

**INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
AGRONOMIQUE**

**SCIENCE ET
TECHNOLOGIE DES CÉRÉALES**

**Illustrations du cours aux élèves-ingénieurs de
Sciences et Technologies des Industries Alimentaires
(3ème année)**

Jean-Claude AUTRAN

**UFR de Technologie des Céréales et des Agropolymères
INRA - ENSA.M
2 Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 1
Tél. : 04 99 61 22 17 - Fax : 04 67 52 20 94
émail : autran@ensam.inra.fr**

**INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE
AGRONOMIQUE**

**SCIENCE ET
TECHNOLOGIE DES CÉRÉALES**

**Illustrations du cours aux élèves-ingénieurs de
Sciences et Technologies des Industries Alimentaires
(3ème année)**

Jean-Claude AUTRAN

**UFR de Technologie des Céréales et des Agropolymères
INRA - ENSA.M**

2 Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 1

Tél. : 04 99 61 22 17 - Fax : 04 67 52 20 94

email : autran@ensam.inra.fr

Science et Technologie des Céréales

Plan du cours

I - INTRODUCTION

Comment définit-on une céréale ?
Importance des céréales dans le monde
Origine et classification des céréales
Production et commerce des céréales dans le monde

II - PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET STRUCTURE DES GRAINS DE CÉRÉALES

Généralités sur la structure des grains de céréales
Les différents types de grains : blé, orge, seigle, triticales, seigle, avoine, maïs, riz, sorgho, millet
Notions de dureté et de vitrosité
Conséquences sur les technologies de première transformation (broyage, mouture, décorticage, abrasion,) et sur la nature des produits obtenus
Recherches en cours sur la fragmentation et sur le fractionnement des grains de céréales

III - COMPOSITION DES GRAINS DE CÉRÉALES

Amidon

Le granule d'amidon et son organisation
Composition chimique
Gélatinisation et rétrogradation
Amidons modifiés
Conversion des amidons en sucres

Autres polysaccharides

Cellulose
Pentosanes (arabinoxylanes)

Protéines

Teneurs en protéines des grains de céréales
Classification des protéines des céréales : protéines solubles, protéines de réserve, protéines du gluten
Compositions en acides aminés
Hétérogénéité et polymorphisme génétique
Structure et propriétés fonctionnelles : interactions dans la pâte

Constituants mineurs

Lipides, enzymes
Vitamines, matières minérales

IV - QUALITÉ NUTRITIONNELLE DES CÉRÉALES

Protéines, acides aminés, lipides, cellulose, vitamines ; facteurs anti nutritionnels,
maladie cœliaque
Effet des procédés de transformation des céréales sur leur valeur nutritionnelle

V - LE BLÉ TENDRE : PREMIÈRE TRANSFORMATION - MEUNERIE

Le procédé de mouture sèche : généralités
Nettoyage et conditionnement (humidification) des grains
Les machines de meunerie: broyeurs, tamis (plansichters)
Les différents produits de la mouture : farines, sons
Notions de taux d'extraction et de valeur meunière
Notion d'amidon endommagé
Procédé de turboséparation
Recherches en cours sur l'amélioration des procédés de mouture et sur la valeur meunière des blés

VI - LE BLÉ TENDRE : DEUXIÈME TRANSFORMATION - PANIFICATION

Généralités
Les différentes technologies de panification dans le monde
Évolution des procédés de panification (pétrissage, fermentation, réfrigération ou congélation des pâtes) en France
Qualité des farines exigée pour la panification
Additifs autorisés en panification
Formation et structure de la pâte : la qualité boulangère et ses bases biochimiques
Influences respectives de la variété de blé et du procédé de transformation
Fermentation, cuisson, rassissement,
L'arôme du pain
Recherches en cours sur l'amélioration des procédés de boulangerie et sur la valeur boulangère des blés

VII - AUTRES USAGES ALIMENTAIRES DES BLÉS TENDRES

Biscuiterie, biscotterie, pâtisserie
Amidonnerie et glutennerie de blé
Produits de régime
Petits déjeuners

VIII - CAS DU BLÉ DUR : SEMOULERIE ET PÂTES ALIMENTAIRES

Technologies de semoulerie
Technologies de pastification : malaxage, extrusion, séchage
Qualité des pâtes alimentaires (couleur, tenue à la cuisson) et bases biochimiques
Influences respectives de la variété de blé et du procédé de transformation
Autres produits à base de blé dur : pain de blé dur, couscous, bulgur, Ebly, ...
Recherches en cours sur l'amélioration des procédés de pastification et sur la valeur semoulière, pastière et culinaire des blés durs

IX - LE MAIS: SEMOULERIE, AMIDONNERIE

Mouture sèche: semoulerie

Mouture humide: amidonnerie

Produits sucrants

Huile

Autres technologies : cuisson-extrusion, produits divers, masa

X- LES AUTRES CÉRÉALES

Riz

Décorticage et usinage

Qualité culinaire du riz

Autres technologies : riz étuvés, riz précuits

Orge

Différentes utilisations de l'orge

Malterie-brasserie

Alimentation animale.

Seigle, Triticale, Avoine, Sorgho

XI - UTILISATIONS NON TRADITIONNELLES DES CÉRÉALES – AGRO-INDUSTRIE

Utilisation industrielle de l'amidon et du gluten

Papeterie, textiles

Chimie

Plastiques, biomatériaux

Fermentations, biocarburants

XII - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Évolution des utilisations alimentaires / non alimentaires des céréales

Comment améliorer la qualité (nutritionnelle, technologique) des céréales ?

Amélioration des processus technologiques ou création de nouvelles variétés ?

Développement de céréales génétiquement modifiées ??

I - INTRODUCTION

Comment définit-on une céréale ?

Importance des céréales dans le monde

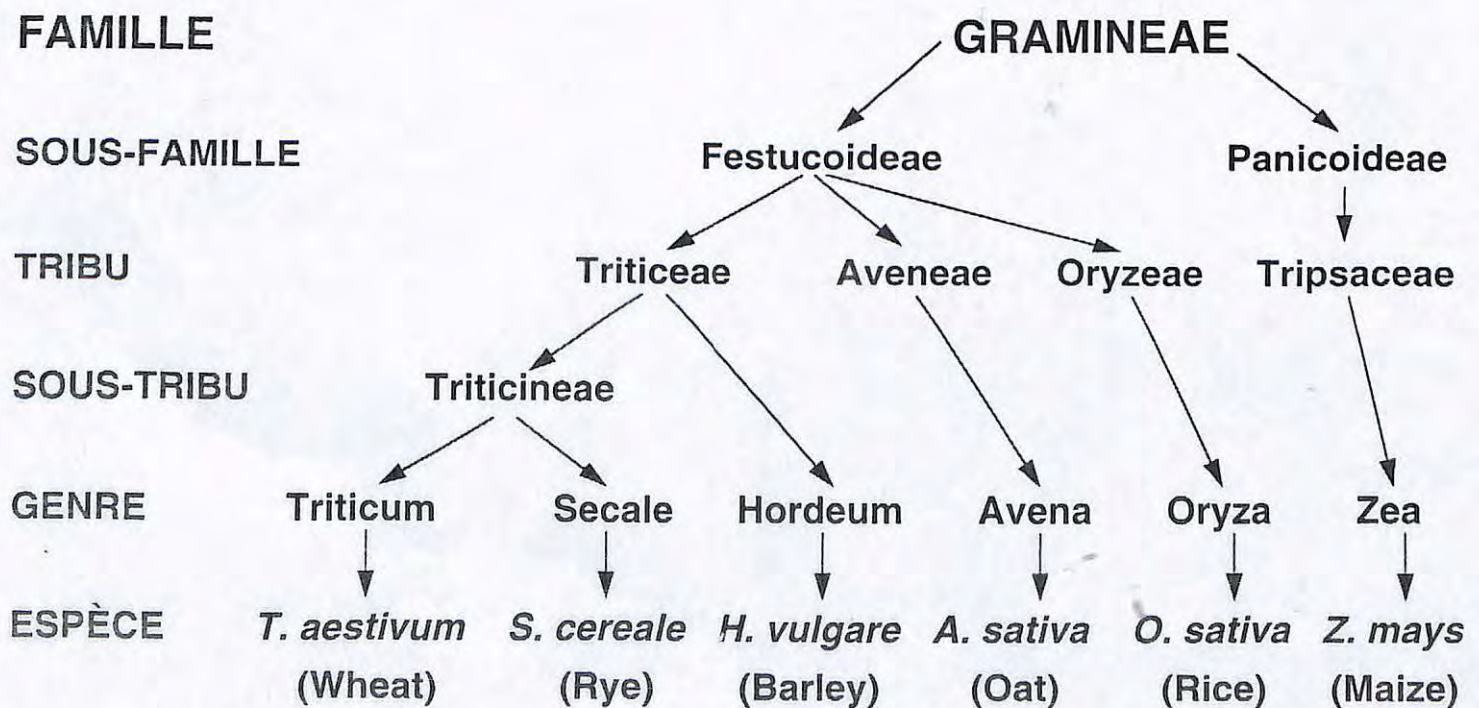
Origine et classification des céréales

Production et commerce des céréales dans le monde

CLASSIFICATION BOTANIQUE DES CÉRÉALES

TRIBU	Espèce	Nom commun	Nom anglais
Triticeae	<i>Triticum aestivum</i>	Blé tendre	Common Wheat
	<i>durum</i>	Blé dur	Durum Wheat
	<i>Secale cereale</i>	Seigle	Rye
	<i>Triticosecale</i>	Triticale	Triticale
	<i>Hordeum distichon</i>	Orge à 2 rangs	2-row Barley
	<i>Hordeum hexastichon</i>	Orge à 6 rangs	6-row Barley
Aveneae	<i>Avena sativa</i>	Avoine	Oat
Oryzeae	<i>Oryza sativa indica</i>	Riz	Rice
	<i>japonica</i>	Riz	
Tripsaceae	<i>Zea Mays</i>	Maïs	Maize (Corn)
Andopogoneae	<i>Sorghum vulgare</i>	Sorgho	Sorghum
	<i>bicolor</i>	Sorgho	
Paniceae	<i>Panicum</i>	Millet commun	Millet
	<i>Echinochloa</i>	Millet japonais	
	<i>Eleusine</i>	Eleusine, Mil rouge	
	<i>Eragrostis</i>	Tef	
	<i>Paspalum</i>	Kodo	
	<i>Setaria</i>	Millet d'Italie	
	<i>Pennisetum</i>	Petit Mil	
[Polygonaceae]	<i>Fagopyrum esculentum</i>	Sarrasin, Blé noir	Buckwheat

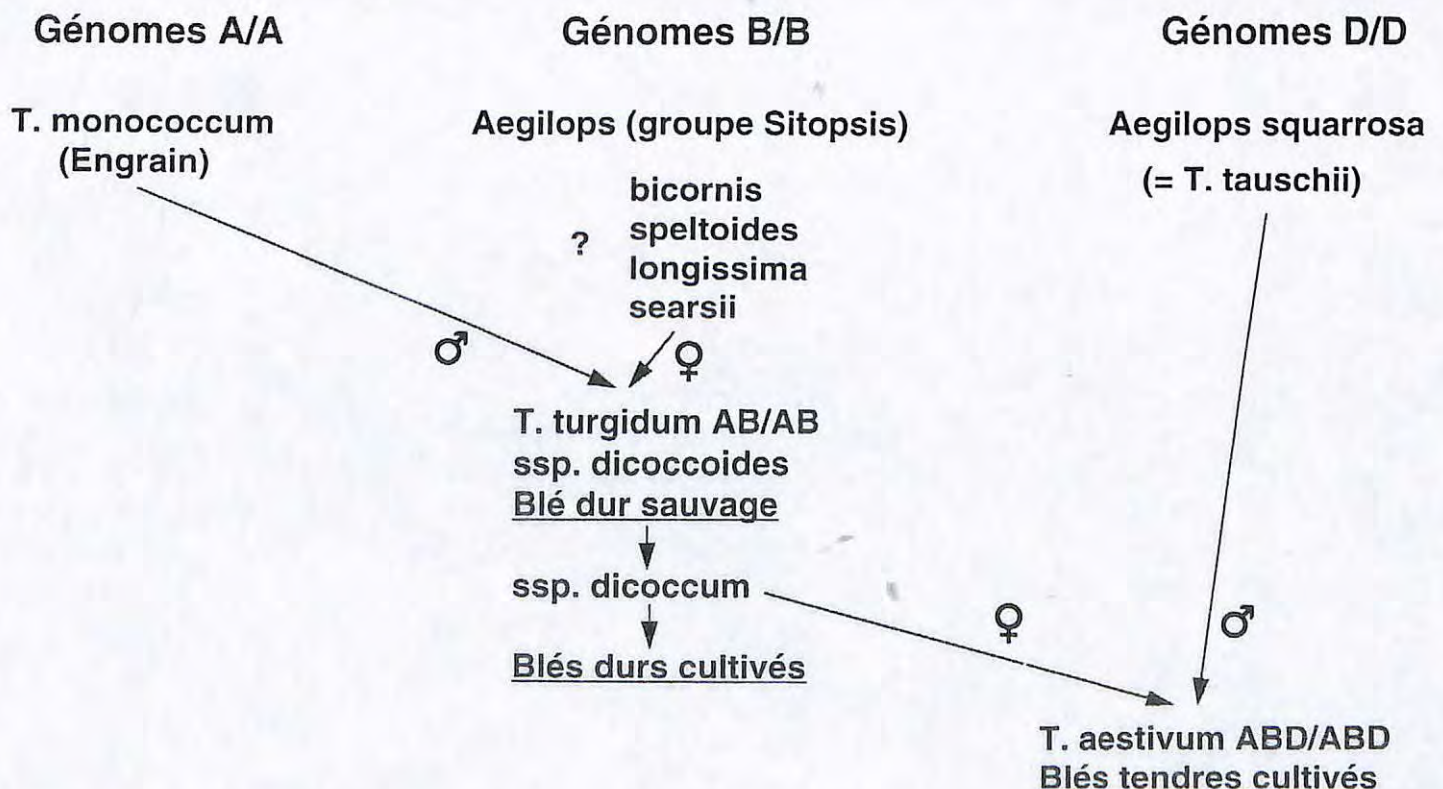
Relations taxonomiques entre céréales



Classification des blés

Forme sauvage	2n=	Formes cultivées	Nom commun
<i>T. boeoticum</i> <i>T. urartu</i>	14	<i>T. monococcum</i>	Engrain
<i>T. dicoccoides</i>	28	<i>T. dicoccum</i> <i>T. durum</i> <i>T. polonicum</i> <i>T. turgidum</i> <i>T. araraticum</i>	Blé poulard Blé dur Blé de Pologne
<i>T. monococcum</i> x ? <i>T. speltoides</i> x <i>Ae. squarrosa</i>	42	<i>T. aestivum</i> <i>T. spelta</i> <i>T. sphaerococcum</i> <i>T. compactum</i>	Blé tendre Epeautre Blé indien nain Blé Club

Origine génétique des blés cultivés



Les céréales dans le monde : surfaces, rendements, production

	Surfaces	Rendement	Production	1° Producteur
	Mi. ha	Tonnes/ha	Mi. tonnes	
• Blé	274	2.2	603	Chine
• Maïs	140	4.1	572	USA
• Riz	190	3.0	571	Chine
• Orge	70	2.2	153	ex-URSS
• Sorgho	46	1.4	65	USA
• Avoine	18	1.7	31	ex-URSS
• Seigle	11	2.2	25	ex-URSS
• Total	≈ 750		> 2 000	(1997)

Couverture des besoins alimentaires de l'homme par les céréales

- **Besoins par habitant :**
 - Energie (2500 kcal/jour) ---> 900 000 kcal/an
 - Protéines (70 g / jour) ---> 25 kg/an

- **Besoins de la population mondiale (6,0milliards d'habitants) :**
 - Energie ---> 5 400 x 10¹² kcal/an
 - Protéines ---> 150 000 000 tonnes /an

- **Les céréales contiennent environ 3000 kcal et 100 g de protéines par kg, donc :**
 - Besoins en énergie en équivalent de céréales : 1,8 x 10⁹ t/an
 - Besoins en protéines en équivalent de céréales : 1,5 x 10⁹ t/an
 - Production mondiale de céréales : 2,0 x 10⁹ t/an
 - Autres produits de récolte disponibles pour l'alimentation ≈ 2 x 10⁹ t/an

Production de céréales en France et dans le monde (1997)

	Monde (1997)	France (1999)
• Blé tendre	570	35.1
• Blé dur	33	1.5
• Maïs	572	14.6
• Riz	571	0.1
• Orge	153	9.7
• Sorgho	65	0.3
• Avoine	31	0.6
• Seigle	25	0.2
• Triticale	?	1.2
• Total	≈ 2 000	≈ 63.4

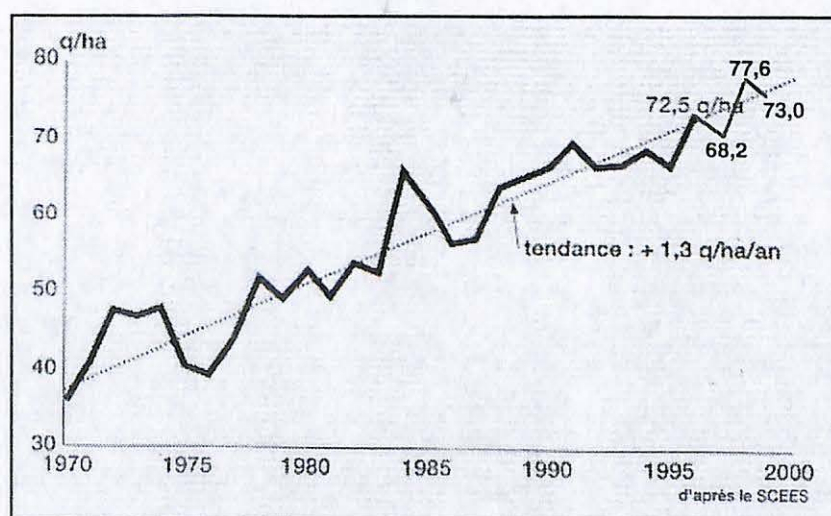
Production de blé dans le monde (1997)

	Surfaces	Rendements	Production
	Mi. ha	Tonnes/ha	Mi. tonnes
• Chine	33.8	3.0	120.0
• U.E.	13.2	6.6	87.1
<i>dont France</i>	5.1	7.3	36.6
• USA	28.6	2.3	68.8
• Inde	28.3	2.0	57.5
• Russie	33.9	1.9	42.0
• Canada	11.0	2.2	23.0
• Ukraine	8.5	2.0	19.0
• Turquie	8.0	2.0	18.7
• Australie	9.5	1.5	16.2
.....			
• Total monde	271	2.3	≈ 610

La France, un grand pays semencier

(Année 1999)	Surfaces (ha)	Rendements (qx/ha)	Production (Mi de tonnes)
• Toutes céréales	8 274 000	71.1	63.4
• Blé tendre	4 816 000	73.0	35.1
• Blé dur	330 000	45.5	1.5
• Maïs	1 734 000	84.1	14.6
• Orge d'hiver	1 057 000	65.6	6.9
• Orge de printemps	476 000	57.7	2,8
• Avoine	122 000	46.0	0.6
• Seigle	41 000	45.8	0.2
• Triticale	231 000	52.4	1.2
• Sorgho	56 000	55.4	0.3
• Riz	16 000	58.3	0.1

Evolution du rendement de la culture du blé tendre en France



II - PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET STRUCTURE DES GRAINS DE CÉRÉALES

Généralités sur la structure des grains de céréales

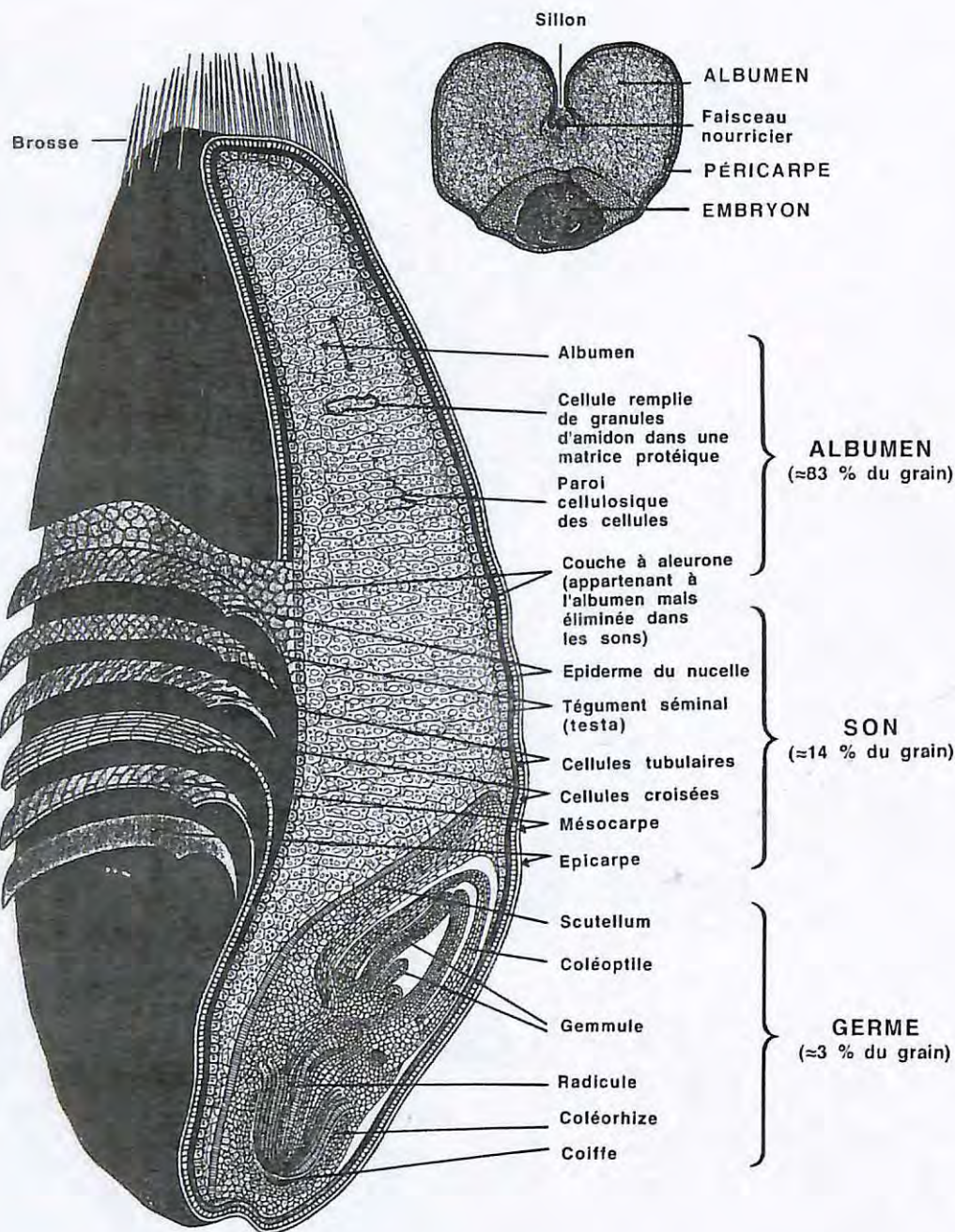
Les différents types de grains : blé, orge, seigle, triticale,
seigle, avoine, maïs, riz, sorgho, millet

Notions de dureté et de vitrosité

Conséquences sur les technologies de première
transformation (broyage, mouture, décorticage, abrasion,
et sur la nature des produits obtenus

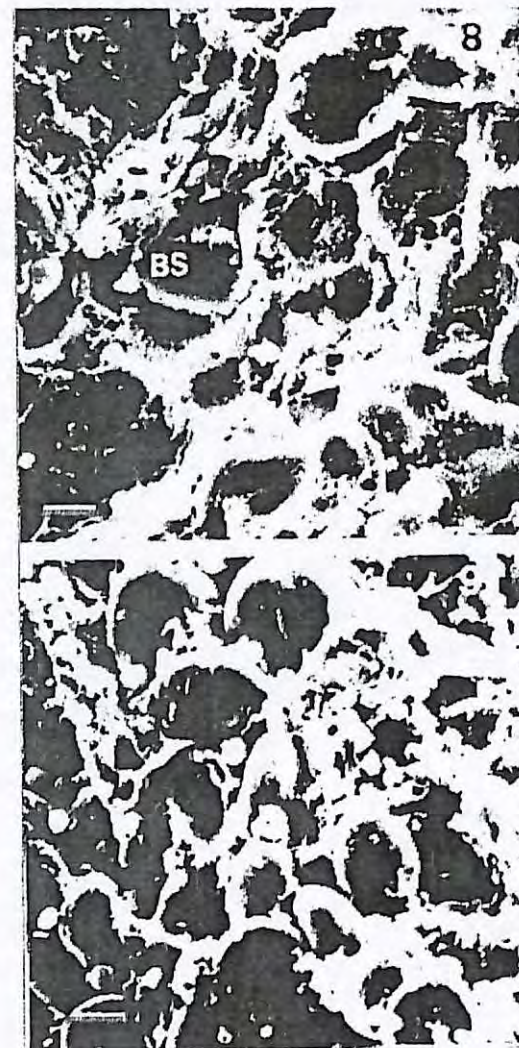
*Recherches en cours sur la fragmentation et sur le
fractionnement des grains de céréales*

Section d'un grain de blé



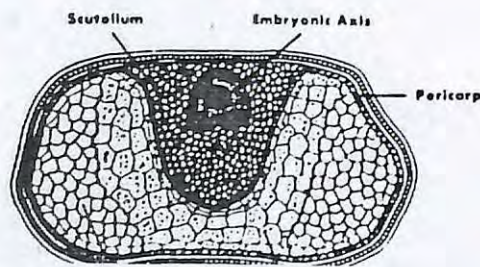
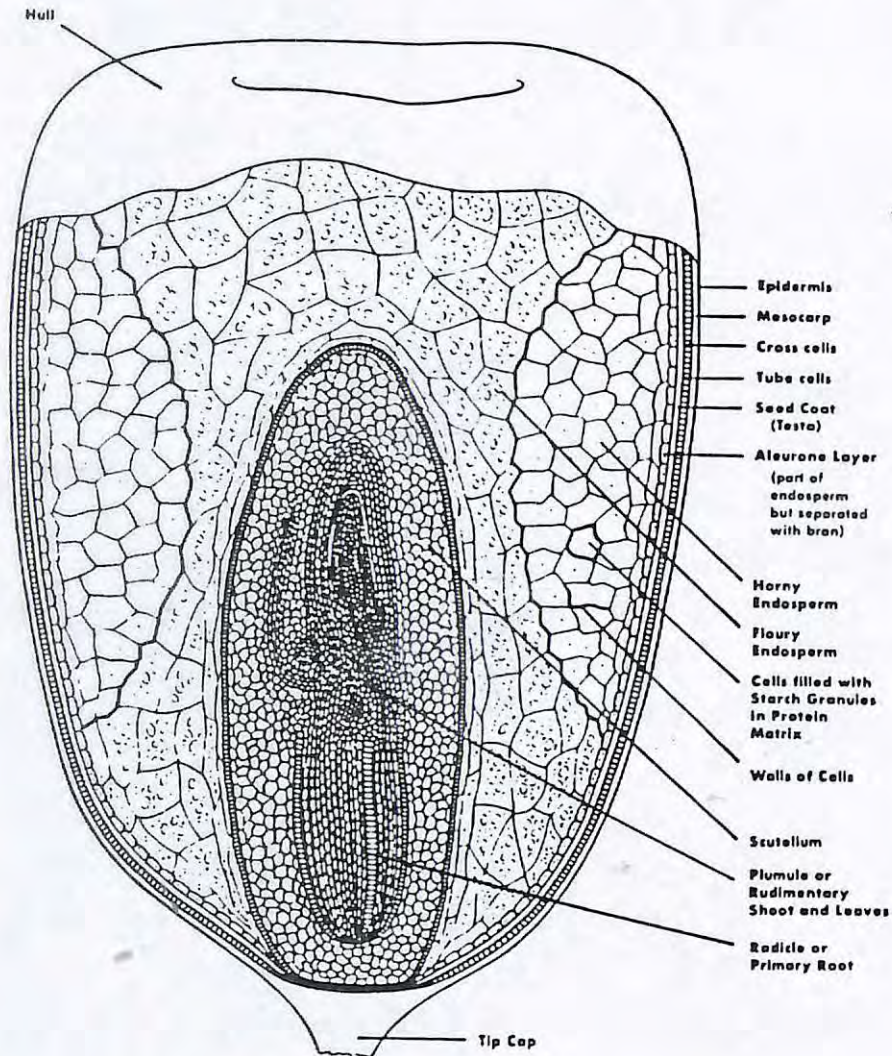
Microscopie électronique à balayage des cellules de l'albumen de grains de blé

Blé de type "hard"
 BS = granule d'amidon endommagé

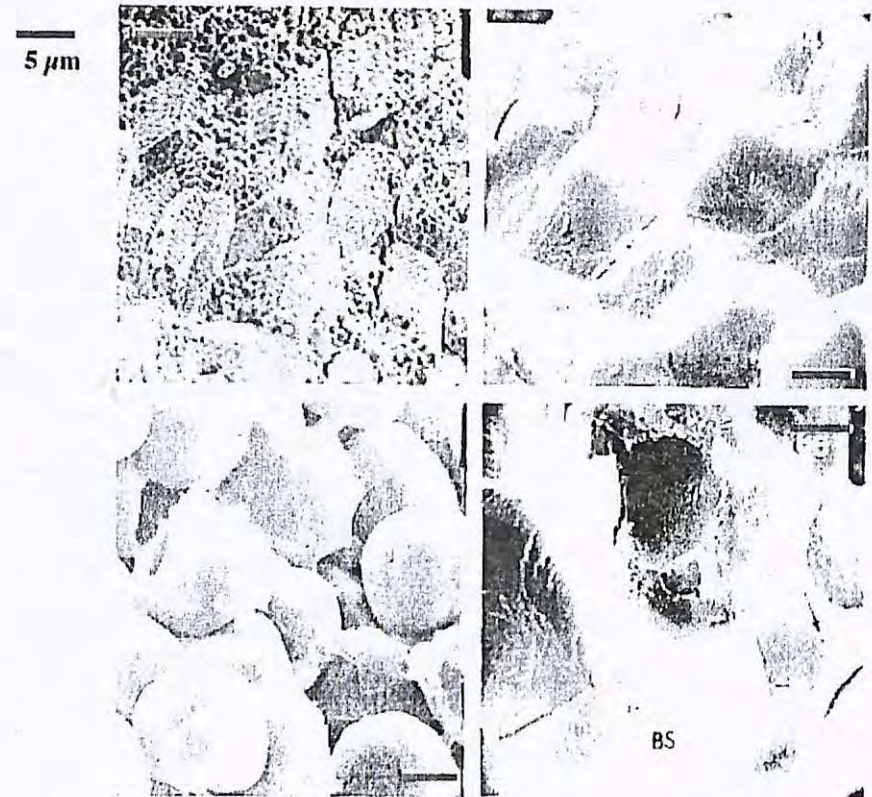


Blé de type "soft"

Section d'un grain de maïs



Microscopie électronique à balayage des cellules de l'albumen de grains de maïs



13. Fracture d'un grain, montrant la nature cellulaire de l'albumen
14. Coupe d'une région vitreuse de l'albumen
15. Coupe d'une région farineuse de l'albumen
16. Coupe d'une région vitreuse montrant le hile d'un granule ainsi qu'un granule brisé (BS)

HISTOLOGIE DU MAIS

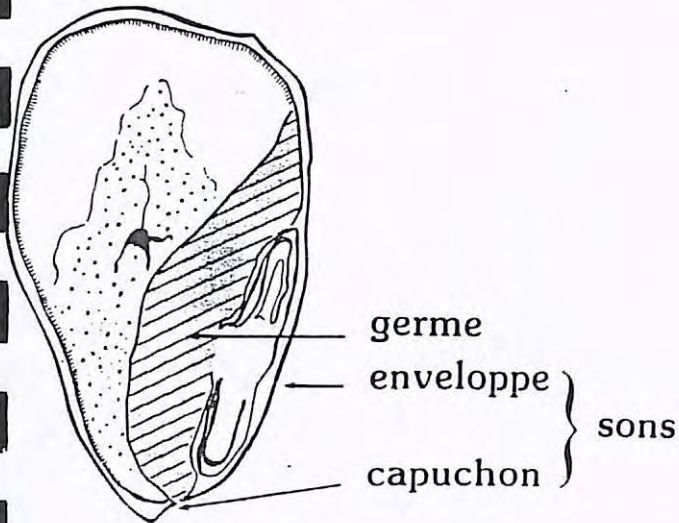


Fig. 1 : Coupe d'un grain corné

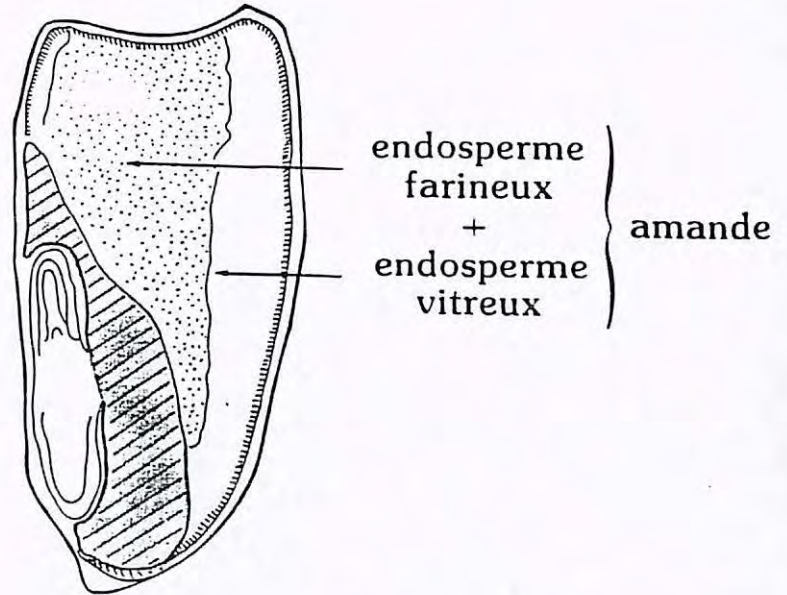
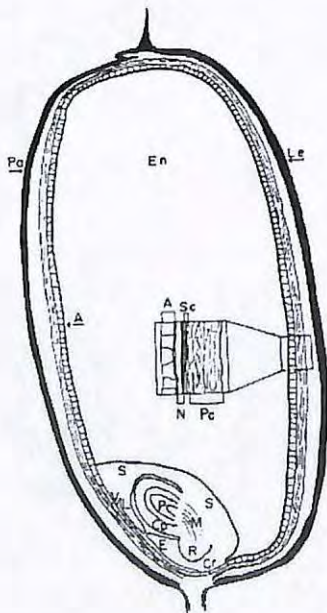


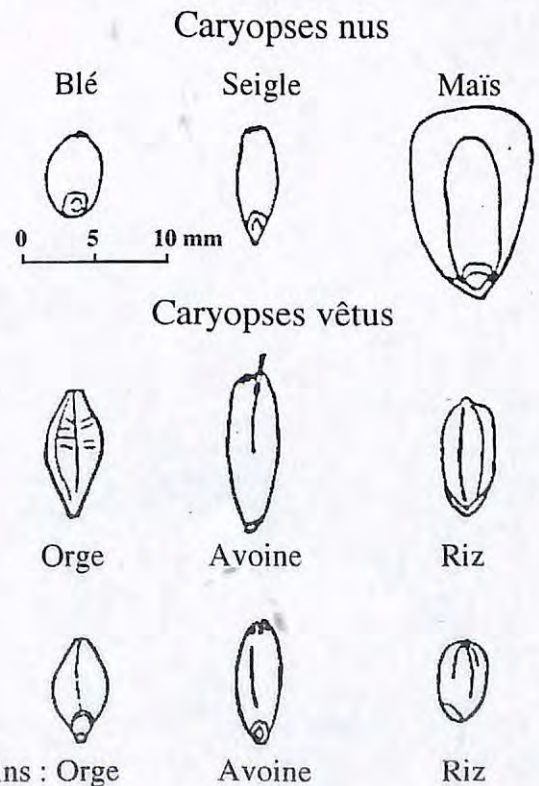
Fig. 2 : Coupe d'un grain denté

Section longitudinale d'un grain de riz



Albumer: (En), palea (Pa), lemma (Le), péricarpe (Pc), tégument de la graine (Sc), nucelle (N), couche à aleurone (A), scutellum (S), coléoptile (Cp), plumule (P), mésocotyle (M), radicule (R), épiblaste (E), coléorhize (Cr).

Morphologie comparée des grains des six principales céréales



TAILLE ET COMPOSITION DES GRAINS DE CEREALES

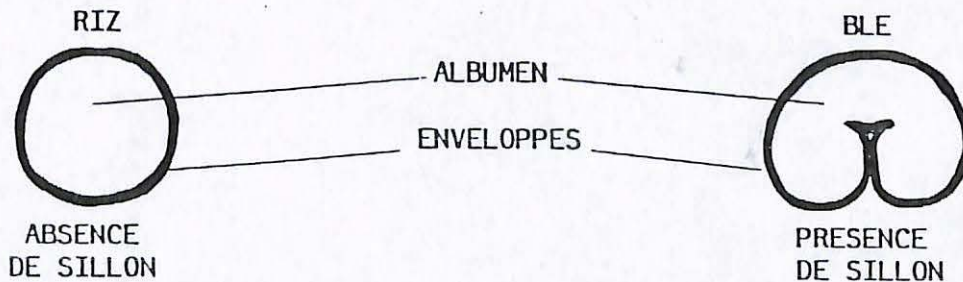
CEREALES	POIDS DE 1000 GRAINS (g.)	% DES GRAINS				
		EMBRYONS	SCUTELLUM	PERICARPE	ALEURONE	ALBUMEN
BLÉ TENDRE	30-45	1.2	1.5	7.9	7.0	81-84
BLÉ DUR	34-46	— 1.6 —	—	12.0	— 86.4 —	—
ORGE (GRAIN)	36-45	1.8		18.3	— 79.0 —	—
MAYS	150-600	1.1	7.2	— 5.5 —		82
SEIGLE	15-40	1.8	1.7	12.0	— 85.1 —	—
SORGHO	8-50	— 7.8 ↔ 12.0 —		— 7.3 ↔ 9.3 —		80-85
RIZ (CARGO)	38-53	— 3.7 —		14.4	— 81.9 —	—

SELON SIMMONDS, 1978

PRINCIPE DU PROCEDE DE MOUTURE

BUT : SEPARER LES ENVELOPPES DE L'ALBUMEN

TYPE DE CEREALES



ELIMINATION DES ENVELOPPES

de l'extérieur
vers l'intérieur

de l'intérieur
vers l'extérieur

NOM DU PROCEDE

DECORTICAGE

MOUTURE

CONDITIONS NECESSAIRES

Dureté et
vitrosité
de l'albumen

Souplesse et
élasticité des
enveloppes

Vitrosité du grain de blé



Sections de grains de blé montrant différents degrés de vitrosité



Grain de blé vitreux (à gauche) et le même blé après humidification et séchage (à droite)

La dureté d'un matériau est définie comme la difficulté à le pénétrer ou à le séparer en fragments. La dureté des grains de céréales est plus généralement assimilée à la force requise pour les déformer ou les fragmenter. La manière selon laquelle la fracture se propage, la taille des fragments, et leur comportement au cours du tamisage dépendent de la dureté. La dureté, et plus généralement, les propriétés mécaniques, sont parmi les caractéristiques les plus importantes des grains de céréales, car elles déterminent la valeur meunière et la qualité des farines obtenues.

