phénomène de satiété au cours du repas. De plus, le pain est un aliment qui doit être privilégié chez les enfants car il est très énergétique et n'apporte ni graisses ni sucres rapides (contrairement aux biscottes, gâteaux et pains de mie industriels).

Le pain complet permet d'enrichir notre alimentation en fibres tout en diminuant la quantité de calories ingérées. Il est préconisé chez les personnes ayant des problèmes de constipation (et peut même se substituer à certains médicaments), où chez les personnes obèses voulant suivre un régime.

Par contre, sa consommation ne doit pas être excessive chez les personnes âgées, souffrant déjà de déminéralisation, ni chez les diabétiques à cause d'un index glycémique élevé.

Les conseils hygiéno-diététiques qui peuvent être délivrés à l'officine dans le cadre de pathologies digestives et métaboliques comme la constipation, l'hypercholestérolémie, le diabète, la déminéralisation, l'obésité, doivent être des conseils encourageant une alimentation

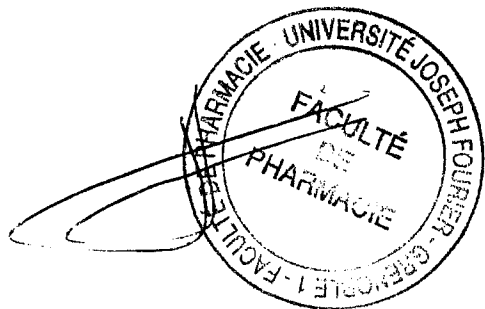
équilibrée incluant du pain. De même, le pharmacien sera amené à donner des conseils diététiques pour le sportif, l'enfant, la personne âgée ou la femme enceinte.

Ainsi, le pain, consommé tout au long de la vie, peut être un facteur de prévention de certaines maladies (métaboliques et cardio-vasculaires) parce qu'il nous aide à mieux manger, c'est à dire à manger équilibré. Les grands amateurs de pains sont souvent des personnes proches de la nature et respectueuses pour leur environnement, ayant une alimentation et une vie saine. Et cela forme un tout : il n'y a pas de blés sains sans environnement protégé.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Grenoble, le

LE DOYEN



A. FAVIER

LE PRESIDENT DE THESE

Professeur A.M. ROUSSEL

BIBLIOGRAPHIE

ABSOLONNE J., Alimentation des diabétiques, *In* : ASSAL J.P., EKOE P., LEFEVRE P., SLAMA G., Le diabète sucré, édition Maloine, Paris, 1994 : 79-82.

APFELBAUM M., FORRAT C., NILLUS P., Diététique et nutrition, collection Abrégés, édition Masson, Paris, 1997 : 364-382.

Actualités, concurrence, consommation et répression des fraudes, 1991, n° 40.

AUTRAN J.C., BOURDET A., L'identification des variétés de blé : établissement d'un tableau général de détermination fondé sur le diagramme électrophorétique des gliadines du grain, *Ann. Amélior. Plantes*, 1975, **25**, 3 :277-301.

BERNARD A., CARLIER H., Aspects nutritionnels des constituants des aliments. Influence des technologies, Les cahiers de l'ENSBANA, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1992 : 273-289.

BEROT S., GODON B., Le craquage des grains, *In* : GODON B., *Biotransformation des produits céréaliers*, édition technique et documentation Lavoisier Apria, Paris, 1991 : 23-78.

BIETZ J.A. WALL J.S., Identity of high molecular weight gliadin and ethanol soluble glutenin subunits of wheat. Relation to gluten structure, *Cereal Chem.*, 1980, **57** : 415-421.

BJORCK I., GRANFELDT Y., LILJEBERG G., TOVAR J., ASP N.G., Food properties affecting the digestion and absorption of carbohydrates, *Am. J. Clin. Nutr.*, 1994, **59**, 699S-705S.

BURKITT D.P., WALKER A.R.P., PAINTER N.S., Dietary fiber and disease, *J. Am. Med. Ass*, 1974, **229** : 1068-1074.

CALET C., L'innovation au service de l'approvisionnement en protéines des hommes et des animaux domestiques, *In* : GODON B., Protéines végétales, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1985 : 1-24.

CALVEL R., *La boulangerie moderne*, édition Eyrolles, Paris, 1952.

