

Mise en Evidance du Rôle de Certaines Gluténines de Haut Poids Moléculaire dans la Qualité Boulangère des Blés Tendres en Algérie

H. Sadouki et J.C. Aufran
(avec la collaboration technique de Renée Berrier)

H. Sadouki: Département de Technologie, Institut National Agronomique, Alger El-Harrach (Algérie)
J.C. Aufran: Laboratoire de Technologie des Céréales, Institut National de la Recherche Agronomique, 9 Place Viala, 34000 Montpellier (France)

(Reçu Octobre 29, 1986; Accepté Juillet 2, 1987)

L'étude d'une collection de blés tendres sélectionnés ou cultivés en Algérie a permis de mieux préciser les aptitudes technologiques des génotypes de ce pays et de confirmer certaines relations existant entre les différents tests d'appréciation de la qualité boulangère. A partir du fractionnement électrophorétique (SDS-PAGE) des sous-unités gluténines de haut poids moléculaire, différentes relations, confirmées par une analyse en composantes principales, entre le potentiel de qualité des génotypes algériens et la présence de bandes gluténines particulières ont été mises en évidence, particulièrement le rôle favorable des sous-unités 1, 5-10 et 13-16, et le rôle défavorable des sous-unités 2-12. L'intérêt de ces relations en vue de la sélection variétale est discuté. Une étude des différentes sous-unités au cours de la formation et d'un traitement thermique du gluten a montré que, dans la plupart des cas, les sous-unités qui présentent la plus forte tendance à l'insolubilisation sont également celles qui apparaissent positivement corrélées à des valeurs élevées de qualité boulangère.

Implications of specific high-molecular-weight glutenins for baking quality of bread wheats grown in Algeria

The study of a collection of bread wheats bred or grown in Algeria allowed improved knowledge of the technological characteristics of these genotypes and confirmation of certain relationships between the various tests for baking quality assessment. A correlation was demonstrated and confirmed through principal-components analysis, between the presence of some specific high-molecular-weight glutenin subunits detected by electrophoresis (SDS-PAGE) and the baking potential of Algerian genotypes. A positive role for subunits 1, 5-10 and 13-16 and a negative role for subunits 2-12 was evidenced and this is discussed in relation to breeding for quality. A study of the solubility characteristics of these subunits during gluten formation and heat treatment showed that, in most cases, those subunits whose presence was found to be positively correlated to high baking quality were also those that exhibited the higher tendency to form insoluble complexes.

Introduction

La fraction protéique présente dans le résidu d'extraction des farines de blé par des solvants tels que l'éthanol dilué, l'acide acétique dilué, l'urée ou le chloro-2-éthanol, appelée communément 'gluténine' ou 'gluténine insoluble', joue selon de nombreux auteurs, un rôle clef dans l'expression de la qualité boulangère des blés tendres (1-8). Des études chromatographiques ont montré que cette fraction protéique est essentiellement constituée de complexes de très haut poids moléculaire; plusieurs millions de daltons (9-11). L'existence de tels complexes, reposant vraisemblablement sur la présence de liaisons disulfures et d'interactions de type hydrogène et hydrophobe, est en effet considérée comme explicative de la formation et des propriétés rhéologiques du gluten et de la pâte, conditionnant ainsi pour une grande part l'aptitude d'une farine à la panification (12-14).

Il est évident que l'étude de ces complexes gluténines, la compréhension de leur structure et de leurs propriétés fonctionnelles en panification, ainsi que de leurs aspects génétiques, est importante tant au plan fondamental (bases physicochimiques de la qualité) qu'au plan de l'amélioration de la qualité par sélection variétale.

L'action de solvants dissociants (urée, détergents, savons) ou réducteurs (mercapto-éthanol) sur ces complexes de haut poids moléculaire suivie d'analyses par électrophorèse en présence de dodécylsulfate de sodium (SDS-PAGE) (14-16) a permis de montrer qu'ils étaient constitués d'une série de polypeptides (ou 'sous-unités') de poids moléculaires allant de 10 000 à 130 000, avec deux familles principales: les sous-unités dites de faible poids moléculaire (inférieur à 50 000) et celles dites de haut poids moléculaire (70 000-130 000) qui, selon Payne *et al.* (17), représentent respectivement 70% et 30% de la gluténine classique.

Les fractions de faible poids moléculaire, dont on sait depuis peu (18-20) qu'elles sont indiscutablement distinctes des fractions gliadines, sont encore très mal connues et font actuellement l'objet de nombreuses études tant du point de vue de la physicochimie que de la génétique ou de la biologie moléculaire. Celles de haut poids moléculaire ont par contre fait l'objet de nombreuses études électrophorétiques et génétiques: polymorphisme intervariétal et héritabilité par 'blocs' alléliques étroitement liés (21); localisation des gènes sur les chromosomes 1AL, 1BL et 1DL (22, 23); et structure des gènes (24, 25).

Il a également été montré par Payne *et al.* (26, 27) à partir de l'étude de blés cultivés en Grande Bretagne et par Branlard et Le

Blanc (28) et Branlard et Dardevet (29) à partir de blés cultivés en France, que certains types de sous-unités étaient plus fréquemment rencontrés chez des variétés de qualité boulangère élevée, alors que d'autres types étaient davantage des marqueurs de variétés de faible qualité. L'existence de telles protéines positivement ou négativement liées à la qualité, facilement identifiables au moyen de l'électrophorèse, a commencé d'être exploitée en Europe pour sélectionner, dès les premières générations dans la descendance d'un croisement, les lignées présentant une valeur potentielle élevée.

Il était donc important de réaliser une recherche comparable sur des variétés cultivées dans d'autres pays afin de s'assurer si les mêmes relations entre constituants électrophorétiques et qualité peuvent exister au sein de pools génétiques différents et si elles sont susceptibles d'être exploitées pour l'amélioration génétique de la qualité boulangère. Un autre point important est que la nature de la relation entre ces sous-unités gluténines et la qualité n'a jamais été démontrée avec certitude. On ne sait pas vraiment s'il s'agit d'une simple liaison génétique ou s'il s'agit d'une relation fonctionnelle reposant sur une structure ou une réactivité chimique particulière de certaines sous-unités. Il était donc également important de rechercher si les sous-unités que les généticiens ont trouvées positivement associées à la qualité ne seraient pas précisément celles qui manifesteraient au cours des processus de panification (pétrissage, fermentation, cuisson) des propriétés physicochimiques et fonctionnelles particulières. L'objet de ce travail était donc triple: (i) acquérir et analyser au moyen de méthodes statistiques un grand nombre de données technologiques sur une collection de génotypes algériens, contribuant ainsi à une meilleure connaissance de génotypes jusqu'ici très peu étudiés; (ii) réaliser une analyse électrophorétique complète des sous-unités gluténines de haut poids moléculaire de ces génotypes et rechercher l'existence de relations éventuelles entre certains types électrophorétiques et certains paramètres de la valeur technologique; et (iii) à partir d'une étude simple consistant à suivre la perte de solubilité des fractions gluténines lors de la formation et du traitement thermique du gluten, rechercher si les sous-unités trouvées positivement ou négativement liées à la qualité présentent ou non des comportements différents.

