

# le grain de blé

composition et utilisation

Pierre FEILLET

MIEUX COMPRENDRE

 **INRA**  
EDITIONS



# le grain de blé



# le grain de blé

## composition et utilisation

Pierre FEILLET

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE  
147, rue de l'Université - 75338 Paris Cedex 07

## MIEUX COMPRENDRE

*Ouvrages parus dans la même collection :*

### **Biology of lactation**

J. MARTINET, L.-M. HOUEBINE, H.H. HEAD  
1999, 686 p.

### **Principes des techniques de biologie moléculaire**

Denis TAGU  
1999, 136 p.

### **Sol : interface fragile**

Pierre STENGEL et Sandrine GELIN  
1998, 222 p.

### **Les marqueurs moléculaires en génétique et biotechnologies végétales**

Dominique DE VIENNE  
Coédition INRA-CNED  
1998, 200 p.

### **Assimilation de l'azote chez les plantes**

Aspects physiologique, biochimique  
et moléculaire  
Jean-François MOROT-GAUDRY (éd.)  
1997, 422 p.

### **L'eau dans l'espace rural**

Production végétale et qualité de l'eau  
C. RIOU, R. BONHOMME, P. CHASSIN,  
A. NEVEU, F. PAPY (éd.)  
1997, 414 p.

### **La pomme de terre**

P. ROUSSELLE, Y. ROBERT et J.-C. CROSNIER  
(éd.)  
1996, 640 p.

### **Vie microbienne du sol et production végétale**

Pierre DAVET  
1996, 380 p.

### **Nutrition des ruminants domestiques**

R. JARRIGE, Y. RUCKEBUSH,  
C. DEMARQUILLY, M.-H. FARCE,  
et M. JOURNET (éd.)  
1995, 921 p.

### **Sols caillouteux et production végétale**

Raymond GRAS  
1994, 178 p.

### **Biologie de la lactation**

Jack MARTINET,  
et Louis-Marie HOUEBINE  
1993, 587 p.

### **Amélioration des espèces végétales cultivées**

Objectifs et critères de sélection  
André GALLAIS et Hubert BANNEROT  
1992, 768 p.

### **La régression non linéaire : méthodes et applications en biologie**

Sylvie HUET, Emmanuel JOLIVET,  
et Antoine MESSÉAN  
1992, 250 p.

### **L'épidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes**

Frantz RAPILLY  
1991, 318 p.

### **Cytogénétique des mammifères d'élevage**

Paul C. POPESCU  
1989, 114 p.

### **Les oligo-éléments en agriculture et en élevage**

Yves COÏC et Marcel COPPENET  
1989, 114 p.

© INRA, Paris 2000

ISBN : 2-7380-0896-8

ISSN : 1144-7605

Le code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

# Introduction

Le blé est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. Sa production annuelle devait atteindre 600 millions de tonnes en 1997, soit près de 30 % de la production totale de céréales, devant le maïs et le riz. On estime que la demande s'élèvera à 1 milliard de tonnes en 2020. La Chine est devenue le premier producteur mondial, devant l'Union européenne, les pays de l'ex-URSS, les États-Unis et l'Inde. Principalement destiné à l'alimentation des hommes (à hauteur de 75 % de la production), dont il assure 15 % des besoins énergétiques, le blé sert également à l'alimentation des animaux (15 % de la production) et à des usages non alimentaires. Le rendement annuel moyen des 270 millions d'hectares cultivés atteint les 22 quintaux, chiffres qui témoignent des progrès remarquables enregistrés dans le monde au cours des trois dernières décennies. On comprend les enjeux politiques et économiques qui sous-tendent la production et la commercialisation de cette céréale, quand on sait qu'elle représente à elle seule 17 % des échanges internationaux de produits agricoles.