CHAMP M., FAISANT N., Technologies et qualités nutritionnelles des amidons, *In* : BERNARD A., CARLIER H., Aspects nutritionnels des constituants des aliments. Influence des technologies, Les cahiers de l'ENSBANA, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1992, **8** : 1-23.

CHEFTEL J.C., CHEFTEL H., Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, édition technique et documentation Lavoisier, entreprise moderne d'édition, Paris, 1976.

CHERBUT C., Fibres alimentaires et substances de charge : aspect physiologique et nutritionnel, *Cah. Nutr. Diet.*, 1989, **24**, 6 :463-472.

DEHOVE R. Réglementation des produits, qualité, répression des fraudes, Denrées alimentaires végétales. Céréales et produits à base de céréales, étude 431 : farines et farines de riz, édition Lamy, Paris, 1996.

DEHOVE R. Réglementation des produits, qualité, répression des fraudes, denrées alimentaires végétales. Céréales et produits à base de céréales, étude 430 : céréales et assimilés, édition Lamy, Paris, 1996.

DERACHE R., Les mycotoxines dans les aliments : doses journalières admissibles (D.J.A) et limites résiduelles maximales (L.M.R), *Cah. Nutr. Diet.*, 1989, 24, 6 : 463-472.

Dictionnaire Médical Larousse, édition Larousse, Paris, 1995.

DUPAIGNE B., MARQUIS J., *Le pain*, Édition La Courtille, Paris, 1979.

DUPIN H. *et al.*, Aliments, alimentation et santé, groupe de recherche en éducation nutritionnelle, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1996 : 39-40, 63-65, 109-110, 135-136.

DUPIN H, ABRAHAM J., GIACHETTI I., Apports nutritionnels conseillés pour la population française, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1992.

FERNANDEZ DE CAYELA R., GONZALEZ-PASCUAL B., GARCIA OHMEDO F., CARBONERO P., Susceptibility of phytopathogenic bacteria to wheat purothionins in vitro, *Appl. Microbiol.*, 1972, **23**, 5 : 998-1000.

Fiber analysis tables, *Am. J. Clin. Nutr.*, 1978, **31** : S281-S284.

FIELD J.M., SHEWRY P.R., MIFLIN B.J., Solubilisation and characterization of wheat gluten proteins : correlation between the amount of aggregate proteins and baking quality, *J. Sci. Food Agric.*, 1983, **34** : 370-377.

FRAYSSINET C., Mycotoxines, *In* : DEYNIE B., MULTON J.L., SIMON D., Techniques d'analyses et de contrôle dans les industries agro-alimentaires, Volume 4 : analyse des constituants alimentaires, édition technique et documentation Lavoisier Apria, Paris, 1990 : 341-364.

FRAZIER P.J., DANIELS N.W.R., RUSSEL EGGIT P.W., Lipid-protein interaction during dough development, *J. Sci. Food Agric.*, 1981, **32** : 877-897.

GIERSH B., Contribution à l'étude des fibres alimentaires : étude des répercussions de l'ingestion de pain au son sur certains paramètres biologiques du sang : lipides et glucides. Thèse Méd. Strasbourg, 1983, N°191.

GODON B., Les constituants des céréales : nature, propriétés et teneurs, *In* : GODON B., Biotransformation des produits céréaliers, édition technique et documentation Lavoisier Apria, Paris, 1991 : 1-21.

Grand dictionnaire encyclopédique, Édition Larousse, Paris, tome 2, 1982.

GRENIER-GIERSH D., Contribution à l'étude des fibres alimentaires : étude des répercussions de l'ingestion de pain au son sur certains paramètres biologiques du sang : protides, électrolytes, minéraux, vitamines et de la bile. Thèse Méd. Strasbourg, 1983, N°192.

GRIMALDI A., Guide pratique du diabète, collection médiaguides, éditions Médicales spécialisées, Paris, 1997 : 41-63.

GUIGNARD J.L., Botanique, collection abrégés, édition Masson, 8 ème édition, Paris, 1993.

HEATON K.W., Les effets d'un régime à base de fibres cellulosiques sur le métabolisme des sels biliaires et sur la composition de la bile, *Med. Chir. Dig.*, 1975, 4, Suppl. I : p 27-29.