Matériel et méthodes

Matériel végétal

L'étude a porté d'une part sur 23 génotypes de blé tendre algériens (dont 15 lignées F7/F8 et huit cultivars) récoltés en 1982 à la Station d'Alger et sur 42 génotypes (dont 34 lignées F7/F8 et huit cultivars), récoltés en 1983 dans la même Station. Le pedigree de ces génotypes, ainsi que les indices relatifs de similarité calculés à partir des électrophorogrammes des gliadines (résultats non publiés), ont montré que ces génotypes sont très peu apparentés. Toutes les farines utilisées dans ce travail ont été obtenues au moyen d'un moulin Brabender Junior avec tamis de 150 μm (taux d'extraction 62–75%).

Tests d'appréciation de la qualité boulangère des blés

L'essai à l'Alvéographe Chopin et l'essai au farinographe ont été réalisés selon le protocole de Mauze *et al.* (30). Le test de sédimentation de Zeleny a été effectué selon Bourdet et Berrier (31) à partir de farines Brabender Junior retamisées manuellement à 150 μm (taux d'extraction 15–25%). Le test de sédimentation en milieu dodécylsulfate de sodium (SDS) a été réalisé sur une mouture totale de grains selon le protocole de Axford *et al.* (32) modifié par Payne *et al.* (27).

On a également utilisé (récolte 1982 uniquement) le micro test de Bourdet *et al.* (33) dont on rappelle qu'il a été conçu pour permettre la détermination de la force boulangère à des stades précoces de la sélection (à partir de la génération F3), y compris

à partir de blés de force élevée qui sont pénalisés lorsqu'on utilise une panification française classique.

Propriétés viscoélastiques du gluten

L'extraction du gluten a été effectuée (récolte 1983 uniquement) selon Mauze *et al.* (30) et Feillet *et al.* (34) et la quantité de gluten sec extrait (exprimée en % de la farine s.s.) a été mesurée après séchage dans une étuve Chopin pendant 15 h à 130°C. Les propriétés viscoélastiques du gluten (fermeté et recouvrance élastique) ont été déterminées au moyen d'un Viscoélastographe (34) à partir de pastilles de gluten thermoformées durant 60 s dans l'eau bouillante selon le protocole de Damidaux et Feillet (35) adapté au gluten de blé tendre par Houliaropoulos (4).

Extraction et fractionnement électrophorétique des protéines de la farine

Les protéines ont été extraites et réduites en traitant la farine au moyen d'un tampon Tris-SDS-mercaptoéthanol, puis fractionnées par électrophorèse en gel de polyacrylamide à 13%, tampon Tris-glycine-SDS, pH 8.4 (SDS-PAGE), dans les conditions décrites par Payne et Corfield (16). La nomenclature des sous-unités de haut poids moléculaire utilisée est également celle de Payne et Lawrence (36).

Extraction et fractionnement électrophorétique de la fraction protéique alcool-soluble de glutens ayant subi un traitement thermique

Dans les mêmes conditions que celles mentionnées ci-dessus pour le thermoformage, les glutens ont été traités thermiquement durant des temps différents (0, 1, 10 et 30 min), puis lyophilisés et rebroyés dans un broyeur à billes. Les protéines alcool-solubles ont été extraites en agitant durant 18 h à 20°C (agitateur rotatif) un mélange de gluten rebroyé (300 mg) et d'amidon commercial de blé (900 mg) dans 25 ml d'éthanol à 70% (v/v). Après centrifugation pendant 30 min à 38 000g, le surnageant a été dialysé 72 h et lyophilisé, puis soumis à l'électrophorèse (SDS-PAGE) comme ci-dessus après réduction par le tampon Tris-SDS-mercaptoéthanol.

Analyses chimiques

Les teneurs en azote total ont été déterminées par la méthode de Kjeldahl en exprimant les résultats par rapport à la matière sèche et en utilisant le facteur de conversion 5.7.

Analyse statistique: analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode de description des données d'un tableau renfermant des individus (par exemple, des variétés) et des valeurs numériques (par exemple, des résultats de tests technologiques). Lorsqu'on a affaire à deux ou trois paramètres seulement, une représentation des données sur le plan ou dans l'espace est possible. Par contre, si l'on veut étudier plus de trois paramètres, par exemple, les résultats de 11 tests technologiques, une représentation visuelle n'est plus possible car il faudrait pouvoir travailler dans un espace à 11 dimensions.

Une représentation plane des données reste cependant possible au moyen d'une projection sur un plan, mais cela introduit inévitablement des distorsions. Une ACP consiste à déterminer le plan de projection qui conserve le mieux les distances et qui minimise ainsi les distorsions. Ce plan de projection particulier est appelé 'plan principal', et de nouvelles coordonnées pour les points sont obtenues et appelées 'composantes principales'. L'ACP est donc une méthode destinée à réduire le nombre de paramètres numériques, permettant ainsi une représentation graphique même dans le cas de données complexes. Cette réduction n'est pas réalisée par sélection de certains paramètres, mais par création de nouvelles variables synthétiques, les composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires non corrélées entre elles des variables initiales. Plus le nuage de points est aplati sur le plan principal, plus la représentation des

données sur ce plan est valide. Le 'pourcentage de l'inertie totale' du plan principal constitue une estimation de l'aplatissement du nuage de points et donc de la signification de la représentation sur ce plan.

Une représentation graphique d'ACP consiste en deux axes orthogonaux qui déterminent un plan principal, sur lequel les échantillons sont figurés par des points et les tests par des flèches. L'interprétation de ce graphique exige beaucoup de prudence. Par exemple, la proximité de points-échantillons et de flèches-tests n'a aucune signification car les deux échelles sont différentes. Par contre, la proximité de deux flèches-tests signifie que les valeurs de ces tests sont corrélées et cela d'autant plus qu'on se situe plus loin de l'origine.

Résultats et discussion

Corrélations entre les résultats des différents tests d'appréciation de la qualité

Les résultats concernant la qualité technologique des 23 échantillons (1982) et des 42 échantillons (1983) sont synthétisés (moyennes, écart-types, valeurs extrêmes) dans le Tab. 1. Ces résultats mettent en évidence la grande diversité de ces génotypes au niveau de toutes les caractéristiques analysées, diversité qui rend l'échantillonnage retenu particulièrement approprié pour la recherche de tests applicables en sélection et pour l'étalonnage de méthodes biochimiques.

Cet ensemble de données n'a été obtenu que dans le but de caractériser au plan technologique la collection de génotypes algériens, génotypes sur lesquels peu d'études ont été pratiquées à cette échelle. Compte tenu qu'il n'a été analysé qu'une seule répétition par génotype, ce travail n'a pas la prétention de

conclure définitivement, ni quant à l'intérêt en sélection de chacun de ces tests, ni quant à l'influence respective du génotype et du milieu sur leurs résultats, ni quant à l'intérêt de tel ou tel génotype.

Les coefficients de corrélation linéaire ont été calculés entre les résultats de tous les tests d'appréciation de la qualité. Le Tab. 2 fournit les résultats obtenus en prenant pour exemple l'ensemble des 42 génotypes de la récolte 1983. A partir de ce tableau, plusieurs observations importantes peuvent être faites.

On confirme tout d'abord sur ces génotypes de blés algériens un certain nombre d'observations classiques obtenues jusqu'ici sur les blés européens ou étrangers (37-42) à savoir, par exemple, que: le *W* de l'Alvéographe Chopin présente des corrélations significatives avec l'indice *G*, l'indice de Zeleny et la teneur en protéines des farines; le test de sédimentation en milieu SDS, très corrélé à l'indice de Zeleny classique ($r = 0.85$) et au rapport Zeleny/protéines ($r = 0.88$), ne présente aucune corrélation avec la teneur en protéines ($r = 0.07$) ce qui tend à souligner son intérêt particulier en tant que test miniaturisé d'appréciation de la valeur potentielle des génotypes en sélection.