Les blés "hard" et les blés "soft" doivent être traités différemment en meunerie : Les blés "hard" doivent être amenés à une teneur en eau plus élevée que les blés "soft" ; lors du broyage, les blés "hard" donnent de gros fragments (semoules), alors que les blés "soft" se pulvérisent en fines particules (farines) qui, en raison de l'irrégularité de leur surface posent davantage de problèmes d'agglomération, d'écoulement et de tamisage.

Au niveau microscopique, il y a une différence fondamentale de propagation de la fracture entre blés "hard" et blés "soft". Les grains de blés "hard" tendent à se fracturer au niveau des parois cellulaires, ou (lorsque des cellules sont brisées), au sein des granules d'amidon, alors que l'albumen des blés "soft" se fracture le long de l'interface amidon-protéine, laissant des granules d'amidon intacts lors de la mouture. Pour la même raison (la fracture suivant également les parois cellulaires entre albumen et couche à aleurone), les blés "hard" se caractérisent par une meilleure séparation des sons d'avec les farines et un taux d'extraction plus élevé de ces dernières. Mais les farines de blés "hard" contiennent un pourcentage plus élevé d'amidon mécaniquement endommagé que les blés "soft".

L'albumen des grains de céréales varie également au plan de son aspect visuel : il peut avoir un aspect farineux, ou opaque lorsqu'il renferme des micro cavités d'air, qui diffusent la lumière ; il peut être vitreux ou translucide s'il ne contient pas de vides entre l'amidon et les protéines. Bien que les grains "hard", riches en protéines, tendent à être vitreux, la dureté doit être distinguée de la vitrosité car elles n'ont pas la même cause fondamentale (et il est possible de trouver des blés "hard" qui soient opaques et des blés "soft" qui soient, vitreux. La dureté est un caractère génétique, qui est lié à une forte adhérence entre le granule d'amidon et la matrice protéique. La vitrosité est liée à la présence de micro cavités dans l'albumen et dépend largement de facteurs agronomiques, notamment la fertilisation azotée de la plante.

La dureté d'un blé détermine sa valeur d'utilisation. Les blés les plus durs (espèce *Triticum durum*) sont utilisés pour la fabrication de pâtes alimentaires, tandis que les blés les plus "soft" sont préférés pour la fabrication de biscuits, cakes ou pour l'amidonnerie et les produits dérivés de l'amidon (papeterie), les blés intermédiaires étant plutôt adaptés à la boulangerie. La dureté joue aussi un rôle essentiel chez le maïs et le sorgho : les maïs cornés ont une meilleure valeur semoulière et une meilleure aptitude à la fabrication de corn-flakes.

Dureté et vitrosité sont deux termes utilisés pour caractériser la texture de l'albumen des céréales : la dureté est une propriété mécanique qui ne résulte pas directement de la vitrosité, laquelle est une propriété optique. Ainsi, un blé dur (*Triticum durum*), même partiellement farineux (mitadiné) reste beaucoup plus dur qu'un blé *Triticum aestivum* entièrement vitreux.

La dureté du grain est un caractère variétal

Indice de dureté *	Classe	Variétés
< 30	extra-soft	Artaban, Sidéral,
30-40	soft	Gaspard, Scipion
40-50	medium-soft	Forby, Texel,
50-60	medium hard	Arpain, Darius
60-70	hard	Récital, Soissons Camp-Rémy
≥ 70	extra-hard	Baroudeur, Génial, Manital

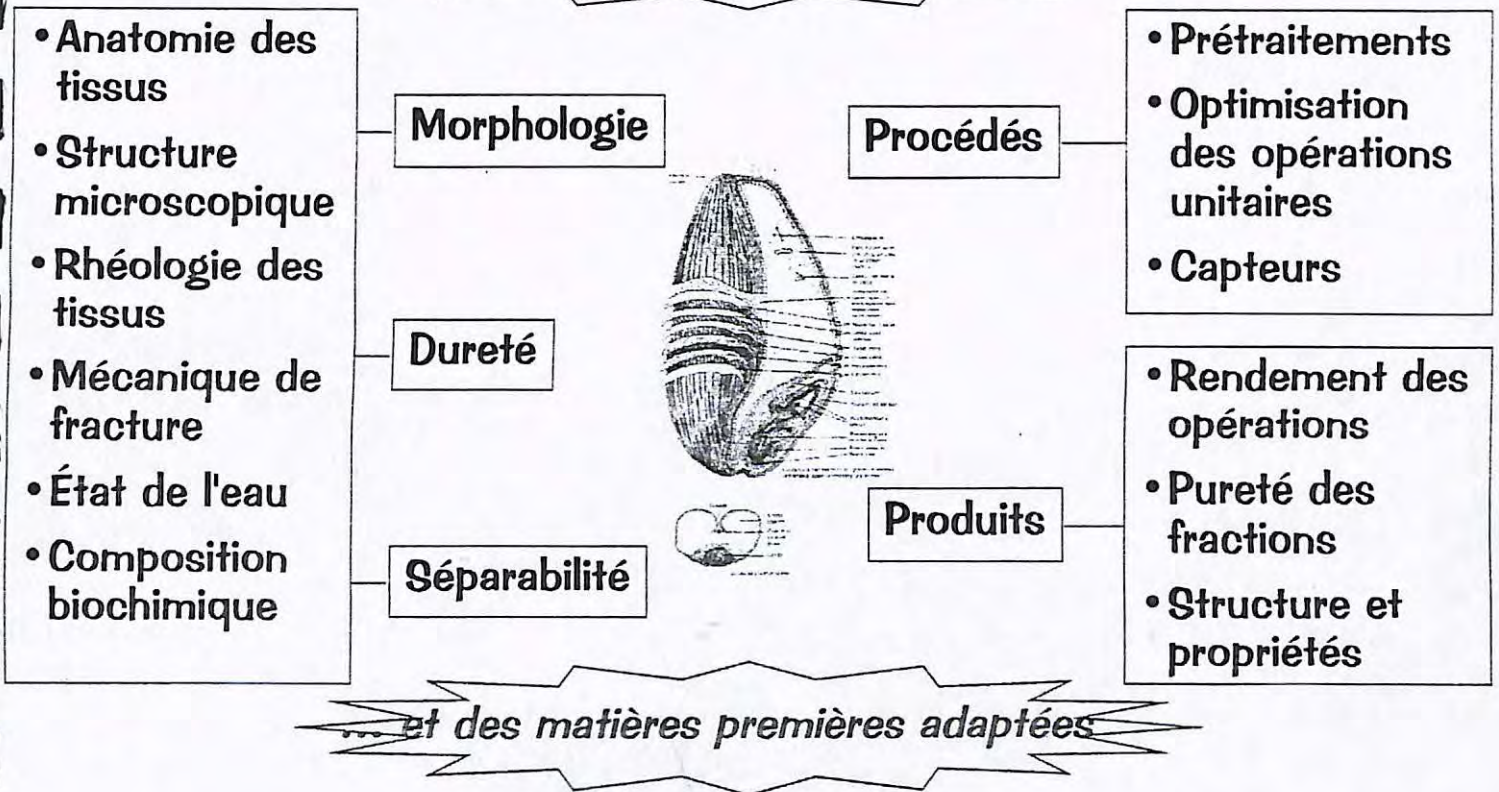
* Selon spectrométrie de réflexion dans le proche infra-rouge

Théories explicatives de la dureté de l'albumen

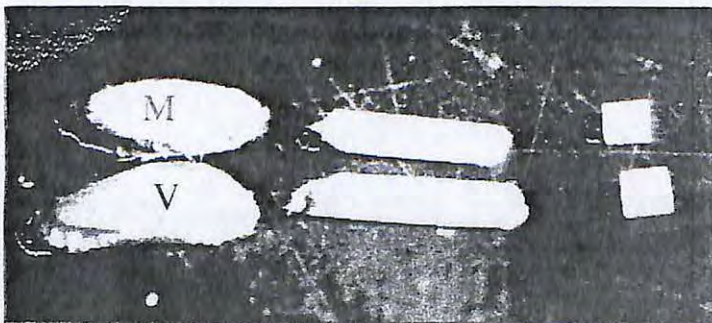
- Force de la liaison entre le granule d'amidon et la matrice protéique (Barlow *et al.*, 1973)
- Continuité du réseau protéique qui enserre les granules d'amidon (Stenvert et Kingswood, 1977)
- Charge électrique des protéines de l'albumen immature (Doekes, 1985)
- *Friabiline*, protéine de surface du granule d'amidon, qui réduit l'adhérence à l'interface amidon-protéine (Greenwell et Schofield, 1986)

Fractionnement des grains de céréales par voie sèche

Des procédés nouveaux...



Development of techniques for production of samples suitable for dynamic methods



Preparation of samples of endosperm
(M = mealy ; V = vitreous)



Two samples of endosperm
from the same wheat kernel

III - COMPOSITION DES GRAINS DE CÉRÉALES

Amidon

- Le granule d'amidon et son organisation
- Composition chimique
- Gélatinisation et rétrogradation
- Amidons modifiés
- Conversion des amidons en sucres

Autres polysaccharides

- Cellulose
- Pentosanes (arabinoxylanes)

Protéines

- Teneurs en protéines des grains de céréales
- Classification des protéines des céréales : protéines solubles, protéines de réserve, protéines du gluten
- Compositions en acides aminés
- Hétérogénéité et polymorphisme génétique
- Structure et propriétés fonctionnelles : interactions dans la pâte

Constituants mineurs

- Lipides, enzymes
- Vitamines, matières minérales

Composition biochimique des grains de céréales

<u>Céréale</u>	Protéines %N x 5,7	Lipides %	Amidon %	Cellulose %	Minéraux %
• Blé (USA)	16,0	2,9	74,1	2,6	1,8
• " (Europe)	10,5	2,6	78,6	2,5	1,8
• Seigle	13,8	1,4	79,7	2,6	2,2
• Orge	11,8	1,8	78,1	5,3	3,1
• Avoine	11,6	5,2	69,8	10,4	2,9
• Riz (paddy)	9,1	2,2	71,2	10,2	7,2
• " (cargo)	11,0	2,7	83,2	1,2	1,8
• " (blanchi)	9,8	0,5	88,9	0,3	0,6
• Maïs (corné)	11,1	4,9	80,2	2,1	1,7
• " (denté)	10,6	4,6	81,0	2,2	1,6
• Sorgho	12,4	3,6	79,7	2,7	1,7

Composition biochimique du grain de blé

Tissus	Grain entier	Péricarpe	Couche à aleurone	Albumen amylacé	Germe
• Protéines	14,0	8,5	28,2	12,0	30,5
• Lipides	2,1	0	9,4	1,6	11,8
• Amidon	68,8	0	0	82,0	0
• Sucres réd.	2,3	0	0	1,6	30,5
• Pentosanes	7,7	40,5	45,2	1,4	7,5
• Cellulose	2,7	45,0	4,1	0,3	2,3
• Minéraux	1,9	5,9	12,0	0,6	6,2

Composition biochimique du grain de maïs

Tissus	Grain entier	Péricarpe (son)	Pointe	Albumen amylicé	Germe
• Protéines	9,1	3,7	9,1	8,0	18,4
• Lipides	4,4	1,0	3,8	0,8	33,2
• Amidon	73,4	7,3	5,3	87,6	8,3
• Sucres réd.	1,9	0,3	1,6	0,6	10,8
• Pentosanes	7,0	86,9	78,6	2,7	18,8
• Cellulose	2,0				
• Minéraux	1,4	0,8	1,6	0,3	10,5

Répartition des constituants du grain de blé dans ses principales régions histologiques

Tissus	% / au grain	Constituants				
		Amidon	Protéines	Fibres	Lipides	Minéraux
• Péricarpe testa aleurone	15	0	20	93	30	67
• Albumen	82	100	72	5	50	23
• Embryon scutellum	3	0	8	3	20	10

Microscopie électronique à balayage de granules d'amidon isolés de blé et de maïs

Blé : granules ellipsoïdaux, de types A (15-20 μm) et B (2-3 μm)

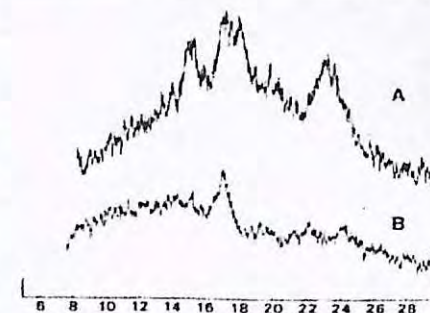
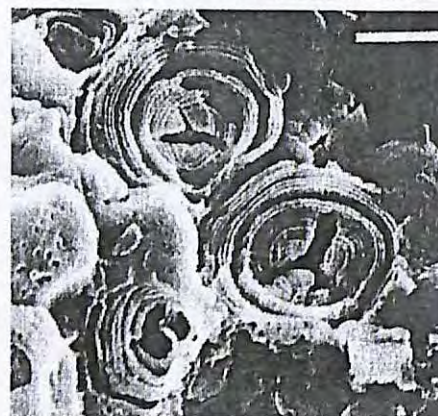


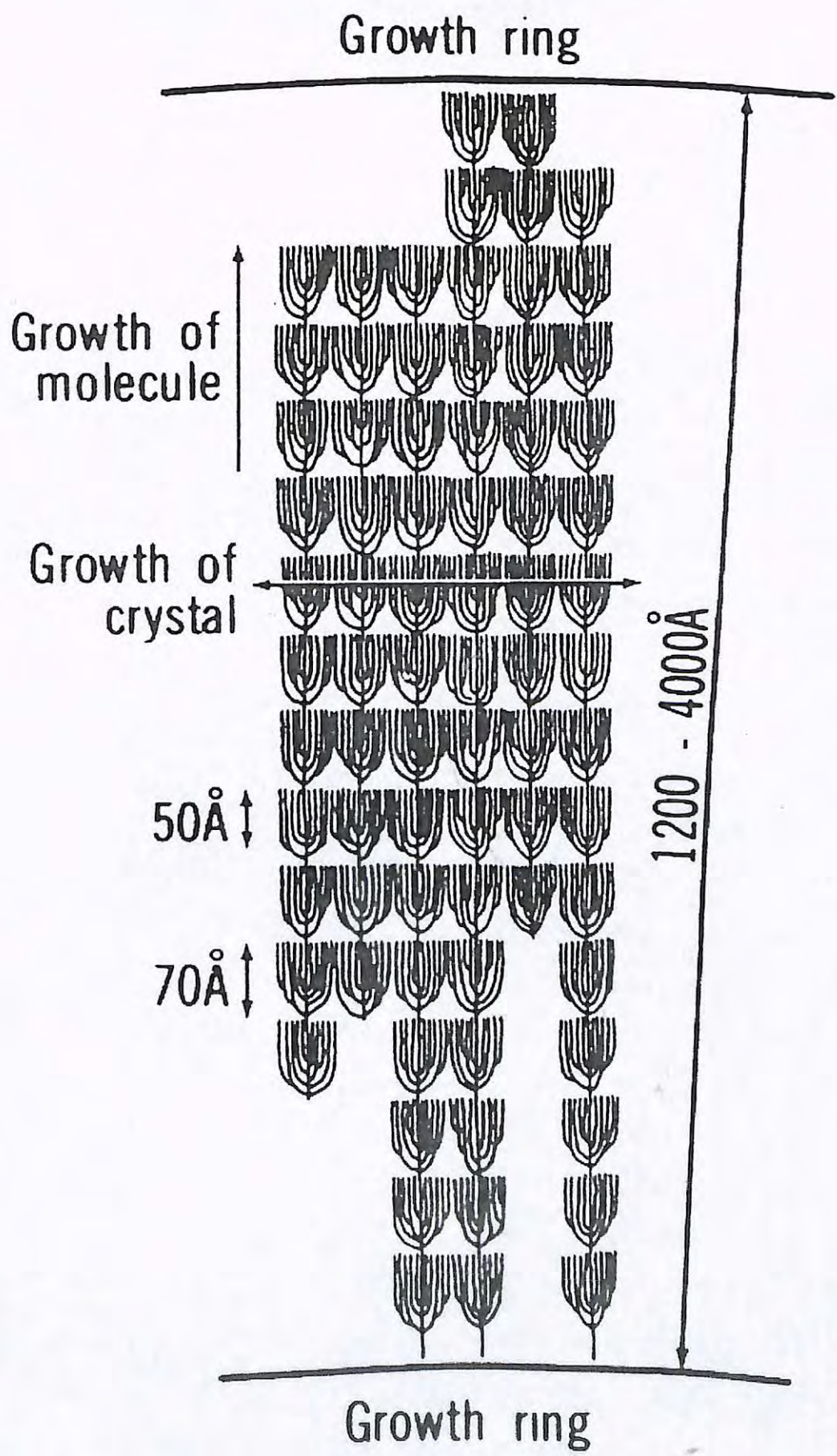
Maïs : granules anguleux, homogènes de $\approx 10 \mu\text{m}$



Structure du granule d'amidon

- Le granule est composé de structures alternées cristallines et amorphes
- L'amylose est distribuée dans les zones amorphes du granule
- 14-45 % de l'amylopectine sont cristallins
- Les anneaux sont composés de couches de 50 Å formées par les hélices doubles des chaînes externes de l'amylopectine
- Deux types de cristallinité (en diffraction des rayons X : type A (le plus stable thermodynamiquement) chez les céréales et type B chez les tubercules)



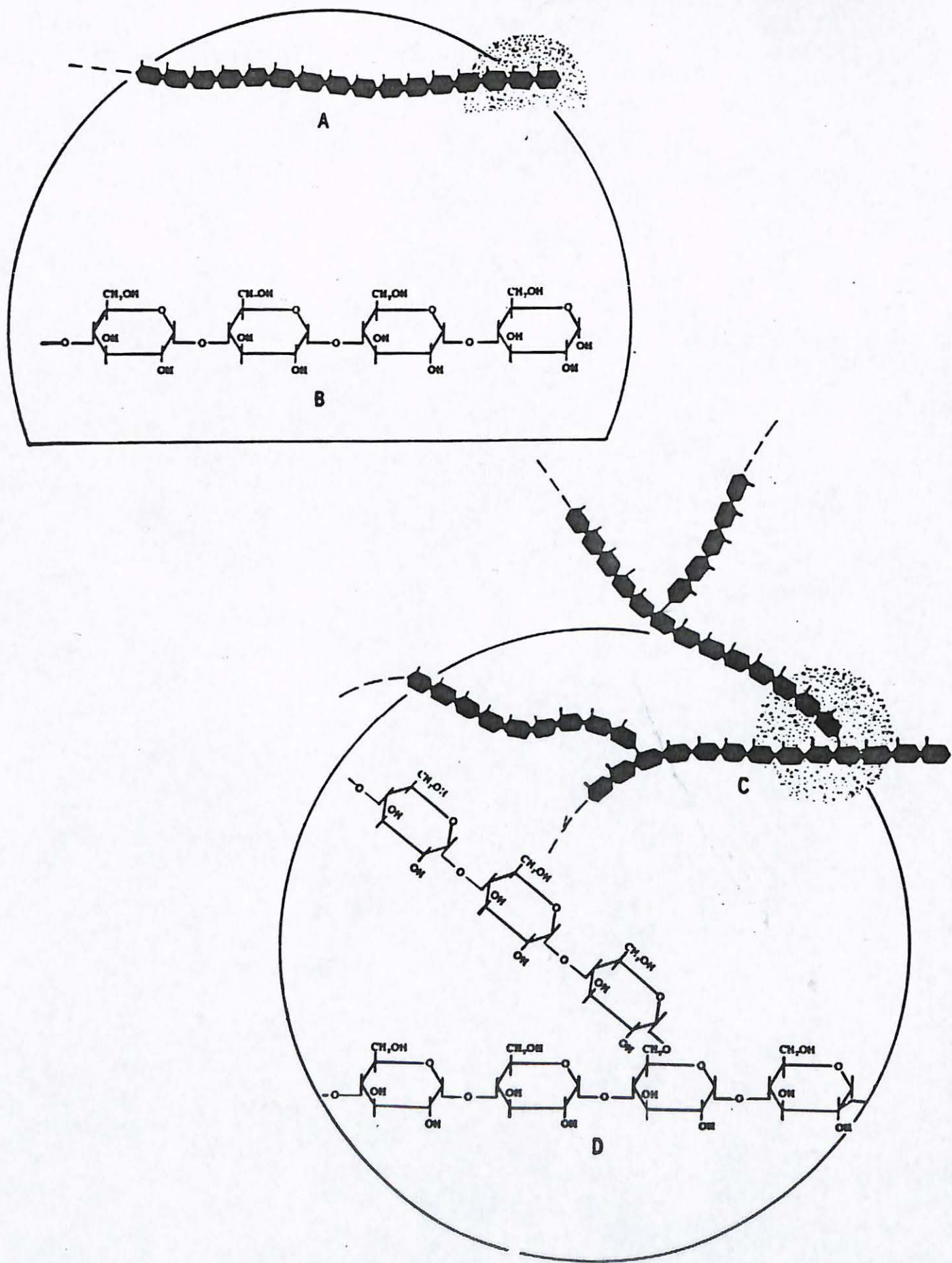


Model of the structure of amylopectin in starch granules.

CHARACTERISTICS OF STARCH GRANULES OF CEREALS*

Cereal	Size (μm)	Shape	Notes
Wheat	Large: 15-40 Small: 1-10	Spherical or lenticular Spherical	Granules simple
Triticale	As wheat	'	
Rye	Large: 25-60	Spherical or lenticular	Concentric markings sometimes noticeable. Hilum visible
	Small: 2-10	Spherical	
Barley	Large: 10-30	Lenticular, kidney- shaped or sub- angular	No concentric markings
	Small: 1-5	Spherical or spindle- shaped	Often in groups
Oats	Compound: up to 60	Lenticular	Containing up to 80 individual granules
	Simple: 2-10	Spherical	Single granules
Rice	Compound granules: individual granules 2-12	Angular	Containing up to 150 individual granules. Hilum not visible
Maize	2-30; av. 10 2-30; av. 10	1. Angular, polygonal 2. Spherical	In flinty endosperm In mealy endosperm. No concentric rings. Star-shaped hilum present
Sorghum	6-20; av. 15	As maize, but slightly larger	
Millet	4-10; av. 7	Angular, polygonal	Granules simple

*Sources of data: Duly (1928), Jones *et al.* (1959), Kerr (1950), Whistler and Smart (1953), Matz (1969), Macgregor *et al.* (1971).



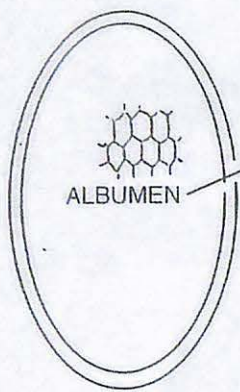
Structure of the amylose and amylopectin components of starch. A, diagram of a portion of an amylose molecule; B, enlarged view of the shaded section of A, showing the chemical formula; C, diagram of a portion of an amylopectin molecule; D, enlarged view of the shaded section of C, showing the chemical formula. (Reprinted, with permission, from Pazur, 1965)

Rôle de l'amidon en panification

- L'amidon intervient de différentes manières au cours de la fabrication du pain :
 - - c'est une source inépuisable de sucres fermentescibles assurant la multiplication et la croissance des levures
 - - c'est également un "fixateur" d'eau. On admet que l'amidon absorbe environ 45% de l'eau ajoutée à la farine (selon la répartition approximative 70 /30 entre les granules d'amidon natifs et les granules d'amidon endommagés quand ces derniers, cas usuel, représentent 15% de l'amidon)
 - - c'est enfin une "charge" de remplissage assurant une fonction de dilution du gluten.

Index glycémique de quelques produits céréaliers

<i>Produits</i>	<i>Index glycémique</i>
Pâtes alimentaires	50
Riz brun	66
Pain blanc	69
Ebly® (blé dur "légume" précuit)	72
Riz blanc	72
Pain complet	72
Pétales de maïs (corn-flakes)	78
Glucose	100



FARINE

AMIDON (80 %)

PROTEINES (10-15 %)

lipides (2%)

PENTOSANES (2-3 %)

Pentosanes Insolubles (WIP)
(3/4 à 1/2)



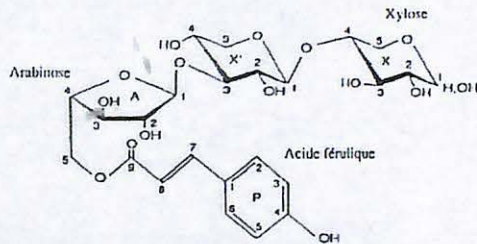
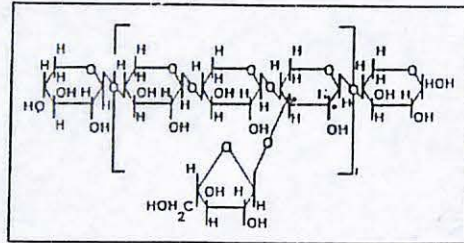
cellulose
glucomannanes

Pentosanes solubles (WSP)
(1/4 à 1/2)



arabinogalactanes

arabinoxylane



POURQUOI ETUDIER LES PENTOSANES ?

Propriétés fonctionnelles importantes liées à leur grande affinité pour l'eau

à l'état isolé:

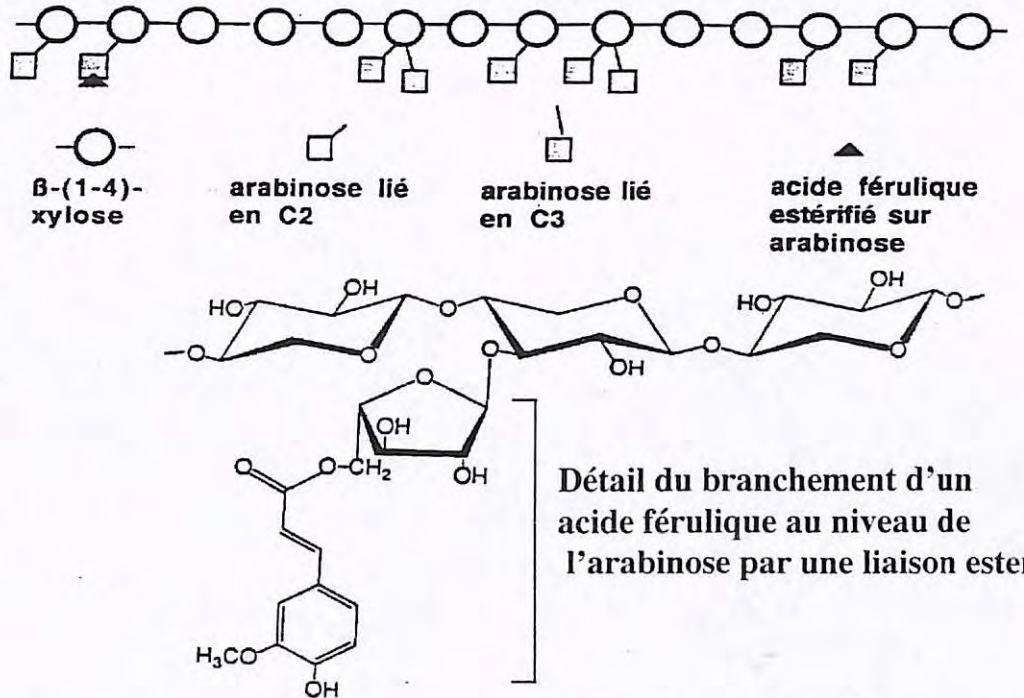
- WIP : forte capacité d'absorption et de rétention d'eau (5 à 10 g/g)
- WSP : viscosité élevée
- formation de gels covalents

dans la pâte:

- fixent environ 1/4 de l'eau ajoutée
- WIP défavorables, WSP favorables ?
- importance démontrée par expériences
- de reconstitutions
- d'addition aux farines
- d'hydrolyse enzymatique extensive

mais les mécanismes d'intervention ne sont pas expliqués

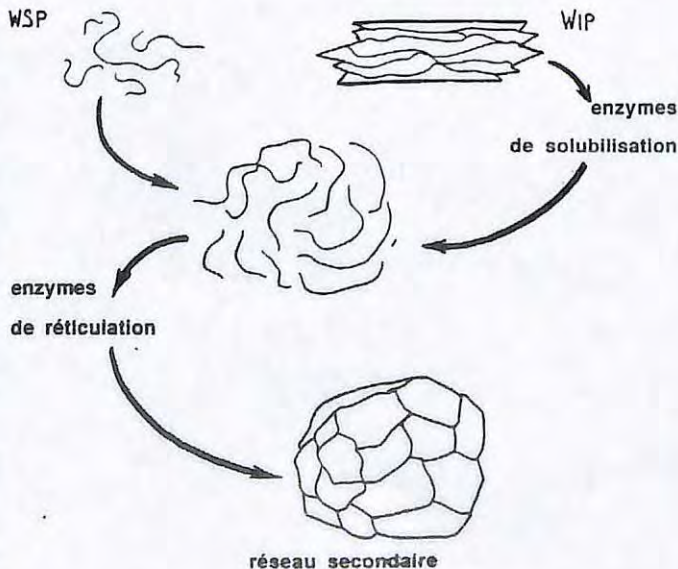
Représentation schématique d'un arabinoxylane de farine de blé



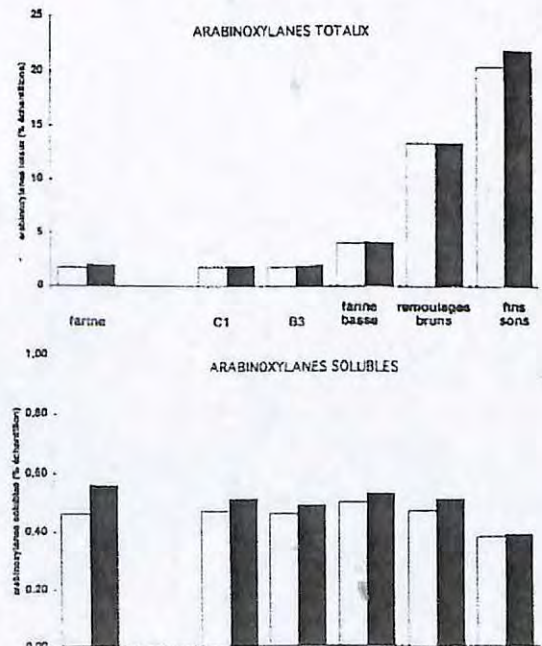
D'après Rouau, *Industries des Céréales*, 1996

SOLUBILISATION ET RETICULATION ENZYMATIQUES DES PENTOSANES

Objectif : mettre en place dans les pâtes un réseau polysaccharidique (réseau secondaire) pour la maîtrise et l'amélioration de la qualité des pâtes et des produits de cuisson



Teneurs en arabinoxylanes totaux et solubles de fractions de mouture de deux blés mettant en évidence le gradient de concentration en pentosanes insolubles de l'intérieur vers l'extérieur du grain



D'après Rouau, *Industries des Céréales*, 1996

Classification traditionnelle des protéines de céréales

<u>Appellation</u>	<u>% moyen</u>	<u>Solubilité</u>	<u>Fonction</u>
Albumines	10	Eau	Protéines métaboliques
Globulines	5	Sels neutres	
Prolamines	45	Alcools dilués	Protéines de réserve
Glutélines	40	Acides dilués, urée, réducteurs détergents	

Composition protéique de l'albumen des céréales (en % des protéines totales)

Céréales	Teneur en protéines (en % m.s.)	Albumines	Globulines	Prolamines	Glutélines
• Blé tendre	10-15	5-10	5-10	40-50	30-40
• Blé dur	12-16	10-15	5-10	40-50	30-40
• Orge	10-16	3-4	10-20	35-45	35-45
• Maïs	7-13	2-10	10-20	50-55	30-45
• Seigle	9-14	20-30	5-10	20-30	30-40
• Avoine	10-15	2-5	30-35	15-20	45-50
• Sorgho	9-13	tr.	tr.	60-70	30-40
• Riz	8-10	2-5	2-8	1-5	85-90

AMINO ACID CONTENT OF CEREAL GRAINS* (G AMINO ACID/16 G NITROGEN)

Amino acid	Wheat	Triticale	Rye	Barley	Oats	Rice	Maize	Sorghum	Millet
Arginine	4.0	4.9	4.2	4.4	6.6	7.7	4.7	2.6	3.3
Cystine	2.6	2.8	2.3	2.5	3.3	1.1	2.5	1.1	1.8
Histidine	2.2	2.5	2.1	2.1	2.2	2.3	2.8	2.1	2.3
Isoleucine	3.8	4.1	3.6	3.8	4.2	3.9	4.0	3.8	4.3
Leucine	6.7	6.7	6.0	6.9	7.2	8.0	12.5	13.6	13.1
Lysine	2.3	3.0	2.9	3.5	3.7	3.7	3.0	2.0	1.7
Methionine	1.7	1.9	1.2	1.6	1.8	2.4	1.8	1.5	2.4
Phenylalanine	4.8	4.8	4.5	5.1	4.9	5.2	5.1	4.9	5.6
Threonine	2.8	3.1	3.3	3.5	3.3	4.1	3.6	3.1	3.1
Tryptophan	1.5	1.6	1.2	1.4	1.6	1.4	0.8	1.0	1.4
Tyrosine	2.7	2.3	1.9	2.5	3.0	3.3	4.4	1.5	3.7
Valine	4.4	5.0	4.9	5.4	5.6	5.7	5.2	5.0	5.4
Alanine	3.3	3.6	3.7	4.1	4.6	6.0	7.7	9.5	11.3
Aspartic acid	4.7	5.9	6.5	6.1	7.8	10.4	6.4	6.3	6.4
Glutamic acid	33.1	30.9	27.5	24.5	21.0	20.4	18.8	21.7	22.2
Glycine	3.7	3.9	3.6	4.2	4.8	5.0	3.9	3.1	2.3
Proline	11.1	10.7	10.4	10.9	4.7	4.8	8.8	7.9	6.9
Serine	5.0	4.6	4.3	4.2	4.8	5.2	4.9	4.3	6.9
Protein (N × 5.7)†	16.3	17.9	14.5	12.1	17.8	11.1	10.6	10.5	13.5

*Data for wheat, triticale, rye, barley, oats and millet from Tkachuk and Irvine (1969); data for rice (except tryptophan) from Juliano *et al.* (1964); data for maize (except tryptophan) from Busson *et al.* (1966); data for sorghum from Deyoe and Shellenberger (1965). Tryptophan data for rice and maize calculated from Hughes (1967).

†All data are for whole grains, except oats and rice—hulled grains—and rye—dark rye flour, ash 1.1% d.m.b.

‡Dry matter basis. Original data for maize and sorghum given as N × 6.25, viz. 11.6% and 11.5%, respectively.

AMINO ACID COMPOSITION OF WHEAT PROTEINS—GLUTENIN,
GLIADIN, ALBUMIN, GLOBULIN
(G AMINO ACID/16 G NITROGEN)

Amino acid	Glutenin*	Gliadin*	Albumin†	Globulin§
Alanine	3.1	2.3	5.6	4.3
Arginine	4.2	2.7	7.5	14.5
Aspartic acid	3.9	3.0	7.9	6.3
Cystine	2.5	3.1	6.7	12.6
Glutamic acid	34.1	40.0	17.7	5.9
Glycine	4.5	1.8	3.1	5.6
Histidine	2.4	2.3	4.3	2.2
Hydroxylysine	n.d.	n.d.	0.2	0
Isoleucine	3.9	4.5	4.1	1.4
Leucine	6.9	7.2	10.7	9.2
Lysine	2.3	0.7	11.0	12.2
Methionine	1.7	1.5	0	0.4
Phenylalanine	4.8	5.6	5.0	3.2
Proline	11.0	14.7	8.4	3.3
Serine	5.9	5.1	4.7	9.1
Threonine	3.3	2.3	2.9	4.5
Tryptophan	2.1	0.7	n.d.	n.d.
Tyrosine	3.6	2.6	3.4	2.3
Valine	4.5	4.4	8.1	2.2

*From Ewart (1967), recalculated. Original data are given as moles of anhydro amino acids per 10⁵ of recovered anhydro amino acids.

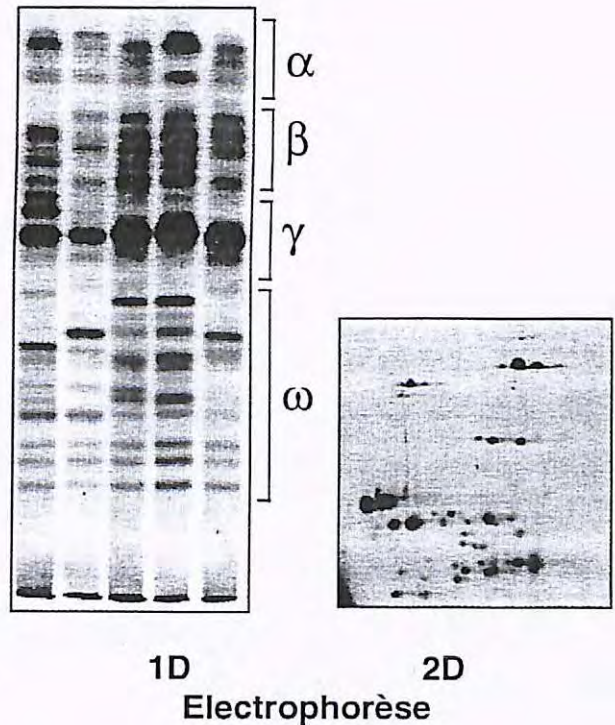
†From Waldschmidt-Leitz and Hochstrasser (1961).

§From Fisher *et al.* (1968).

n.d.: not determined.