La saga du blé accompagne celle de l'homme et de l'agriculture ; sa culture précède l'Histoire et caractérise l'agriculture néolithique, née en Europe il y a 8 000 ans. Le passage d'une civilisation de nomades (chasseurs, cueilleurs et éleveurs) à celles d'agriculteurs sédentarisés est le résultat de la domestication progressive de graminées cultivées, dont la plus ancienne semble être le blé dur dans le croissant fertile de la Mésopotamie. Le blé est indissociable de la culture européenne, comme le maïs, le riz, le mil et le sorgho le sont des cultures de l'Amérique latine, de l'Asie et de l'Afrique. La grande révolution aura été l'apparition de plantes auxquelles les épis et les grains restaient attachés, ce qui devait permettre de les récolter et de les cultiver ; la chance de l'humanité sera que ces grains sont comestibles, riches en énergie, faciles à conserver et à transporter.

De grands agronomes, le russe Vavilof notamment, ont déterminé les foyers anciens de l'agriculture. En Europe, le plus important est celui du Moyen-Orient entre le Tigre et l'Euphrate. L'examen des sites archéologiques permet d'y affirmer la domination de six espèces végétales, le blé et l'orge en particulier, et de cinq espèces animales. Les céréales y étaient la base de l'alimentation, complétée par les produits laitiers et quelques produits carnés.

Le blé est ainsi devenu le symbole de la terre nourricière. Si l'on en croit la légende d'un hymne homérique, la déesse Déméter, mère des céréales et donc de l'agriculture, accorda à l'Attique la connaissance des bienfaits mystères d'Eleusis qui offraient les charmes de la fertilité. La symbolique des grains et des graines se répète dans toutes les civilisations. La graine est un embryon en devenir, issue d'une plante qui attend la mort dès qu'elle a enfanté ; elle procède de la vie et de la mort, de l'air que l'on respire et de la terre qui ensevelit, de la lumière et des ténèbres. Nourrissant le germe fécondé dans l'obscurité de sa matrice, la terre donne naissance à un épi d'or sorti de la glèbe noire.

Principe de vie, le blé symbolise le passage de l'ignorance à la révélation. L'épi de blé est l'un des emblèmes du dieu des Égyptiens Osiris. Comme Osiris ressuscité après avoir été tué et jeté dans le Nil, le blé est enfoui dans la terre avant de revivre dans les terres libérées par la décrue du fleuve.

Pour cultiver le blé, don de Dieu, les hommes prient leurs dieux. Cères la latine est fêtée à chaque étape de la végétation du blé : la fête des semailles, les *sementinae* fin janvier pour protéger les grains déjà germés contre le gel, les rites de la fécondité (*cerialae*), les fêtes de la maturation et la fête des récoltes qui comporte le sacrifice d'une truie. L'Occident chrétien reprendra nombre de ces fêtes.

En Occident, le pain symbolise l'aliment et le droit de tous les peuples à se nourrir. Dispensé par la grâce de Dieu, il est sacré. Avant de l'entamer, on le bénit ; le poser à l'envers porte malheur. Son partage est signe de bienvenue, d'amitié et de reconnaissance des autres. À partir du blé, seule céréale panifiable, se fabrique le pain, fruit d'une seconde naissance résultant de la fécondation de l'eau et de la farine par le levain. À l'inverse, l'hostie eucharistique faite de pain azyme, non fécondé et non levé, est symbole de pureté et de vie spirituelle.

Aux temps les plus anciens, le blé était consommé à l'état de galettes et de bouillies avant que la fermentation spontanée et la cuisson d'une pâte n'aient permis à l'homme de découvrir un produit possédant textures, saveurs et arômes nouveaux, le pain. Des peintures murales témoignent de son existence chez les Égyptiens 1 300 ans avant notre ère.

Le blé, et la farine ou les semoules qui en sont extraites, se prêtent aujourd'hui à la fabrication – souvent industrielle – d'un nombre extraordinairement diversifié d'aliments : pains, galettes, couscous, pâtes alimentaires, biscuits, pour ne citer que les plus connus. Cette diversité d'usage, le blé la doit à la capacité des protéines qu'il contient à former en présence d'eau un réseau viscoélastique, le gluten. Selon les propriétés de ce réseau, et donc des caractéristiques physico-chimiques des protéines qui le forment, certains blés seront particulièrement aptes à la fabrication du pain ; d'autres conviendront mieux à la fabrication de biscuits ou de pâtes alimentaires. Mais les protéines ne sont pas les seuls constituants dont la présence est nécessaire à l'obtention d'aliments savoureux et nutritifs : l'amidon, qui constitue la plus grande partie du grain, les lipides, les pentosanes et les enzymes sont autant de molécules qui contribuent à la texture et, pour certains d'entre eux, à la saveur des produits finis.