Des données plus originales ont été obtenues au niveau des caractéristiques viscoélastiques (fermeté et recouvrance élastique au Viscoélastographe) des glutens. On trouve ainsi: une relation assez étroite entre fermeté et recouvrance élastique ($r = 0.75$); des corrélations significatives entre fermeté et recouvrance du gluten et les différents indices de sédimentation, les plus élevées étant obtenues avec la sédimentation SDS ($r = 0.53$ et 0.52 , respectivement), mais aucune corrélation avec la teneur en protéines des farines; le *W* de l'Alvéographe Chopin, associé à la teneur en protéines ($r = 0.53$) et à la teneur en gluten sec ($r = 0.41$), ne présente aucune corrélation avec les aspects qualitatifs des glutens que sont la fermeté et la recouvrance élastique.

Table 1 Synthèse des caractéristiques technologiques des échantillons utilisés

	Récolte 1982 (n = 23)			Récolte 1983 (n = 42)		
	Moyennes	Ecart types	Valeurs extrêmes	Moyennes	Ecart types	Valeurs extrêmes
<i>W</i> (Alvéographe Chopin)	249.3	84.0	72-500	204.6	83.6	70-460
<i>G</i> (Alvéographe Chopin)	18.8	2.3	13.0-22.8	19.3	3.1	13.0-25.6
Volume du pain en micro-cuisson (ml)	542	103	275-800	—	—	—
Indice de sédimentation SDS (ml)	47.6	7.0	36.1-66.6	56.6	8.4	33.5-72.5
Indice de sédimentation Zeleny (ml)	32.5	3.5	23.3-37.9	34.7	6.2	17-48.5
Teneur en protéines (% m.s.)	13.03	1.97	10.54-20.07	12.3	1.36	10.14-16.16
Rapport Zeleny/protéines	2.54	0.42	1.16-3.05	2.84	0.50	1.33-4.14
Recouvrance élastique du gluten (mm)	—	—	—	1.56	0.47	0.20-2.17
Fermeté du gluten (mm)	—	—	—	2.05	0.38	1.15-2.80
Teneur en gluten humide (% m.s.)	—	—	—	24.7	7.8	9.3-43.0
Teneur en gluten sec (% m.s.)	—	—	—	9.3	2.9	3.6-14.6
Hydratation du gluten (% m.h.)	—	—	—	63.0	2.6	58.2-69.4

Table 2 Matrice des corrélations entre les résultats des tests technologiques: génotypes de la récolte 1983 (n = 42)

	<i>W</i>	<i>G</i>	SDS	Zel	Prot	Zel/Prot	E_2-E_1	E_1	GH	GS	Hyd
<i>W</i> (Alvéographe Chopin) (<i>W</i>)	1										
<i>G</i> (Alvéographe Chopin) (<i>G</i>)	0.53**	1									
Indice de sédimentation SDS (ml) (SDS)	0.32	0.41*	1								
Indice de sédimentation Zeleny (ml) (Zel)	0.48*	0.52**	0.85**	1							
Teneur en protéines (% m.s.) (Prot)	0.53**	0.27	-0.07	0.33	1						
Rapport Zeleny/protéines (Zel/Prot)	0.15	0.36	0.88**	0.81**	-0.29	1					
Recouvrance élastique du gluten (mm) ($E_2 - E_1$)	0.06	0.30	0.53**	0.45**	-0.03	0.47*	1				
Fermeté du gluten (mm) (E_1)	-0.04	0.27	0.52**	0.41*	-0.14	0.50**	0.75**	1			
Teneur en gluten humide (% m.s.) (GH)	0.35	-0.06	-0.24	-0.08	0.27	-0.25	-0.55**	-0.72**	1		
Teneur en gluten sec (% m.s.) (GS)	0.41	-0.03	-0.14	0.01	0.28	-0.15	-0.50**	-0.62**	0.96**	1	
Hydratation du gluten (% m.h.) (Hyd)	-0.26	-0.12	-0.32	-0.36	-0.06	-0.32	-0.11	-0.34	0.06	-0.20	1

* Corrélation significative à $p < 5\%$.

** Corrélation significative à $p < 1\%$.

Il est enfin intéressant de noter que ces caractéristiques viscoélastiques sont négativement reliées ($r = -0.50$ à -0.72) aux teneurs en gluten, ce qui tend à montrer que plus un gluten est extrait avec un fort rendement, moins bonnes sont ses propriétés viscoélastiques. Inversement, tout se passe comme si les glutes extraits avec de faibles rendements semblaient 'concentrer' les fractions les plus directement responsables de l'élasticité et surtout de la fermeté. Cette question doit cependant être considérée avec prudence et mérite des études complémentaires car, si on confirme ici les résultats de Houliaropoulos (4) obtenus sur 34 variétés françaises, on ne confirme pas ceux de Autran *et al.* (43) obtenus sur 11 farines semi-industrielles dans lequel une faible corrélation positive avait été observée entre rendement et qualité du gluten. Il est cependant très probable que la grande différence dans le type de mouture ou dans le type d'échantillonnage utilisé (lequel peut amplifier une variation génétique ou, au contraire, une variation simplement liée à la teneur en protéines (44)) soit responsable des divergences observées.

Relations entre les résultats technologiques et les électrophorogrammes de gluténines

La Fig. 1 illustre le fractionnement obtenu en SDS-PAGE pour les protéines totales réduites de quelques uns des génotypes algériens. A la lumière de travaux antérieurs, on sait que ces diagrammes renferment plusieurs groupes protéiques de mobilités différentes: (A) correspondant aux sous-unités gluténines de haut poids moléculaire, (B) à des sous-unités gluténines de moyen poids moléculaire ainsi qu'à des oméga-gliadines, (C) à des sous-unités gluténines de faible poids moléculaire ainsi qu'à des gliadines principalement de type gamma, et (D) à des gliadines principalement de type alpha et bêta.

Dans la suite de ce travail, on s'intéresse essentiellement au premier groupe: celui des sous-unités de haut poids moléculaire en utilisant la nomenclature des bandes développée par Payne et Lawrence (36), déjà employée sur les génotypes français par Brânlard et Le Blanc (28) et dont la Tab. 3 donne un exemple à partir des schémas de diagrammes des génotypes de la Fig. 1. Il

Table 3 Schémas des diagrammes électrophorétiques des sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (zone A de la Fig. 1), utilisant la nomenclature de Payne et Lawrence (36). Mêmes échantillons que sur la Fig. 1

	Sous-unités												
	1	2	2*	3	5	7	13	20	16	8	9	10	12
Courtot (F)		+	+			+					+		+
254		+	+					+					+
223		+	+						+			+	+
207		+			+				+				+
213		+	+					+					+
228		+			+		+		+				+
238	+				+	+				+			+
Anza		+				+				+			+
281	+				+	+		+				+	+
Hobbit (F)					+	+							+

est à noter que cette nomenclature est différente de celles utilisées par Burnouf et Bouriquet (45) et par Moonen *et al.* (46). A partir de cet exemple on peut facilement repérer les groupes classiques de sous-unités, connus pour correspondre à des 'blocs' d'allèles codés au niveau des différents chromosomes du groupe 1, en particulier les no. 1 ou 2* (chromosome 1AL), les no. 7-8, 7-9 ou 13-16 (chromosome 1BL), les no. 2-12 ou 5-10 (chromosome 1DL). Tous ces groupes ont été antérieurement identifiés sur les blés anglais (27) ou français (28) mais, sans que des comparaisons statistiques n'aient été faites, il est très clair que les fréquences d'apparition des principaux allèles sont ici très différentes. Si on retrouve bien les allèles no. 1, 2*, 2-12, 5-10, 7-8 ou 7-9, très répandus dans de nombreuses variétés, on note la présence dans plus du tiers des génotypes algériens des allèles no. 13-16, 14-15 ou 17-18, qui sont très rares chez les blés européens.