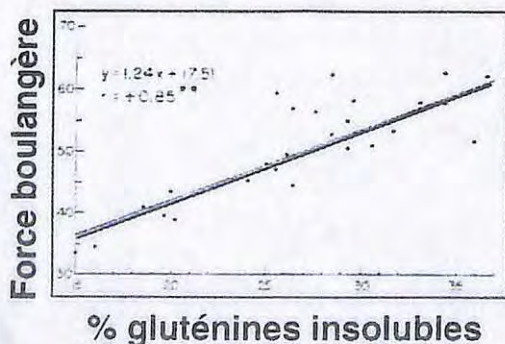
Gliadines

- Protéines monomériques, une centaine
- Taille : 30 000 à 70 000
- Classées en : α , β , γ et ω
- Liaisons disulfures intramoléculaires (absentes chez les ω)
- Contribuent à la viscosité et à l'extensibilité du gluten et de la pâte



Gluténines

- Protéines polymériques, très hétérogènes, poids moléculaire 10^5 à $n \times 10^6$
- Constituées de sous-unités de haut poids (HMW) ou de faible (LMW) poids moléculaire
- HMW : 20-30 % des gluténines, PM 60 à 90 000
- LMW : 70-80 % des gluténines, PM 30-50 000
- S-unités réunies par des liaisons covalentes (S-S) et non covalentes
- Les HMW contribuent à la ténacité et à l'élasticité du gluten et de la pâte



Gluten

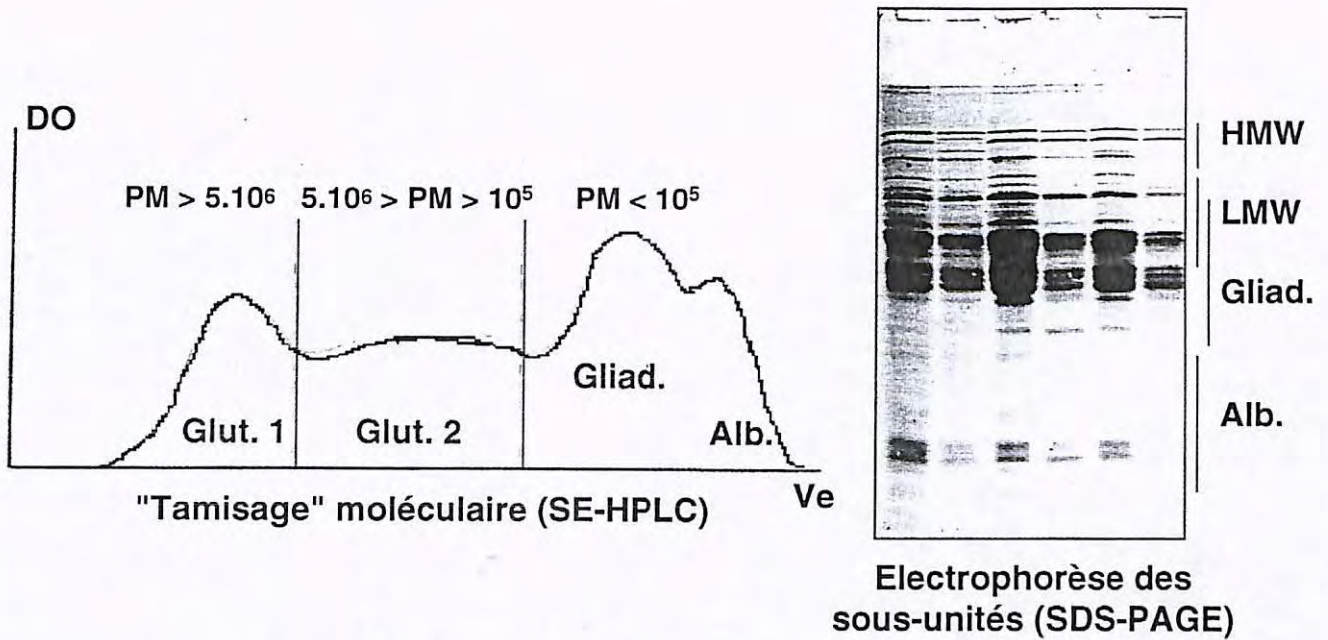


Gliadine

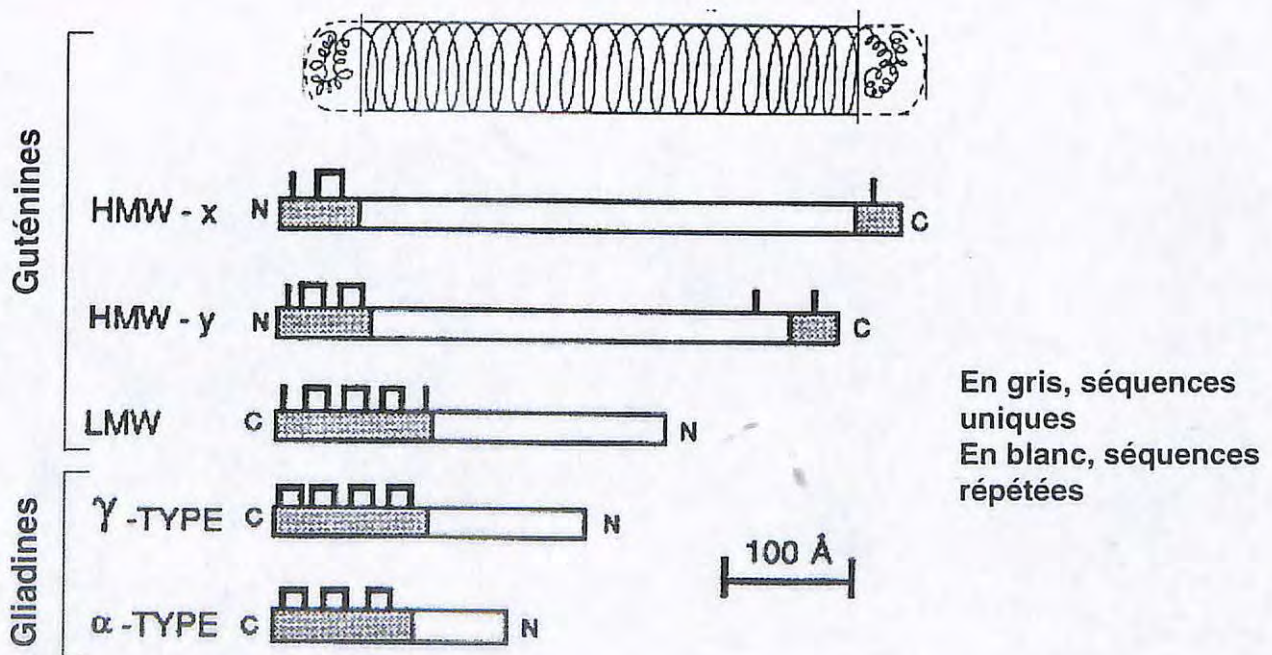


Gluténine

Taille des protéines du blé



Représentation schématique des séquences des principales familles de protéines du blé

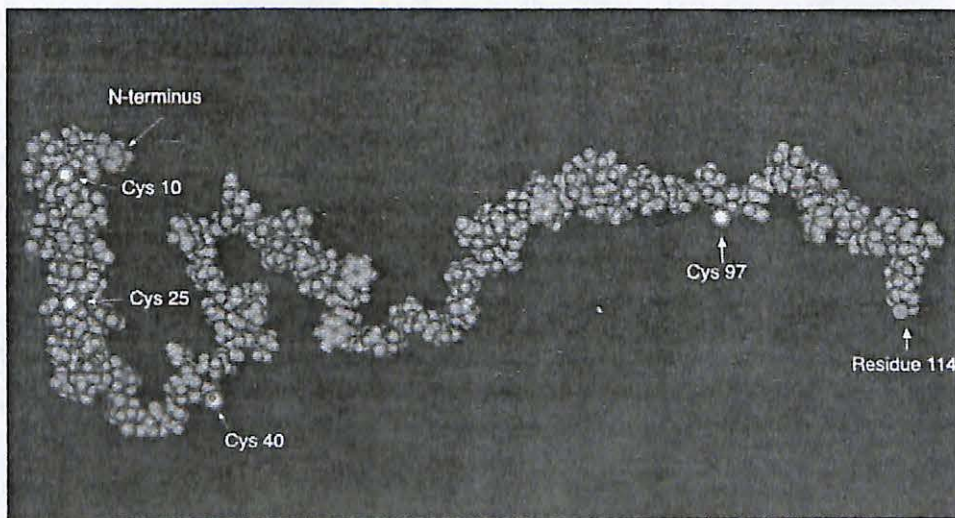


D'après Kasarda (1989) et Shewry *et al.* (1989)

Hierarchical arrangement of high molecular weight (HMW) and low molecular weight glutenin subunits (LWW-GS) in relation to their contribution to dough strength

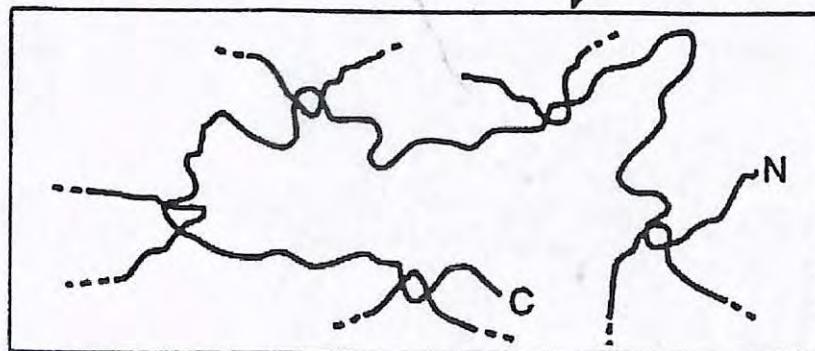
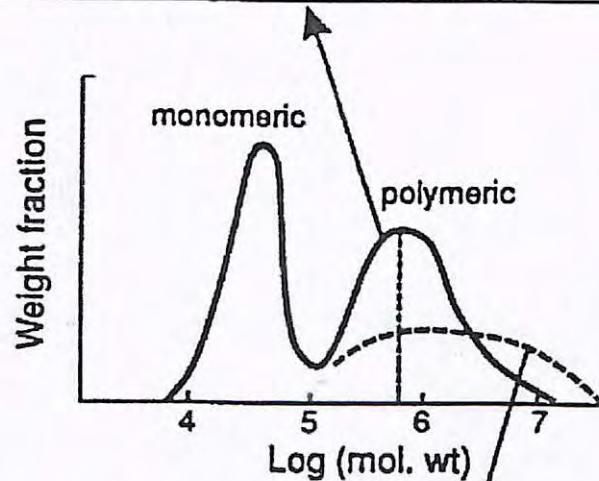
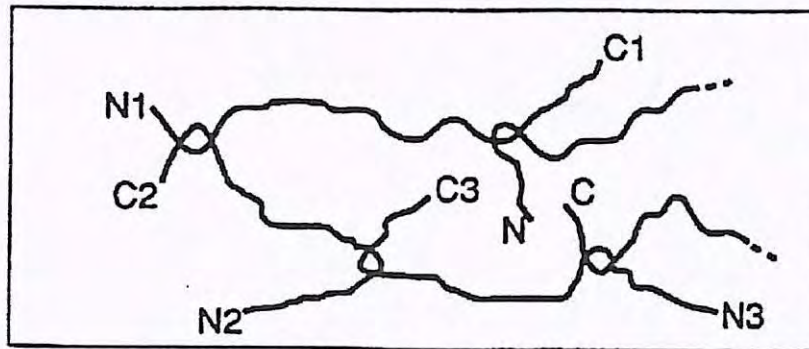
	Dx5	Dx2	Dy10	Dy12	Bx7	LMW-GS (LMW-s, LMW-m)
No. InterMol. Crosslinks	5	4	3	3	2	2
AAs in Repeat Domain	690	680	481	492	647	200-150
Polymer Type	branched	branched	branched	branched	linear	linear

From Kasarda, 1999



N-terminal region (residues 1-114) of Dx5 HMW glutenin subunit showing cysteine positions (from Kasarda, 1999)

moderate R_{max}
 moderate mixing requirements
 high extensibility



moderate R_{max}
 high mixing time and intensity requirements
 low extensibility

Model of interactions between the chains of gluten polymers due to entanglement coupling (darkened region where different chains cross). The bottom diagram (corresponding to the dotted MW profile) shows only one polymer chain (from N to C terminal ends), and entanglements with several other chains. The top diagram illustrates three short chains (N1...C1, N2...C2, N3...C.) whose entanglements with one another would be readily disentangled by applying a stress; their lower size distribution is shown by the solid line in the graph.

La qualité des protéines

- ❑ Notion qui dépend du domaine d'utilisation des farines
- ❑ *En boulangerie* : capacité des protéines à former, au cours du pétrissage, des complexes insolubles, des réseaux viscoélastiques conférant à la pâte des propriétés de ténacité, élasticité et extensibilité
- ❑ *En biscuiterie* : capacité à former des réseaux extensibles et non élastiques pour éviter la rétraction des biscuits

Evolution de la composition protéique en fonction des apports azotés

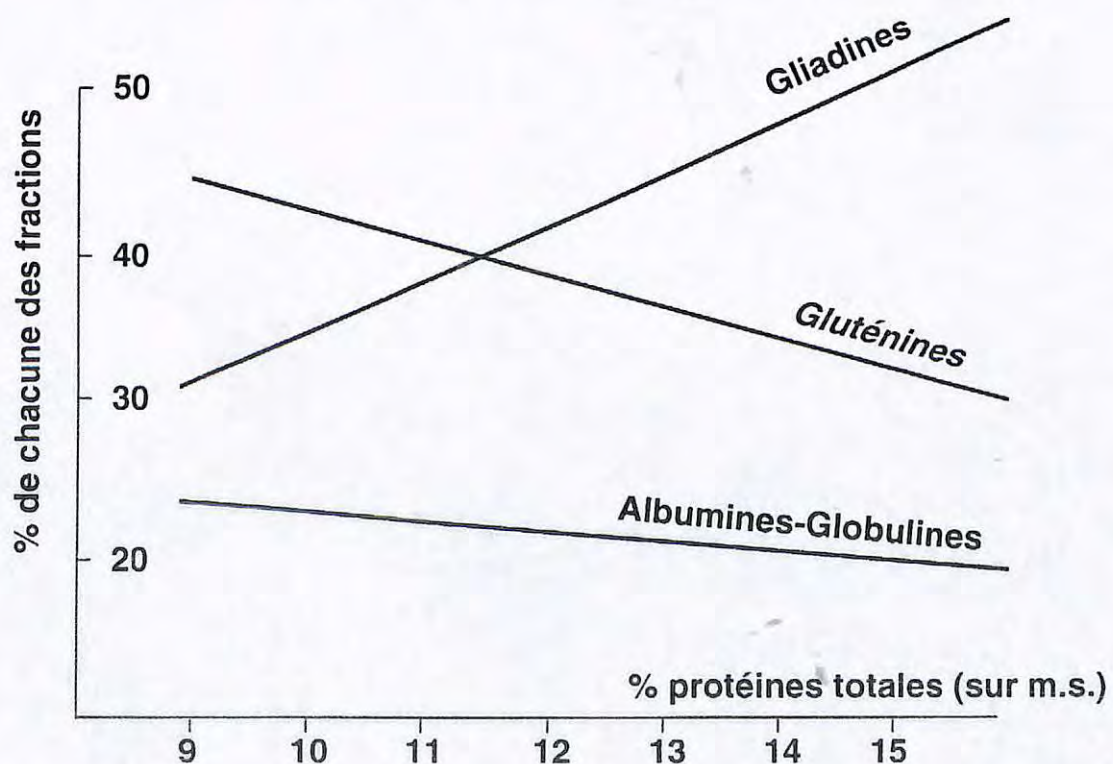
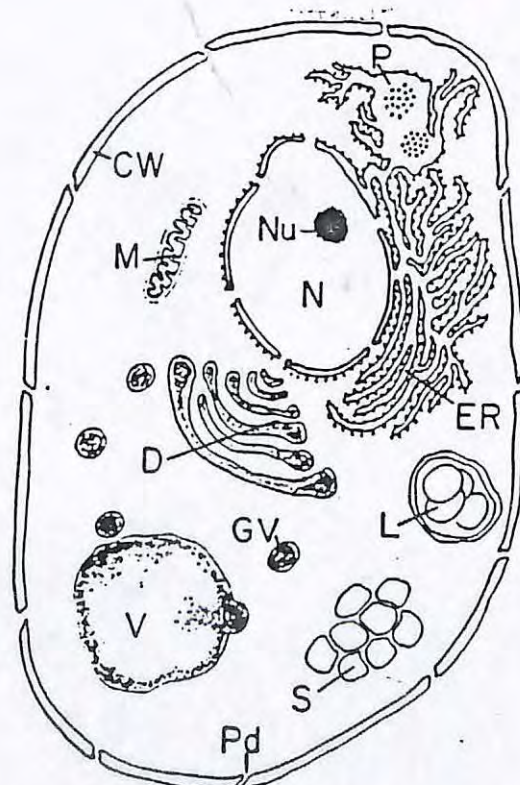


TABLE II. PROTEIN FRACTIONS^a OF NORMAL AND MUTANT MAIZE, BARLEY AND SORGHUM [15]

Solubility fraction	Maize		Barley		Sorghum	
	Normal	Mutant (<i>opaque-2</i>)	Normal	Mutant (R1508)	Normal	Mutant (<i>hl</i>)
Albumin ^b + globulin	6	18	27	46	15	22
Prolamin	59	26	29	9	53	33
Glutelin	30	49	39	39	27	38
Unextracted	4	5	5	6	5	6

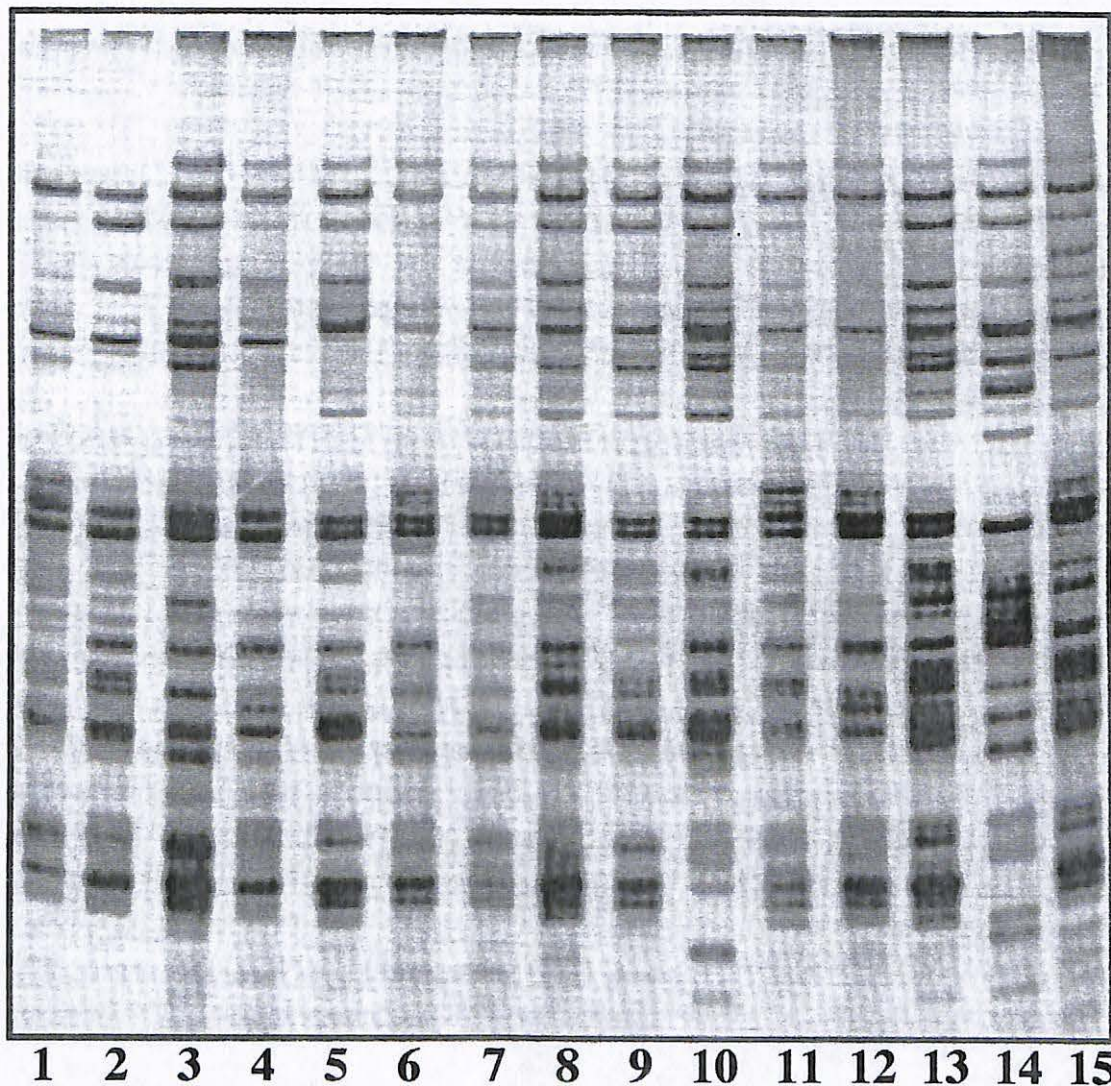
^a As per cent of total protein.

^b Includes non-protein nitrogen.



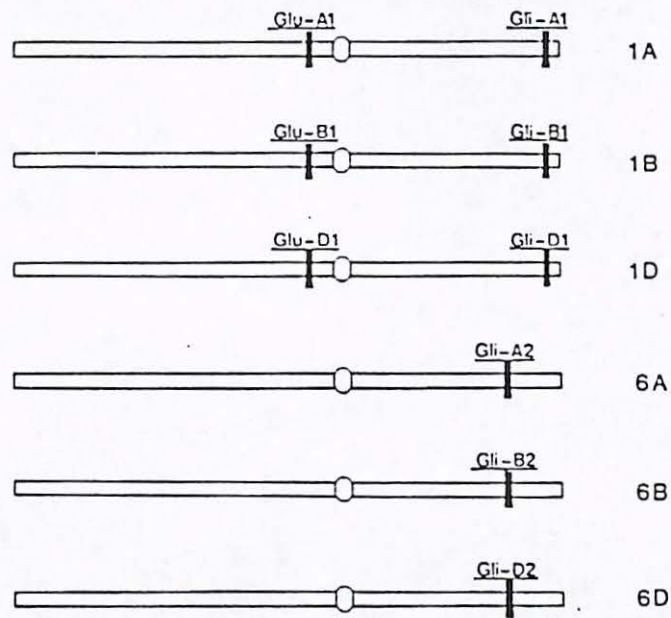
Diagrammatic representation of cell of developing seed, illustrating synthesis of protein in the endoplasmic reticulum (ER), modification and packaging in the dictyosome (D), and transport in the Golgi vesicles (GV), with final deposition of the completed protein in the aleurone vacuole (V). Spirally arranged polyribosomes (P) are indicated in coplanar view of ER membrane. The usual subcellular organelles are depicted, including spherosomes (S), leukoplast (L) containing starch grains, mitochondria (M), nucleus (N) containing a nucleolus (Nu), and cell wall (CW)

Le diagramme électrophorétique des gliadines est une « empreinte digitale » des variétés de blé



Electrophorèse en gel de polyacrylamide, tampon lactate, pH 3,2

Variétés : 1 - Fidel, 2 - Albatros, 3 - Top, 4 - Beauchamp, 5 - Capitole, 6 - Camp-Rémy, 7 - Hardi, 8 - Festival, 9 - Tango, 10 - Promentin, 11 - Arminda, 12 - Castan, 13 - Champlein, 14 - Talent, 15 - Aquila



LOCALISATION CHROMOSOMIQUE DES GENES
DES PROTEINES DU GLUTEN
(d'après Payne et al., 1984)

Diagrammes HMW témoins (variété Chinese Spring)	10—2	—1 —2*	<u>Glu-A1</u>
	18—7		
	18—8		
	10—12	$a = b > c$	
	10—2		<u>Glu-B1</u>
	18—7	—7 —13 —7 —7 —6	
	18—8	—7 —16 —8 —8 —9	
	10—12	$l > f ; b > c > a > d$	
	10—2	—5 —2 —3 —4	<u>Glu-D1</u>
	18—7		
	18—8		
	10—12	—10 —12 —12 —12	$d > a = b > c$

Qualité

RELATIONS ENTRE COMPOSITION ALLELIQUE DES SOUS-UNITES
HMW ET LA QUALITE BOULANGERE (d'après PAYNE et al., 1984).

Principales enzymes pouvant jouer un rôle en technologie du blé dur

α -amylase : Hydrolyse de la liaison glycosidique α -(1 \rightarrow 4) de l'amidon

→ Problèmes d'extrusion et de fragilité mécanique des pâtes ?

Endo- et exo-protéases : Hydrolyse des protéines de réserve

→ Problèmes de machinabilité de la pâte et de qualité culinaire

Lipoxygénase : Oxygénation par l'O₂ moléculaire d'acides gras à pentadiène *cis-cis* (1 \rightarrow 4)

→ Perte des pigments jaunes des pâtes

Peroxydase : Oxydation d'acides aminés aromatiques et de phénols par l'H₂O₂

→ Brunissement des pâtes

Polyphénoloxydase : Oxydation de phénols en quinones

→ Brunissement des pâtes

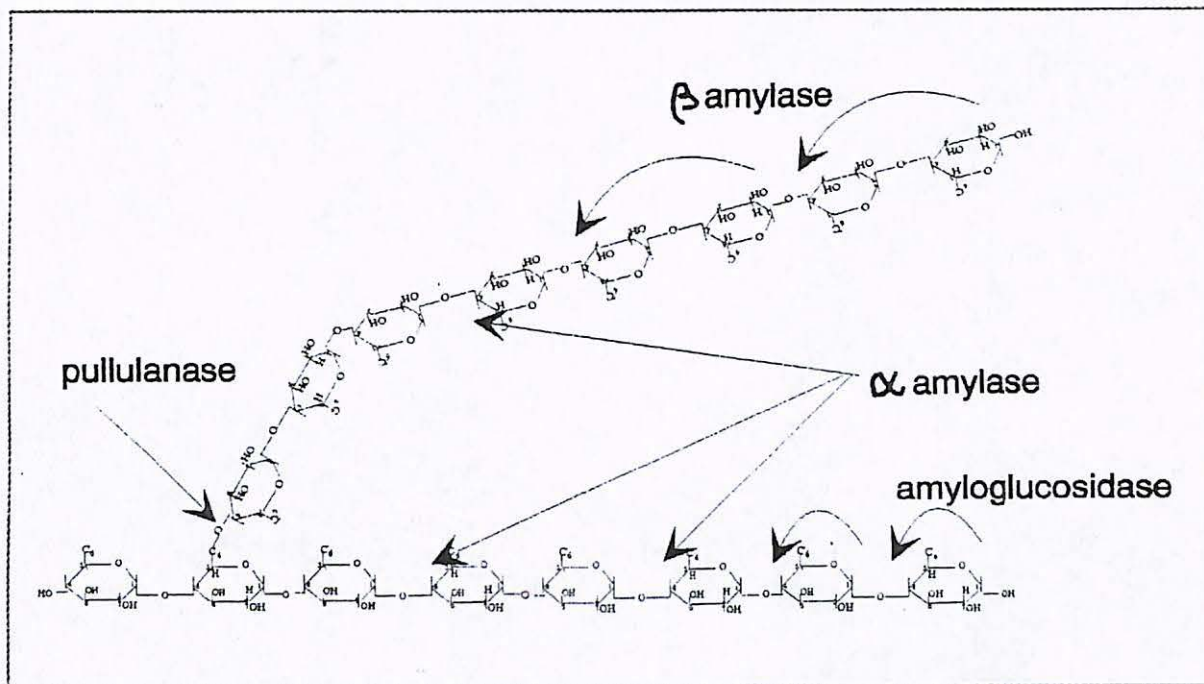


Figure 2 : présentation simplifiée de l'action des amylases sur les chaînes d'amidon.

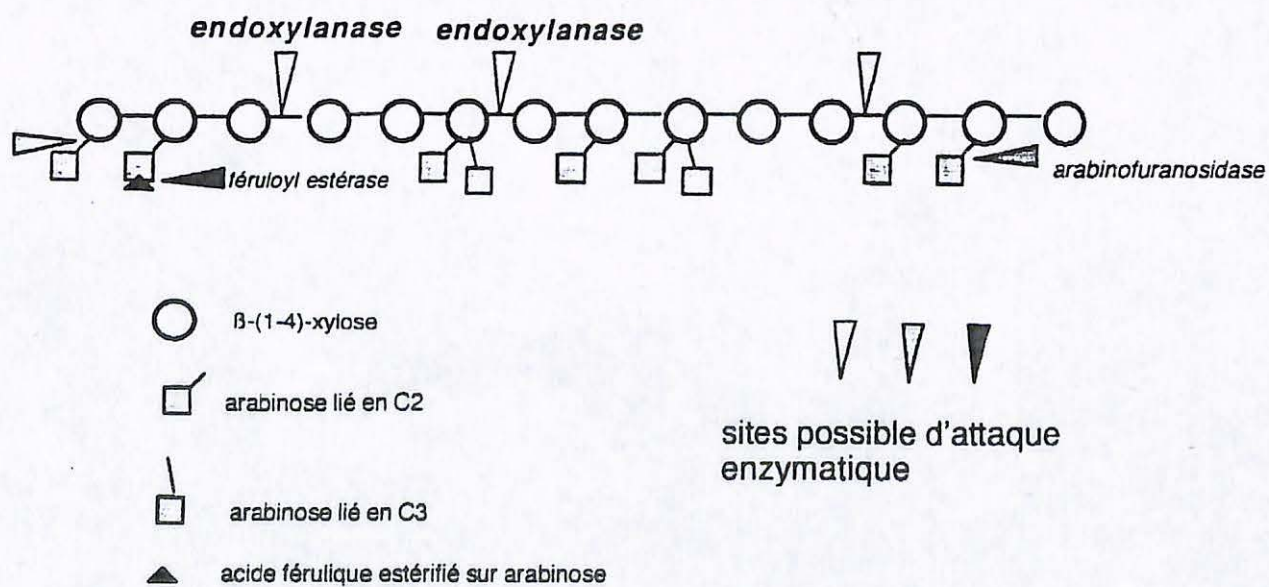


Figure 3. Les principales enzymes capables de dégrader un arabinoxylane et leurs sites possibles d'attaque.

Composition du blé en lipides

Fractions du grain	Lipides totaux (% ms)	% des lipides totaux			
		Lipides non polaires	Phospho lipides*	Glyco lipides**	Acides gras libres
Grain entier	1,5 - 3,5	44 - 80	6 - 40	8 - 21	
Péricarpe	0,5 - 1,5	38	32	30	21
Couche à aleurone	6 - 18	72 - 83	14 - 18	2 - 10	
Germe	10 - 30	80 - 85	14 - 17	0	1 - 2
Amidon	0,8 - 1,2	4 - 6	1,5 - 6,5	90 - 95	2,5 - 3,5
Son	4,5 - 6,0	80	10		
Farine**	1,4 - 2,0	50	20 - 25	24 - 28	5

* Les phospholipides et les glycolipides sont des lipides polaires

** Non compris les lipides inclus dans les granules d'amidon

COMPOSITION OF THE FATTY ACIDS OF CEREAL LIPIDS*

Wheat

Fatty acids	Wheat			Barley (%)	Rye (%)	Oats (%)	Rice (%)	Maize (%)	Sorghum (%)	Millet (%)
	Grain (%)	Germ (%)	Endosperm (%)							
<i>Saturated</i>										
C _{14:0} Myristic	0.1	—	—	1.0	—	—	—	—	—	—
C _{16:0} Palmitic	24.5	18.5	18.0	11.5}	21.0	15.9}	17.6	12.4-15.6	12.3	16.7-25.0
C _{18:0} Stearic	1.0	0.4	1.2	3.1}	—	—	—	1.7-2.4	0.8	1.8-8.0
<i>Unsaturated</i>										
C _{16:1} Palmitoleic	0.8	0.7	1.0	—	—	—	—	—	—	—
C _{18:1} Oleic	11.5	17.3	19.4	28.0	18.0	40.4	47.6	29.3-37.5	34.3	20.2-30.6
C _{18:2} Linoleic	56.3	57.0	56.2	52.3	61.0	43.7	34.0	43.4-55.4	49.9	40.3-51.7
C _{18:3} Linolenic	3.7	5.2	3.1	4.1	—	—	0.8	1.0-1.2	2.7	2.3-5.0
Others and unsapon.	1.9	0.8	1.1	—	—	—	—	—	—	0.3-1.0

*Sources of data: Wheat: Nelson *et al.* (1963). Barley: McLeod and White (1961). Rye: Matz (1969). Oats: Aylward and Showler (1962). Rice: Mickus (1959). Maize: Thornton *et al.* (1969). Sorghum: Freeman and Bocan (1973). Millet: Jellum (1970).

IV - QUALITÉ NUTRITIONNELLE DES CÉRÉALES

Protéines, acides aminés, lipides, cellulose, vitamines ;
facteurs anti nutritionnels, maladie cœliaque
Effet des procédés de transformation des céréales sur leur
valeur nutritionnelle

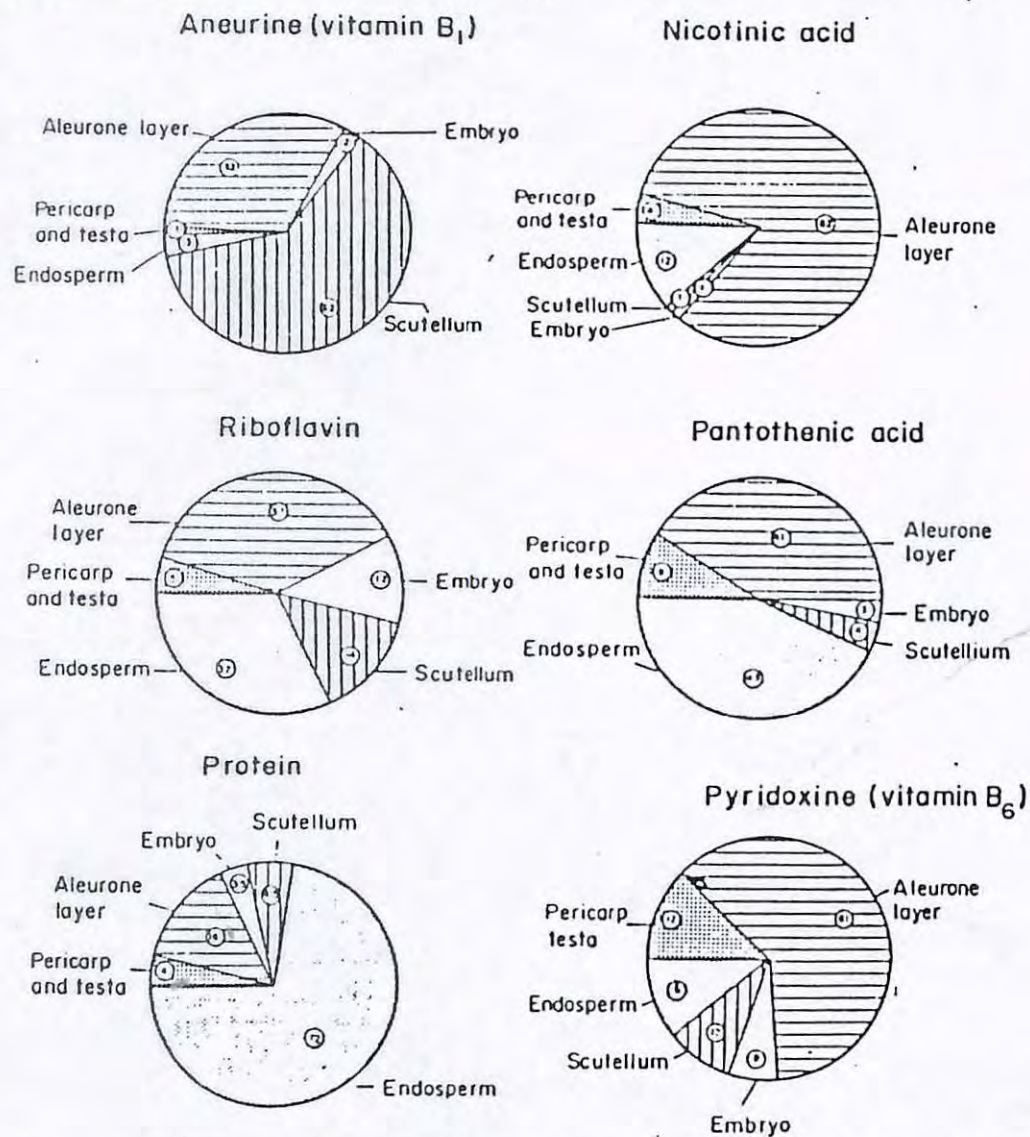


FIG. 10. Distribution of vitamins and protein in the wheat grain. The figures show the percentage of the total nutrients in the grain found in various anatomical parts. (Based on microdissections by J. J. C. Hinton. From *The Research Association of British Flour-Millers 1923-60.*)

VITAMIN CONTENTS OF THE CEREAL GRAINS* ($\mu\text{g}/\text{g}$)

Vitamin	Wheat				Oats (whole)	Rice (brown)	Maize	Sorghum	Millet
	Manitoba	English	Barley	Rye					
Vitamin B ₁	4	2.9	6.5	4.6	5.7	4.0	4.5	3.1	3.7
Riboflavin (B ₂)	1.2	1.1	1.2	1.5	1.3	0.6	0.9	1.1	1.5
Nicotinic acid	70	50	90	10	9.4	53	23	51	28
Pantothenic acid	10-15		4.4	10.4	9	17	4.6	7	13.5
Biotin	0.1		0.14	0.06	0.15	0.1	0.1	0.3	—
Pyridoxin (B ₆)	5		3.4	3.3	1.2	10.3	6.9	6.4	—
Folic acid	0.5		0.3	0.3	0.2	0.6	0.16	0.2	—
Choline	1000		1100	450	980	900	450	420	—
Inositol	2500		2000-3050	—	—	—	—	—	—
p-Aminobenzoic acid	1		0.5	—	—	—	—	—	—
Vitamin B ₁₂	0.001-0.002		—	—	—	—	—	—	—

*Sources of data include: Adrian and Petit (1970), Andrews *et al.* (1942), Anon. (1958), Aykroyd and Swaminathan (1940), Barton-Wright (1945), Frey and Watson (1950), Grist (1959), Hall *et al.* (1952), Hinton (1948), Hodson and Norris (1939), Horder *et al.* (1954), Hubbard (1950), Ihde and Schuette (1941), Kent-Jones and Amos (1967), Kik and Landingham (1943), McCance *et al.* (1945), Moir (1946), Nelson (1953), Schultz *et al.* (1941), Scriban (1970), Sebrell jr. and Harris (1954), Shaw (1953), Thomas *et al.* (1942), Williams *et al.* (1943), McCance and Widdowson (1960), Fournier and Digaud (1948).

Ref. 003

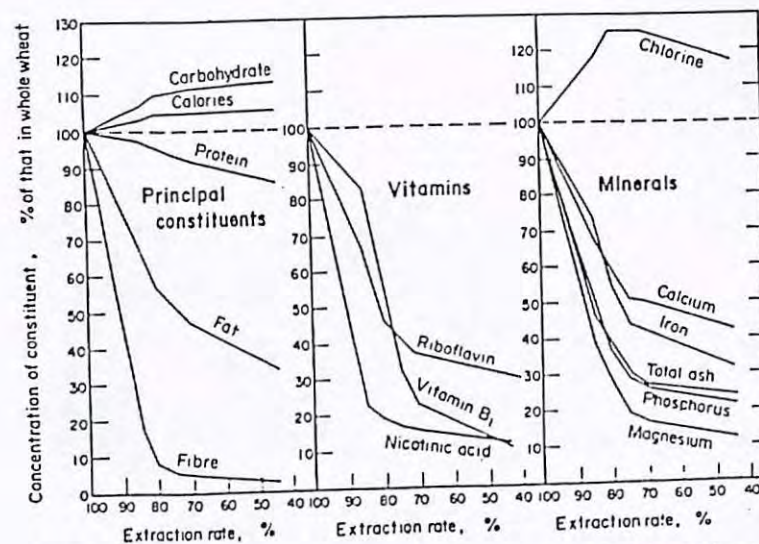


FIG. 32. Nutrient composition of flours of various extraction rates in relation to that of whole wheat. (Constructed from data in McCance *et al.*, *Biochem. J.* 39: 213, 1945.)