Pétrir une pâte, cuire un pain, fabriquer un biscuit ou des spaghetti consistent à déclencher une succession d'événements physiques, chimiques et parfois biologiques que les spécialistes sont encore bien loin d'avoir élucidés. Ce qui n'empêche pas cuisiniers, artisans et industriels de fabriquer d'excellents produits ; bien que, dans certains cas, l'évolution des modes de vie et des techniques mises en œuvre n'aient pas toujours été favorables à l'expression d'une qualité optimale.

On trouvera dans cet ouvrage l'état actuel des connaissances sur la science et la technologie du blé rassemblées depuis l'époque où l'Italien Beccari, en 1745, isolait le gluten de la farine. Les premiers chapitres sont consacrés à l'étude détaillée de la composition du grain de blé et de ses principaux constituants : protéines (protéines solubles, gliadines, gluténines), glucides (amidon, pentosanes), lipides, vitamines et minéraux. Les mécanismes de transformation des farines et des semoules en aliments sont abordés

dans les chapitres suivants (pâtes et pains, biscuits, pâtes alimentaires, couscous, nouilles chinoises) ; le mode d'action des additifs, agents technologiques et agents de levée des pâtes est l'objet d'un chapitre particulier. Deux autres chapitres portent sur les méthodes d'analyse des blés et des farines et sur la valeur nutritionnelle des produits. De nombreuses données à caractère économique sont rassemblées dans le dernier chapitre. Le lecteur sera sans doute frappé par l'accumulation considérable de connaissances que les chercheurs ont pu rassembler au cours du siècle sur la composition du grain de blé et de ses dérivés, et par la difficulté très souvent rencontrée à rapprocher celles-ci de manière à présenter des vues synthétiques et explicatives de phénomènes apparemment aussi simples que la formation d'une pâte par mélange d'eau et de farine, pour ne citer qu'un exemple. L'une des ambitions de cet ouvrage est bien de rassembler le corpus de connaissances nécessaires à l'élaboration de ces synthèses. On aura, çà et là, tenté l'ébauche de certaines d'entre elles.

Deux choix rédactionnels ont été faits : privilégier les références à des ouvrages et à des articles de synthèse aux dépens des articles originaux (dont les quelques références sont données en note de bas de page), proposer de nombreux renvois entre les différents chapitres.

Jean-Claude Autran (INRA, Montpellier), Paul Colonna (INRA, Nantes) et Bernard Launay (ENSIAA, Massy) ont bien voulu relire le manuscrit de cet ouvrage et faire part à l'auteur de leurs remarques. Qu'ils en soient chaleureusement remerciés. Ils ne peuvent, bien sûr, être tenus pour responsables des erreurs qui pourraient subsister.

### Pour en savoir plus

#### Ouvrages généraux

FARIDI H. et FAUBION J. N. ed., *Dough Rheology and Baked Product Texture*, 1989 - Van Nostrand Reinhold, New York.

HAMER R. J. et HOSENEY R. C. ed., *Interactions : the Keys to Cereal Quality*, 1998 - American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Mn, USA.

HOSENEY R. C. ed., *Principle of Cereal Science and Technology*, 1994 - American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Mn, USA.

POMERANZ Y. ed., 10 volumes de 1978 à 1990 - *Advances in Cereal Science and Technology*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul.

POMERANZ Y. ed., *Wheat Chemistry and Technology*, 1988 - American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Mn, USA.

STEELE J. L. et CHUNG O. K. ed., *International Wheat Quality Conference Proceedings*, 1998 - American Association of Cereal Chemists, St. Paul.

#### Revue scientifique spécialisées

*Cereal Chemistry*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Mn, USA.

*Cereal Foods World*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Mn, USA.

*Journal of Cereal Science*, Academic Press Ltd., London, UK.

*Getreide Mehl und Brot*, Deutscher Bäcker-Verlag GmbH, Bochum, Allemagne.