Il est à noter que les aspects quantitatifs n'ont pas été étudiés. Comme dans la plupart des travaux précédents sur ces protéines, un poids égal a été donné à chaque sous-unité en utilisant un coefficient 1 en cas de présence et 0 en cas d'absence. Egalement, les sous-unités qui apparaissent toujours indissoci-

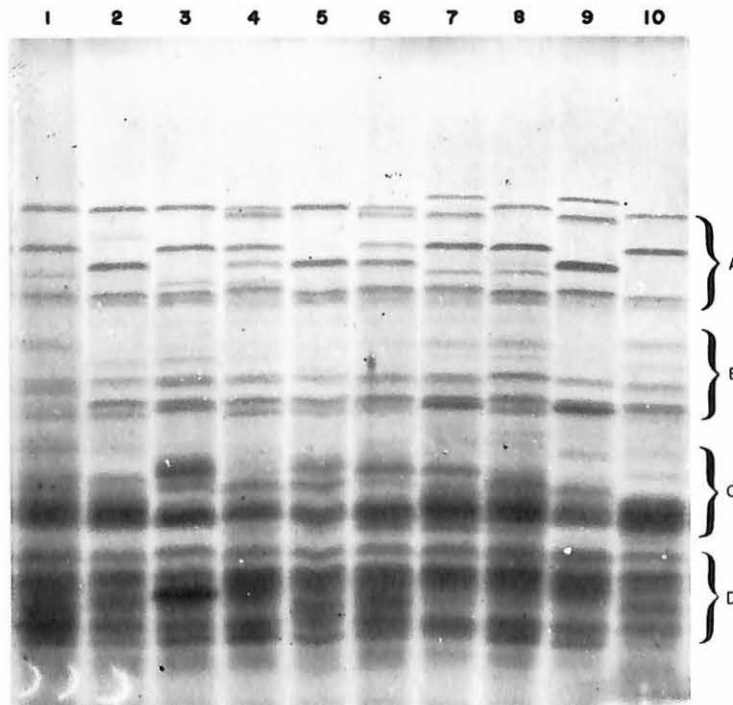


Fig. 1 Exemples de diagrammes électrophorétiques en gel de polyacrylamide SDS, tampon Tris-glycine SDS, pH 8.4, des protéines totales réduites de quelques lignées de blés algériens. 1, Courtot (Variété française témoin); 2, 254; 3, 223; 4, 207; 5, 213; 6, 228; 7, 238; 8, Anza; 9, 281; 10, Hobbit (variété française témoin)

Table 4a Matrice des corrélations entre les résultats des tests technologiques et la présence des différents groupes de sous-unités gluténines de haut poids moléculaire: génotypes de la récolte 1982 ($n = 23$)

		Référence des sous-unités (d'après Payne) (effectif de chaque classe)							
		1 (4)	2-12 (10)	5-10 (13)	6 (2)	7 (11)	8 (7)	9 (6)	13-16 (3)
<i>W</i> (Alvéographe Chopin)	(<i>W</i>)	0.15	-0.59**	0.56**	-0.37	0.01	-0.13	0.35	0.12
<i>G</i> (Alvéographe Chopin)	(<i>G</i>)	0.34	-0.33	0.37	-0.09	0.31	0.23	0.06	-0.04
Volume du pain en microcuisson (ml)	(Pain)	0.23	-0.35	0.38	-0.37	0.18	0.00	0.13	-0.07
Indice de sédimentation SDS (ml)	(SDS)	0.19	-0.53**	0.54**	-0.24	0.09	0.05	0.12	-0.14
Indice de sédimentation Zeleny (ml)	(Zel)	0.11	-0.60**	0.61**	-0.33	0.19	0.22	0.16	0.04
Teneur en protéines (% m.s.)	(Prot)	-0.11	0.15	-0.07	0.04	0.04	-0.15	0.02	-0.16
Rapport Zeleny/protéines	(Zel/Prot)	0.13	0.46*	0.40*	-0.29	0.04	0.23	0.06	0.14

* Corrélation significative à $p < 5\%$.** Corrélation significative à $p < 1\%$.**Table 4b** Matrice des corrélations entre les résultats des tests technologiques et la présence des différents groupes de sous-unités gluténines de haut poids moléculaire: génotypes de la récolte 1983 ($n = 42$)

		Référence de sous-unités (d'après Payne) (effectif de chaque classe)											
		1 (12)	2-12 (17)	2* (16)	5-10 (23)	6 (2)	7 (20)	8 (14)	9 (11)	13-16 (5)	14-15 (3)	17-18 (8)	20 (3)
<i>W</i> (Alvéographe Chopin)	(<i>W</i>)	+	+	+	+	+	+	+	+	0.44**	+	+	+
<i>G</i> (Alvéographe Chopin)	(<i>G</i>)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Indice de sédimentation SDS (ml)	(SDS)	+	-0.45**	+	0.49***	+	+	+	+	0.30*	-0.38*	+	+
Indice de sédimentation Zeleny (ml)	(Zel)	0.31*	-0.33*	0.56***	+	+	+	+	+	+	-0.35*	+	+
Teneur en protéines (% m.s.)	(Prot)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rapport Zeleny/protéines	(Zel/Prot)	+	-0.50***	0.54***	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Recouvrance élastique du gluten (mm)	($E_2 - E_1$)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Fermeté du gluten (mm)	(E_1)	0.41**	+	+	+	0.32*	+	+	+	+	+	+	+
Teneur en gluten humide (% m.s.)	(GH)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Teneur en gluten sec (% m.s.)	(GS)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hydratation du gluten (% m.h.)	(Hyd)	-0.36*	+	0.49***	-0.33*	+	+	+	-0.34*	+	+	+	+

+, Corrélation non-significative à $p < 5\%$.* Corrélation significative à $p < 5\%$.** Corrélation significative à $p < 1\%$.*** Corrélation significative à $p < 0.1\%$.

ablement liées dans les diagrammes (car correspondant, d'après la littérature, à des gènes étroitement liés dits 'blocs alléliques') telles que les no. 2 et 12, 5 et 10, 13 et 16, 14 et 15, 17 et 18, ont été présentées regroupées dans les tableaux. On signale que l'existence de ces 'blocs' a été également confirmée par une étude de corrélations 'interbandes' (résultats non fournis) à l'image de celle réalisée par Branlard et Rousset (47) et Branlard (48) sur les gliadines.

Dans les mêmes conditions que ces derniers auteurs, on a également effectué des calculs de corrélations entre la présence de chacun de ces groupes de sous-unités et les résultats des différents tests de technologie. Les Tab. 4a et 4b donnent ainsi les matrices des corrélations obtenues respectivement dans le cas des 23 génotypes de la récolte 1982 et des 42 génotypes de la récolte 1983.

Il ressort de ces tableaux que certaines sous-unités ou blocs de sous-unités ne semblent présenter aucune relation particulièrement significative avec les données technologiques ou ne peuvent être prises en considération en raison d'un effectif variétal trop faible. C'est notamment le cas des sous-unités no. 6, 7, 8, 9 ou 20.