V - LE BLÉ TENDRE : PREMIÈRE TRANSFORMATION - MEUNERIE

Le procédé de mouture sèche : généralités

Nettoyage et conditionnement (humidification) des grains

Les machines de meunerie: broyeur, tamis (plansichters)

Les différents produits de la mouture : farines, sons

Notions de taux d'extraction et de valeur meunière

Notion d'amidon endommagé

Procédé de turboséparation

*Recherches en cours sur l'amélioration des procédés de
mouture et sur la valeur meunière des blés*

Les industries du blé

Blé tendre -----> **Farine** -----> **Pain**
Triticum aestivum *Valeur meunière* (0-200 μ) *Valeur boulangère*
 (2n = 42)

Blé dur -----> **Semoule** -----> **Pâtes alimentaires**
Triticum durum *Valeur semoulière* (200-500 μ) *Valeur pastière*

		P. 100	PRODUITS
G R A I N D E B L É	PERICARPE (enveloppe du fruit)		
	- Externe Epiderme Hypoderme		
	- Interne Cellules internes Cellules croisés Cellules tubulaires	7 à 8	SONS 13 à 20 %
	TESTA (enveloppe de la graine)		
G R A I N E	ALBUMEN Couche à aleurone	5 à 8	
	Albumen amylicé	75 à 85	Farine/semoule
	Germe Scutellum Axe embryonnaire Epiblaste	2 à 4	Germe

Utilisation des blés tendres collectés en France (1994-1995)

Sur 100 tonnes collectées :

- 45,5 % Exportations en grains
- 10,0 % Report
- 1,2 % Aide alimentaire
- 43,3 % Utilisations intérieures
 - dont : 16,6 % ... Alimentation du bétail
 - 1,9 % ... Semences et freintes
 - 24,8 % ... Meunerie française
 - dont : 7,6 % ... Exportations en farine
 - 17,2 % ... Boulangerie et autres

Utilisations de la farine en France

• Panification	69,4 %
• Boulangerie artisanale	53,5 %
• Boulangerie industrielle	8,1 %
• Grandes surfaces + pains surgelés	7,8 %
• Autres usages	30,6 %
• Farines en sachets	5,2 %
• Biscuits, biscottes, pâtisserie	17,7 %
• Amidonnerie-glutennerie	2,4 %
• Utilisations diverses alimentaires	2,8 %
• Alimentation animale	2,2 %
• Utilisations non-alimentaires	0,3 %

LES ETAPES DE LA PREMIERE TRANSFORMATION

NETTOYAGE

Enlever les impuretés

CONDITIONNEMENT

Augmenter l'élasticité des enveloppes
Hydratation + temps de repos

MOUTURE

Séparer l'amande et les enveloppes :

- . Opérations de fragmentation
- . Opération de séparation

LE CONDITIONNEMENT

Augmenter les différences d'élasticité et de friabilité entre les parties périphériques du grain et l'amande .

2 Etapes :

- Mouillage et absorption d'eau par les grains .
- Distribution de l'eau absorbée à l'intérieur des grains pendant la période de repos .

Principales machines de nettoyage des blés avant broyage

Type de machine	Principe physique	Impuretés éliminées
Aimant	Champ magnétique	Métaux
Aspirateur	Densité et résistance à l'air	Pailles, glumes
Nettoyeur-séparateur et trieur	Forme et dimension	Grosses et petites impuretés
Epierreur	Densité	Pierres
Brosse, épointeuse, lavage	Nettoyage en surface	Poussières adhérentes
Table densimétrique	Densité	Pierres, blés ergotés
Toboggan	Force centrifuge	Petites graines, grains cassés
Trieur de couleur	Couleur	Grains avariés

Séparateur à disques

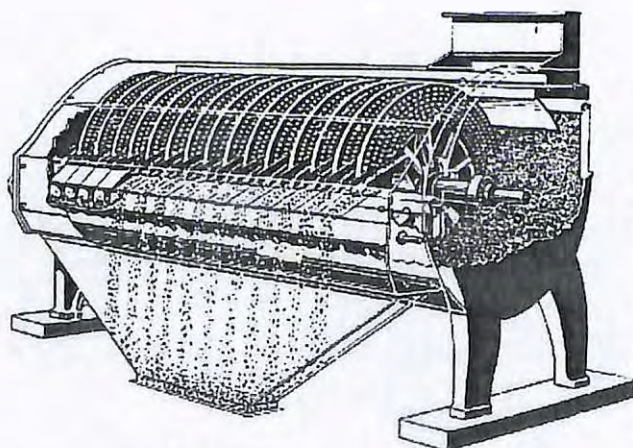


Schéma d'ensemble

Disque à blé



1

Disque à graines rondes



2

- 1 - Les grains de blé entiers sont récupérés, tandis que les graines longues (avoine, orge) sont rejetées
- 2 - Les graines rondes sont éliminées, tandis que les grains de blé retombent

OPERATIONS UNITAIRES

- Fragmentation
 - Broyage : dissocier l'amande et les enveloppes
 - Désagrégeage : fractionner les semoules vétues
 - Convertissage : Réduire l'amande en farine
- Séparation
 - Division : séparation granulométrique des sons et des farines
 - Epuration : classement aerodynamique des semoules

Principaux produits formés au cours de la mouture

Farines : fines particules d'albumen (30 à 200 μm)

Semoules : grosses particules d'albumen exemptes d'enveloppes adhérentes (150 à 500 μm)

Gruaux : produits isolés du cœur de l'albumen et de taille intermédiaire de celle des farines et des semoules (à ne pas confondre avec les **gruaux D** qui sont des farines de blé dur, riches en produits de la couche à aleurone)

Semoules bises : grosses particules d'albumen auxquelles adhèrent des fragments d'enveloppe

Remoulages : fines particules d'enveloppes auxquelles adhèrent des apticules d'albumen. Les **remoulages blancs** se différencient des **remoulages bis** par leur teneur plus élevée en produits issus de l'albumen

Fins sons : petits morceaux d'enveloppe (0,5 à 1 mm de dimension principale : 0,5 à 1 mm^2) exempts d'albumen

Gros sons : gros morceaux d'enveloppe (1 à 5 mm de dimension principale ; 1 à 10 mm^2 exempts d'albumen)

LE BROYAGE

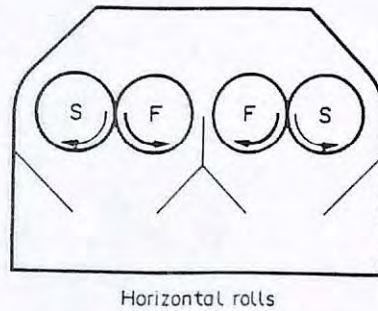


FIG 6.1 Disposition of rolls in roller mill stands. The fast roll of each pair is indicated by the broader arrow.

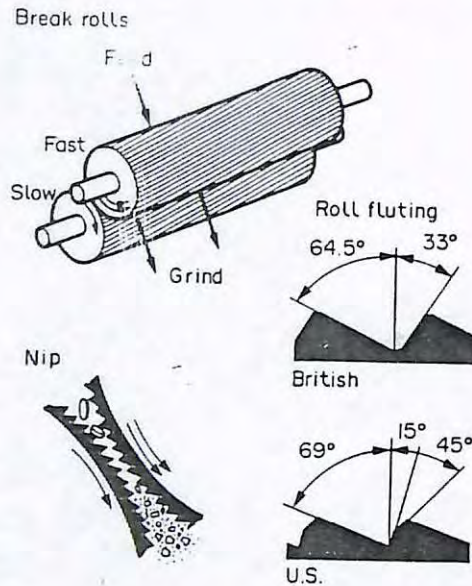
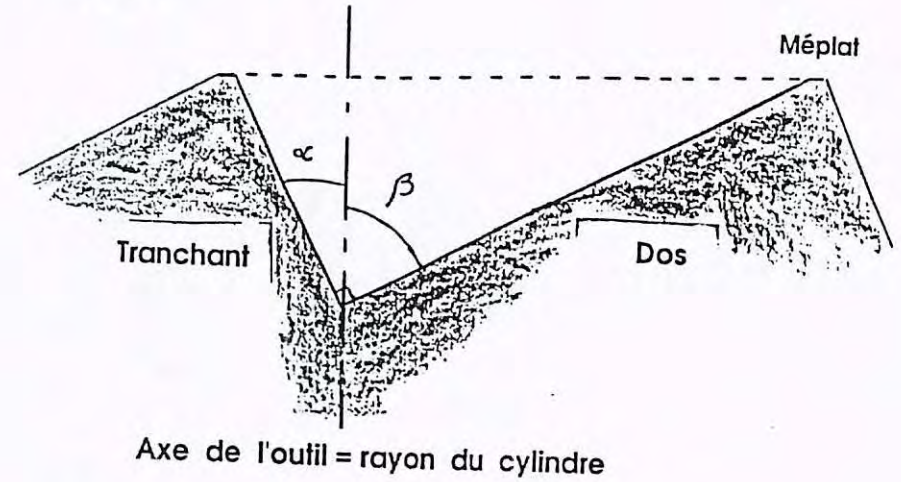


FIG 6.2 Pair of break rolls. In the enlarged view of the 'nip' (left) rolls are disposed in the dull-to-dull configuration. Details of typical British and U.S. roll flutings are shown right.

- FORME



- POSITION

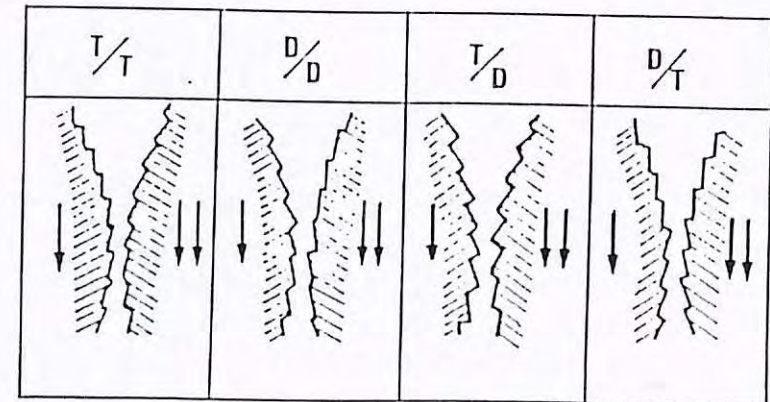
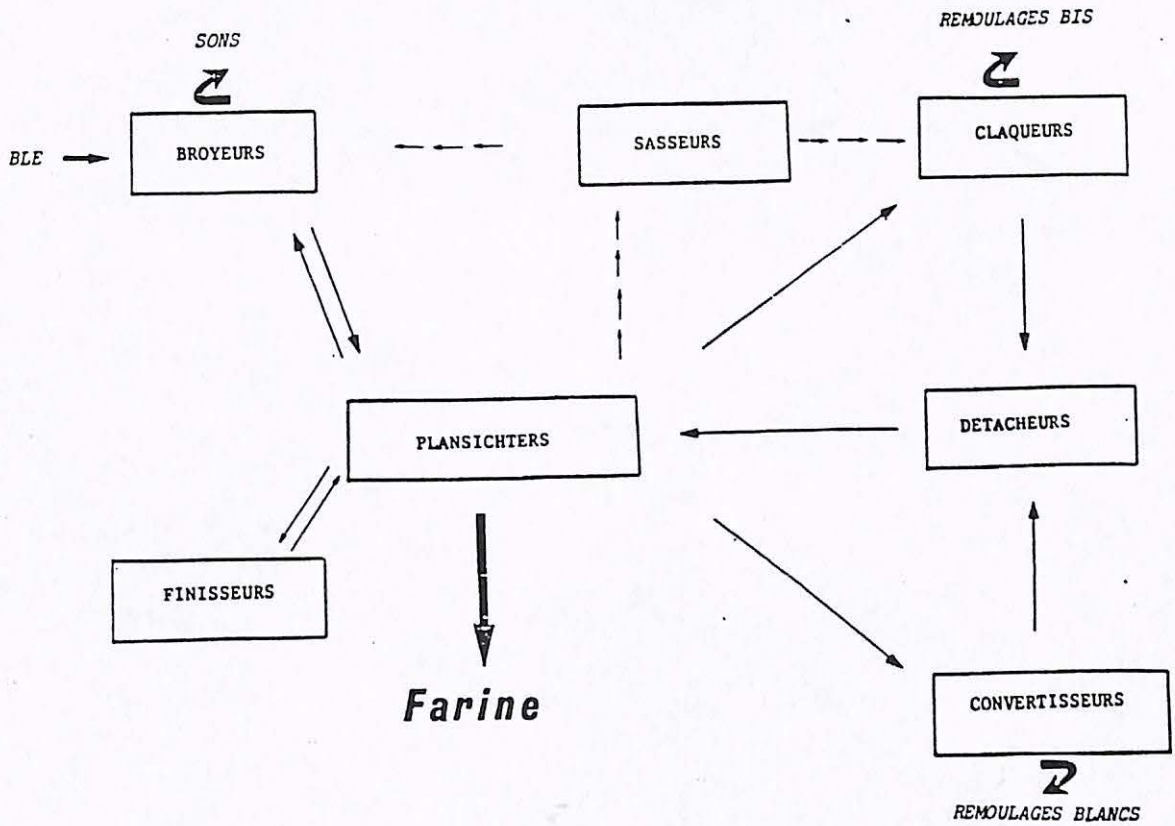
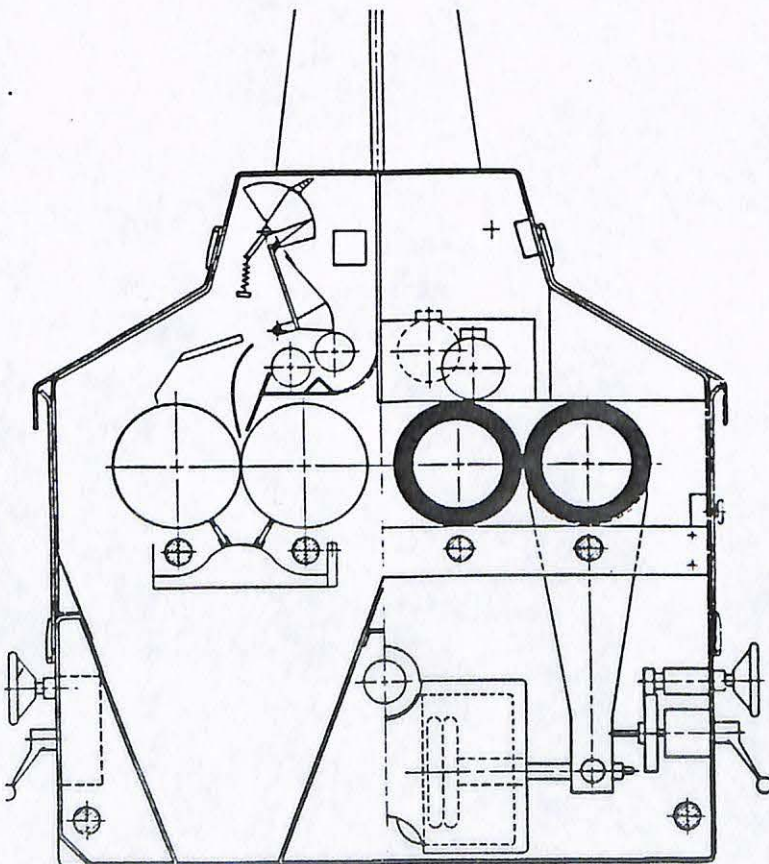


DIAGRAMME DE MOUTURE TYPE BLE TENDRE

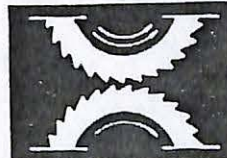


L'APPAREIL A CYLINDRES

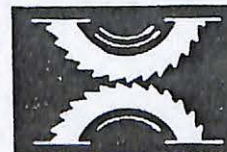


POSITION DES CANNELURES DE CYLINDRES

En position de tranchant contre tranchant (T-T) on obtient une efficacité de coupe maximum avec production de semoules, gruyaux, et farines vives.



En position tranchant contre dos (T-D) on obtient approximativement une partie de grosses semoules pour deux de semoules moyennes, une de finots et une de farines assez bonnes.



En position dos contre tranchant (D-T) on a des semoules moyennes, des finots et des farines plates.



En position dos contre dos (D-D) il en résulte une compression maximum permettant une extraction importante de farines.

Diagramme de mouture

BLE TENDRE

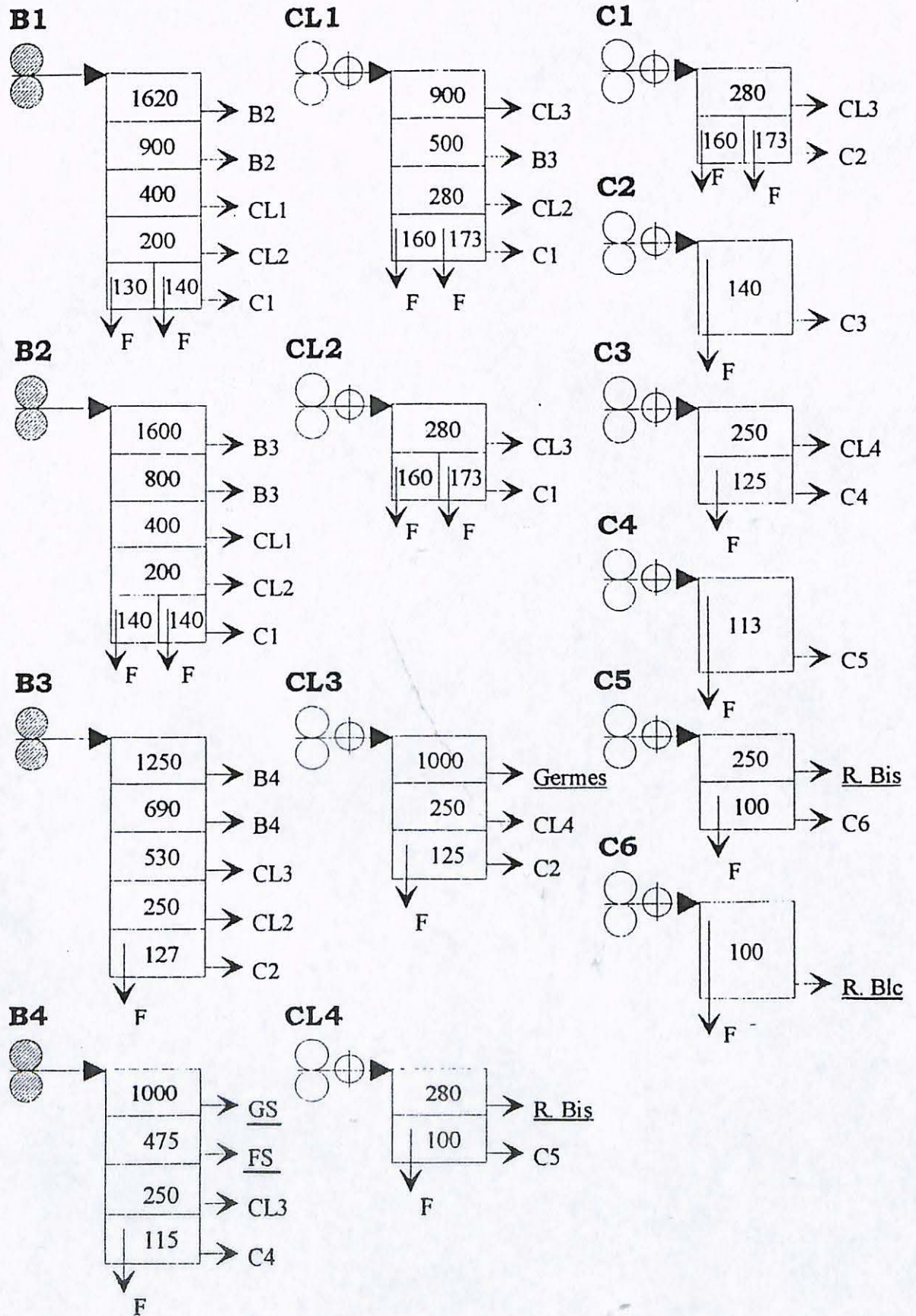


Figure 1

LE PLANSICHTER

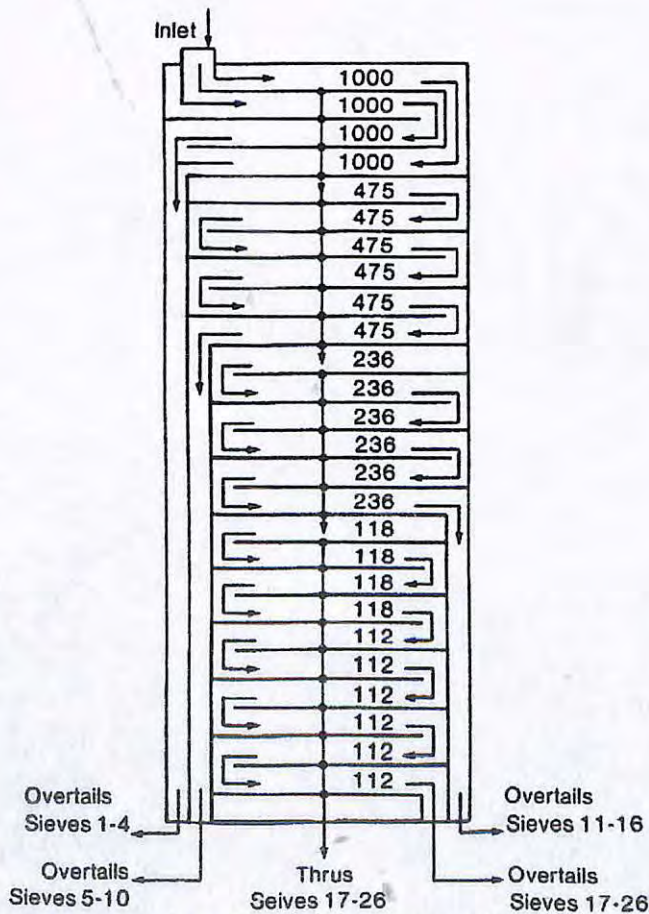
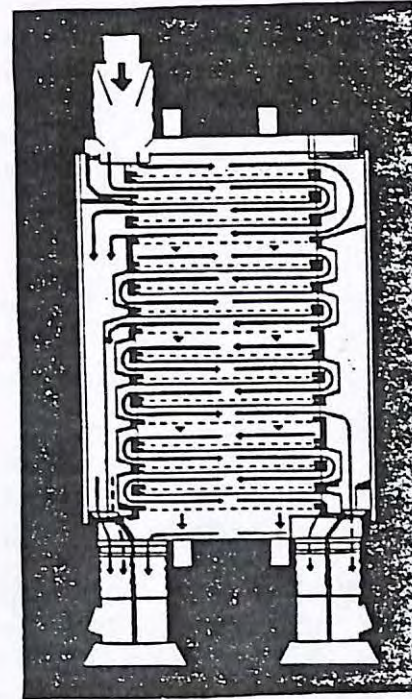
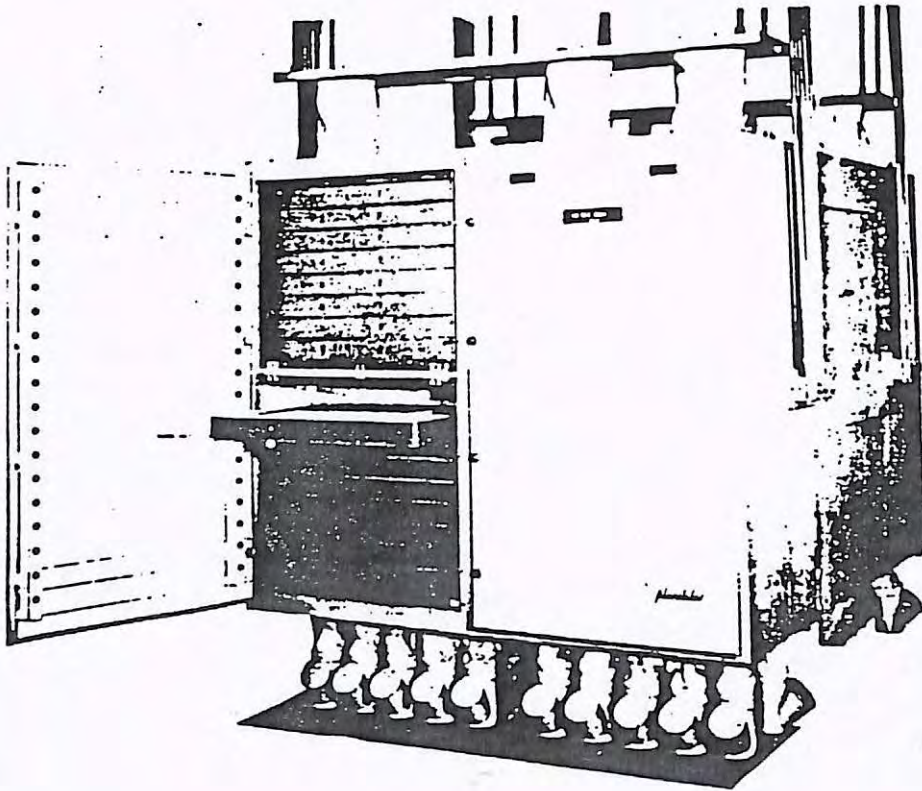
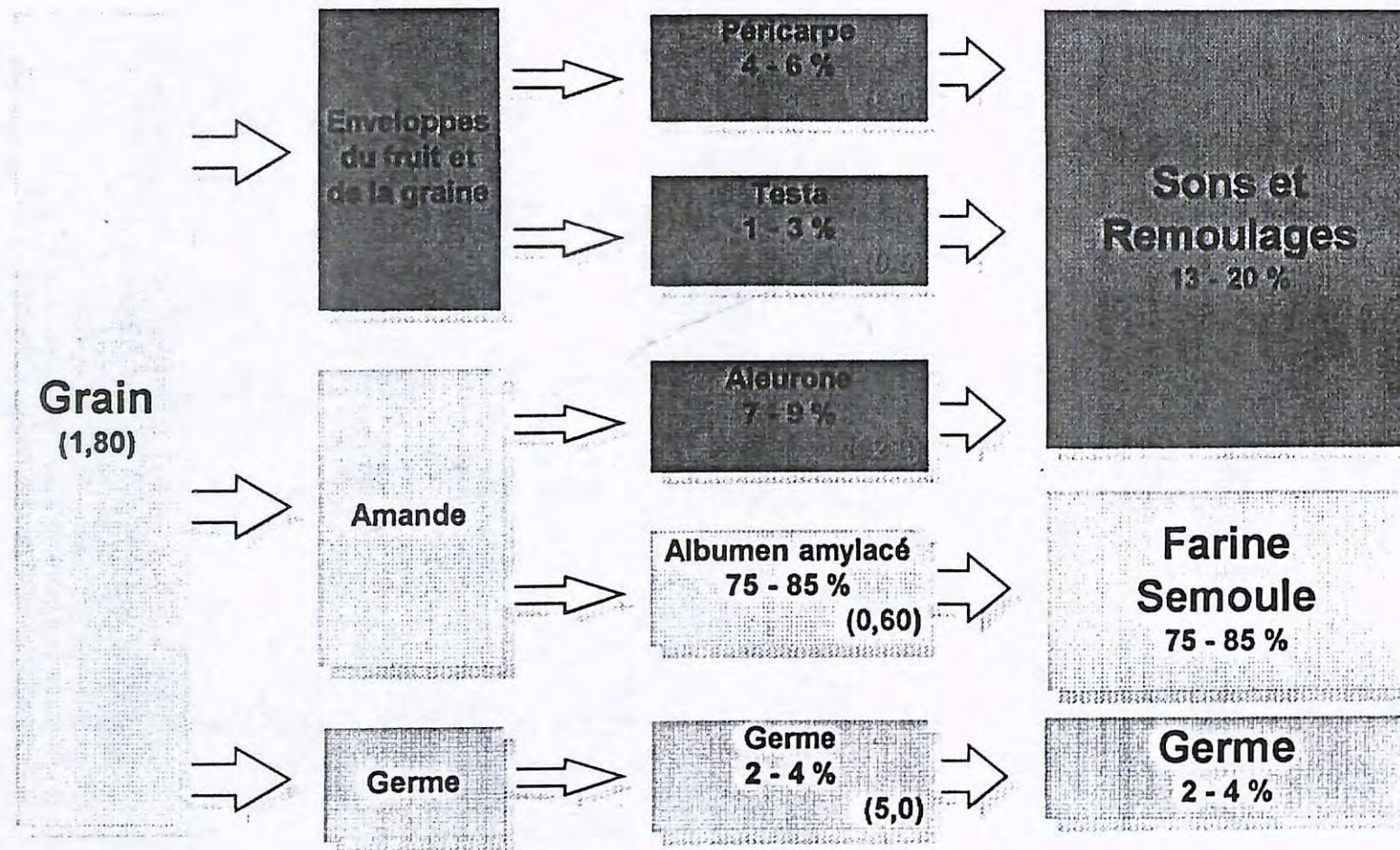
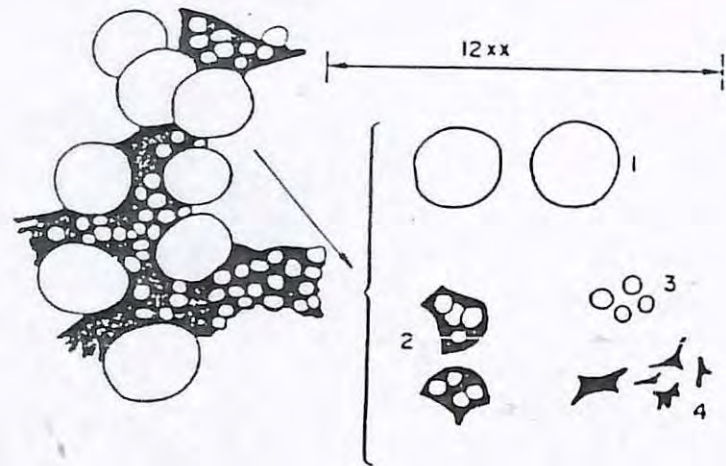
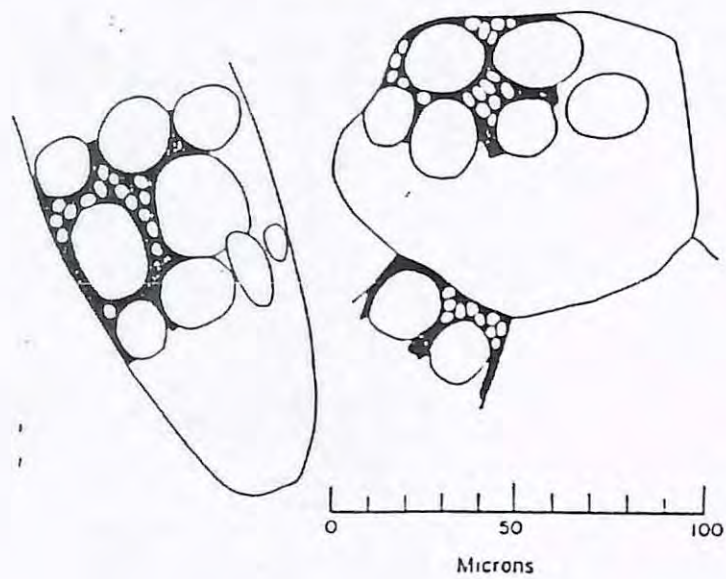


Fig. 15. Schematic diagram of one section of a sifter. Numbers show sieve sizes in micrometers.

DEVENIR DES PRINCIPALES COUCHES HISTOLOGIQUES DU GRAIN APRES MOUTURE





REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ELEMENTS CONSTITUTIFS
D'UNE FARINE DE BLE TENDRE

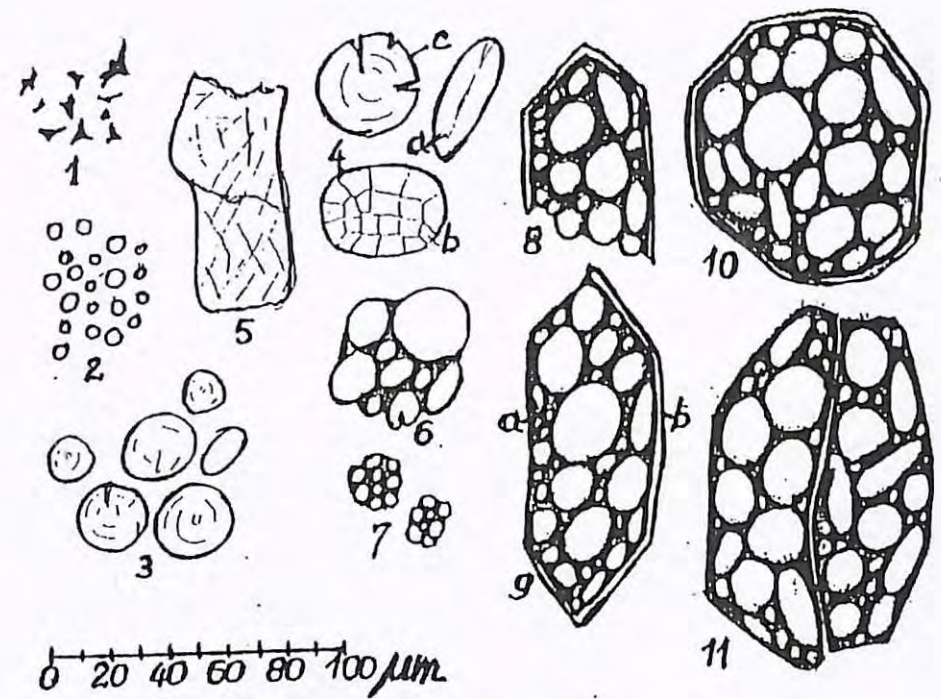


FIG. 25. Above: the two main types of endosperm cell—prismatic (left), polyhedral (right)—showing large and small starch granules (white) embedded in protein matrix (black). Below: exposed endosperm cell contents (left) and products of further breakdown (right): 1, detached large starch granules (about 25 μm diameter); 2, "clusters" of small starch granules and protein matrix (about 20 μm diameter); 3, detached small starch granules (about 7 μm diameter); 4, fragments of free wedge protein (less than 20 μm diameter). 12xx is the representation to scale of the mesh aperture width of a typical flour bolting silk. (Redrawn from C. R. Jones et al., *J. Biochem. Microbiol. Technol. Engng*, 1: 77, 1959, and reproduced by courtesy of Interscience Publishers.)

- Légende :
- 1 - Lamelles de protéines interstitielles.
 - 2 - Petits granules d'amidon (90% du total en nombre et 10 à 15% en masse de l'amidon total).
 - 3 - Gros granules d'amidon (70 à 80% de la masse totale).
 - 4 - Très gros grains d'amidon; 4a : grain vu sur le champ; 4b : granule composé de petits grains; 4c : gros grain endommagé mécaniquement.
 - 5 - Fragments de paroi cellulaire.
 - 6 - Agglomérat de granules d'amidon liés par les protéines (fragments de cellule).
 - 7 - Agglomérat de petits grains.
 - 8 - Fragments de cellules avec paroi.
 - 9 - Cellule prismatique (a) sans et (b) avec paroi.
 - 10 - Cellule polygonale (albumen central).
 - 11 - Deux cellules accolées.

Nota : les parties pleines correspondent aux protéines.

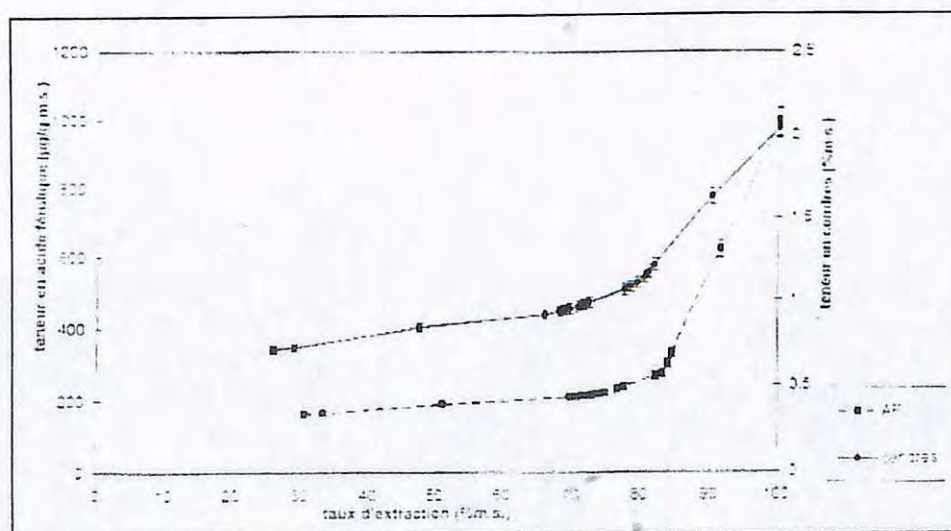
Figure 7

QUANTIFICATION PAR AUTOFLUORESCENCE DES COUCHES HISTOLOGIQUES DU GRAIN

Constituants	Dissection manuelle	Fluorescence
Péricarpe	8,2	9,7
Aleurone	6,5	6,7
Albumen	81,8	80,2
Germe	2,2	(2,2)
Testa	1,3	(1,3)

(Jensen *et al.*, 1982)

Comparison entre les courbes de matières minérales et d'acide férulique



TYPES LEGAUX DE FARINE

TYPE	CENDRE % m.s.	UTILISATION
0.45	< 0.50	SACHETS PATISSERIE, FARINE GRUAU*
0.55**	0.50-0.60	PAIN COURANT, BISCOTTE, PANIFICA- TION FINE, BISCUITERIE, PATISSERIE, SACHETS
0.65	0.62-0.75	BISCUITERIE
0.80	0.75-0.90	PAINS SPECIAUX
1.10	1.00-1.20	PAINS BIS
1.50	> 1.40	PAINS COMPLETS

*Taux d'extraction : 70 % (pain "hamburger").

**95 % des farines françaises ; taux d'extraction : 75/1

LA TURBOSEPARATION DES FARINES

1. Broyage complémentaire

- Dissocier les agglomérats
- Utilisation de broyeurs à broches ou à tourbillons (165 m.s-1)

2. Elutriation ou classification dans un selecteur à air

- Séparation en 2 fractions en fonction de la taille (17 µm) et de la densité (A=1.50 ; P=1.32)

3. Coût énergétique : 4kWh/kg m.s. de protéines déplacées

COMPOSITION DES FARINES TURBOSEPAREES

	% de farine initiale	Granulométrie diam. moy. en microns	Humidité % MS	Amidon total % MS (amidon lésé % du total)	Cendres % MS	Protéines % MS (gluten % MS)	Lipides % MS	Constituant parietaux % MS
Farine d'alimentation type 55	100	54,0	14,5	82 (4,5)	0,55	13,0 (12,0)	1,5	3,0
<i>Cas de 2 coupures</i>								
Fraction fine	11	10,5	11,2	77 (7,8)	0,60	19,9 (19,0)	2,2	0,3
Fraction moyenne	37	22,0	13,5	89 (3,5)	0,47	7,4 (5,8)	1,1	2,0
Fraction grosse	52	53,0	14,4	84 (2,4)	0,53	12,3 (11,4)	1,7	1,5
<i>Cas d'une coupure</i>								
Fraction fine	27	13,5	11,0	71 (4,7)	0,57	25,8 (25,2)	2,1	0,5
Fraction grosse	73	44,0	12,5	90,5 (3,8)	0,50	6,0 (5,1)	1,5	1,5

VI - LE BLÉ TENDRE : DEUXIÈME TRANSFORMATION - PANIFICATION

Généralités

Les différentes technologies de panification dans le monde
Évolution des procédés de panification (pétrissage,
fermentation, réfrigération ou congélation des pâtes) en
France

Qualité des farines exigée pour la panification

Additifs autorisés en panification

Formation et structure de la pâte : la qualité boulangère et
ses bases biochimiques

Influences respectives de la variété de blé et du procédé de
transformation

Fermentation, cuisson, rassissement,

L'arôme du pain

*Recherches en cours sur l'amélioration des procédés de
boulangerie et sur la valeur boulangère des blés*

LA DEUXIEME TRANSFORMATION

14

OPERATION DE MISE EN FORME

Objectif: Fabrication d'un produit digestible et agreable sur le plan organoleptique

Mise en forme par:

- Fermentation et cuisson: Panification
- Extrusion sans fermentation
 - A basse temperature avec sechage: Pastification
 - A temperature e'levee : Cuisson-Extrusion.