*Industrie des Céréales*, APIC, Paris, France.



# Table des matières

## 1. Des blés aux farines

Classification botanique, origine et caractéristiques des blés cultivés. . . . .	17
Composition histologique et chimique du grain . . . . .	23
Transformation des blés en farines et en semoules . . . . .	25
Nettoyage des blés . . . . .	27
Conditionnement des blés . . . . .	30
Mouture . . . . .	30
Propriétés des farines . . . . .	37
Sous-produits de la mouture . . . . .	42
Turbo-séparation . . . . .	43
Valeur meunière et semoulière . . . . .	44
Taille et forme des grains . . . . .	45
Friabilité des blés . . . . .	46
Stockage des blés et des farines . . . . .	48
Activité de l'eau et isotherme de sorption . . . . .	50
Altérations au cours du stockage . . . . .	52
Conditions de stockage . . . . .	54
Pour en savoir plus . . . . .	55

## 2. Protéines

Classification et propriétés . . . . .	57
Solubilité et classification . . . . .	57
Composition en acides aminés . . . . .	60
Albumines, globulines et petites protéines riches en cystéine . . . . .	60
Gliadines . . . . .	64
Gluténines . . . . .	66
<i>Sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM)</i> . . . . .	66
<i>Sous-unités gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM)</i> . . . . .	67
<i>Agrégats gluténines</i> . . . . .	68
Gluten . . . . .	72
Capacité d'interactions des protéines . . . . .	75
Synthèse des protéines et germination . . . . .	80

Contrôle génétique de la composition en protéines du blé . . . . . 81  
 Génome du blé et composition protéique . . . . . 81  
 Transgénèse et transformation génétique . . . . . 83  
 Relation avec la qualité d'utilisation des farines . . . . . 84  
 Teneur en protéines. . . . . 84  
     *Teneur en protéines totales* . . . . . 85  
     *Teneur en certaines familles de protéines* . . . . . 85  
 Propriétés spécifiques des protéines . . . . . 88  
     *Gliadines et gluténines* . . . . . 88  
     *Sous-unités gluténines de haut poids (SG-HPM) et de faible poids (SG-FPM) moléculaires* . . . . . 88  
 Pour en savoir plus . . . . . 90

**3. Amidon, pentosanes et lipides**

Amidon . . . . . 91  
 Composition et structure . . . . . 91  
 Biosynthèse . . . . . 95  
 Amidon endommagé . . . . . 96  
 Transitions de l'amidon . . . . . 97  
 Absorption d'eau, gélatinisation et rétrogradation . . . . . 99  
 Rôle de l'amidon en panification . . . . . 102  
 L'industrie de l'amidon . . . . . 102  
     *Extraction de l'amidon et du gluten (amidonnerie-glutennerie)*. . . . . 103  
     *Utilisation de l'amidon*. . . . . 104  
 Pentosanes . . . . . 109  
     Propriétés physico-chimiques . . . . . 110  
     Rôle des pentosanes en panification . . . . . 113  
 Lipides . . . . . 114  
     Composition, structure et propriétés des lipides de la farine . . . . . 114  
     Modification de la composition lipidique au cours du pétrissage et de la fermentation . . . . . 117  
     Rôle des lipides en panification . . . . . 119  
     Huile de germe . . . . . 120  
 Pour en savoir plus . . . . . 121

**4. Enzymes**

Enzymes amylolytiques .....	124
$\alpha$ -amylases .....	127
$\beta$ -amylases .....	128
Autres hydrolases .....	129
Pentosanases .....	129
Protéases .....	129
Lipases .....	130
Oxydoréductases .....	131
Lipoxygénases .....	131
Peroxydases .....	133
Polyphénoloxydases .....	134
Catalase .....	134
Pour en savoir plus .....	136