Par contre, la présence de certaines autres sous-unités se trouve corrélée de façon significative aux résultats de un ou plusieurs tests et ce, généralement, sur les deux séries de génotypes. Parmi les groupes communément rencontrés dans la collection de génotypes on note ainsi que: le groupe 2-12 apparaît toujours négativement relié aux différents indices de sédimentation (1983 seulement) au *W* de l'Alvéographe; le groupe 5-10 est significativement relié, mais cette fois de façon positive, à chacun

de ces mêmes tests; la bande 1 apparaît plus particulièrement corrélée (1983 seulement) à l'indice de Zeleny et à la fermeté du gluten, la bande 2*, à l'indice de Zeleny et au rapport Zeleny/protéines, le groupe 13-16 au *W* de l'Alvéographe et à l'indice de sédimentation SDS (1983 seulement), le groupe 14-15 négativement, aux indices de sédimentation SDS et Zeleny. Il est remarquable de noter que des relations comparables, mettant en jeu les mêmes sous-unités, ont été observées par Payne *et al.* (21, 26, 27) sur des collections ou au sein de croisements de blés anglais et par Branlard et Dardevet (29) sur des collections de blés français. En outre, si l'on établit la correspondance entre les différentes nomenclatures, ces relations sont en accord avec celles trouvées par Burnouf et Bouriquet (45) et par Moonen *et al.* (46). Sur un échantillonnage de blés algériens génétiquement très différents des blés européens étudiés jusqu'ici, il est donc particulièrement fondamental de confirmer, dans la plupart des cas, la liaison entre différents critères de qualité et les mêmes sous-unités gluténines de haut poids moléculaire que celles antérieurement décelées.

Une étude plus détaillée a été réalisée sur les 40 génotypes présentant les sous-unités les plus répandues: no. 2-12 ou 5-10, dont on sait qu'elles correspondent à des allèles situés à un même locus Glu-Di situé sur le chromosome 1DL (23, 27). On a ainsi porté sur le Tab. 5 les moyennes et les écart-types de chacun des tests technologiques pour chacun des sous-ensembles possédant soit l'allèle 2-12, soit l'allèle 5-10. Un simple calcul de comparaison des moyennes montre que la différence entre les deux types est significative au niveau de cinq

Table 5 Comparaison des moyennes (et écart-types) des résultats technologiques en fonction des différents types de sous-unités présentes (récolte 1983)

	Ensemble des génotypes (n = 42)	Sous-ensemble des types 2-12 (n = 17)	Sous-ensemble des types 5-10 (n = 23)	Sous-ensemble des types simultanément 5-10 et		
				1 (n = 9)	17-18 (n = 5)	13-16 (n = 5)
W	204.6	174.7 (62.3)	225.4 (91.8)	225.5 (115.2)	267.0 (118.1)	263.0 (96.0)
G	19.3	18.1 (2.9)	20.1 (2.7)	20.9 (3.2)	20.2 (2.2)	20.5 (2.1)
SDS	56.6	51.6 (8.3)	60.3 (6.5)	57.1 (7.2)	63.7 (7.6)	64.1 (5.2)
Zel	34.7	31.0 (5.8)	37.6 (5.1)	36.5 (6.9)	38.7 (6.5)	39.3 (4.4)
Prot	12.3	12.3 (1.4)	12.4 (1.3)	12.5 (1.8)	12.5 (0.9)	12.3 (1.1)
Zel/Prot	2.84	2.54 (0.52)	3.04 (0.36)	2.90 (0.35)	3.12 (0.61)	3.20 (0.32)
E ₂ - E ₁	1.56	1.55 (0.57)	1.57 (0.41)	1.58 (0.36)	1.76 (0.44)	1.63 (0.42)
E ₁	2.05	1.95 (0.41)	2.11 (0.34)	2.22 (0.40)	2.20 (0.26)	2.04 (0.27)
GH	24.7	24.1 (8.2)	25.1 (6.8)	22.7 (8.5)	27.2 (4.0)	26.4 (4.3)
GS	9.3	8.6 (2.7)	9.6 (2.9)	8.8 (3.5)	10.2 (1.9)	10.0 (2.2)
Hyd	63.0	64.2 (1.6)	62.0 (2.8)	61.7 (2.3)	62.6 (1.8)	62.0 (3.3)

Table 6 Classement de l'effet apparent des principales sous-unités rencontrées sur les valeurs de W et d'indice de sédimentation SDS

Locus considéré	Effet sur le W	Effet sur l'indice SDS
Glu-A1	2* < 1	2* ≈ 1
Glu-B1	7-8 ≈ 7-9 < 17-18 ≈ 13-16	7-8 ≈ 7-9 ≈ 17-18 < 13-16
Glu-D1	2-12 < 5-10	2-12 ≪ 5-10

≈ Différence non-significative à $p < 5\%$.

< Différence significative à $p < 5\%$.

≪ Différence significative à $p < 1\%$.

tests: W, SDS, l'indice de Zeleny, le rapport Zeleny/protéines et E1.

Cette comparaison de l'effet des deux principaux allèles du locus Glu-D1 peut encore être complétée par l'étude de l'effet des autres allèles situés aux loci Glu-A1 et Glu-B1, à condition de disposer d'un effectif suffisant de chacun des variants à locus donné, toutes conditions égales par ailleurs au niveau des deux autres loci. Bien que le nombre de génotypes étudiés ne permette pas d'avoir toutes les combinaisons souhaitables, on a cependant essayé sur le Tab. 6 de réaliser un classement des principales sous-unités rencontrées au niveau de chacun des trois loci en fonction des valeurs du W et l'indice de sédimentation SDS. Il ressort de ce tableau que l'effet le plus net semble provenir du type d'allèle présent au locus Glu-D1, le no. 2-12 paraissant jouer un rôle très défavorable, le no. 5-10 un rôle très favorable. Au niveau des autres loci, les différences sont moins tranchées, mais les allèles no. 17-18 et surtout no. 13-16 paraissent jouer un rôle plus positif que les autres. En ce qui concerne le locus Glu-A1, l'allèle 1 paraît avoir un effet plus favorable sur le W que le no. 2*, mais cette différence n'apparaît pas sur le test SDS.

Bien que les différences ainsi mises en évidence soient beaucoup moins nettes que dans le cas des blés durs (49, 50) où un seul couple d'allèles (gliadine no. 42 ou no. 45) permet une prédiction quasi absolue de la viscoélasticité du gluten, elles n'en sont pas moins intéressantes par la possibilité qu'elles offrent de sélectionner progressivement pour une amélioration de la qualité boulangère en repérant les lignées possédant les types électrophorétiques favorables et en essayant par exemple d'associer sur un même génotype les allèles de type no. 5-10, 13-16 et 1.

Analyse en composantes principales de l'ensemble des données

En vue d'examiner de façon synthétique les liaisons pouvant exister entre les différents tests d'appréciation de la qualité utilisés, ainsi qu'entre les différents génotypes analysés, on a réalisé une analyse en composantes principales (ACP) des données en considérant les résultats des tests technologiques comme des paramètres numériques et les génotypes comme des individus.

La Fig. 2 montre, en prenant comme exemple les données obtenues sur la récolte 1983 (des résultats très comparables ayant été obtenus à partir de la récolte 1982), le premier plan principal du graphique de l'ACP, qui recouvre plus de 72% de l'inertie totale et sur lequel les points représentatifs des tests ont été matérialisés par des flèches et ceux représentatifs des génotypes, par des carrés. A partir de cette représentation graphique, on a pu faire les observations suivantes.