Réf. 003



PANIFICATION

Qualité du pain: Le pain doit être léger, la mie fine et élastique.

La fabrication du pain:

PETRISSAGE

Mélange des constituants
Hydratation et formation
de la pâte.

FERMENTATION

"Levée" de la pâte par
incorporation d'un gaz

CUISSON

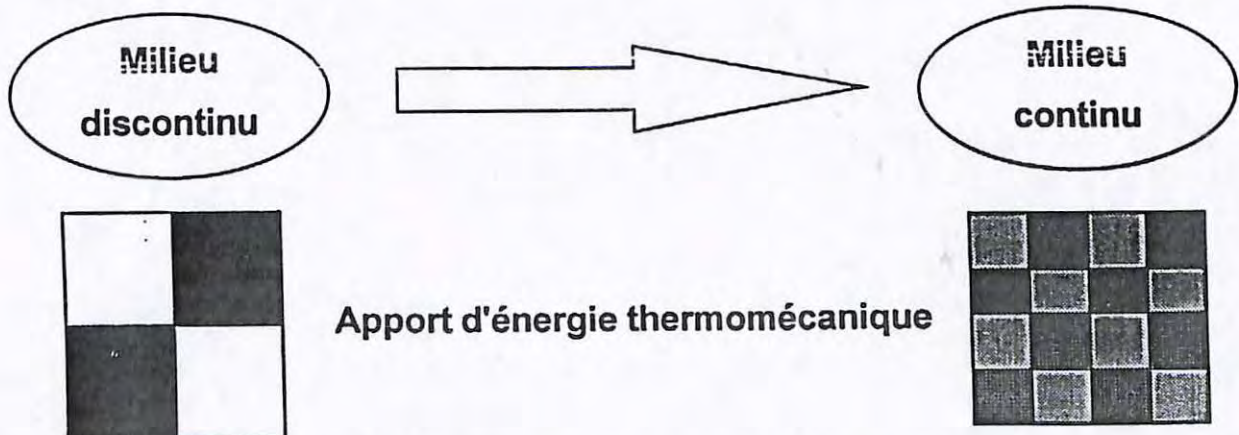
Stabilisation de la
structure

Physicochimie: Les protéines (gluten) doivent pouvoir constituer un réseau viscoélastique, extensible et élastique, imperméable à la poussée d'un gaz.

Differents types de pâtes

Pâtes	Ingrédients	Hydratation	Energie
• Boulangère	Farine (100) Levure (2) Sel (2)	60	10 kJ/kg
• Biscuitière	Farine (100) Matière Grasse (10-30) Sucre (30-50)	20	40 kJ/kg
• Alimentaire	Semoule (100)	25	80 kJ/kg

Formation de la pâte

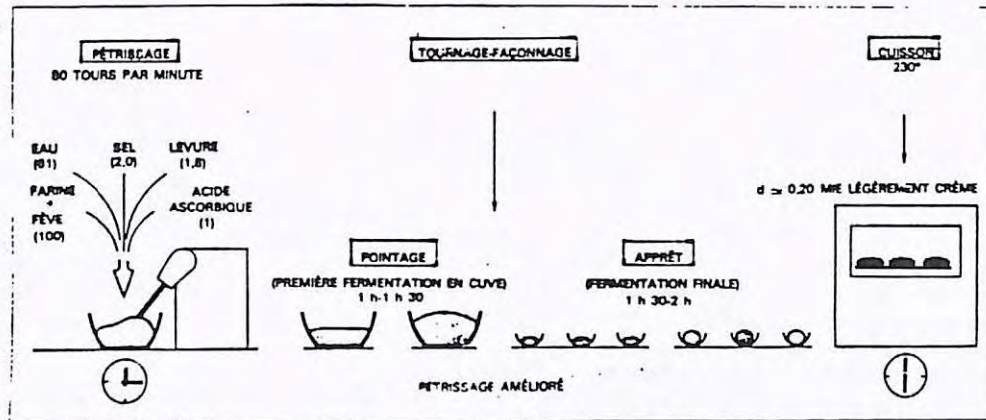


- Mélange des ingrédients
- Dispersion et solubilisation de constituants
- Sorption de l'eau
- Incorporation d'air
- Effets de cisaillement
- liaisons chimiques entre constituants
- création de structure protéiques orientées

LA PANIFICATION

Formation de la pâte x Fermentation. x Cuisson

Hydratation et
Formation d'un
réseau continu
de gluten.
Pâte viscoélastique



-50°C Arrêt de la Fermentation
-60°C Début de la gélatinisation de l'amidon
-70°C Coagulation du gluten.
-100°C Formation de la croûte.

Fermentation alcoolique par *Sartrachomyces Cerevisiae*

- 1^{re} phase : à partir de sucres simples fermentescibles.
- 2^{de} phase : amylolyse de l'amidon par α amylase et β amylase

PROPORTIONS OF CONSTITUENTS IN RECIPES FOR BAKED PRODUCTS*

Type of product	Water	Salt	Flour	Sugar	Milk powder	Yeast	Fat	Baking powder	Whole egg
Bread:									
Chorleywood	61	1.8	100			1.8	0.7		
Fermented	57	1.8	100			1.1	0.7		
Biscuits:									
Cream cracker	43	0.3	100			0.1	17	1.1	
Hard sweet	17	0.7	100	22	2.6		25		
Soft	1	0.9	100	30					
Pastry:									
Short	25	2.0	100				50		
Puff	45	0.6	100				75		
Choux	125		100				50		150
Cake:									
Plain	50		100	40			40	3.5	35
High-ratio	55	2.0	100	120	13		76	5.0	90
Sponge			100	100					170

*Source of data: Atkins (1971).

Evolution de la boulangerie en France*

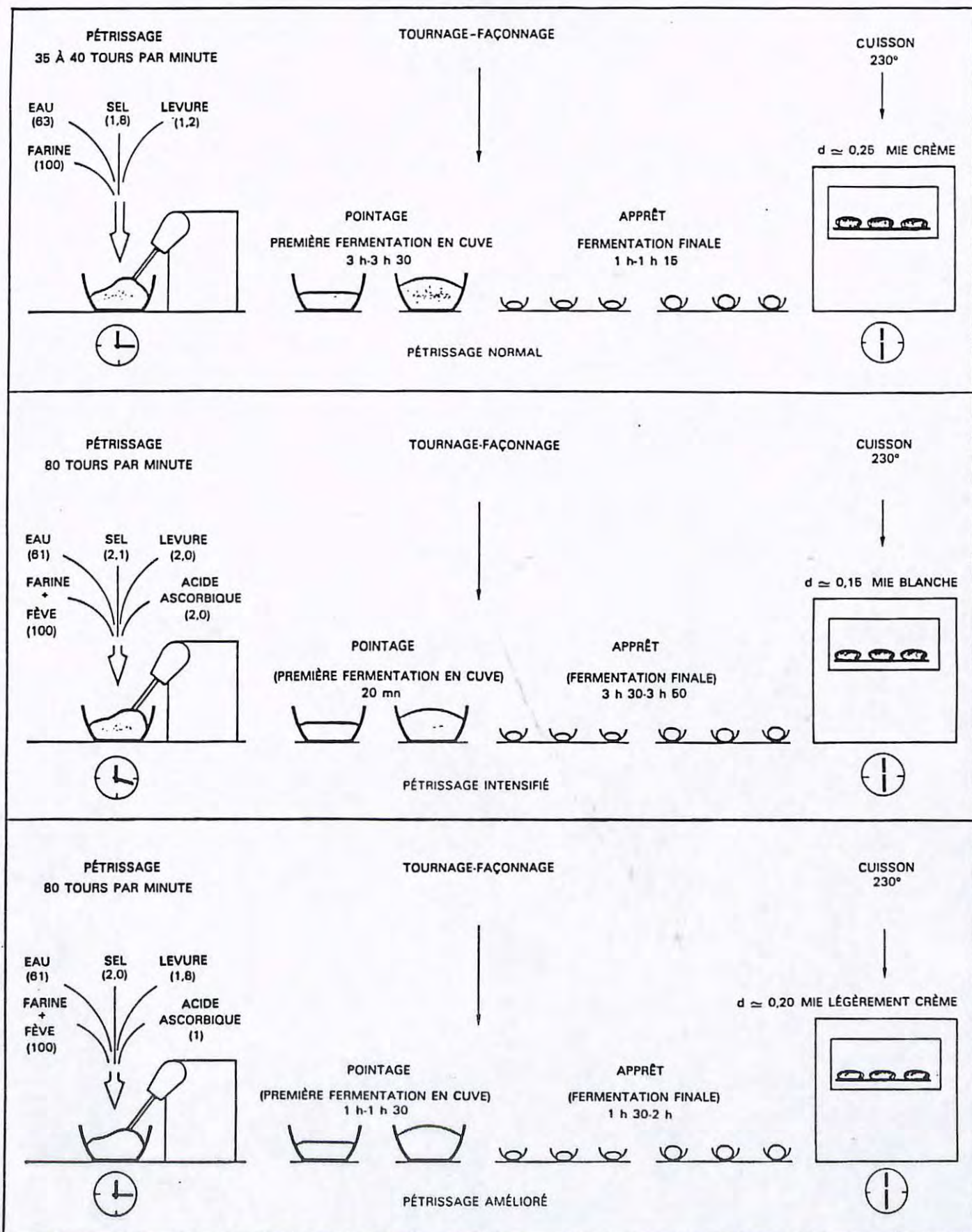
- Avant 1920 Levain, pétrissage à la main
- 1920 Pétrissage mécanique
- 1930 Levure de boulangerie : travail sur direct
- 1940-1945 Diminution du temps de pétrissage (Farine de mauvaise qualité)
- 1947 Retour aux conditions de 1930
- 1957 Pétrissage intensifié (énergie X 4)**
- 1960 Utilisation du froid
 - Fermentation contrôlée
 - Surgélation des pâtes

* Selon Guinet et Buré, 1986

** Pétrissage deux fois plus rapide et deux fois plus longtemps

Evolution de la consommation de pain en France

Années	grammes de pain consommés par personne et par jour
• 1781-1790	550
• 1835-1844	670
• 1885-1890	810
• 1920-1924	630
• 1960-1964	300
• 1965-1970	200
• 1980-1995	165

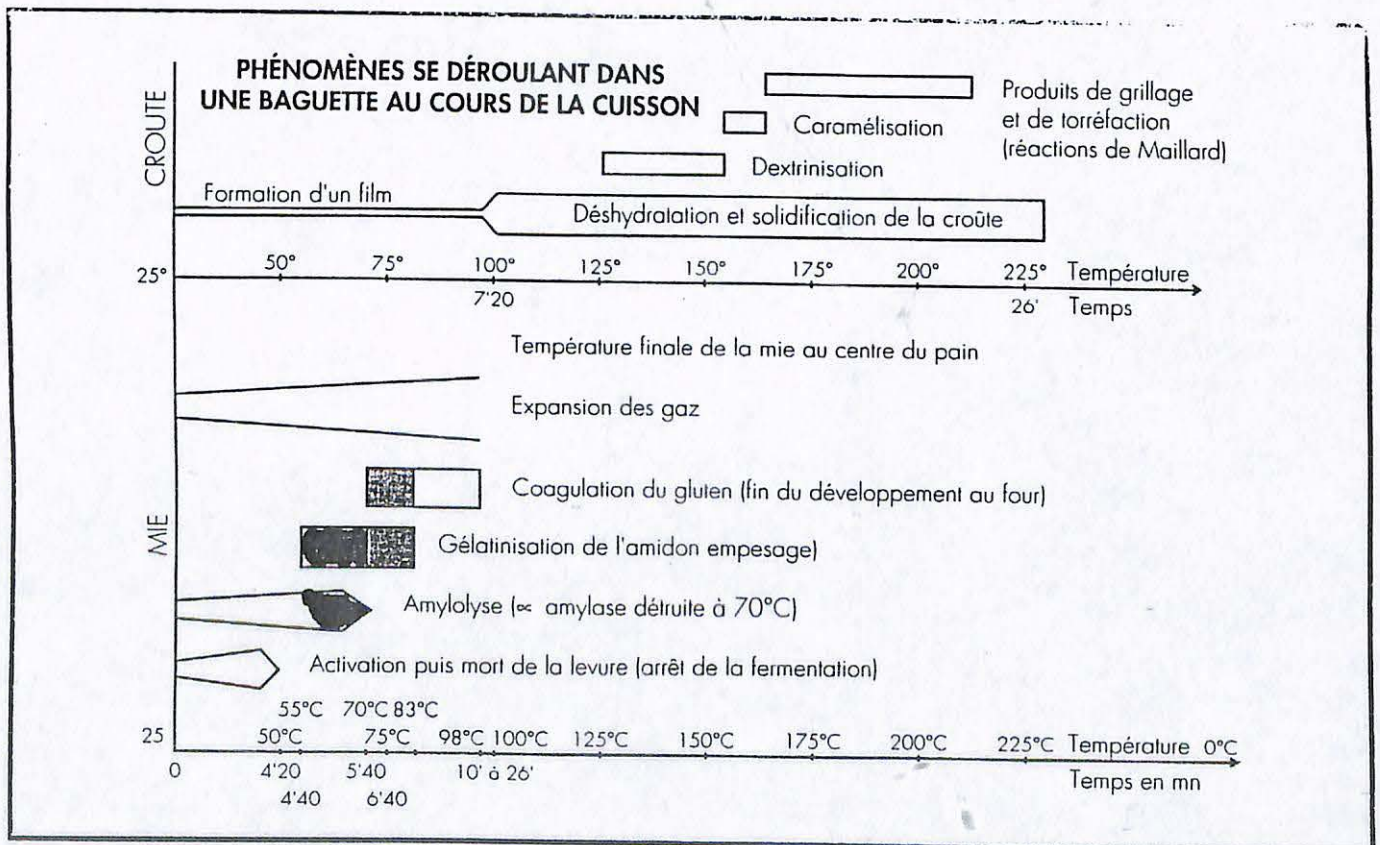


4. TROIS TECHNIQUES DE PANIFICATION ont été utilisées ; on a employé la plus ancienne, dite « à pétrissage normal » depuis le début du siècle jusque vers 1950. Le pétrissage est limité, le pointage (première fermentation) est long, l'apprêt (seconde fermentation) est court. Les pains sont crème, de bon goût, moyennement développés et assez denses. La méthode dite « à pétrissage intensifié » a remplacé peu à peu le pétrissage normal. Elle fut à peu près la

seule utilisée ces dernières années. Le pétrissage est bien plus intense, le pointage est très réduit ou supprimé, l'apprêt est allongé ; les pains sont blancs, avec peu de goût, très développés et plus légers. Une technique intermédiaire, dite « à pétrissage amélioré », apparaît progressivement ; elle conserve une certaine qualité des pains agréables au consommateur et reste compatible avec les impératifs techniques modernes.

Dès le début du pétrissage, l'eau se répartit entre les différents constituants hydrophiles de la farine

Constituant	Eau absorbée g d'eau / g de constituant
Amidon natif	0,3
Amidon endommagé	1,0
Protéines	2,0
Pentosanes	11,0

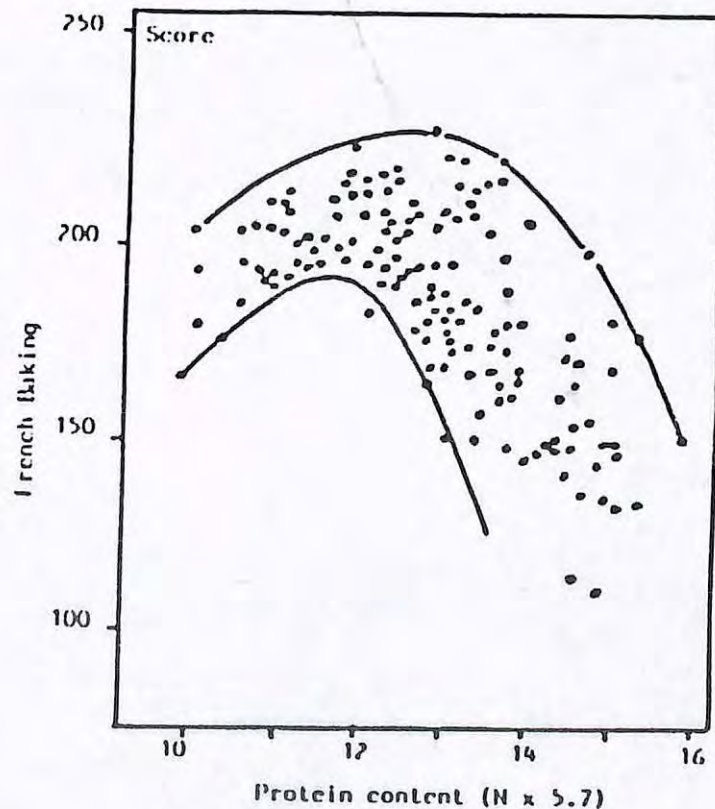


Essai de panification

Un essai de panification permet d'apprécier l'aptitude d'une farine à se transformer en pain de bonne qualité. Il s'appuie sur une procédure de panification soigneusement standardisée et sur une grille de notation des propriétés de la pâte au cours du pétrissage, de l'apprêt et de la mise au four et de la qualité de la mie et de la croûte.

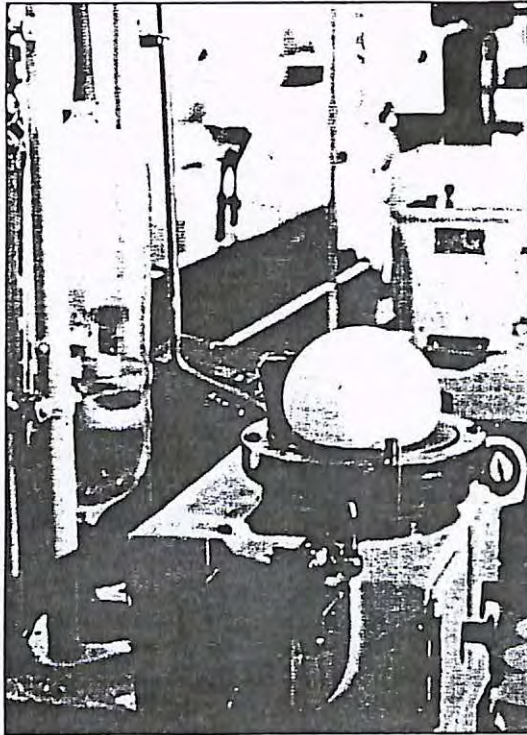


Il existe autant de tests que de procédures. Les correspondances entre les résultats des différents tests ne sont pas toujours faciles à établir.

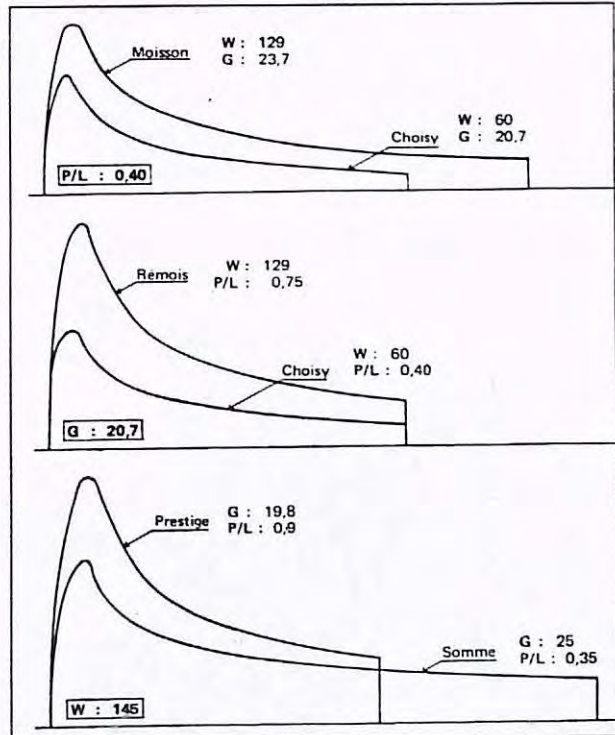


Relationship between French baking score and protein content. Source: Martin (12).

Essai à l'alvéographe Chopin



Développement de la bulle

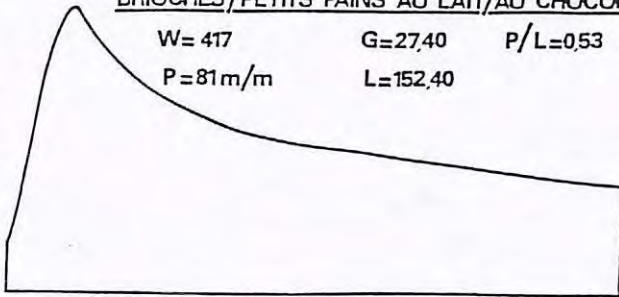


Exemples d'alvéogrammes

FARINE POUR VIENNOISERIE

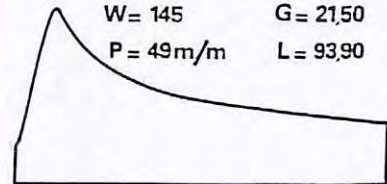
BRIOCHE/PETITS PAINS AU LAIT/AU CHOCOLAT

W= 417 G=27,40 P/L=0,53
P=81m/m L=152,40



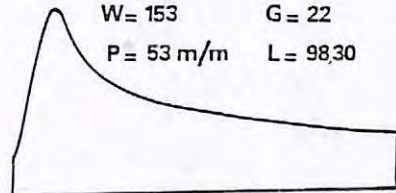
FARINE POUR USAGE FAMILIAL

W= 145 G= 21,50 P/L=0,52
P= 49m/m L= 93,90



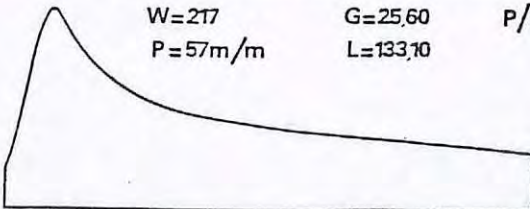
FARINE BOULANGERE UTILISEE AVEC TEMPS DE FERMENTATION PROLONGE

W= 153 G= 22 P/L=0,54
P= 53 m/m L= 98,30



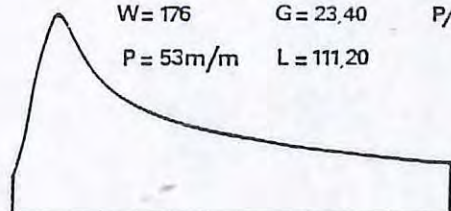
FARINE POUR PAIN GRILLE-BISCOTTES

W=217 G=25,60 P/L=0,43
P=57m/m L=133,10



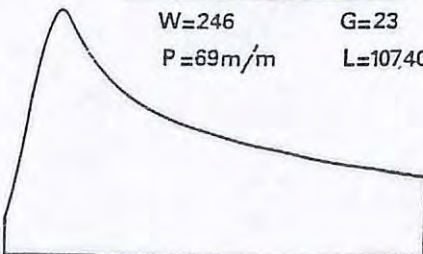
FARINE BOULANGERE-BAGUETTE/PAIN FRANCAIS

W= 176 G= 23,40 P/L=0,51
P= 53m/m L= 111,20



FARINE TYPE CROISSANT

W=246 G=23 P/L=0,65
P=69m/m L=107,40



La force boulangère des blés a doublé en 30 ans

Année d'inscription	Variété ayant eu extension importante	W (alvéo)
• 1933	Vilmorin 27	90-100
• 1946	Cappelle	100-130
• 1950	Etoile de Choisy	60-70
• 1953	Vilmorin 53	90-100
• 1959	Champlein	80-90
• 1963	Moisson	130-140
• 1964	Capitole	140-150
• 1966	Joss	100
• 1969	Hardi	160
• 1970	Top	150-160
• 1973	Talent	130
• 1973	Maris Huntsman	70
• 1974	Clément	50
• 1977	Arminda	120
• 1978	Fidel	140
• 1980	Camp Rémy	180
• 1981	Festival	170-180
• 1981	Scipion	140-170
• 1983	Pernel	200-250
• 1984	Moulin	180
• 1984	Thésée	200-250
• 1988	Soissons	250-300
• 1989	Forby	140-160
• 1991	Ritmo	150-180
• 1991	Sidéral	200-250

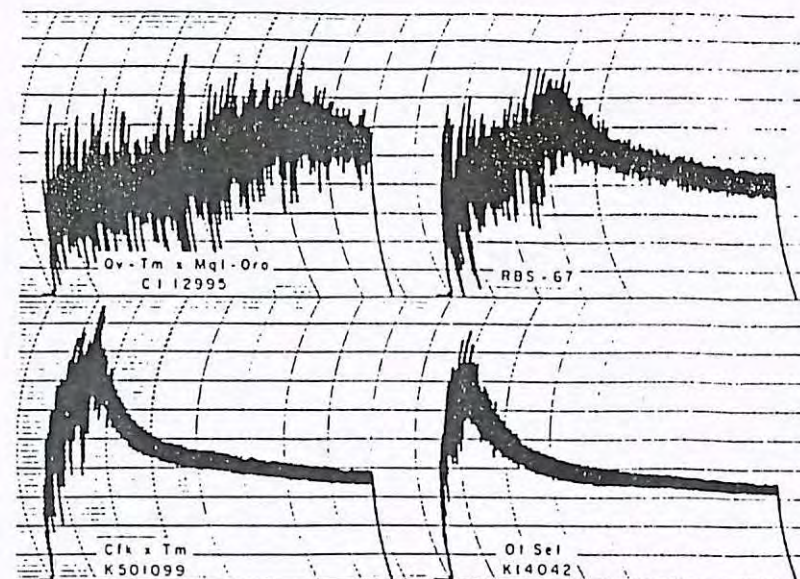


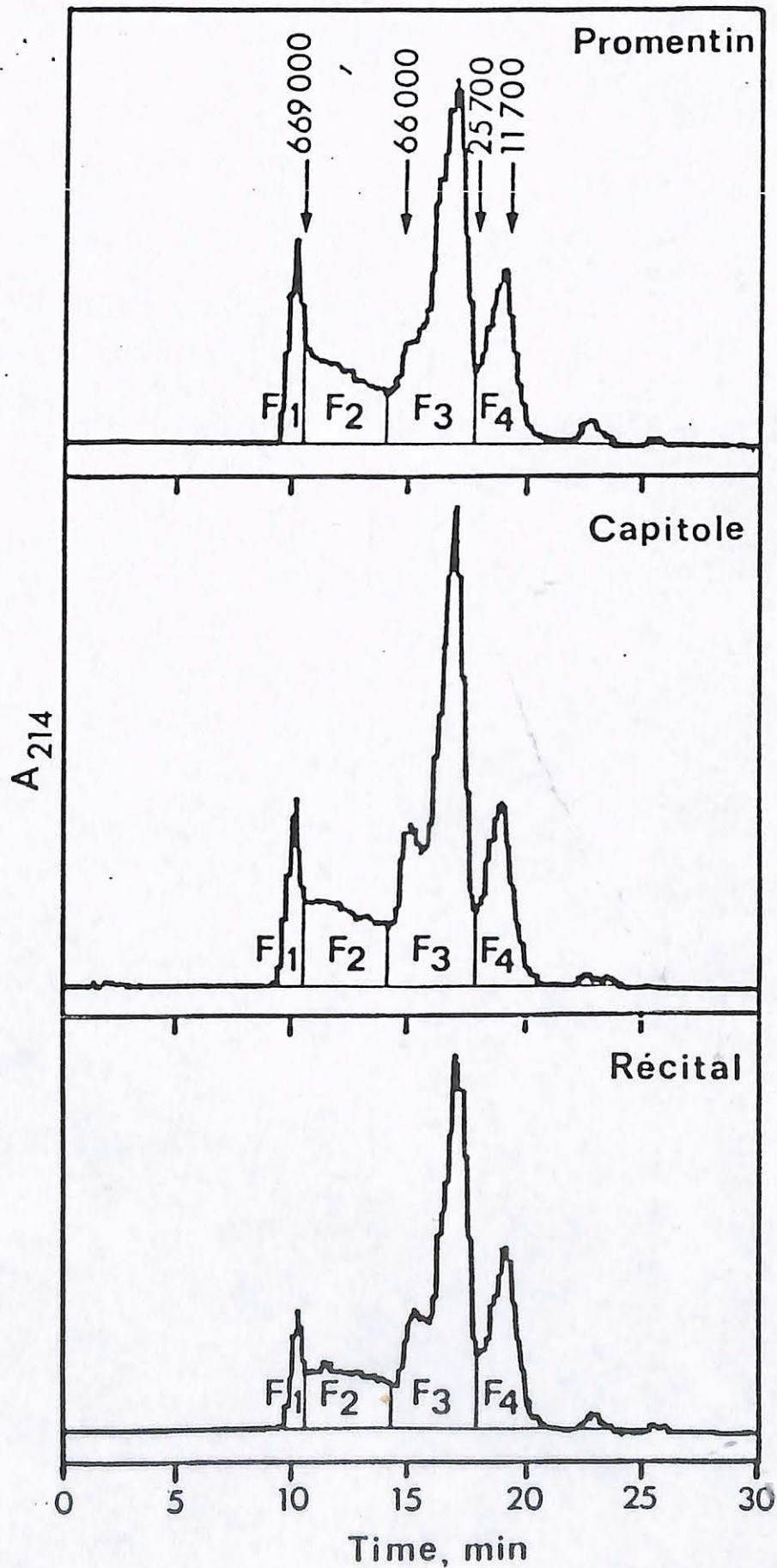
Fig. 10. Mixogram of hard winter wheats showing excellent (CI 12995), good (RBS-67), poor (K501099), and extremely poor (K14042) mixing properties.

Indice de sédimentation de Zeleny

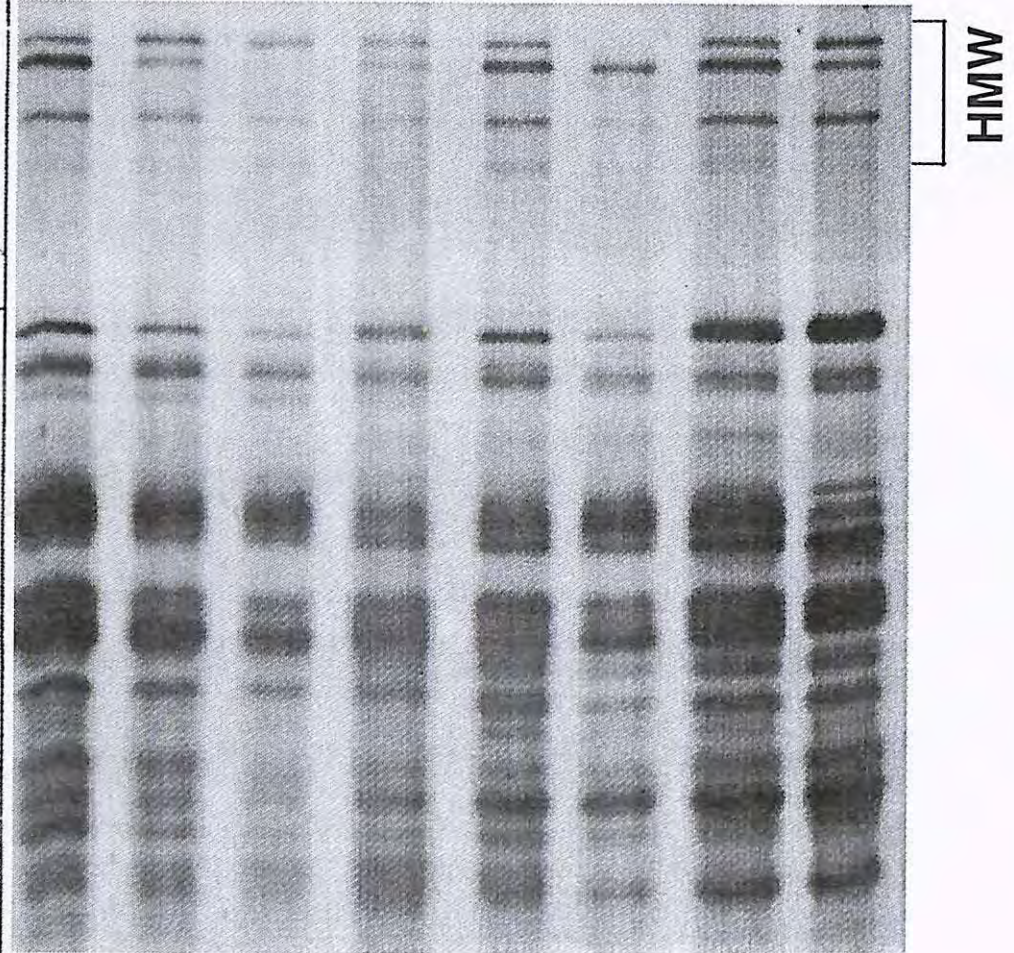
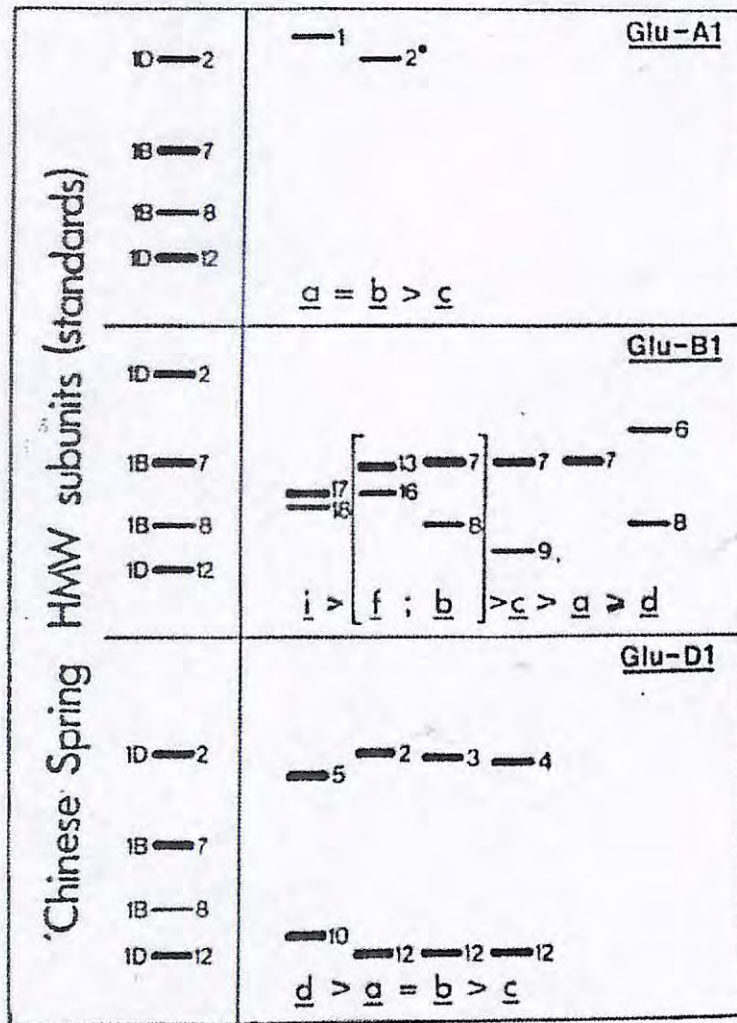
- Le test de sédimentation mesure l'aptitude des protéines à « gonfler » en milieu lactique. Sa valeur serait reliée à la force boulangère des farines : un indice élevé témoigne d'une bonne qualité. Sa valeur est toutefois influencée par la teneur en protéines et la granulométrie des farines.
- L'indice de sédimentation est égal à la hauteur du sédiment mesuré après que la farine ait été mise en suspension dans une solution d'acide lactique, agitée et laissée reposer.