HERCBERG S., DUPIN H., PAPOZ L., GALAN P., Nutrition et santé publique : approche épidémiologique et politique de prévention, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1985.

HIPSLEY E.P., Dietary fibre and pregnancy toxæmia, *Brit. Med J.*, 1953, 2 : 420-422.

INSEE, Maison des artisans boulangers, 1997.

LEDERER J., Alimentation et prévention du cancer : comment corriger nos erreurs alimentaires. édition Maloine Nauxelaerts avec l'appui de l'association contre le cancer, Paris, 1995.

LEROUX C., Contribution à l'étude des interactions lipides-protéines dans les produits céréaliers de cuisson : propriétés physicochimiques des lipides endogènes et exogènes dans les pâtes et le gluten de blé tendre, Thèse, Université de Nantes, 1987.

LIRON F., Le pain : valeur nutritionnelle. Thèse de pharmacie, 1987, n° 87PA25P297.

MARION D., LEROUX C., AKOKA S., TELLIER C., GALLANT D., Lipid-protein interaction in wheat gluten : a phosphorus nuclear magnetic resonance spectroscopy and freeze fracture electron microscopy study, *J. Cereal. Sc.*, 1987, 5 : 101-115.

MESSING B., BILLAUX M.S., Biodisponibilité des glucides des aliments, édition Arnette Blackwell, Paris, 1995 : 81-94.

MESSING B., Sucre et nutrition, édition Doin, Paris, 1992 : 1-29,41-52, 72-73.

MOUILLET L., LUQUET F.M., Résidus de pesticides, *In* : DEYNIE B., MULTON J.L., SIMON D., Techniques d'analyses et de contrôle dans les industries agroalimentaires, Volume 4 : analyse des constituants alimentaires, édition technique et documentation Apria, Paris, 1990 : 291-306.

OSBORNE T.B., The proteins of the wheat kenel, *Carnegie Inst.*, Washington D.C., 1907.

POINTILLART A., GUEGUEN L., Influence des fibres alimentaires sur la biodisponibilité des minéraux, *In* : BERNARD A., CARLIER H., Aspects nutritionnels des constituants des aliments. Influence des technologies, Les cahiers de l'ENSBANA, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1992, 8 : 157-182.

POPINEAU Y., Propriétés biochimiques et physicochimiques des protéines de céréales, *In* : GODON B., Protéines végétales, édition technique et documentation Lavoisier, 1985 : 161-210.

REMESY C., DEMIGNE C., Le rôle des produits végétaux, en particulier des fibres en nutrition préventive, *Méd. nutr.*, 1994, 30, 4 : 189-198.

RIBOLI E., DECLOITRE F., COLLET RIBBING C., Alimentation et cancer : évaluation des données scientifiques, édition technique et documentation Lavoisier, Paris, 1996.

SOUTHGATE D.A.T., The definition and analysis of dietary fiber, Food an fiber, symposium of Marabou, 1976, Sydbyberg, sweden : 31-37.

TROWELL H., SOUTHGATE D.A.T., WOLEWER T.M.S., LEEDS A.R., GASSUL M.A., JENKINS D.A.J., Dietary fibre redefined, *Lancet*, 1976, 1 : 967.

TROWELL H., The developpement of the concept of dietary fiber in human nutrition, *Am. J. Clin. Nutr.*, 1978, **31** : S3-S11.

TROWELL H.C., Definition of dietary fiber and hypothesis that it is a protective factor in certain disease, *Am. J. Clin. Nutr.*, 1976, **29** : 417-427.

VIROBEN G., BERTRAND D., La valeur nutritionnelle des matières protéiques végétales, *In* : GODON B., Protéines végétales, édition technique et documentation Lavoisier, 1985 : 523-549.

VEYER C., Le pain, son rôle dans notre équilibre alimentaire, thèse Universitaire de Lille II, faculté de pharmacie, 1987.

ZAWISTOWSKA V., BEKES F., BUSHUK W., Gluten proteins with high affinity to flour lipids, *Cereal. Chem.*, 1985, **62** : 284-289.



Serment des Apothicaires

Je jure, en présence des maîtres de la faculté, des conseillers de l'ordre des pharmaciens et de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement.

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.