En ce qui concerne la comparaison des tests technologiques, on note tout d'abord que les critères suivants: teneur en protéines, teneurs en gluten sec et en gluten humide ont des points représentatifs regroupés et situés vers la droite du plan. Cet ensemble de points permet de définir un axe, proche de l'axe horizontal et recouvrant des paramètres essentiellement quantitatifs avec, schématiquement, de gauche à droite, un gradient de teneurs en protéines croissantes.

On note par ailleurs que les différents tests de sédimentation (Zeleny, Zeleny/protéines et SDS) sont assez bien reliés entre eux, ainsi que, dans une moindre mesure, avec l'indice G de l'Alvéographe. Les caractéristiques viscoélastiques du gluten, plus particulièrement la recouvrance élastique, présentent également une assez bonne concordance avec les tests de sédimentation, tout cela confirmant les corrélations présentées dans le Tab. 2. Cet ensemble de tests dont les flèches représentatives sont orientées vers le bas de la figure semble définir un deuxième axe, proche de l'axe vertical du plan et donc grossièrement orthogonal à l'axe de la teneur en protéines. Ce second axe semble définir un autre paramètre de la force boulangère, indépendant de la teneur en protéines et qui correspondrait donc à l'aspect qualitatif ou rhéologique de la pâte et du gluten, dont on sait qu'il constitue une donnée davantage intrinsèque à la variété (38-40, 42).

On trouve également, dans la partie supérieure du tableau, à l'opposé des critères de sédimentation, le critère hydratation du gluten, ce qui est normal compte tenu de la relation plutôt négative qui existe entre ce critère et la force du gluten (4, 43). On confirme d'autre part que les tests de rendement en gluten et de fermeté de ce gluten occupent des positions quasiment opposées sur le plan, ce qui illustre les corrélations négatives (-0.72 et -0.65) trouvées entre eux. Enfin, le paramètre W de

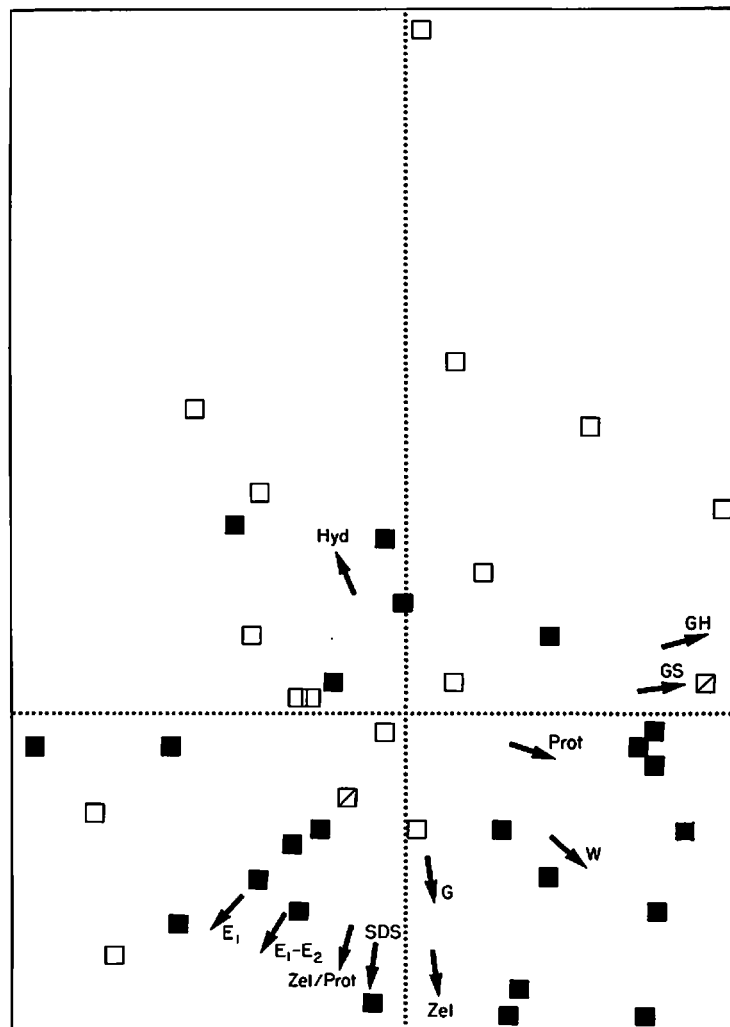


Fig. 2 Analyse en composantes principales: distribution des 42 génotypes (récolte 1983) et des 11 tests technologiques dans le premier plan principal (une échelle différente a été utilisée pour les génotypes et pour les tests). Voir Tab. 2 pour la signification des abréviations utilisées. Génotypes possédant des sous-unités de type 2-12 (□), 5-10 (■), autres (▨)

l'Alvéographe occupe une position intermédiaire entre les deux axes définis ci-dessus, ce qui est en accord avec le fait que, dans la limite de cet ensemble de génotypes, l'indice *W* (Tab. 2) apparaît à la fois corrélé à la teneur en protéines et à l'indice de Zeleny.

En ce qui concerne les relations entre tests de technologie et composition en sous-unités gluténines, l'observation la plus intéressante qui ressort de cette représentation graphique est que les points correspondant aux génotypes possédant le type no. 5-10 (carrés noirs) et ceux correspondant aux génotypes possédant le type no. 2-12 (carrés blancs) sont partiellement séparés sur le plan. Les premiers se situent en majorité (18 sur 23) dans le bas du tableau, du côté de l'axe défini par les valeurs élevées des indices de sédimentation et de viscoélasticité du gluten. C'est dans ce groupe qu'on trouve les variétés de potentiel de qualité élevé telles que Florence-Aurore, INIA 66 ou Pavon S. Les derniers se situent par contre en majorité (13 sur 17) dans la partie supérieure du tableau, du côté des faibles valeurs des indices de sédimentation et de viscoélasticité du gluten. C'est dans ce groupe qu'on trouve par exemple les variétés de faible potentiel de qualité Mahon Demias ou Anza. Ainsi se trouve donc illustrée la comparaison des moyennes des tests technologiques entre les génotypes de types no. 5-10 et 2-12 respectivement (Tab. 5). En revanche, si l'on projette tous les points représentatifs des génotypes sur l'axe horizontal, on n'observe aucune distinction liée à la composition en gluténines no. 5-10 ou 2-12, ce qui est en accord avec l'absence de

différence significative trouvée entre ces deux familles au niveau des teneurs en protéines ou en gluten.

Comme cela ressortait ci-dessus des coefficients de corrélations, certes significatifs, mais d'un niveau relativement faible, il est certain que la séparation des deux groupes n'est pas absolue car chacune des données de qualité est extrêmement complexe en soi et a peu de chances d'être expliquée en totalité par un ou deux constituants gluténines seulement. D'autres constituants protéiques (gluténines de faible poids moléculaire, gliadines) ou lipidiques interviennent d'ailleurs peut-être aussi dans les bases biochimiques de la qualité. Le rôle des autres sous-unités gluténines n'est également pas nul comme on l'a montré dans les Tab. 4a et 4b. Une interprétation utilisant simultanément les autres 'allèles', notamment ceux codés au niveau des chromosomes 1A (no. 1 ou 2*) et 1B (no. 7-8, 7-9 ou 13-16) permet en effet dans certains cas (résultats non fournis) d'affiner la séparation et d'accroître la significativité des différences.