Profils d'élution en chromatographie d'exclusion-diffusion (SE-HPLC) des protéines de 3 variétés de blé de qualité boulangère différente



Variation allélique des sous-unités HMW gluténines et relation avec la force boulangère (selon Payne et Laurence, 1983)



Quality

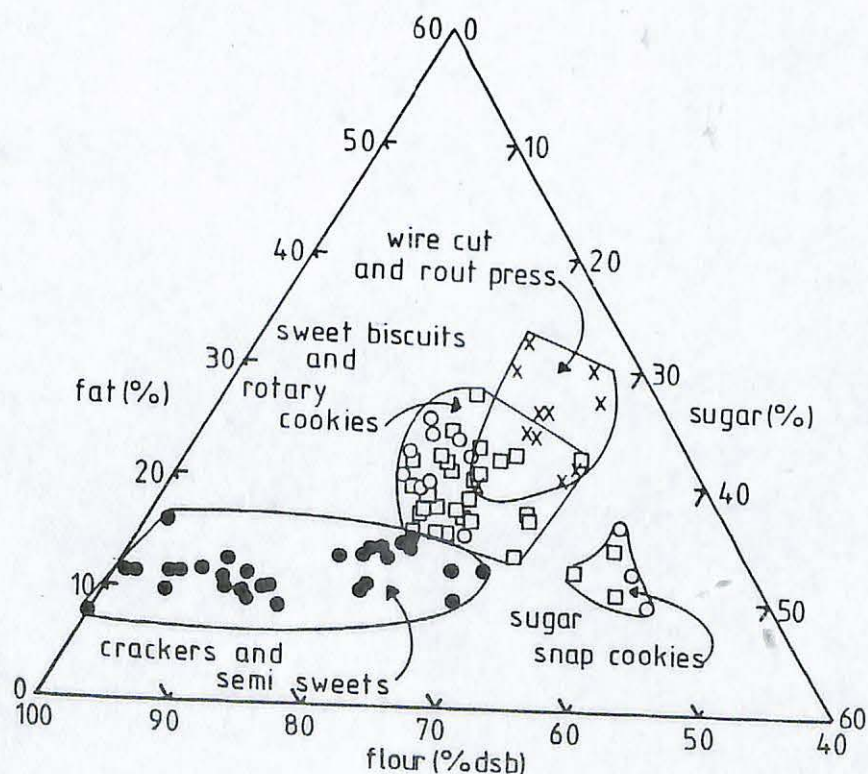
VII - AUTRES USAGES ALIMENTAIRES DES BLÉS TENDRES

Biscuiterie, biscotterie, pâtisserie
Amidonnerie et glutennerie de blé
Produits de régime
Petits déjeuners

Principaux types de biscuits

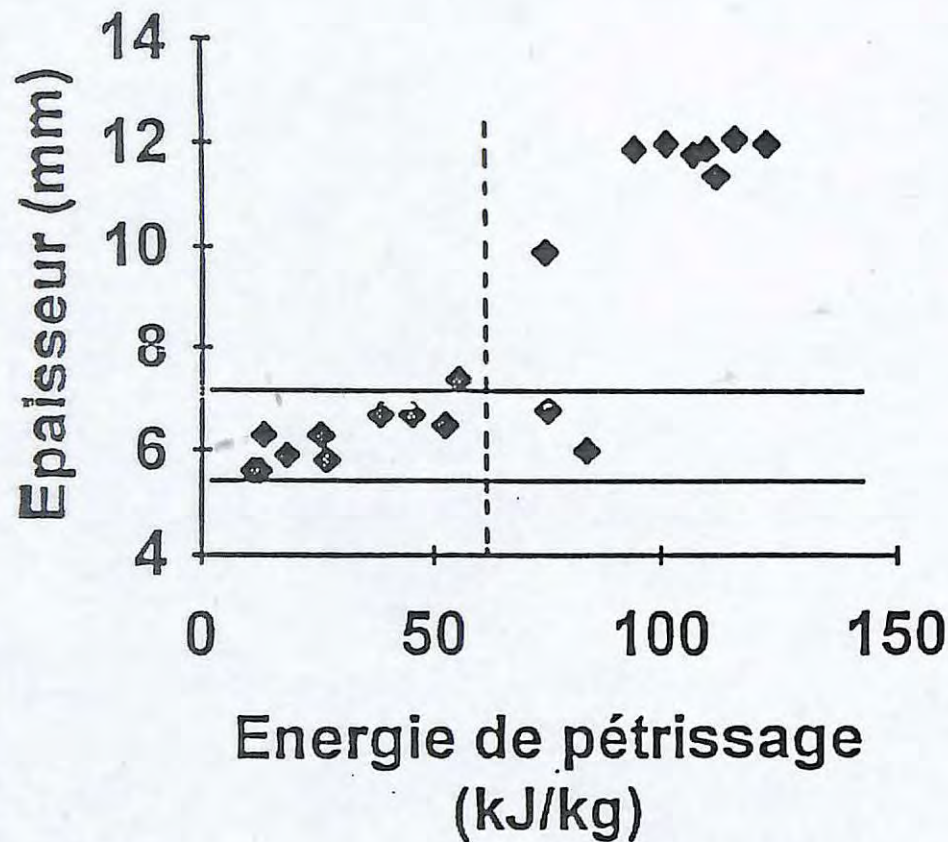
Biscuits secs sucrés	Farine, sucre, matière grasse, eau
Crackers	Farine (pâte fermentée), matière grasse, sucre, sel, eau
Génoises	Farine, sucre, œufs
Gaufrettes	Farine, œufs, sucre, eau

DIFFERENTS TYPES DE BISCUITS

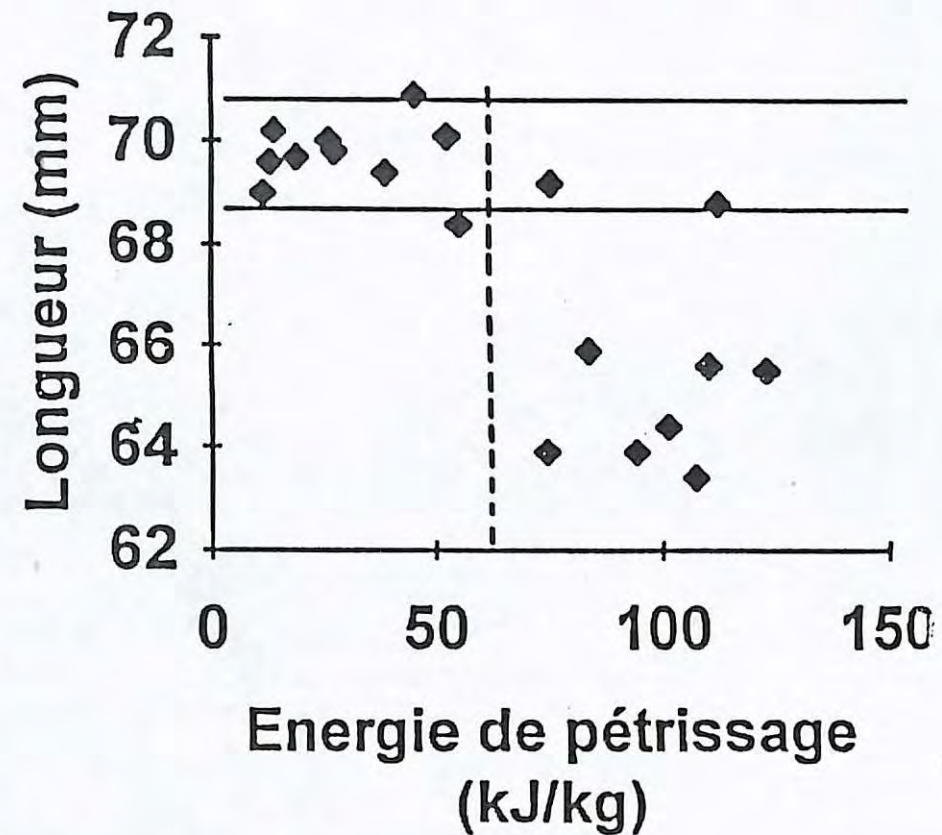


Influence de l'énergie de pétrissage sur la stabilité dimensionnelle des biscuits

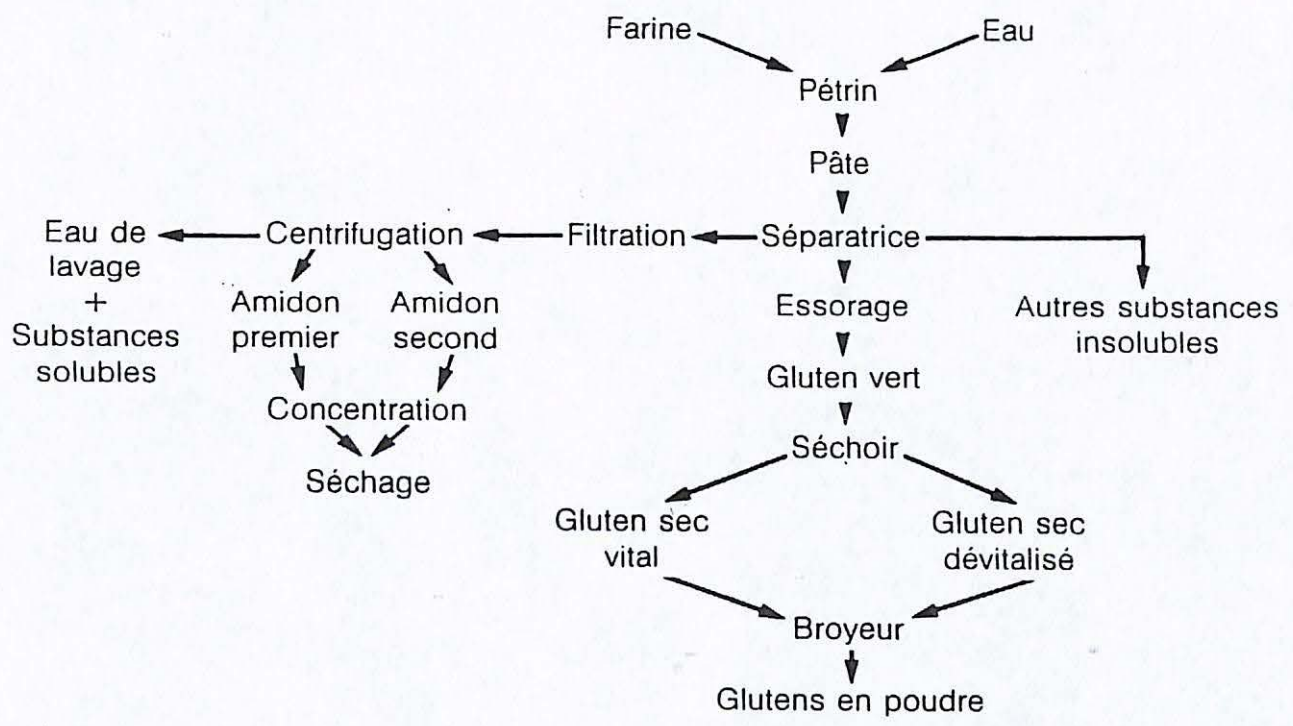
Evolution de l'épaisseur des biscuits avec l'énergie de pétrissage



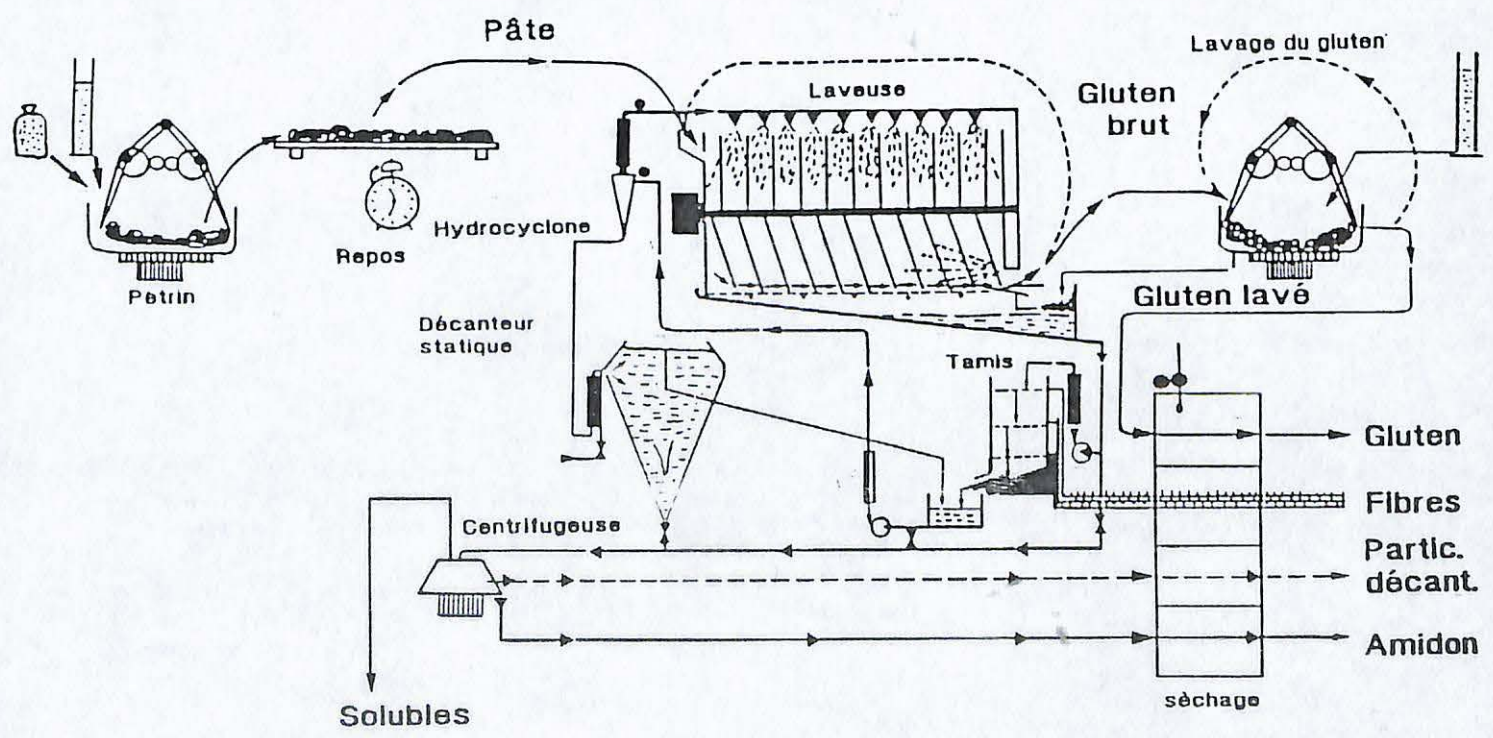
Evolution de la longueur des biscuits avec l'énergie de pétrissage



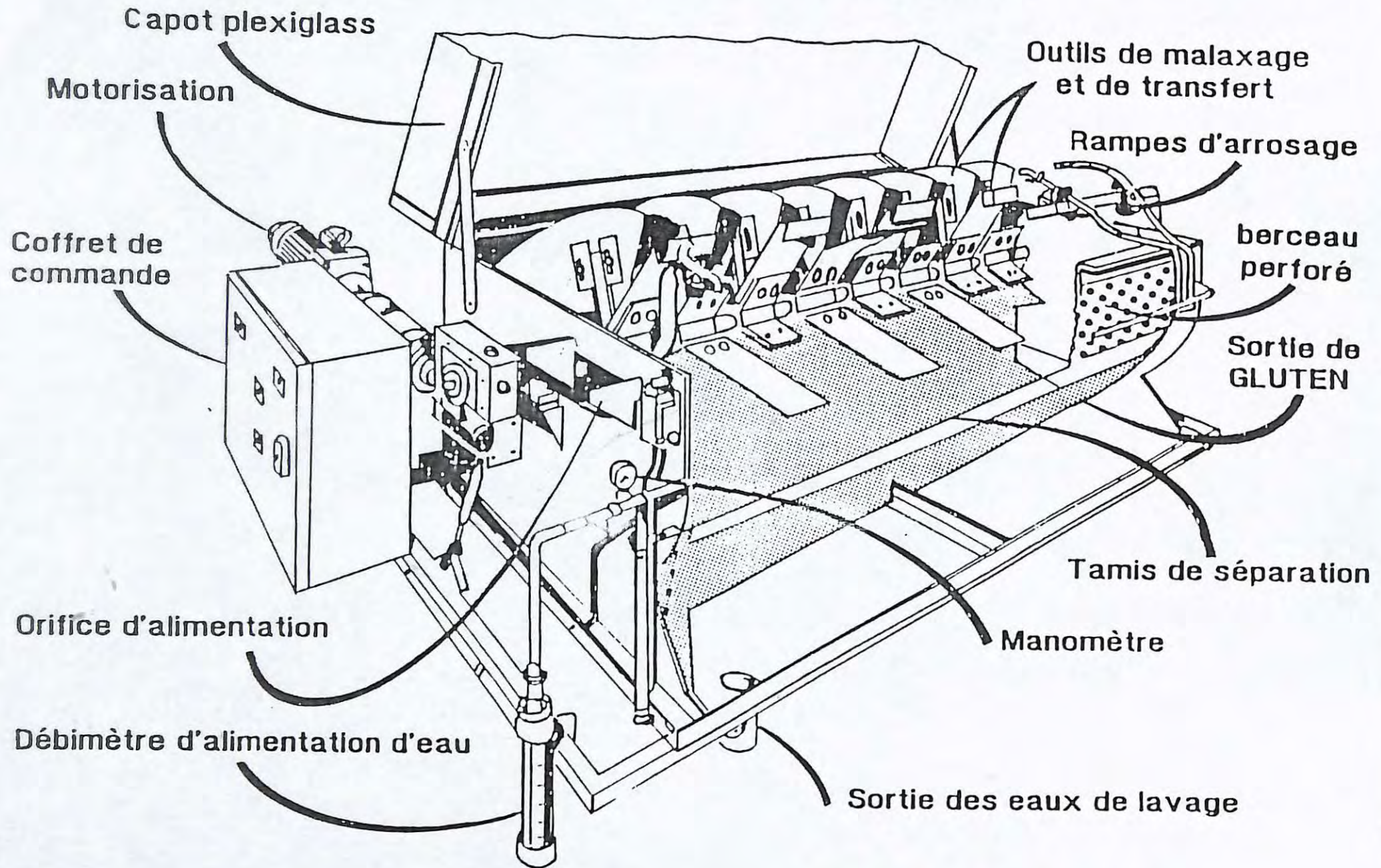
LA GLUTENNERIE



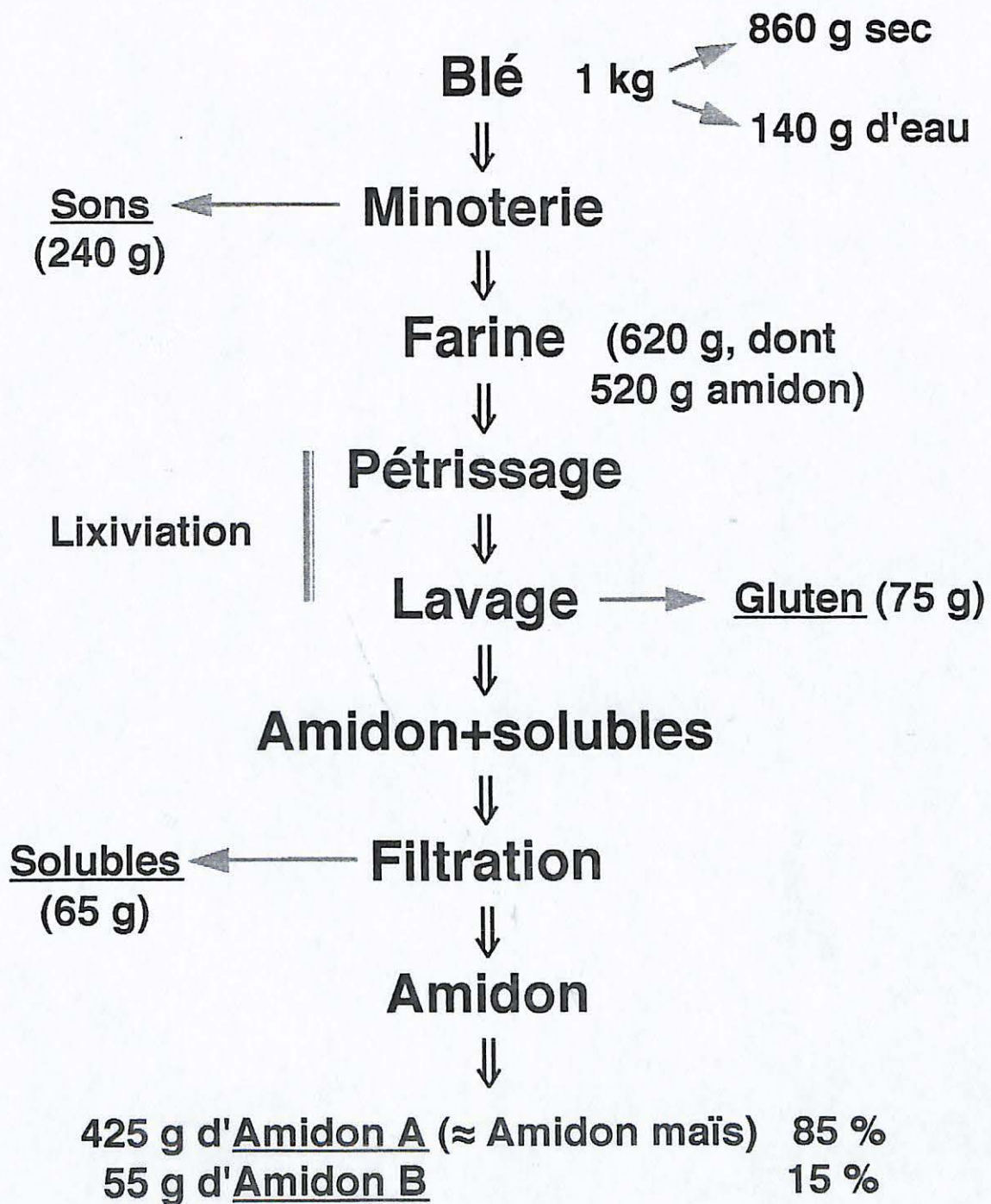
GLUTENNERIE PILOTE



APPAREIL DE LIXIVIATION



Bilan de l'amidonnerie-glutennerie



VIII - LE BLÉ DUR : SEMOULERIE ET PÂTES ALIMENTAIRES

Technologies de semoulerie

Technologies de pastification : malaxage, extrusion, séchage

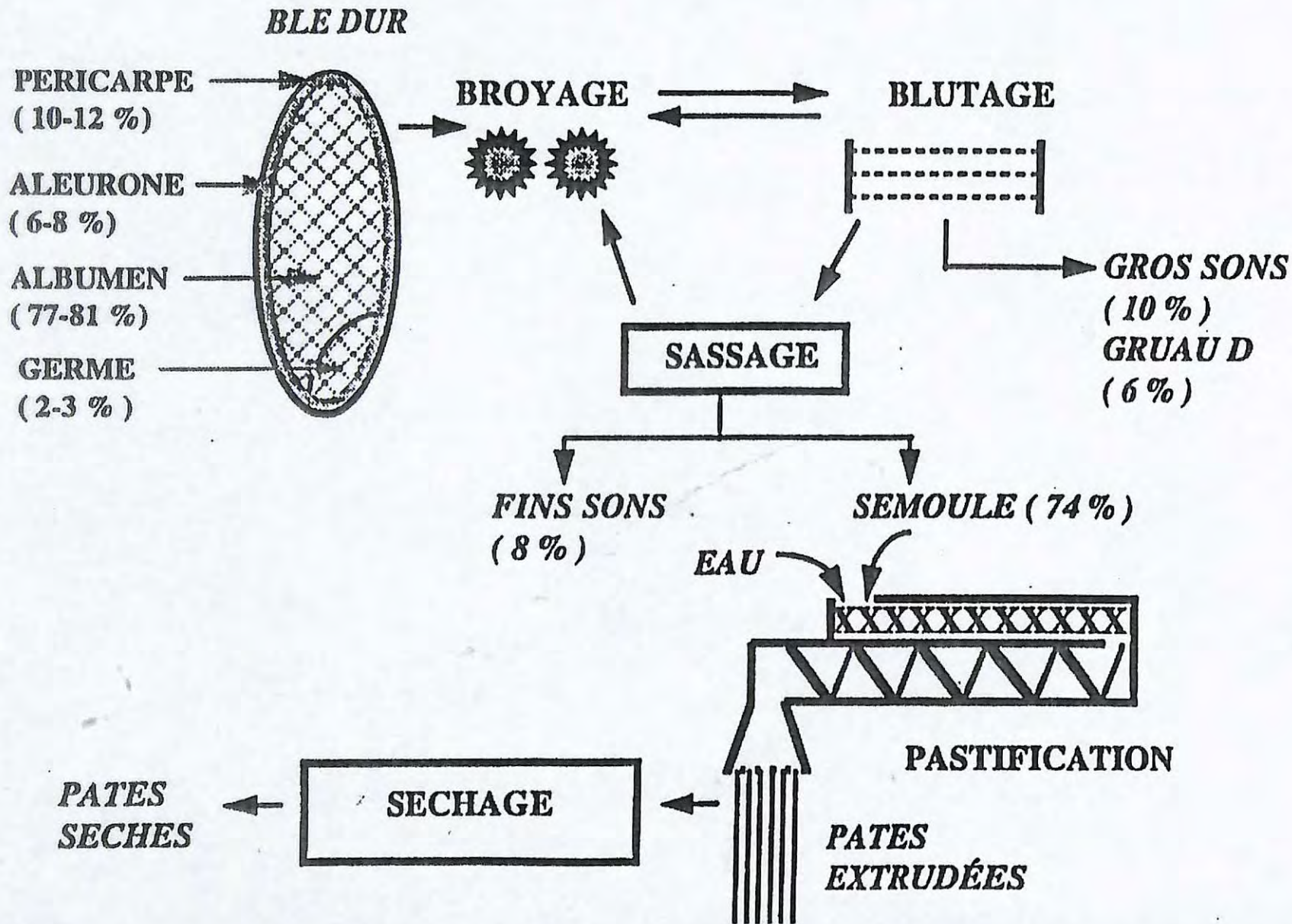
Qualité des pâtes alimentaires (couleur, tenue à la cuisson) et bases physico-chimiques

Influences respectives de la variété de blé et du procédé de transformation

Autres produits à base de blé dur : pain de blé dur, couscous, bulgur, Ebly,...

Recherches en cours sur l'amélioration des procédés de pastification et sur la valeur semoulière, pastière et culinaire des blés durs

Figure 1 - Du Blé Dur aux Pâtes Alimentaires



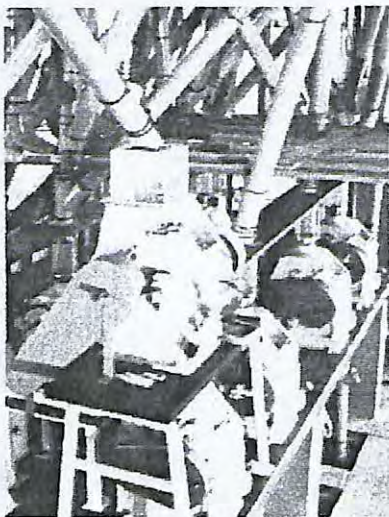
Valeur semoulière des blés durs

Définitions : La *valeur semoulière* est l'aptitude d'un blé dur à donner un rendement élevé en semoule de pureté déterminée.

- ❑ La *semoule* correspond aux fragments de l'amande du grain de taille comprise entre 150 et 500 μm .
- ❑ 1 % de rendement en semoules équivaut à environ 10 millions de francs par an pour la semoulerie française.



Coupe d'un grain de blé



Semoulerie IN RA de Montpellier

Principe de la mouture du blé dur : Broyage très progressif des grains au cours d'une succession de passages dans des machines à cylindres : récupération de l'albumen amylicé par tamisage et sassage, en commençant par extraire les parties les plus internes sous forme de semoule (environ 75 % du grain) pour se rapprocher de la périphérie (sons : 20 %), avec une production minimale de produits fins (farine : 5%).

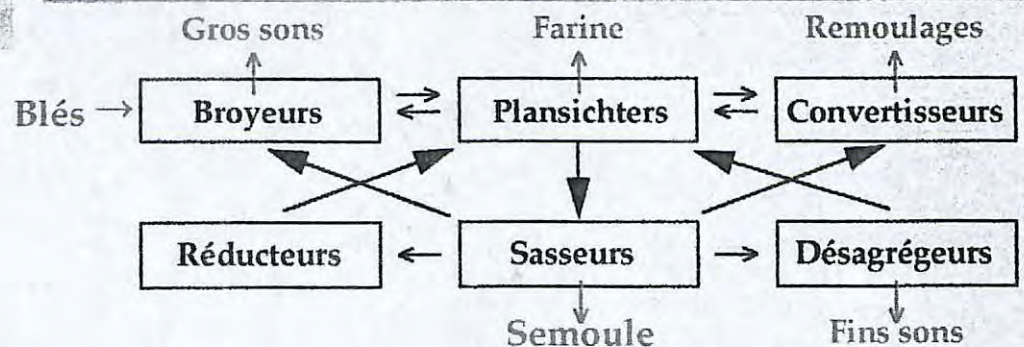


Diagramme de mouture type blé dur

Facteurs de la valeur semoulière

- ❑ Facteurs commerciaux, liés aux conditions de culture et de récolte : teneur en eau, taux d'impuretés, grains cassés,...
- ❑ Facteurs dépendant de la variété de blé dur et des conditions de culture :
 - » rapport entre albumen amylicé et enveloppes : PMG, densité
 - » friabilité de l'albumen : mitadinage
 - » adhérence entre albumen et enveloppes : difficulté à «épuiser» les sons
- ❑ Facteur réglementaire : taux de matières minérales, ou taux de cendres

LE SASSEUR

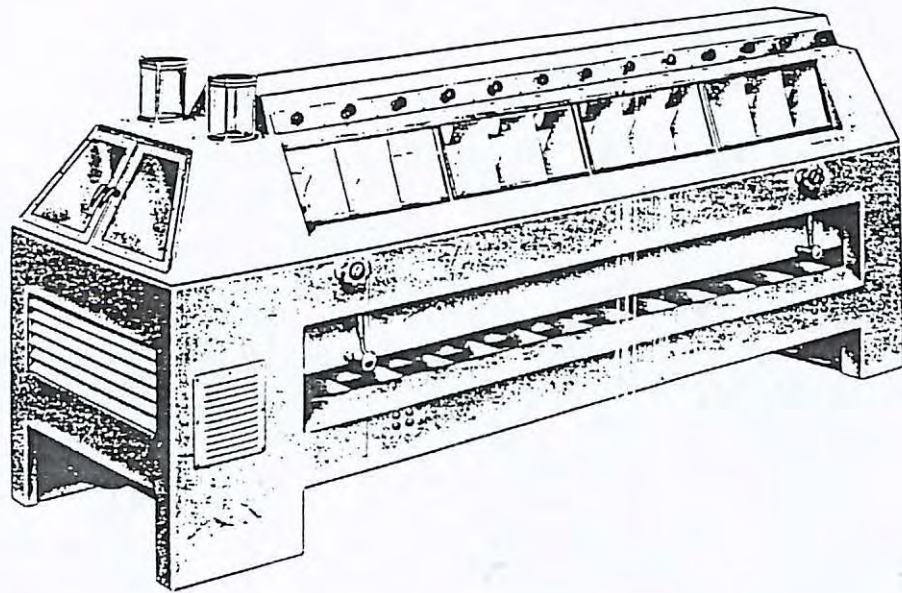
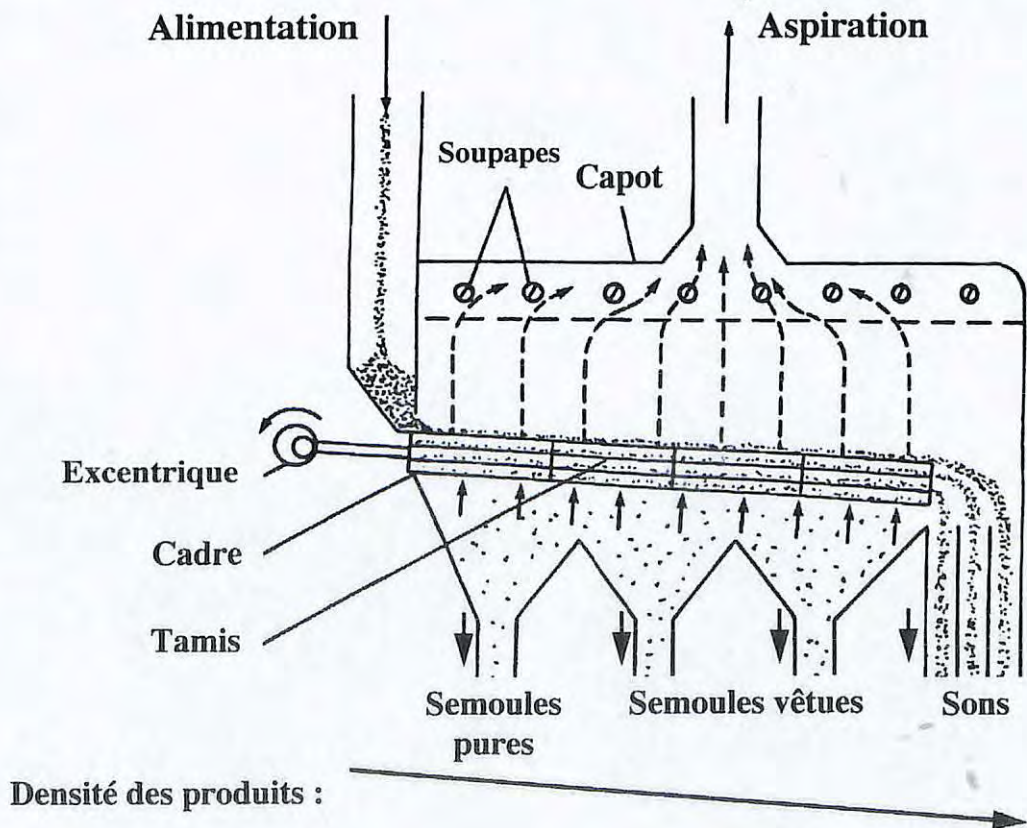


Schéma de fonctionnement d'un sasseur



La fabrication des pâtes alimentaires

Les pâtes alimentaires, de couleur jaune ambré doivent, après cuisson, rester fermes sans se déliter ni coller entre elles

Fabrication :

MALAXAGE

Hydratation des semoules (30 %)

EXTRUSION

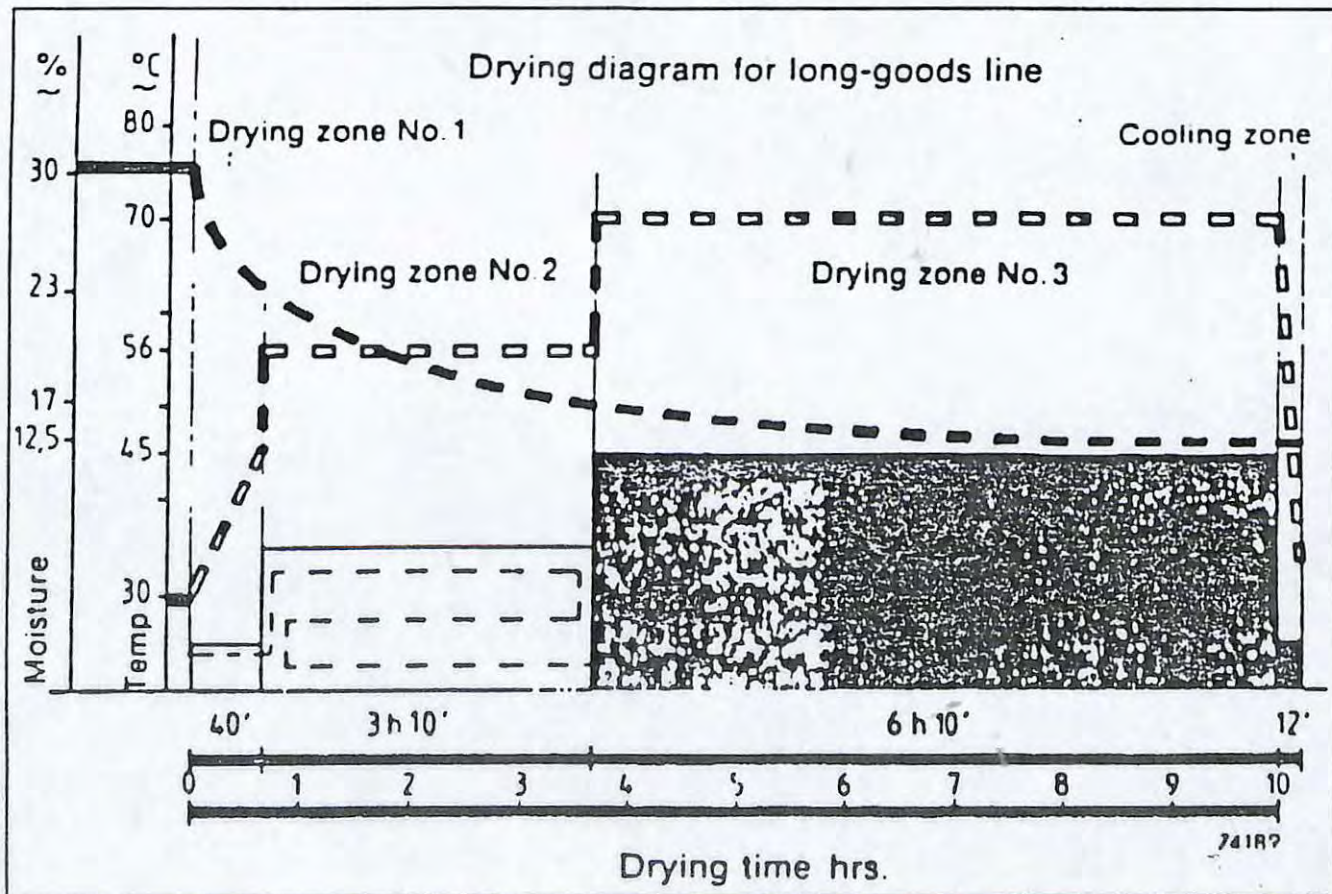
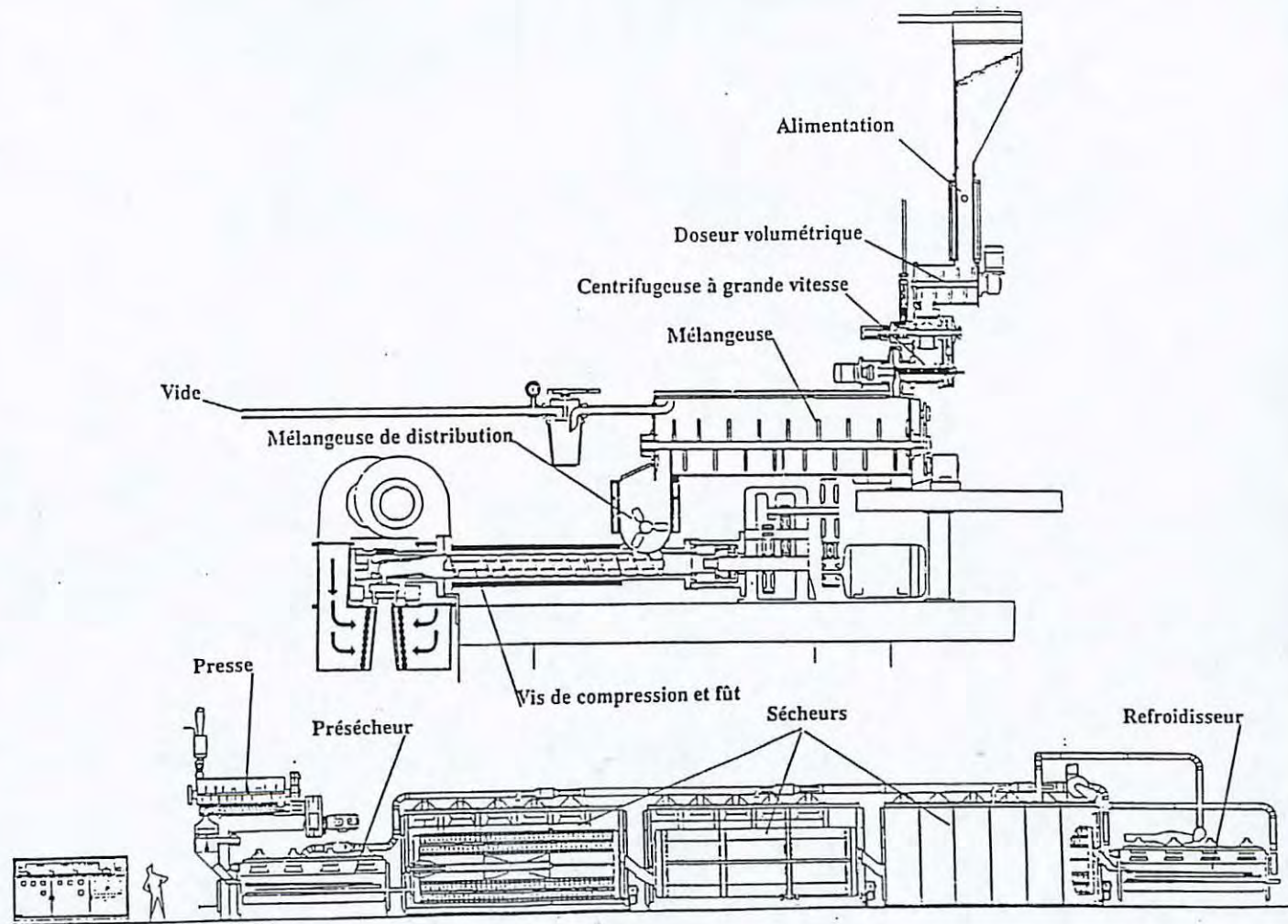
Mise en forme à basse température sous pression élevée (100 bars)

SÉCHAGE

Élimination de l'eau et modification des propriétés physico-chimiques des constituants sous l'effet de traitements hydrothermiques

Physico-chimie

Les protéines doivent former un réseau continu autour des grains d'amidon. Ce réseau doit s'insolubiliser rapidement au cours de la cuisson pour maintenir dans ses mailles les grains d'amidon gélatinisés



Exemple de diagramme de séchage haute température.