**5. De la farine à la pâte et de la pâte au pain**

Pétrissage : formation de la pâte .....	138
Conditions de pétrissage .....	140
Transformation physico-chimique de la pâte .....	143
<i>Développement d'un réseau protéique</i> .....	144
<i>Rôle de l'eau</i> .....	146
<i>Notion de transition vitreuse</i> .....	148
<i>Propriétés rhéologiques des pâtes</i> .....	150
<i>Apparition d'un caractère « collant »</i> .....	152
Fermentation .....	153
Les levures .....	154
Pain au levain .....	157
Façonnage .....	160
Cuisson .....	160
La mie du pain .....	163
Alvéolage de la mie .....	163
Rassissement .....	167
Composés volatils de la mie du pain .....	168
Pâtes et pains surgelés .....	169
Pâtes surgelées crues .....	170
Pains pré-cuits .....	172
Pour en savoir plus .....	172

**6. Biscuits, pâtes alimentaires et autres produits dérivés du blé**

Biscuits .....	175
Conditions de fabrication .....	180
<i>Pétrissage</i> .....	180
<i>Laminage et découpage</i> .....	182
<i>Cuisson</i> .....	184
Blés et farines biscuitiers .....	185
Pâtes alimentaires .....	187
Fabrication des pâtes alimentaires .....	187
<i>Malaxage, pressage et découpe</i> .....	188
<i>Séchage</i> .....	190
<i>Pâtes aux œufs</i> .....	191
Propriétés organoleptiques, nutritionnelles et hygiéniques .....	191
<i>Aspect</i> .....	191
<i>Qualité culinaire</i> .....	192
<i>Qualité nutritionnelle</i> .....	194
<i>Qualité hygiénique</i> .....	195
Les matières premières .....	196
<i>Valeur semoulière</i> .....	196
<i>Qualité pastière</i> .....	197
Autres produits .....	199
Couscous .....	199
Nouilles chinoises .....	201
<i>Procédés de fabrication</i> .....	202
<i>Facteurs de qualité</i> .....	205
Pains plats .....	206
Pains cuits à la vapeur .....	207
Pour en savoir plus .....	208

**7. Régulateurs des farines et agents de levée des pâtes**

Régulateurs .....	209
Modification du réseau protéique .....	213
<i>Agents réducteurs</i> .....	213
<i>Agents oxydants</i> .....	215
<i>Gluten</i> .....	217
<i>Protéases</i> .....	218
Régulation de la répartition de l'eau .....	218
<i>Polysaccharides</i> .....	218
<i>Pentosanases (hémicellulases)</i> .....	219
Stabilisation des interfaces (corps gras) .....	219

Autres effets. . . . .	222
<i>Agents anti-rassissants</i> . . . . .	222
<i>Agents acidifiants</i> . . . . .	222
Agents de fermentation et de levée de la pâte . . . . .	223
Poudres levantes . . . . .	223
$\alpha$ -amylases . . . . .	224
Pour en savoir plus . . . . .	224

## 8. Méthodes d'appréciation de la qualité

Analyses physiques des grains et des farines . . . . .	229
Impuretés. . . . .	229
Poids de mille grains et poids à l'hectolitre . . . . .	230
Friabilité . . . . .	230
Granulométrie des farines . . . . .	231
Analyses chimiques . . . . .	232
Teneur en eau . . . . .	232
<i>Mesure par perte de poids</i> . . . . .	232
<i>Mesure par spectroscopie dans l'infrarouge</i> . . . . .	233
<i>Mesure de constantes physiques (conductivité et constante diélectrique)</i> . . . . .	233
Matières minérales. . . . .	233
Protéines . . . . .	234
<i>Teneur en protéines totales</i> . . . . .	234
<i>Teneur en gluten et en ses protéines constitutives</i> . . . . .	235
Amidon . . . . .	237
<i>Teneur en amidon</i> . . . . .	237
<i>État physique des granules d'amidon</i> . . . . .	237
<i>Degré d'endommagement de l'amidon</i> . . . . .	237
Lipides . . . . .	238
Acidité grasse des farines . . . . .	238
Fibres alimentaires. . . . .	239
Propriétés rhéologiques des pâtes . . . . .	240
Notions de rhéologie . . . . .	240
Mesure par déformation dynamique oscillatoire . . . . .	243
Mesure par essais d'application/retrait de contraintes en régime transitoire . . . . .	244
Caractérisation empirique des propriétés rhéologiques des pâtes . . . . .	246
Analyses technologiques. . . . .	251
Pouvoir d'absorption d'eau des farines . . . . .	251
Fixation d'eau et viscosité des empois d'amidon. . . . .	251
Temps de chute d'Hagberg (activité amylolytique) . . . . .	252