Quoi qu'il en soit, la conclusion la plus importante est qu'au sein du nouveau pool génétique de blés algériens étudié dans ce travail, on confirme après deux années d'étude l'existence de différences significatives de qualité associées à la présence de certaines sous-unités gluténines de haut poids moléculaire. Comme cela est déjà le cas dans d'autres pays, ce résultat permet donc d'envisager, pour l'Algérie, l'utilisation de l'électrophorèse en sélection. Un choix judicieux des géniteurs et un tri des lignées présentant les électrophorogrammes favorables pour la qualité doit en effet certainement accroître la probabilité de retenir des

génotypes présentant des potentiels élevés de qualité boulangère.

Essai de mise en évidence de différence de fonctionnalité entre différents types de sous-unités gluténines

L'approche utilisée ci-dessus, c'est-à-dire la recherche de corrélations entre une composition protéique et des données de qualité, ne permet nullement de conclure quant à la nature de la relation mise en évidence. Dans l'hypothèse où il y aurait relation de cause à effet, il devrait *a priori* être possible de mettre en évidence des différences de comportement entre les sous-unités corrélées positivement et celles corrélées négativement à la qualité. Cela nous a amenés à envisager une approche davantage dynamique du problème en nous fondant sur l'idée que la force boulangère doit reposer en partie sur une aptitude des protéines de la farine à former (au cours des différentes étapes de la panification ou plus simplement au cours de l'extraction du gluten) des complexes, des agrégats insolubles, un réseau extensible résistant à la poussée d'un gaz. Une force boulangère élevée devrait donc signifier, schématiquement, une aptitude élevée des protéines à interagir, à s'agréger, à s'insolubiliser, à entrer dans des complexes. D'où l'idée de comparer simplement la nature des protéines extractibles (au moyen de solvants non réducteurs afin de préserver au maximum l'intégrité des complexes protéiques) à partir d'un gluten natif et d'un gluten ayant subi des traitements thermiques pendant des durées différentes.

Cette expérience a été réalisée à partir de huit des génotypes de la récolte 1983 possédant des niveaux différents de force boulangère et des électrophorogrammes gluténines différents. Parmi les différents solvants qui ont été préalablement testés, c'est l'éthanol dilué (70% v/v) qui s'est révélé le plus discriminant, le plus apte à mettre en évidence des différences entre les comportements des différentes sous-unités, en précisant que les surnageants des extraits éthanoliques obtenus à partir de la farine ou des glutes ont été dans tous les cas dialysés, lyophilisés, puis au moment de l'électrophorèse, repris par le tampon réducteur Tris-SDS-mercaptoéthanol, cette procédure étant indispensable pour visualiser les sous-unités gluténines sur les électrophorogrammes.

A titre d'exemple, la Fig. 3 montre l'évolution de ces

électrophorogrammes dans le cas de quatre des génotypes analysés: 221 (type 2*-5-17-18-10), Mahon Demias (2-2*-14-15-12), INIA 66 (1-5-17-18-10) et 224 (1-5-7-9-10).

Plusieurs observations importantes peuvent être faites à partir de l'ensemble de ces résultats. Un extrait de gluten par l'éthanol dilué contient essentiellement des gliadines et des sous-unités gluténines de faible poids moléculaire (zones B, C et D), mais également des sous-unités de haut poids moléculaire parfaitement identifiables, illustrant une nouvelle fois la difficulté d'obtenir une séparation absolue entre ces différentes familles protéiques. D'une façon générale, le traitement thermique du gluten tend naturellement à insolubiliser les protéines. Comme cela a été précédemment rapporté par McCausland et Wrigley (51) et Meier *et al.* (52) dans le cas des blés tendres et par Autran et Berrier (53) dans le cas des blés durs, on observe cependant que la cinétique d'insolubilisation est différente d'un groupe protéique à un autre. Ainsi, les protéines de la zone B, constituées en majorité d'oméga-gliadines, demeurent extractibles, même après des traitements thermiques prolongés (dans un gluten traité 30 min, elles semblent d'ailleurs constituer la majeure partie des protéines extractibles). Cela s'explique aisément par le fait que ces fractions ne possèdent pas ou très peu d'acides aminés soufrés, ne tendent donc pas à former des agrégats mettant en jeu des liaisons S-S (14) et résistent ainsi remarquablement à la dénaturation thermique. Par contre, tous les autres groupes protéiques tendent plus ou moins rapidement à s'atténuer sur les diagrammes, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'ils participent progressivement à des complexes insolubles au cours des processus, de formation du réseau glutineux tout d'abord, de 'cuisson' du gluten ensuite. Les principales fractions gliadines (zone D) s'atténuent ainsi très progressivement, montrant une certaine résistance à la dénaturation thermique, mais, à l'inverse, les sous-unités de haut poids moléculaire disparaissent beaucoup plus tôt, ce qui tend à démontrer leur plus grande 'réactivité', leur plus grande aptitude à entrer dans des complexes insolubles. Si l'on se concentre sur les différentes sous-unités de haut poids moléculaire, on constate toutefois (contrairement à ce qui a été observé sur des gluténines de blé dur (53)) des comportements assez divers. En comparaison du témoin constitué par l'ensemble des protéines réduites de la farine, certaines sous-