Aspect des pâtes alimentaires

Définitions :

Les pâtes alimentaires sont fabriquées par malaxage d'un mélange d'eau et de semoule de pur blé dur, mise en forme par extrusion ou laminage, et séchage.

L'aspect des pâtes crues est déterminé par 4 groupes de facteurs.

Le premier, la *coloration*, dépend en grande partie de la qualité des blés mis en œuvre. Les 3 autres (piqûres, texture superficielle, gerçures) dépendent des conditions de travail des semouliers et des pastiers.

La **gerçure** constitue un grave accident de fabrication de la pâte, dû à un séchage défectueux.

La **texture superficielle** des pâtes dépend surtout de la nature des moules utilisés (téflon, bronze).

Les **piqûres** proviennent : soit de mauvaises conditions d'hydratation de la pâte (piqûres blanches, soit de particules de sons non éliminées au cours de la mouture (piqûres brunes), soit de grains mouchetés (piqûres noires). La **moucheture** constitue un handicap sérieux qui déprécie fortement l'aspect des produits finis.



La **coloration** : Une pâte alimentaire doit être claire et de couleur jaune-ambéré. La *couleur jaune* dépend des pigments caroténoïdes de la semoule, et des enzymes (lipoxygénases) qui peuvent détruire ces pigments au cours de la pastification. La *clarté* est fonction d'une autre catégorie d'enzymes, les peroxydases. La *coloration peut être améliorée d'abord par la sélection de nouvelles variétés*, et corrigée éventuellement en jouant au niveau de la mouture, ou au niveau du séchage des pâtes.



Fabrication de spaghetti par extrusion

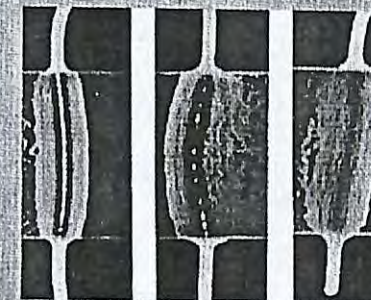
Qualité culinaire

C'est l'aptitude d'une pâte alimentaire à gonfler et absorber de l'eau au cours de la cuisson tout en restant ferme et sans se désintégrer, même après une légère surcuisson.

En réalité, la qualité culinaire regroupe l'ensemble des caractéristiques suivantes : temps de cuisson, absorption d'eau pendant la cuisson, texture des produits cuits (fermeté et élasticité), état de surface des produits cuits, arôme et goût.

Temps de cuisson

Les temps minimal, optimal et maximal de cuisson correspondent respectivement au temps à partir duquel l'amidon est gélatinisé, le temps nécessaire pour donner à la pâte la texture recherchée, le temps au delà duquel les produits se désintègrent dans l'eau de cuisson.



Gonflement et absorption d'eau

Le gonflement et l'absorption d'eau se mesurent en déterminant le poids des pâtes avant et après cuisson. D'une manière générale, 100 grammes de pâtes sèches fixent 160 à 180 grammes d'eau.

Texture : fermeté, masticabilité

La texture des produits cuits rend compte de la fermeté et de la masticabilité des pâtes après cuisson. On peut déterminer ces caractéristiques par des mesures rhéologiques (fermeté, viscoélasticité, ténacité) en utilisant un texturomètre, ou un Viscoélastographe, ou un Alvéographe. Elle dépend de la qualité et de la quantité des protéines (gluténines de faible poids moléculaire).

État de surface : collant et délitescence



L'état de surface des pâtes recouvre les notions de collant (prise en masse, adhésion des brins entre eux) et de délitescence (aspect plus ou moins lisse des produits cuits).



Qualité culinaire des pâtes alimentaires

- ❑ Temps de cuisson
- ❑ Gonflement et absorption d'eau pendant la cuisson
- ❑ Texture : fermeté, masticabilité
- ❑ État de surface : collant et délitescence



Temps de cuisson

- Les temps minimal, optimal et maximal de cuisson correspondent respectivement au temps à partir duquel l'amidon est gélatinisé, le temps nécessaire pour donner à la pâte la texture recherchée et le temps au delà duquel les produits se désintègrent dans l'eau de cuisson.

Détermination du temps optimal de cuisson



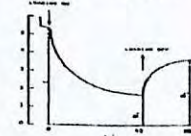
Insuffisant Minimal Optimal

Texture : fermeté, masticabilité

- ❑ La texture des produits cuits rend compte de la fermeté et de la masticabilité des pâtes après cuisson. On peut déterminer ces caractéristiques par des mesures rhéologiques (fermeté, viscoélasticité, ténacité) en utilisant un texturomètre, ou un Viscoélastographe, ou un Alvéographe.



Viscoélastographe



Mesure de la viscoélasticité d'un brin de spaghetti

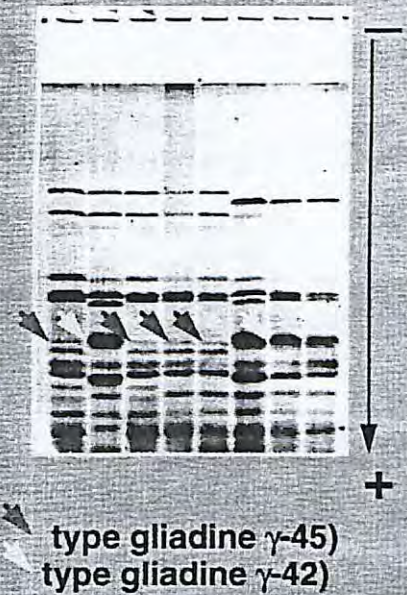
Etat de surface des pâtes cuites

- L'état de surface des produits cuits recouvre les notions de collant (prise en masse, degré d'adhésion des brins entre eux) et de désagrégation (délitescence) se manifestant pendant ou après la cuisson).



Les protéines

- ❑ Teneur en protéines de la semoule
- ❑ "Qualité des protéines", c'est-à-dire gluten ayant des propriétés viscoélastiques satisfaisantes
- ❑ Capacité des protéines à former un réseau insoluble et résistant, capable d'enserrer dans ses mailles les grains d'amidon en cours de gélatinisation.
- ❑ Capacité à coaguler rapidement en début de cuisson : effet améliorant des albumines (exemple : pâtes aux œufs).



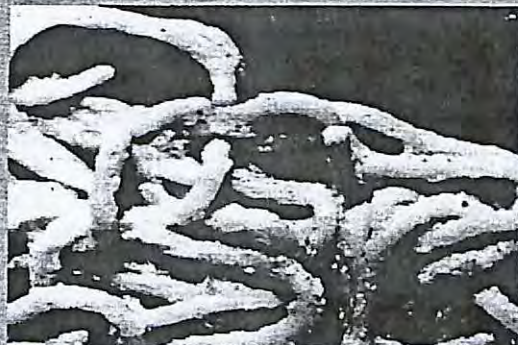
L'amidon

- L'amidon est un polymère du glucose. Formé d'amylose et d'amylopectine.
- La dureté du grain résulte de l'adhésion amidon-protéines.
- La gélatinisation (gonflement, perte de structure granulaire et de cristallinité, solubilisation) se produit au dessus de 55°C et en présence d'un excès d'eau. Elle ne se produit pas pendant le séchage des pâtes.
- Au cours de la cuisson dans l'eau bouillante, alors que les protéines forment un réseau insoluble, l'amidon, en se gélatinisant, tend à laisser échapper sa substance (surtout l'amylose) dans l'eau de cuisson.



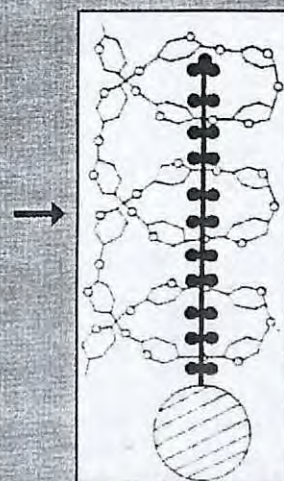
En fait, il y a compétition entre deux phénomènes :

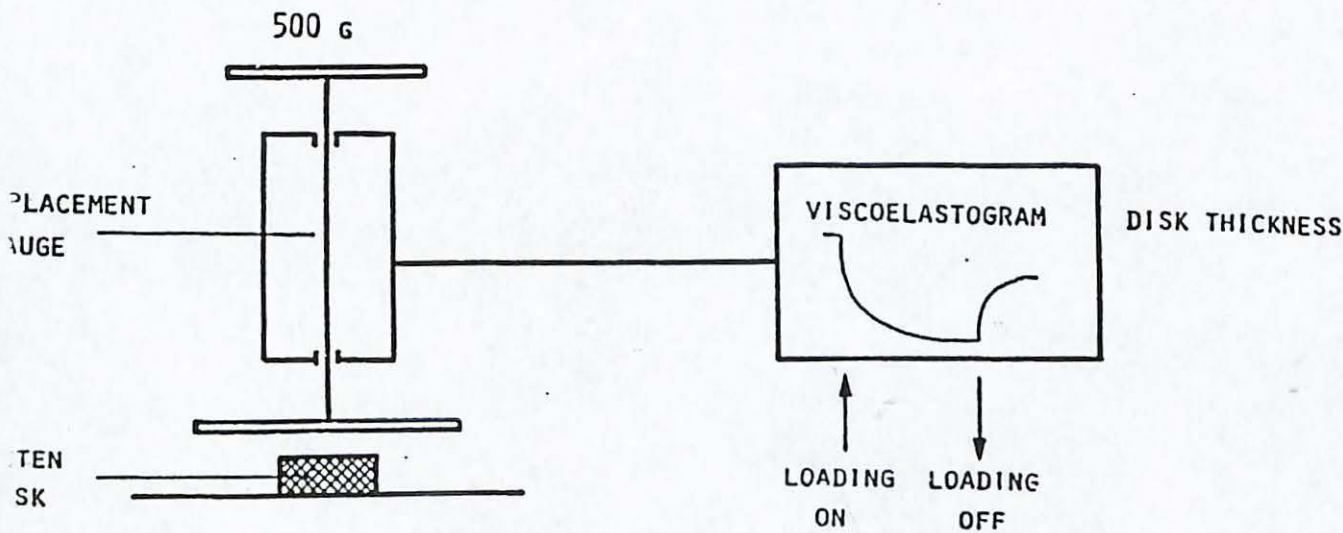
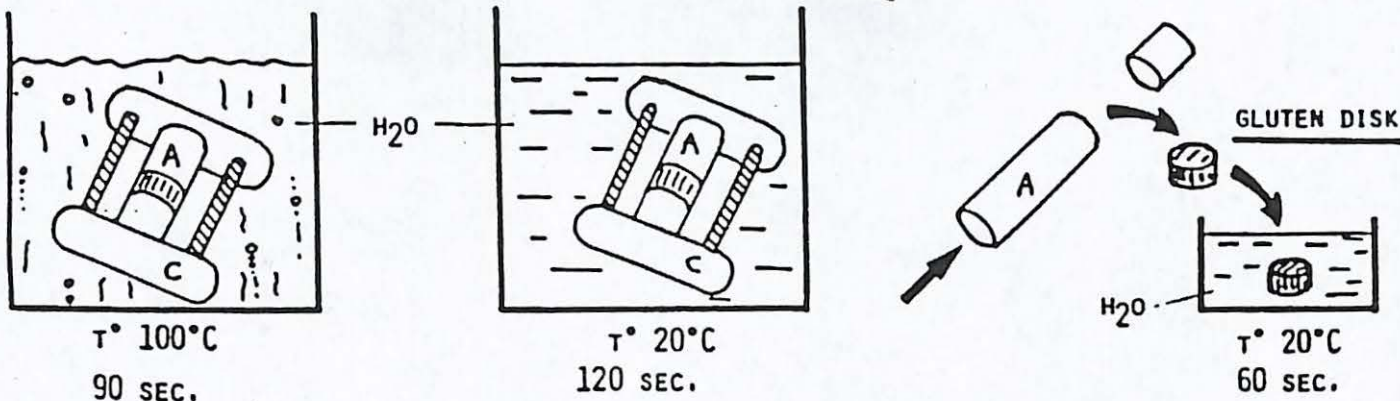
- Si les protéines sont en quantité suffisante et de bonne qualité : le réseau protéique peut être formé avant que l'amidon ne se gélatinise : les pâtes restent fermes et ne collent pas.
- Si la gélatinisation de l'amidon intervient avant formation du réseau protéique, l'amylose tendra à diffuser dans l'eau de cuisson, d'où enrichissement de la surface de la pâte en amylopectine : les pâtes vont coller



Les lipides

- ❑ Il peuvent contribuer à réduire l'aspect collant de la pâte et les pertes de matières lors de la cuisson, par complexation (→) avec l'amylose.
- ❑ Du beurre (ou de l'huile) ajouté aux pâtes lorsque celles-ci sont sorties de l'eau en fin de cuisson, peut éviter aux pâtes, maintenues chaudes, de coller dans l'assiette.

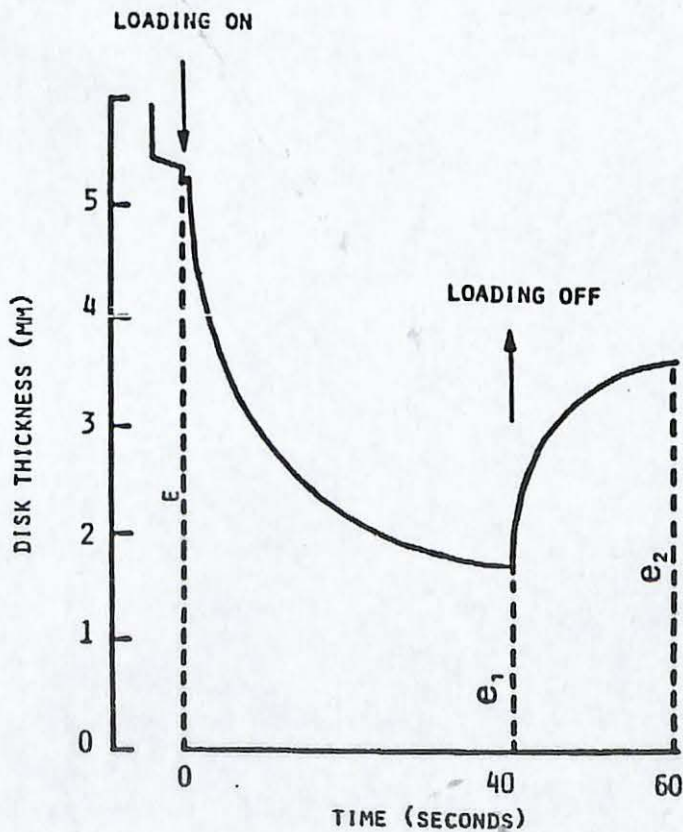




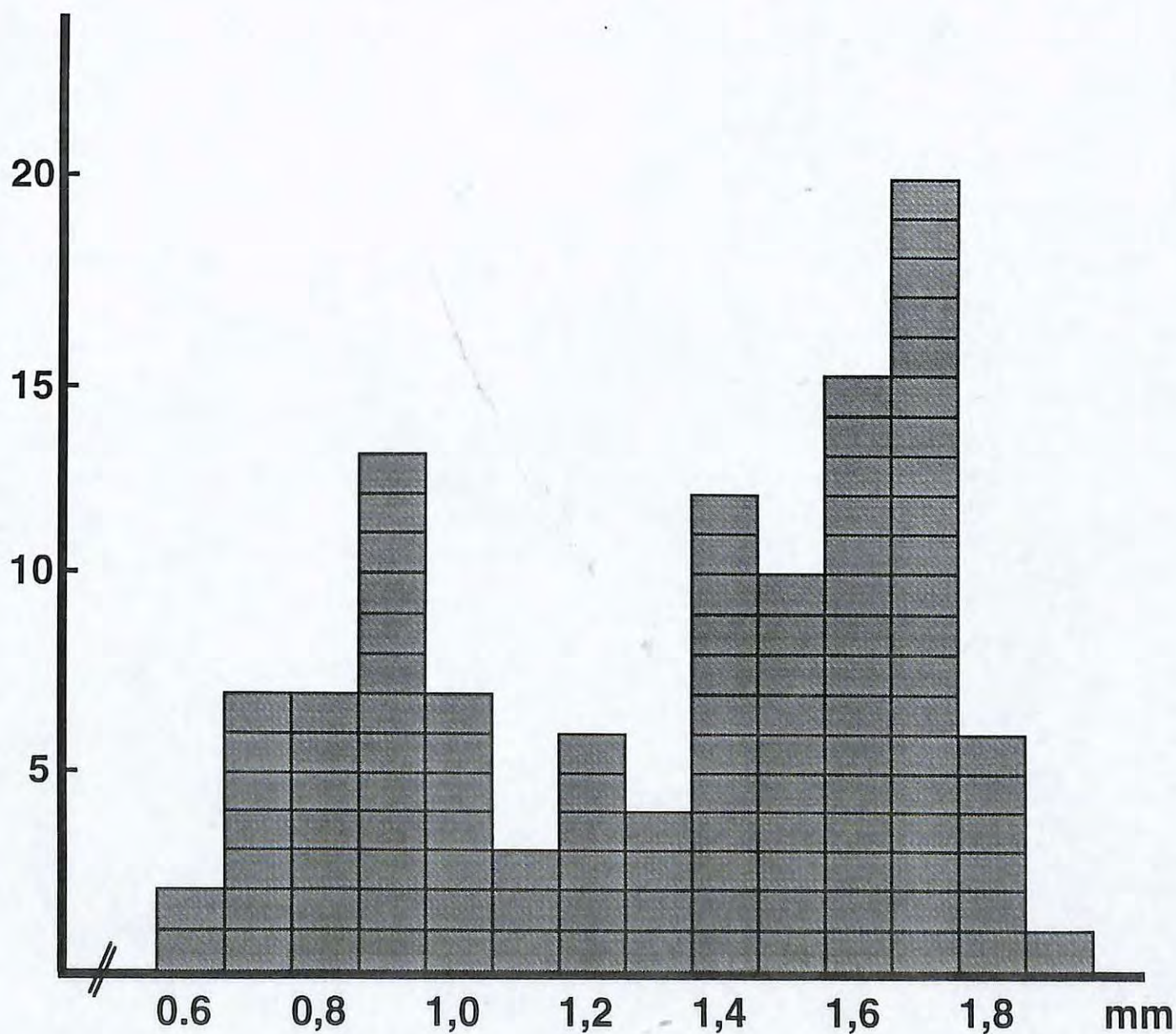
MESURE DE LA
VISCOELASTICITE
DU GLUTEN

RECOURVANCE ELASTIQUE

$$R.E = E_2 - E_1$$



Distribution de 113 variétés de blé dur en fonction de la recouvrance élastique du gluten



EVOLUTION PHYSICOCHIMIQUE PENDANT LA MISE EN FORME

- **Ultrastructure**

- Formation d'un réseau protéique entourant les grains d'amidon observé par microscopie optique, par M.E.B, par cryo-fracture + M.E.T.
- Le réseau est ordonné mais pas complètement développé.

- **Glucides**

- Augmentation du taux d'amidon endommagé et du taux de pentosanes solubles pendant l'extrusion.

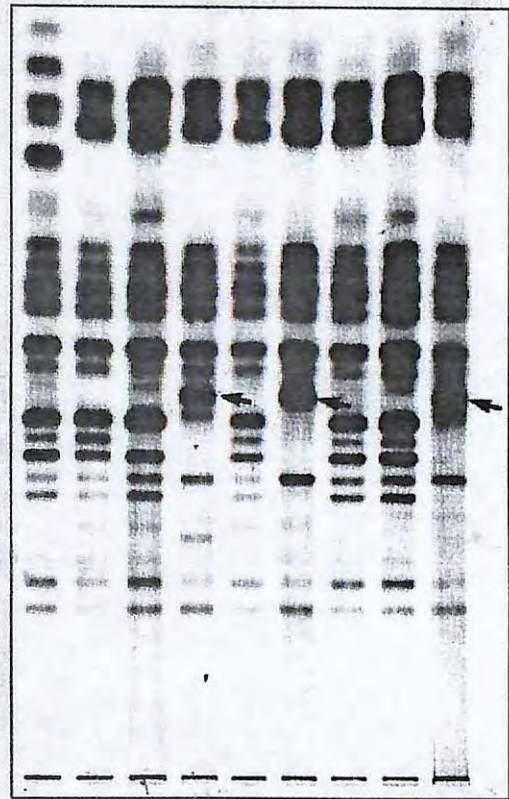
- **Lipides**

- Oxydation des pigments caroténoïdes par la lipoxygénase
- La teneur en lipides totaux reste constante mais la teneur en lipides extractibles par l'héxane diminue au cours de l'extrusion.

- **Protéines**

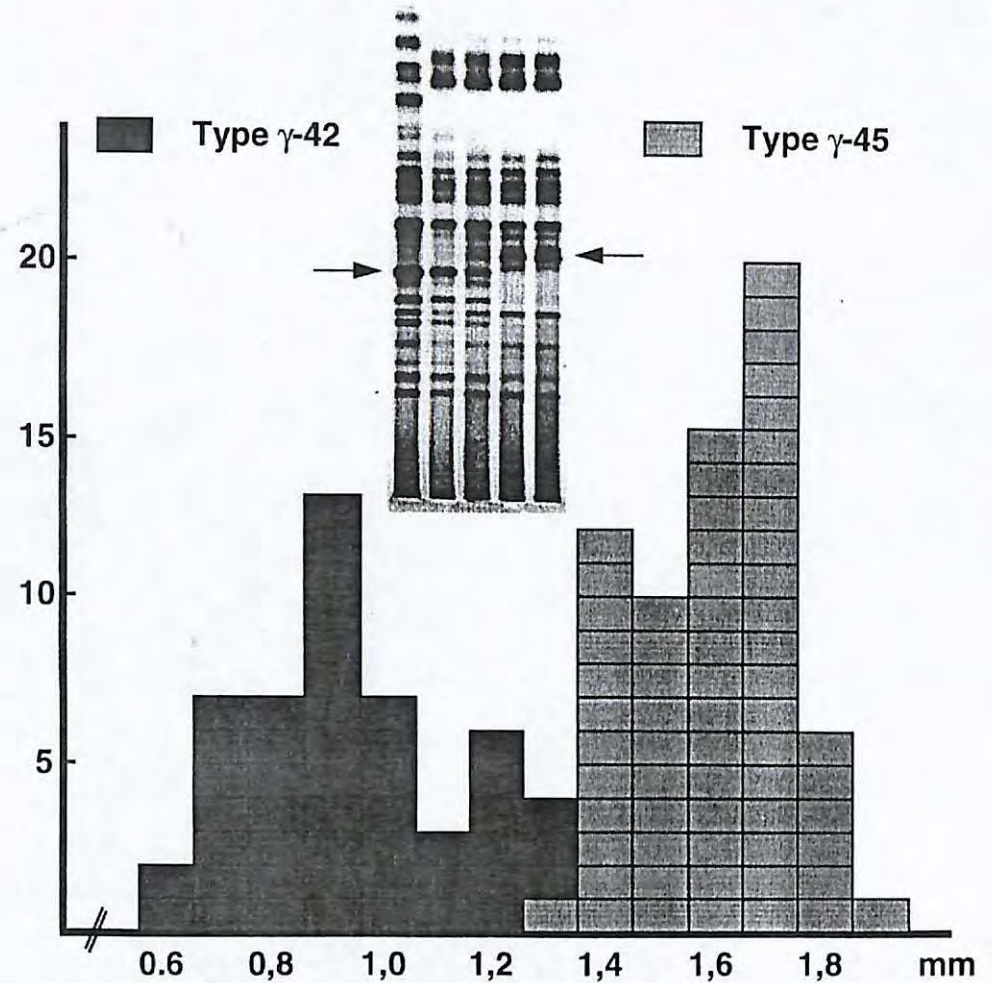
- Diminution de l'extractibilité du gluten.
- Diminution de la solubilité des protéines dans l'ac. acétique dilué, Insolubilisation des HMWG et des protéines salino-solubles.
- Diminution des SH avec ou non formation de liaisons S-S.

Electrophorégramme en gel de polyacrylamide (PAGE) des gliadines des variétés de blé dur

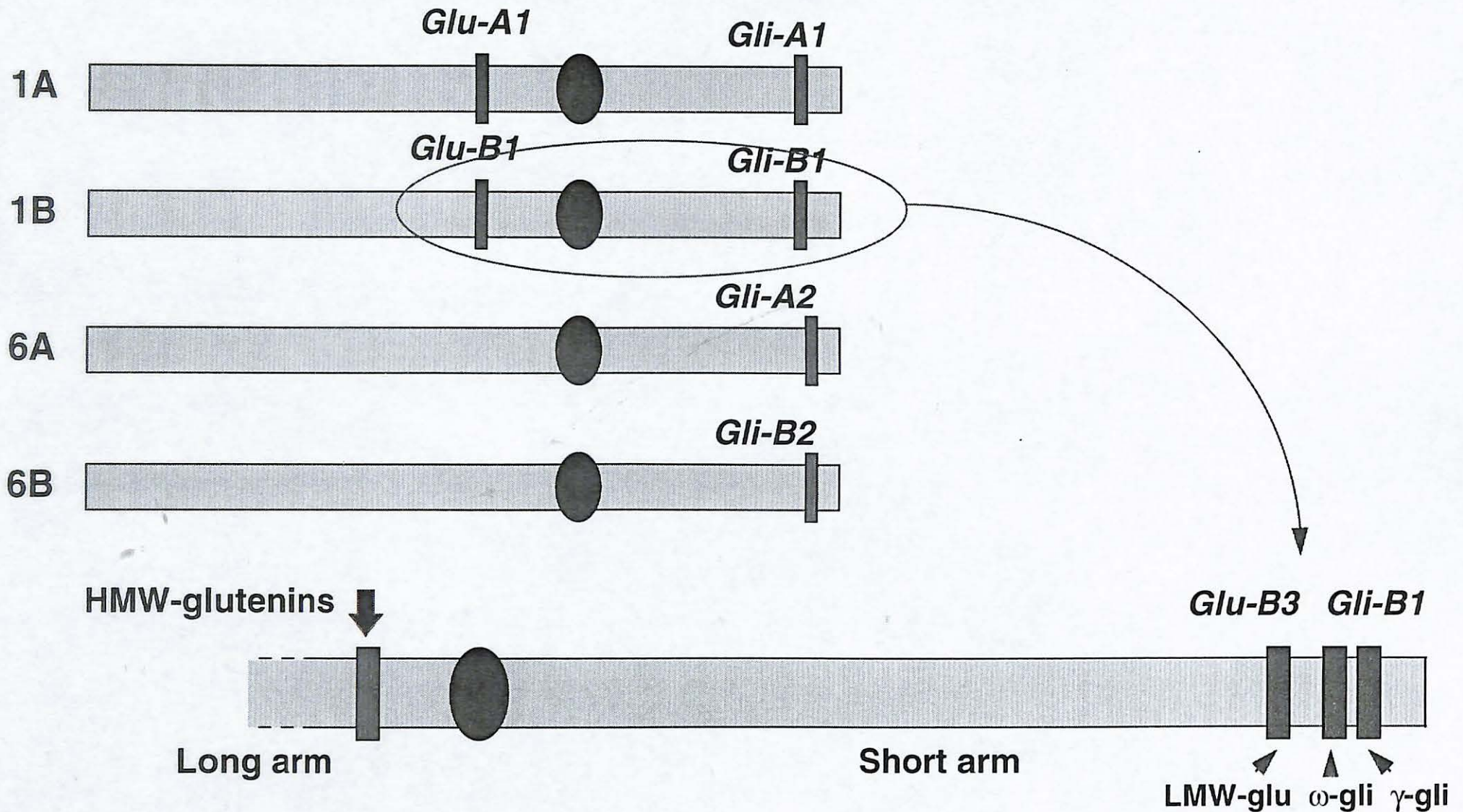


avec indication de la bande γ -45, marqueur d'une recouvrance élastique élevée du gluten

Distribution de 113 variétés de blé dur en fonction de la recouvrance élastique du gluten



Chromosomal location of genes encoding proteins that impart quality in durum wheat



Teneur en protéines du grain

	Lieu A	Lieu B	Lieu C	Lieu D	Moyenne Variété	F Var.
Ardente	17,8	14,3	13,4	13,8	15,5	5,6(*)
Néodur	15,4	13,1	13,8	14,4	14,9	
Ixos	16,3	13,1	12,8	12,8	14,6	
Acalou	16,0	13,4	13,2	13,6	14,6	
.....		
Moyenne Lieu (15 Variétés)	15,7	12,5	12,6	12,8		
F Lieu	60,8 (**)					

% de la variabilité attribuable :

- au génotype :	18 %
- au lieu de culture :	33 %
- résiduel	49 %

$$\sigma^2_G / \sigma^2_L \approx 0,5$$

Indice de jaune des blés durs

	Lieu A	Lieu B	Lieu C	Lieu D	Moyenne Variété	F Var.
Ardente	32,3	31,8	32,5	34,5	33,3	58,7(**)
Néodur	42,3	42,2	39,4	39,6	40,9	
Ixos	37,6	39,2	37,9	37,3	39,0	
Acalou	37,6	40,2	38,9	40,6	39,0	
.....		
Moyenne Lieu (15 Variétés)	39,5	38,9	37,5	37,0		
F Lieu	18,3 (**)					

% de la variabilité attribuable :

- au génotype :	87 %
- au lieu de culture :	8 %
- résiduel	5 %

$$\sigma^2_G / \sigma^2_L \approx 11$$

Amélioration de la qualité des variétés de blé dur inscrites au catalogue français *

Variété Année	Brun	Jaune	Protéines	État de surface	Visco- élasticité	Quintaux/ hectare **
Bidi 17 1953	4	4	8	6	7,5	23
Mondur 1977	7	8	6,5	7,5	8	30
Agrial 1988	7	8	6,5	7	7	40
Duriac 1991	6	8	5,5	7	7,5	49

* D'après Feillet, 1995

** Moyenne annuelle de la production de blé dur en France

Tableau 3 : Composition et valeur nutritionnelle des pâtes alimentaires

	Pâtes Alimentaires (100 g.)				Besoin Journalier		
	Qualité Supérieure		aux Oeufs*		Total (moyenne)	p. 100 apporté par 70 g. de Pâtes Alimentaires Crues**	
	Crues	Cuites	Crues	Cuites		Pâtes de Qualité Supérieure	Pâtes aux Oeufs
Eau (g)	12.5	69	12.5	69	—	—	—
Calories	360	125	370	130	3 000	8.4	8.6
Protides (g)	11.5	4	13	4.5	60	13	15
Glucides (g)	74	26	70	25	—	—	—
Lipides (g)	1.5	0.5	3.5	1.2	70	3	5
Calcium (mg)	20	7	25	9	800	1.7	2.2
Fer (mg)	1.5	0.5	1.8	0.6	1.5	6	6
Thiamine (mg)	0.15	0.05	0.16	0.06	1.5	6	6
Riboflavine (mg)	0.09	0.03	0.09	0.03	1.5	4	4
Acide nicotinique (mg)	1.5	0.05	1.5	0.05	1.5	6	6
Vitamine A (U.I.)	0	0	300	100	4 500	0	4.6
Vitamine B (U.I.)	0	0	10	3.5	300	0	2.5

* 140 g. d'œufs par kg semoule

** Ration habituelle pour 1 personne

Tableau 1 : Consommation de pâtes alimentaires par tête et par an (Kilogrammes)

Italie	25
Argentine, Tunisie, Libye, Venezuela, Espagne	12
Suisse, Chili	9 - 8
Grèce, Pérou, France, RFA, RDA, USA, Bolivie, Somalie	7 - 5
Yougoslavie, Turquie, Canada, Australie, Autriche, Pays Bas	4 - 3
Belgique, Egypte, Japon, Royaume Uni	2 - 1

Source : Macaroni Journal, Juillet 1982

Tableau 5 : Bases physicochimiques et méthodes d'appréciation de la qualité pastière des blés durs

Caractéristique Recherchée	Composants Concernés	Facteurs de Qualité	Tests Technologique
Aspect			
• Jaune	Pigment caroténoïde Activité lipoxygénasique	Teneur élevée Teneur faible	Spectrophotomètre de réflexion sur produits finis (disques de pâtes, spaghetti)
• Clair	Activité peroxydasique	Teneur faible	
• Absence de points noirs		Résistance à la moucheture	Observation visuelle des grains
Qualité culinaire			
• Fermeté, visco-élasticité	Protéines, Gluten	Teneur élevée Gliadine 45/42 γ Test sédimentation SDS	Cuisson de produits finis (disques de pâtes, spaghetti) Mixographe
• Etat de surface			Cuisson des produits finis

IX - LE MAIS: SEMOULERIE, AMIDONNERIE ET AUTRES TECHNOLOGIES

Mouture sèche: semoulerie

Mouture humide: amidonnerie

Produits sucrants

Huile

Autres technologies : cuisson-extrusion, produits divers,
masa

QUELQUES PRODUITS CONTENANT DU MAIS OU SES DERIVES

PRODUITS ALIMENTAIRES	PRODUITS NON ALIMENTAIRES	PRODUITS POUR ALIMENTATION ANIMALE
corn flakes polenta biscuits apéritif barres céréales petits pots bébé confiture crèmes glacées compote biscuits bière whisky (blended) gin coca-cola crème Elsa potage en sachets pop corn maïs doux maïs cornichon bonbons chewing-gum au xylitol huile margarine tortilla chips	papier carton ondulé solvant éthanol dentifrice shampooing déodorant eye-liner glucose plastique placoplâtre béton, tuiles Lambert gouache colle fibres textiles (apprets) acides organiques pâte à modeler aspirine UPSA sirop pectoral Vicks Rinurel sorbitol Delalande mousse à raser (Gillette en gel) crème lustrante Kiwi produits d'entretien (Maison Verte) détergents (Dash color, Ariel liquide...)	pets food acides aminés

L'amidonnerie de maïs

Le principe de l'amidonnerie de maïs consiste à séparer les différents constituants du grain : amidon, protéines (ou "gluten"), germes et enveloppes. L'industrie cherche notamment à obtenir un amidon d'une grande pureté, condition nécessaire pour ses transformations ultérieures.

Depuis quelques années, les amidonniers français utilisent indifféremment des maïs cornés-dentés ou dentés. Ils ont adapté leur savoir-faire aux grains cornés-dentés, ce qui est moins le cas pour leurs collègues du nord de l'Europe qui préfèrent encore utiliser des variétés dentées produites dans le sud.

Une homogénéité dans les approvisionnements est toujours recherchée. Mais, les critères de qualité suivants sont généralement avancés:

- une bonne maturité du grain qu'on ne sait traduire actuellement que par la teneur en eau au moment de la récolte. Plus l'humidité sera basse et plus on considérera que le remplissage (accumulation des constituants du grain en cours de végétation) sera complet. On sait par ailleurs que le séchage sera facilité;
- le taux de grains brisés qui doit être le plus bas possible pour limiter les pertes dans les eaux de trempage;
- un séchage des grains permettant d'obtenir une bonne séparation amidon/protéines. Des tests donnent à cet égard des appréciations intéressantes;
- un bon état sanitaire: absence de moisissures et de mycotoxines qui pourraient être nocives pour les consommateurs;

La semoulerie de maïs

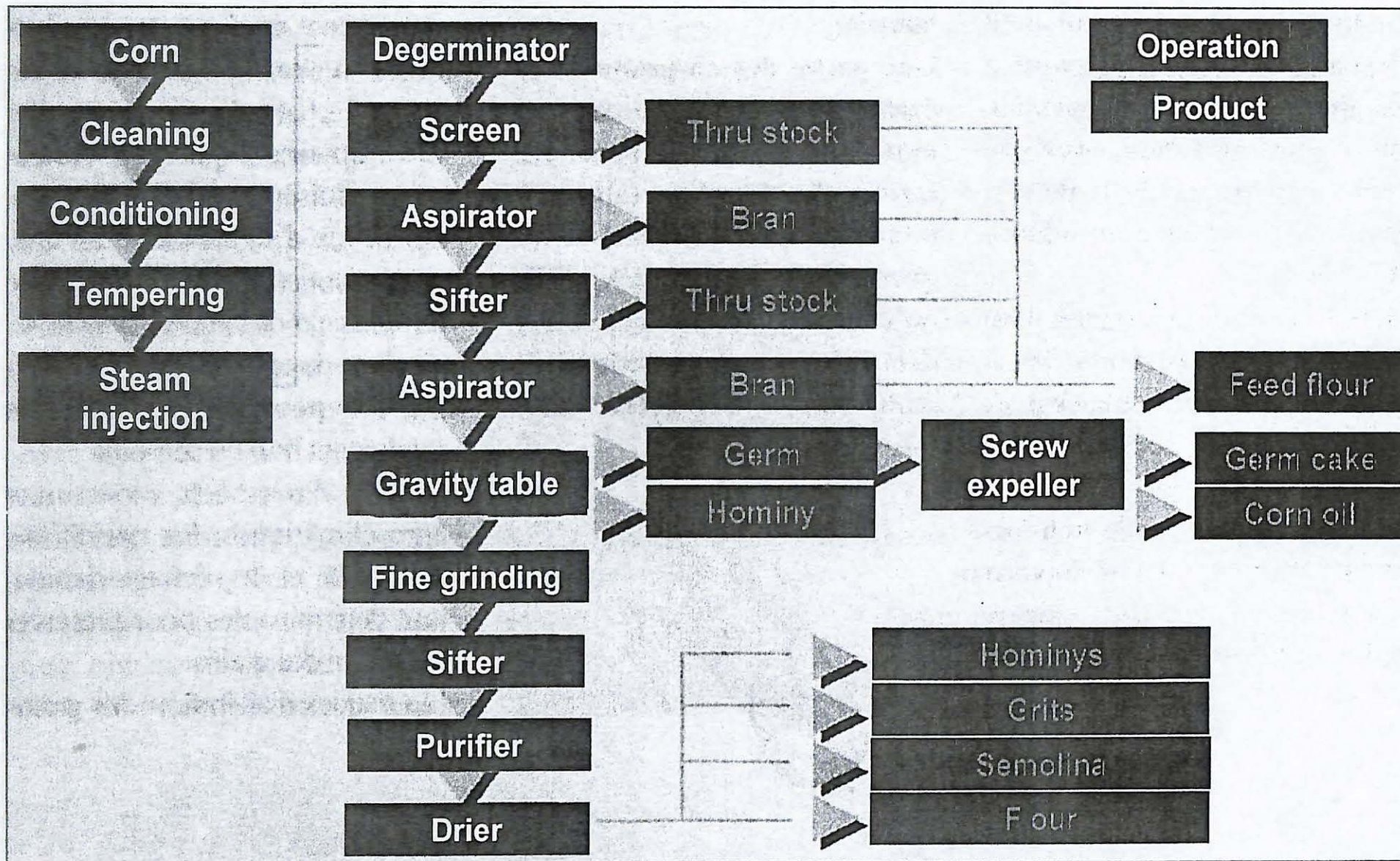
Egalement appelée maïserie, la semoulerie de maïs, transforme la partie vitreuse du grain de maïs en semoule.

Elle recherche des variétés de maïs corné-denté qui assurent de bons rendements en semoule. Pour certaines fabrications comme les hominys (grosses semoules), elle recherche des variétés cornées pures type plata. L'Union Européenne importe près 500 000 tonnes de maïs argentin dont plus de la moitié est du maïs plata. L'utilisation de variétés dentées reste possible avec une valeur semoulière plus faible.