Indice de sédimentation de Zéleny . . . . .	253
Identification des variétés de blé . . . . .	253
Essai de panification . . . . .	254
Essai biscuitier . . . . .	254
Gluten vital . . . . .	256
Force fermentaire des levures . . . . .	257
Conclusion . . . . .	257
Pour en savoir plus . . . . .	258

## 9. Valeur nutritionnelle

Protéines . . . . .	262
Amidon . . . . .	264
Fibres alimentaires . . . . .	266
Minéraux et vitamines . . . . .	269
Allergies . . . . .	270
Asthme des boulangers . . . . .	270
Maladie cœliaque . . . . .	271
Aliments santé à base de blé . . . . .	272
Notion d'aliment santé . . . . .	272
Réglementation . . . . .	274
Les produits céréaliers . . . . .	276
<i>Les fibres</i> . . . . .	276
<i>Enrichissements en vitamines ou minéraux</i> . . . . .	277
<i>Enrichissement en acides gras polyinsaturés (omega-3 et omega-6)</i> . . . . .	277
<i>Substances alimentaires à fonction physiologique</i> . . . . .	278
Maîtriser les procédés de transformation . . . . .	279
Pour en savoir plus . . . . .	279

## 10. Économie de la filière blé

Production agricole . . . . .	281
Blé tendre . . . . .	282
Blé dur . . . . .	285
Utilisation des blés et des farines . . . . .	288
Meunerie, semoulerie et amidonnerie . . . . .	289
<i>Meunerie</i> . . . . .	289
<i>Semoulerie</i> . . . . .	291
<i>Amidonnerie-glutennerie</i> . . . . .	291

Industries de deuxième transformation et consommation.....	293
<i>Pain</i> .....	293
<i>Biscuit</i> .....	293
<i>Pâtes alimentaires et couscous</i> .....	296
<i>Améliorants</i> .....	297
Entreprises .....	297
<b>Épilogue</b>	
Un bilan contrasté .....	302
Regard sur l'avenir .....	303



# Des blés aux farines

## Classification botanique, origine et caractéristiques des blés cultivés

Le blé est une monocotylédone<sup>1</sup> qui appartient au genre *Triticum* de la famille des *Gramineae*. C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscant, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments. Les deux espèces les plus cultivées sont le blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum durum*) (tableau 1) mais il existe de nombreuses autres espèces de *Triticum* qui se différencient par leur degré de ploïdie<sup>2</sup> (blés diploïdes : génome<sup>3</sup> AA ; blés tétraploïdes : génomes AA et BB ; blés hexaploïdes : génomes AA, BB et DD) et par leur nombre de chromosomes (14, 28 ou 42) (tableau 2). Le blé tendre possède les trois génomes AA, BB et DD constitués chacun de sept paires de chromosomes homéologues numérotés de 1 à 7 (A1...A7, B1...B7, D1...D7), soit au total 42 chromosomes ; le blé dur ne contient que les deux génomes AA et BB et 28 chromosomes.

La filiation génétique des blés est complexe et incomplètement élucidée. Il est acquis que le génome A provient de *Triticum monococcum*<sup>4</sup>, le génome B d'un *Aegilops* (*bicornis*, *speltoides*, *longissima* ou *searsii*) et le génome D d'*Aegilops squarrosa* (également dénommé *Triticum tauschii*). Le croisement naturel *T. monococcum* × *Aegilops* (porteur du génome B) a permis l'apparition d'un blé dur sauvage de

1. Chez les plantes supérieures, angiospermes (la graine, enfermée dans un fruit, est protégée) et gymnospermes (la graine est nue), l'embryon de la graine – ébauche de la future plante – contient des feuilles rudimentaires appelées cotylédons. L'embryon de blé ne possède qu'un cotylédon, la graine est protégée par des téguments : le blé est un angiosperme et une monocotylédone.

2. La ploïdie est le nombre de jeux de chromosomes d'une cellule ou d'un organisme : les blés diploïdes, tétraploïdes et hexaploïdes contiennent respectivement deux, quatre ou six assortiments de chromosomes semblables.

3. Le génome est l'ensemble des chromosomes, et par extension l'ensemble des gènes, portant le patrimoine génétique d'un individu. La cellule végétale possède trois types de génomes : le génome chloroplastique (120 à 180 kilobases), mitochondrial (218 à 2 400 kilobases) et nucléaire (16 milliards de bases chez le blé). Seul le génome nucléaire, le plus volumineux, est pris en compte ici. Il existe quatre bases différentes : adénine, cytosine, guanine et thymine.

4. L'engrain (*Triticum monococcum*) est considéré comme l'une des huit plantes fondatrices de l'agriculture. L'analyse comparée de l'ADN (acide désoxyribonucléique) de 68 lignées cultivées et de 261 espèces sauvages a montré une grande similitude de composition entre les premières et 11 espèces sauvages issues des montagnes du sud de la Turquie (les Karacadağ). Il est donc maintenant démontré que cette région est le berceau du blé, d'autant que la présence d'*Aegilops squarrosa* a été reconnue légèrement plus au nord, sur la mer Caspienne (Diamond J., 1997 – Location, location, location : the first farmers, *Science*, 278, 1243-1244).

**Tableau 1** – La famille des *Gramineae*.

Famille	Sous-famille	Tribu	Sous-tribu	Genre	Nom commun (espèce)
Gramineae	Festucoideae	Triticeae Aveneae	Triticineae	triticum	blé tendre blé dur
				secale	seigle
				hordeum	orge
				avena	avoine
		Oryzeae		oryza	riz
	Panicoideae	Tripsaceae		zea	maïs
		Andropogoneae		sorghum	sorgho

type AA BB (*Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides*) qui a ensuite progressivement évolué vers *T. turgidum* ssp. *dicoccum* puis vers *T. durum* (blé dur cultivé). Les blés tendres cultivés (AA BB DD) seraient issus d'un croisement, également naturel, entre *T. turgidum* ssp. *dicoccum* (AA BB) et *Aegilops squarrosa* (DD).

Les blés cultivés sont apparus il y a une dizaine de milliers d'années en Mésopotamie, et il n'est pas impossible que nos ancêtres du Néolithique soient arrivés dès cette époque à sélectionner empiriquement certaines espèces sauvages possédant plus que d'autres les caractéristiques requises pour satisfaire les besoins des nouveaux agriculteurs : maturation des épis et des grains à peu près synchrone, ferme attachement des grains à l'épi, germination non étalée dans le temps, grains gros et bien remplis. Cette sélection se poursuivra jusqu'à ce que Mendel, en 1865, jette les bases de la génétique moderne. Depuis, les caractéristiques agronomiques (rendement à l'hectare, résistance aux maladies) et technologiques (aptitude à la panification des farines) des nouvelles variétés n'ont cessé de s'améliorer. En France, au cours des 50 dernières années, et après avoir

**Tableau 2** – Classification des *Triticum*.

Forme sauvage	Forme cultivée	Nom commun	Nombre de chromosomes (2n)	Nature des génomes
<i>T. boeoticum</i> <sup>(1)</sup>	<i>T. monococcum</i>	engrain	14	AA
<i>T. urartu</i>			14	AA
<i>T. dicoccoides</i>	<i>T. dicoccum</i>	blé poulard	28	AA BB
	<i>T. durum</i>	blé dur	28	AA BB
	<i>T. polonicum</i>	blé de Pologne	28	AA BB
	<i>T. turgidum</i>		28	AA BB
	<i>T. araraticum</i>		28	AA BB
<i>T. mon</i> × <i>T. spe</i> × <i>As</i> <sup>(2)</sup> (hypothétique)	<i>T. aestivum</i>	blé tendre	42	AA BB DD
	<i>T. spelta</i>	épeautre	42	AA BB DD
	<i>T. sphaerococcum</i>	blé indien nain	42	AA BB DD
	<i>T. compactum</i>	blé club	42	AA BB DD

(1) *T* = *Triticum* ; (2) *T. monococcum* × *T. speltoides* × *Aegilops squarrosa*.