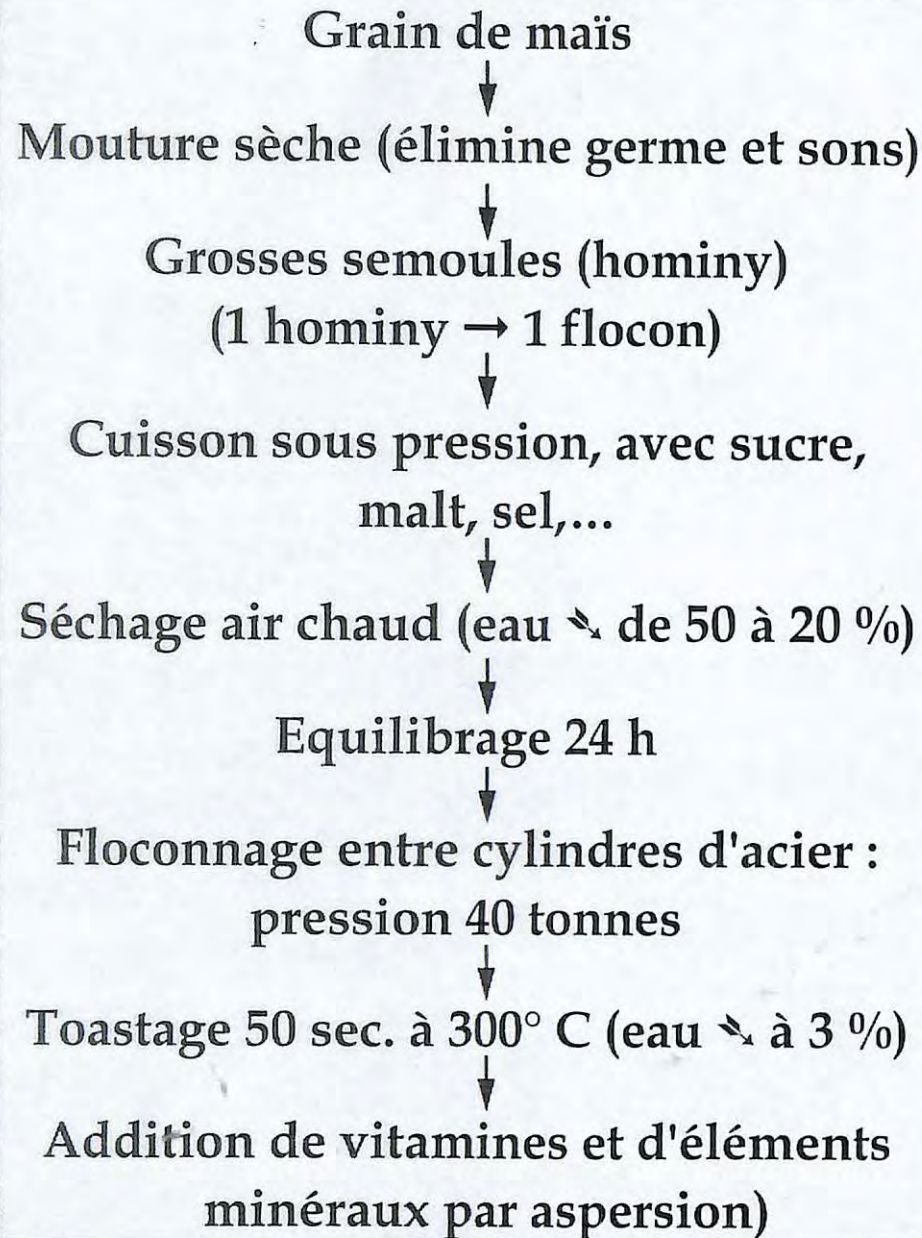
Les industriels recherchent les qualités suivantes:

- séchage: des températures excessives de séchage provoquent un début de migration des lipides du germe vers l'amande, ce qui est préjudiciable à la qualité ultérieure des semoules
- absence de grains anormalement colorés
- faible taux de brisures et de grains fissurés qui perturbent la mouture. Cela est particulièrement important pour obtenir des hominys destinées à la fabrication de corn-flakes.
- assurance d'un bon état sanitaire des grains (absence de parasites et de moisissures).
- bonne homogénéité des lots. C'est comme toujours un gage de bon rendement en usine. Certains industriels recommandent une liste de variétés pour atteindre cet objectif.

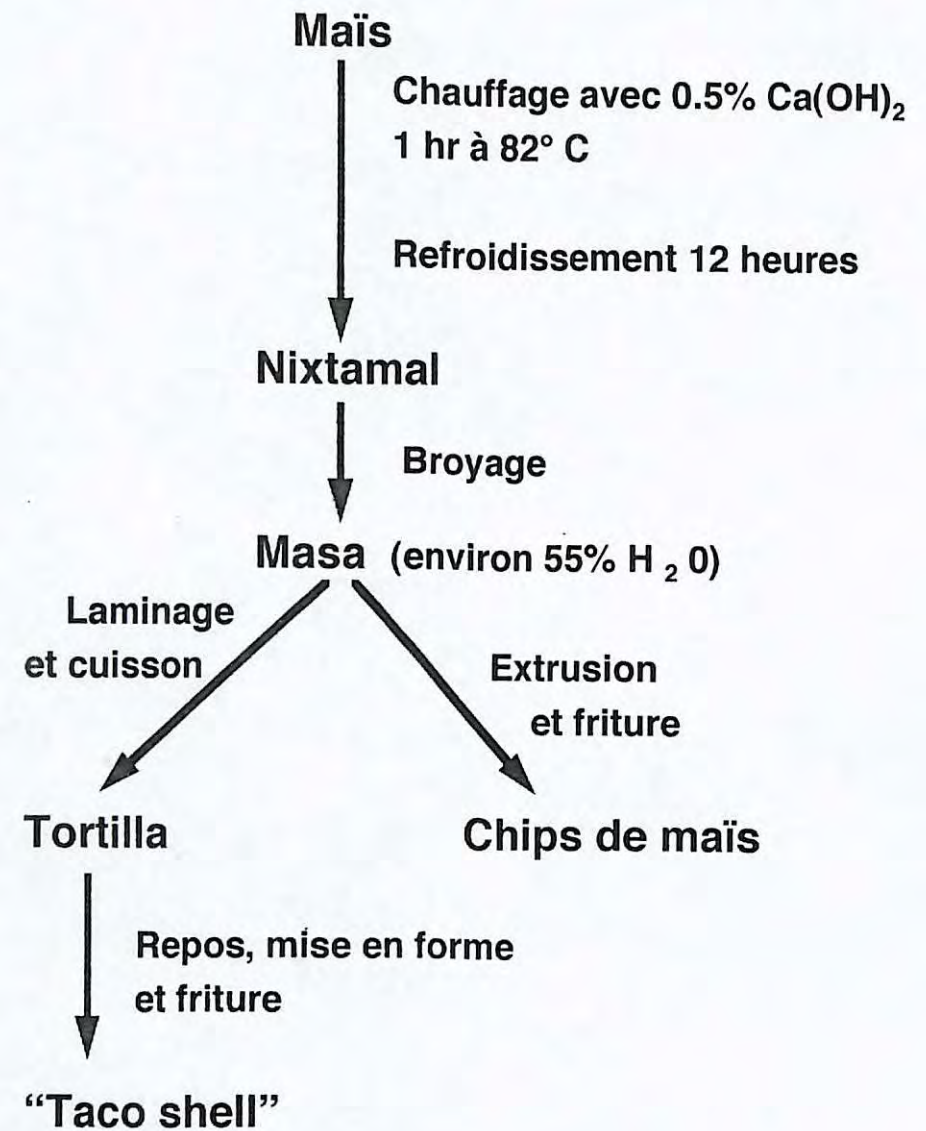
Flow Chart for a Typical Dry-Milling Corn System



Fabrication de corn flakes



Production de masa, tortilla, "taco-shells" et chips de maïs



X- LES AUTRES CÉRÉALES

Riz

Décorticage et usinage

Qualité culinaire du riz

Autres technologies : riz étuvés, riz précuits

Orge

Différentes utilisations de l'orge

Malterie-brasserie

Alimentation animale.

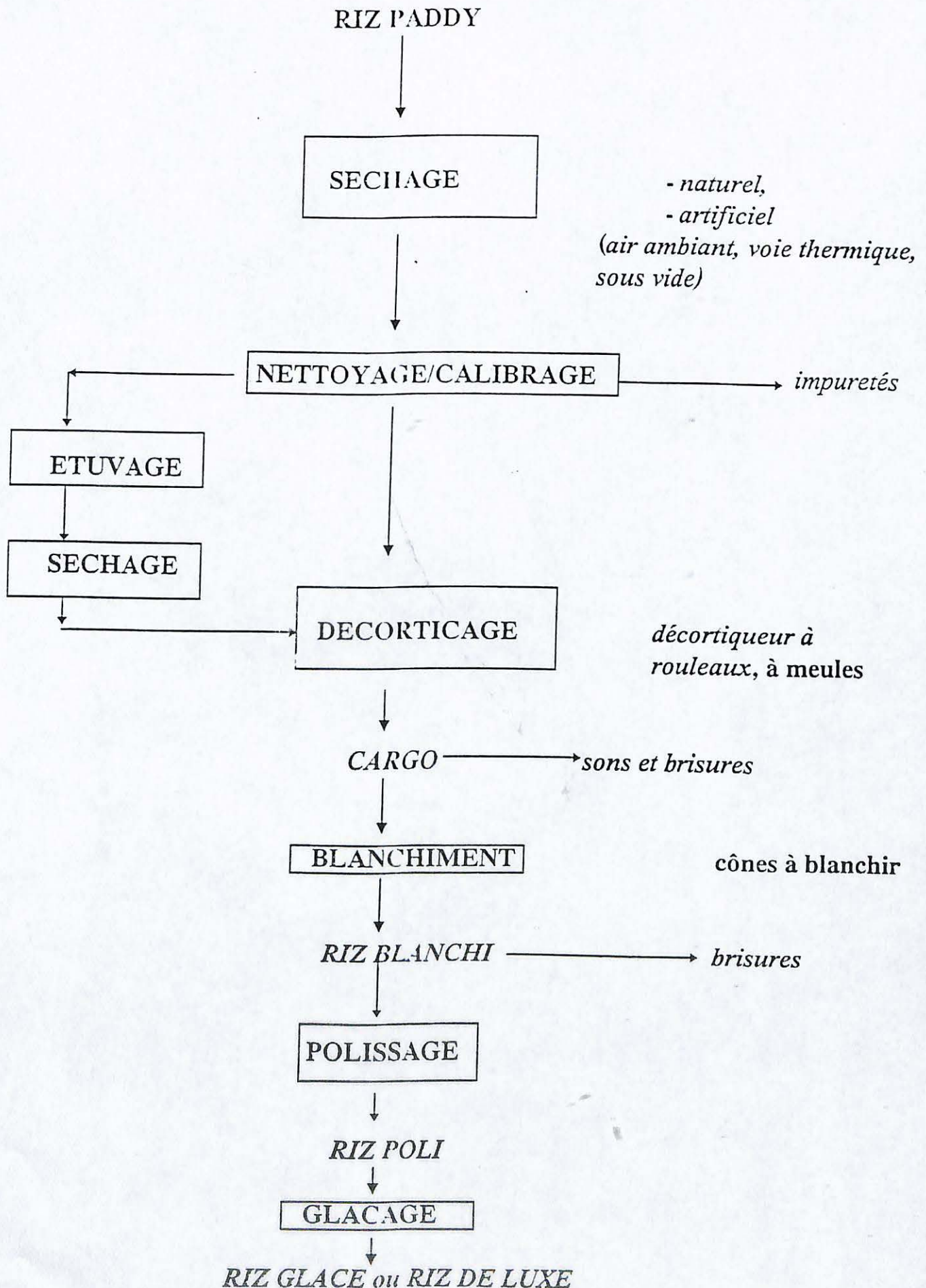
Seigle

Triticale

Avoine

Sorgho

TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES DU RIZ



DECORTICAGE DU RIZ

Du Paddy au Cargo

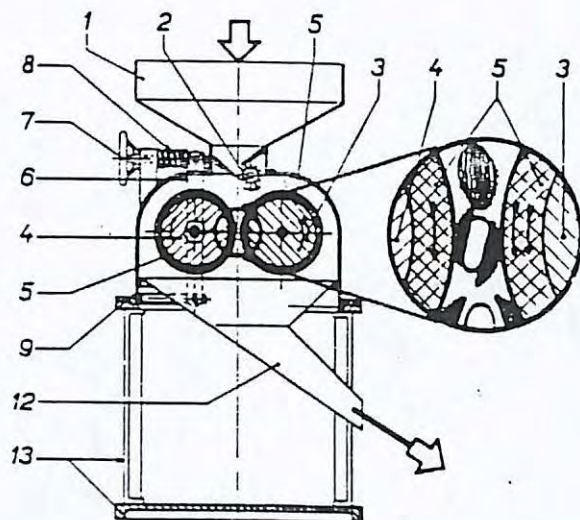
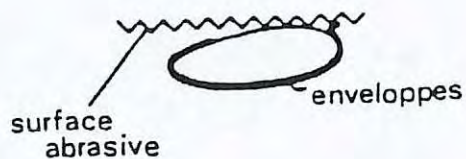


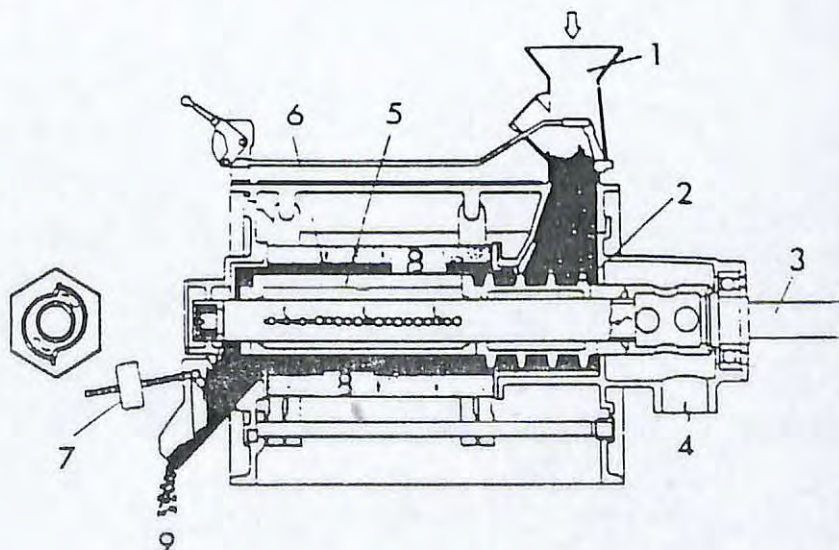
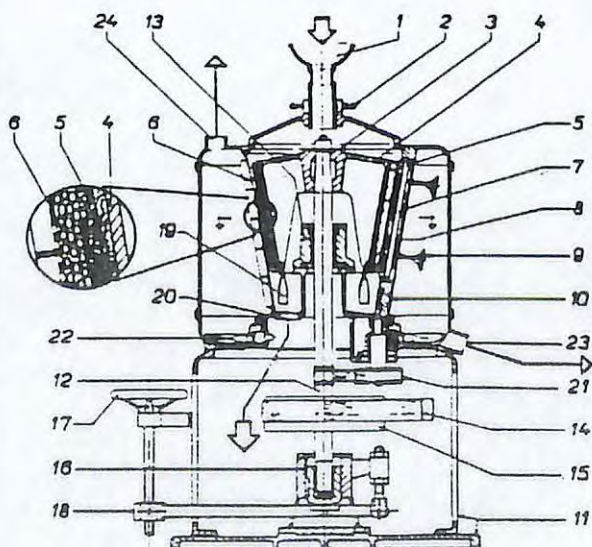
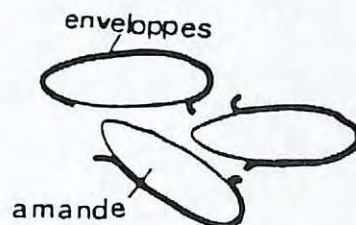
Figure 5. — Décortiqueur à rouleaux de caoutchouc.
 1 : trémie d'alimentation. 2 : cylindre distributeur. 3 : rouleau rapide. 4 : rouleau lent. 5 : garniture en caoutchouc des rouleaux. 6 : bras de réglage du rouleau. 7 : volant à main de réglage d'écartement des rouleaux. 8 : ressort de rappel du rouleau. 9 : carter du décortiqueur. 10 : poulie d'entraînement. 11 : boîte d'entraînement des rouleaux. 12 : sortie du riz décortiqué et des balles. 13 : bâti et socle de l'appareil.

BLANCHIMENT DU RIZ

ABRASION



FRICITION



DECORTICAGE DU RIZ

Du Paddy au Cargo

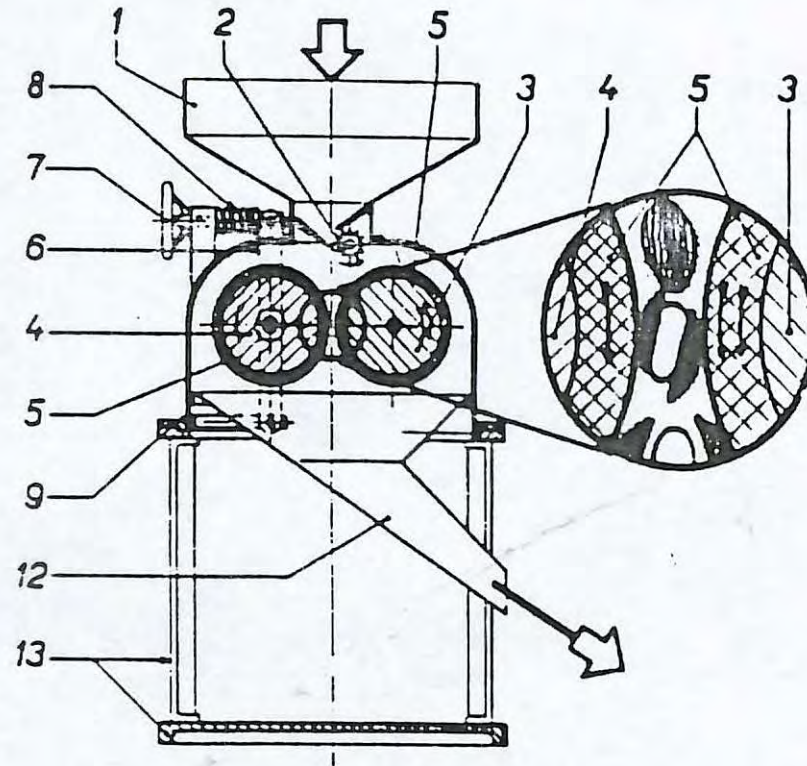
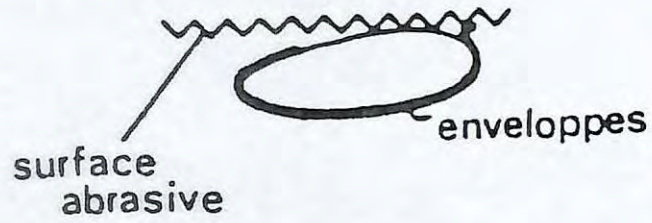


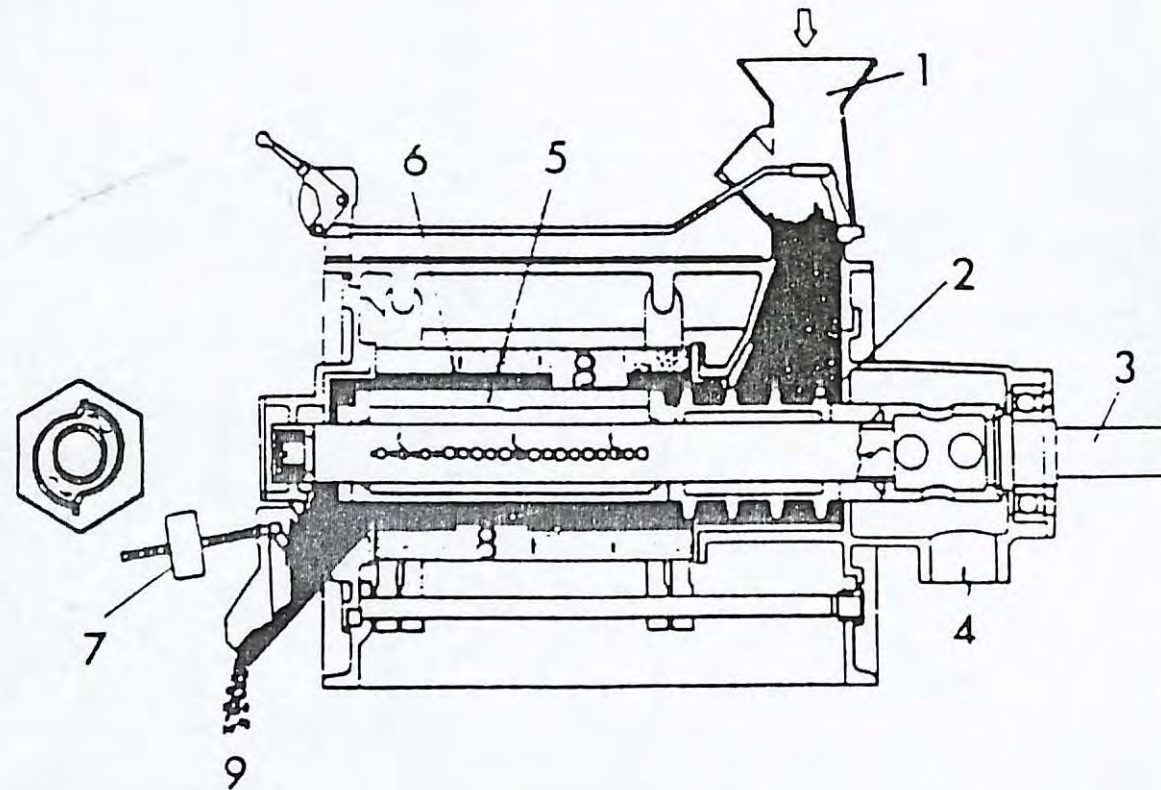
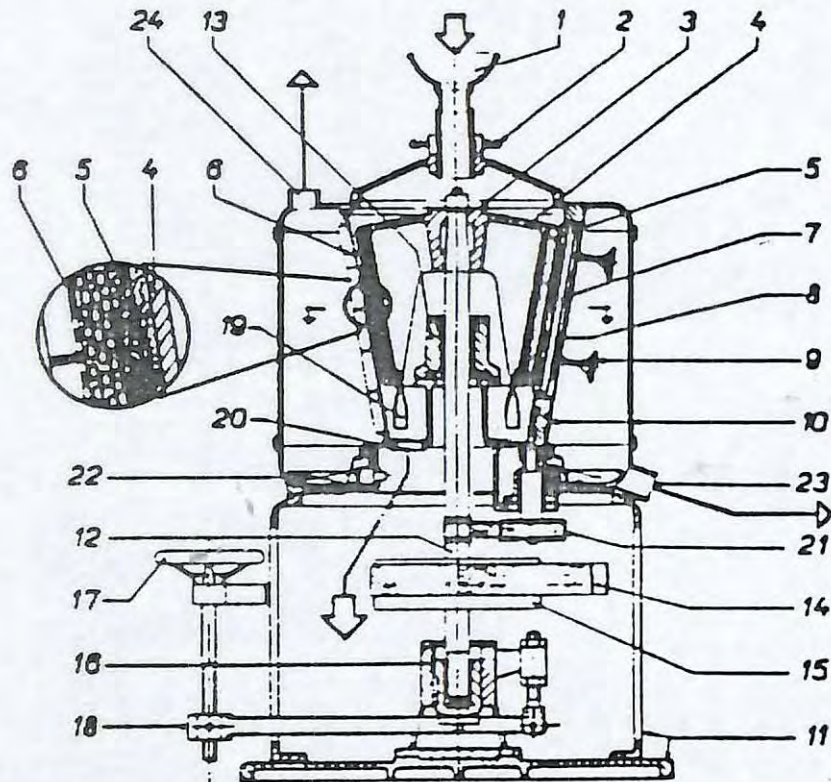
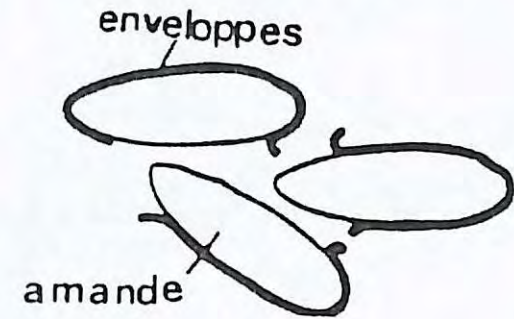
Figure 5. — Décortiqueur à rouleaux de caoutchouc.
1 : trémie d'alimentation. 2 : cylindre distributeur. 3 : rouleau rapide. 4 : rouleau lent. 5 : garniture en caoutchouc des rouleaux. 6 : bras de réglage du rouleau. 7 : volant à main de réglage d'écartement des rouleaux. 8 : ressort de rappel du rouleau. 9 : carter du décortiqueur. 10 : poulie d'entraînement. 11 : boîte d'entraînement des rouleaux. 12 : sortie du riz décortiqué et des balles. 13 : bâti et socle de l'appareil.

BLANCHIMENT DU RIZ

ABRASION



FRICTION



La malterie

- Le maltage a pour but :
 - de développer la biosynthèse des hydrolases du grain (endo- β -glucanases, β -amylases, peptidases),
 - de fragiliser les parois des cellules de l'albumen et de favoriser l'attaque des constituants de réserve, qui sont dégradés en constituants de faible poids moléculaire,
 - d'induire une dégradation des protéines en polypeptides et acides aminés
- Le maltage comporte 3 phases:
 - le trempage,
 - la germination,
 - le séchage

La brasserie

- Les différentes étapes du brassage sont les suivantes :
 - Mélange malt + eau \rightarrow pâte (ou *maïsche*). Addition de grains crus. Chauffage progressif (avec paliers à 50, 63 et 75° C \rightarrow *moût*)
 - Filtration : permet d'obtenir un moût clair et de séparer la drêche (\rightarrow alim. animale)
 - Houblonnage et cuisson (ébullition d'environ 2 heures)
 - Filtration : élimination du houblon et de la "cassure". Refroidissement. Oxygénation. Ensemencement avec une levure pure
 - Fermentation : 5 à 7 jours
 - Garde
 - Filtration
 - Pasteurisation
 - Soutirage et conditionnement

XI - UTILISATIONS NON TRADITIONNELLE DES CÉRÉALES - AGRO-INDUSTRIE

Utilisations industrielles de l'amidon et du gluten

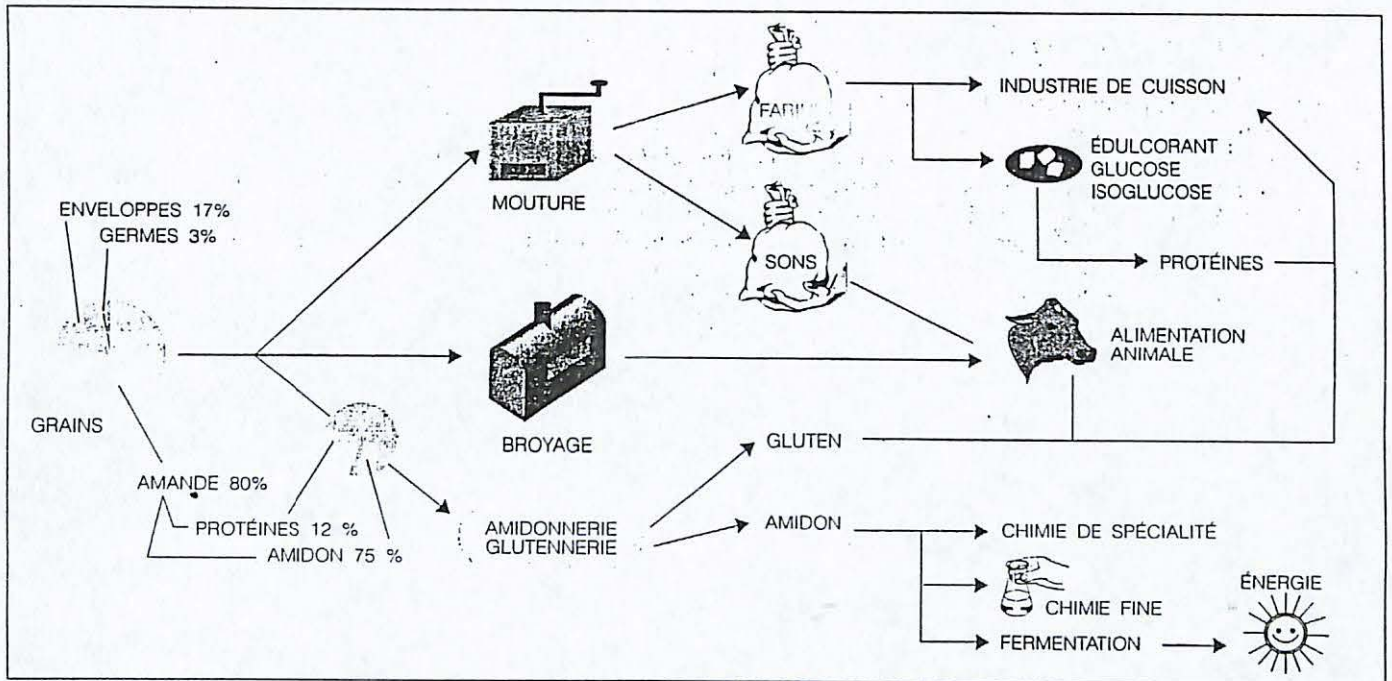
Papeterie, textiles

Chimie

Plastiques, biomatériaux

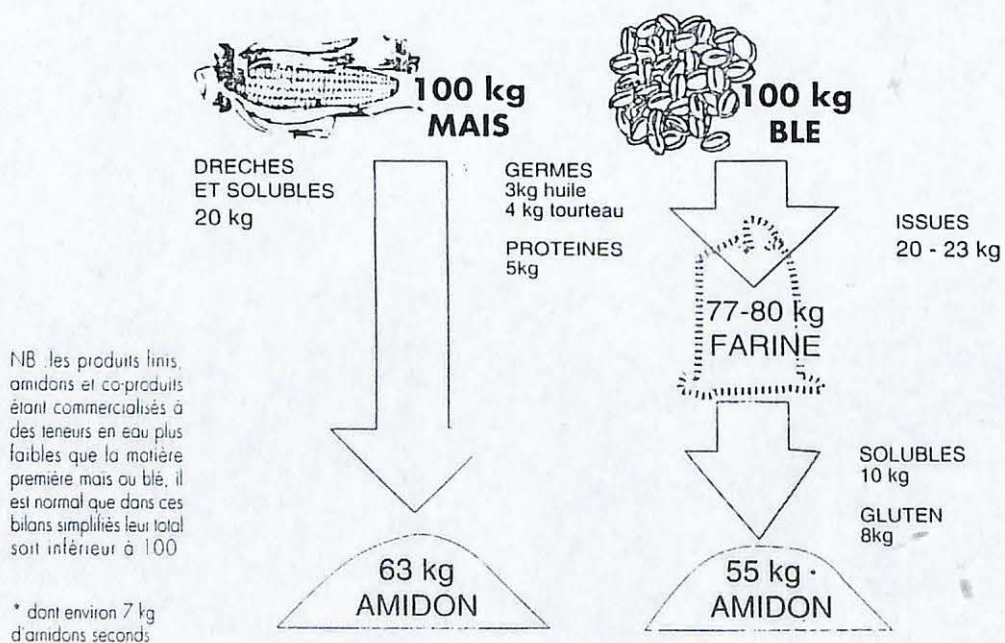
Fermentations, biocarburants

LES FILIERES CEREALES

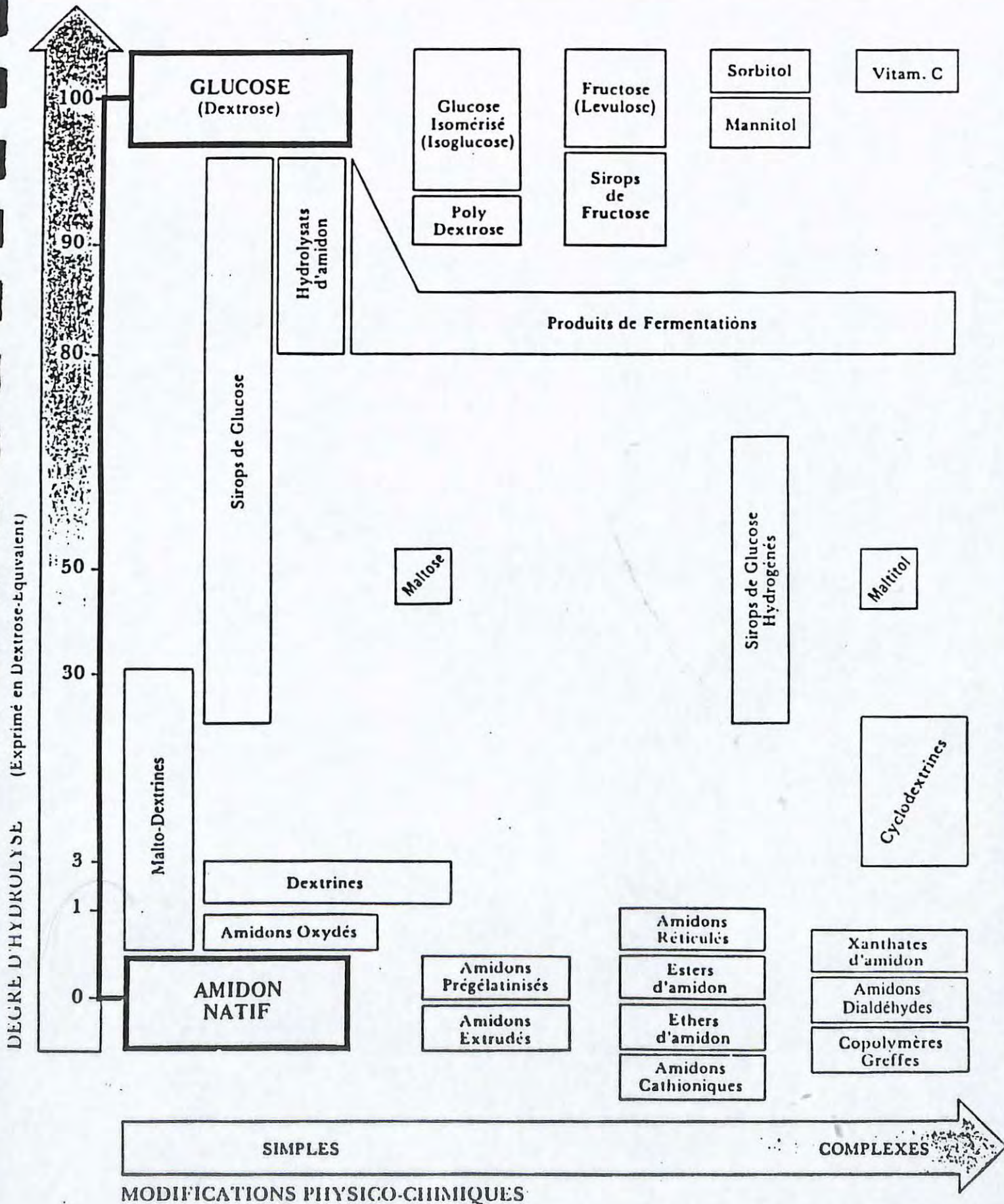


LE FRACTIONNEMENT HUMIDE

FIG 1 .LES BILANS DE L'AMIDONNERIE DE BLÉ ET DE MAIS



L'amidon dans tous ses états



Les grands secteurs d'utilisation de l'amidon (hors bio-carburants)

AGRO-ALIMENTAIRE

- épaississants, liants et texturants
- agents sucrants, sucres diététiques, acidifiants, agents de sapidité
- aliments pour animaux

INDUSTRIES PAPETIERES

- agents de cohésion des fibres de cellulose, surfaçage, couchage, colles et assemblages de cartons ondulés et emballages

INDUSTRIES CHIMIQUES

- excipients et liants, principes actifs pharmaceutiques, plastiques, absorbants, pesticides, détergents biodégradables, gélifiants et stabilisateurs d'émulsions

DIVERS

- bâtiment : antigel, régulateur de prise ou de séchage, isolation
- textile : apprêt de tissage, découpage et montage
- exploitation minière : agglomérat
- métallurgie : agent de démoulage

LES GRANDS SECTEURS D'UTILISATION DE L'AMIDON

ACIDES AMINES BRETZELS COUCHES-CULOTTES DRAGEES
EXPLOSIFS FICELLE GLACAGE HERBICIDES
ISOGLUCOSE JUTE KETCHUPS LAINE
MAYONNAISE NOUGATS ORANGEADE PILES ELECTRIQUES
QUENELLES REGLISSE SHAMPOOINGS TABAC
URETHANNES (POLY) VITAMINE C WHISKY XEROCOPIES
YAOURTS ZEINE

Fabrication de l'isoglucose

Amidon de maïs (de blé, de manioc)

↓
Liquéfaction

Chauffage

↓
Saccharification

α-amylase

(90-96 % de glucose) gluco-amylase

↓
Filtration, purification

↓
Isomérisation

glucose-isomérase

Glucose <---> Fructose

(58 %)

(42 %)

↓
Purification, concentration

↓
HFCS

55 % / 92 %

"High Fructose Corn Syrup"

Coût de l'éthanol-blé

1 tonne blé ---> 357 litres éthanol
---> 370 kg drèches

Valorisation des drèches : 1 500 F/tonne
(27 % protéines)

Coût de fabrication : 130 F/hl
(amortissement ?)

Blé rendu usine : 1 230 F/tonne

Prix du blé : 1 230 F x 1 = 1 230 F

Coût fabrication : 1.30 x 357 = 464 F

Drèches : 1 500 F x 0.37 = - 555 F

Total = 1 140 F

(pour 357 litres)

Soit 3.20 F le litre d'éthanol

Combien 1 ha de terre peut-il fournir d'éthanol ?

Matière première	Quantité de matière première pour produire 1 hl d'éthanol	Rendement matière première par ha	Rendement éthanol par ha
Blé	285 kg	75 quintaux	26 hl
Betterave	1 tonne	50 tonnes	50 hl
Pomme de terre	800 kg	40 tonnes	50 hl
Maïs	270 kg	85 quintaux	31 hl

Marchés ouverts par les biotechnologies aux produits de l'agriculture

Marché	Exemples de produits	Prix (FF/kg)	Impact sur la production agricole	Facteurs de développement
Chimie de spécialité	Antibiotiques, vitamines Aspartame, enzymes	> 100	Nul	Le marché
Chimie fine	Acides aminés, isolats protéiques	10-100	Faible sauf pour le fructose (maïs, éventuellement blé)	Le marché, la compétition intra agricole avec la chimie (méthionine, acides aminés,...)
Chimie lourde	Sucres, alcools acides, solvants	2-10	Moyen	Le prix des matières premières
Energie	Ethanol, méthane	< 2	Fort (éthanol) à nul (méthane)	Le prix des matières premières et du pétrole L'environnement politique

XII - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Évolution des utilisations alimentaires / non alimentaires des céréales

Comment améliorer la qualité (nutritionnelle, technologique) des céréales ?

Amélioration des processus technologiques ou création de nouvelles variétés ?

Développement de céréales génétiquement modifiées ??