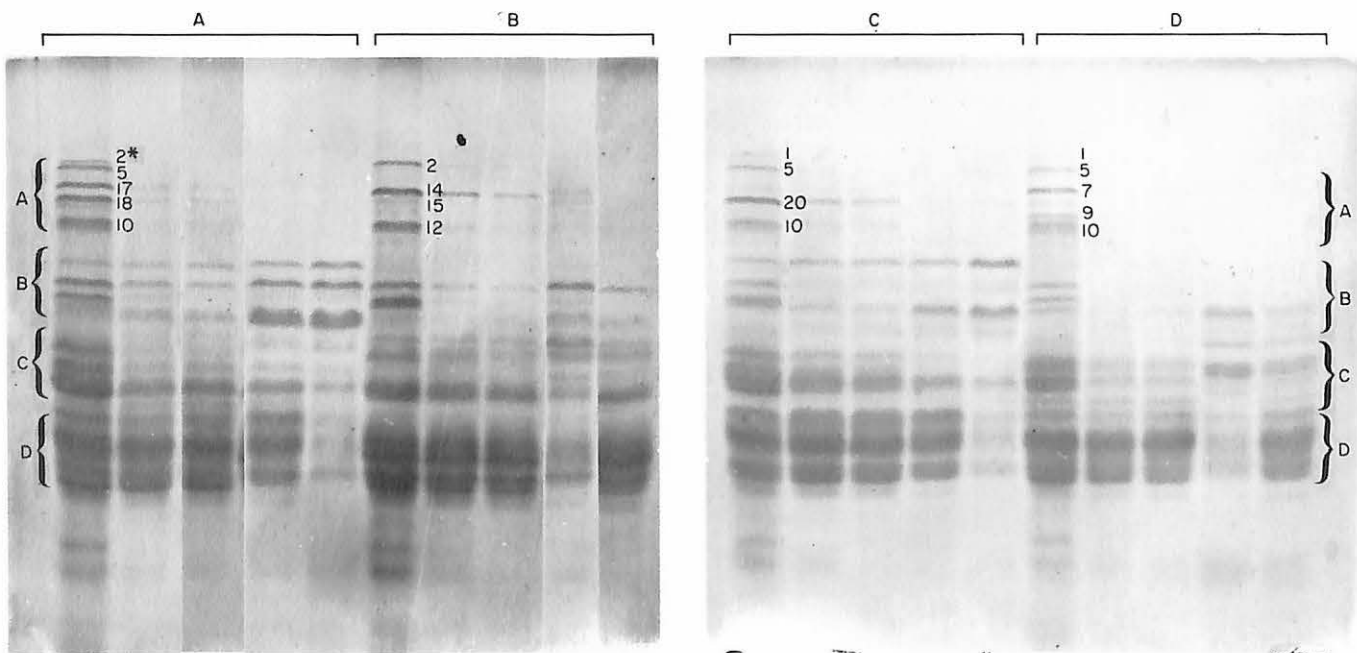


Fig. 3 Exemples de diagrammes électrophorétiques (SDS-PAGE) de protéines extraites par l'éthanol 70% à partir de glutes ayant subi différents traitements au bain-marie bouillant. 1, Témoin protéines totales réduites extraites de la farine; 2, gluten natif; 3, gluten traité 1 min; 4, gluten traité 1 min; 5, gluten traité 30 min. A, Lignée 221; B, variété Mahon Demias; C, variété INIA 66; D, lignée 224

unités ne sont pratiquement jamais visibles, même dans l'extrait éthanolique de gluten non traité, alors que d'autres sont décelables y compris dans des glutens traités 1 ou 10 min. Dans la première catégorie entrent les bandes 1, 2, 2*, 5, 9 et 10. Dans la deuxième catégorie entrent les bandes 7, 8, 12, 14-15, 17-18 et 20. Aucune conclusion n'a pu être obtenue sur les sous-unités 13 et 16. Si l'on tente ensuite de rapprocher ce résultat des calculs de corrélations effectués ci-dessus, il est extrêmement important d'observer que, précisément, toutes les sous-unités pour lesquelles on a mis en évidence une relation positive avec la qualité (indices de sédimentation, fermeté du gluten) (no. 1, 2*, 5 et 10) entrent dans la catégorie des protéines qui ont une forte tendance à l'insolubilisation. A l'inverse, plusieurs sous-unités dont la présence est négativement corrélée (no. 12 et 14) ou n'est pas corrélée (no. 7, 8 et 10) aux différents paramètres de la qualité entrent dans la catégorie des protéines qui demeurent plus facilement solubilisables.

Bien que la séparation entre les comportements des différents types de sous-unités ne soit pas absolue (la tendance à l'insolubilisation des protéines no. 9, 17 et 18 n'a pu, par exemple, être reliée à aucune corrélation particulière), ce résultat est cependant important à souligner car il constitue, selon nous, un des rares exemples de démonstration d'une liaison entre une relation d'origine génétique et une propriété fonctionnelle.

Si l'on examine plus en détail la constitution génétique des groupes de sous-unités de haut poids moléculaire, on est amené à observer que le comportement des sous-unités appartenant à un même 'bloc allélique' n'est pas toujours le même. S'il y a bien simultanément dans l'insolubilisation des protéines no. 5 et 10 dont on sait qu'elles forment un 'bloc' d'allèles étroitement liés du chromosome 1DL, il n'en est pas de même des protéines no. 7 et no. 9 (la no. 9 disparaissant bien avant la no. 7) et surtout des protéines du bloc très fréquemment rencontré no. 2-12 (la no. 2 s'insolubilisant plus rapidement que la no. 12). Cette observation ne constitue cependant pas une anomalie car il n'est pas exclu que des protéines codées par des gènes étroitement liées puissent avoir des propriétés fonctionnelles différentes. Ce problème a d'ailleurs été discuté dans le cas du bloc Glu-B1 des blés tendres (A) ou des blés durs (53) au sein duquel, parmi les constituants oméga et gamma-gliadines ainsi que gluténines de faible poids moléculaire, seuls ces derniers sembleraient présenter un rôle fonctionnel notable, les autres ne semblant être que des marqueurs génétiques. Dans le cas du bloc allélique no. 2-12 considéré ici (dont on sait d'ailleurs qu'il est codé par deux loci légèrement distants: 1DX et 1DY (A)), on pourrait également imaginer que seule la sous-unité no. 2 présente des propriétés défavorables, la no. 12 n'étant négativement corrélée à la qualité qu'en raison de la relative proximité de son gène avec celui de la sous-unité no. 2.

Il est certain qu'en matière de relations entre propriétés fonctionnelles et composition protéique, beaucoup d'autres questions demeurent posées et que seules des études de biologie moléculaire qui fourniront des séquences nucléotidiques complètes des gènes, permettant ainsi de prédire les structures secondaires et l'aptitude à l'agrégation des protéines correspondantes, apporteront des réponses complètes à ce problème.

Discussion générale et conclusion

L'analyse d'une importante collection représentative des blés tendres actuellement sélectionnés et cultivés en Algérie, a permis de rassembler un grand nombre de données technologiques sur des géotypes qui étaient mal connus de ce point de vue. Il a notamment été mis en évidence des types extrêmement diversifiés, depuis des blés de force boulangère très élevée (INIA 66, Pavon 'S', Florence Aurore) jusqu'à des blés médiocres ou de très faible qualité (Mahon Demias, Anza, Strampelli). Bien que l'objet du travail n'ait pas été de porter un jugement

définitif sur l'intérêt et la fiabilité des tests technologiques, on a cependant confirmé, pour la sélection de géotypes algériens, l'intérêt de microtests d'appréciation de la qualité tels que le test de Zeleny, le rapport Zeleny/protéines, l'indice de sédimentation SDS et les caractéristiques viscoélastiques du gluten (recouvrement élastique et fermeté), dont les résultats, très peu influencés par la teneur en protéines des échantillons, semblent permettre de bien prendre en compte la qualité boulangère intrinsèque des géotypes.

Considérant ensuite que les différences variétales de qualité reposent très certainement sur l'aptitude des protéines—particulièrement des gluténines—à s'associer et à former des complexes, des agrégats, au cours des processus technologiques, on a réalisé une étude de la composition électrophorétique des sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (70 000-130 000 daltons). Ce travail a permis tout d'abord de retrouver chez les géotypes algériens des types d'allèles déjà identifiés dans des collections de blés anglais ou français, mais avec des fréquences différentes. Si on rencontre ici des allèles très communs comme les no. 1, 2*, 2-12, 5-10, 7-8 ou 7-9, on rencontre aussi dans de nombreux géotypes algériens les allèles no. 13-16, 14-15 ou 17-18, qui sont très peu répandus chez les blés européens.

Des calculs de coefficients de corrélations, complétés par des analyses en composantes principales, ont permis en outre de montrer, sur les deux années d'étude, qu'il existait des relations entre les résultats de certains tests technologiques et la présence de certaines sous-unités gluténines. Les valeurs des différents indices de sédimentation, du *W* de l'Alvéographe et de la fermeté du gluten sont ainsi généralement corrélées de façon positive à la présence des sous-unités no. 1, 5-10 et 13-16 et de façon négative à la présence des sous-unités 2-12, résultats d'autant plus remarquables que des relations allant dans le même sens ont été trouvées au sein de pools génétiques différents tels que celui des blés européens. Bien qu'une étude complète de l'effet propre des allèles portés par chacun des chromosomes (abstraction faite de l'effet des autres allèles) n'ait pu être réalisée faute de disposer d'un effectif suffisant de toutes les combinaisons possibles, il a cependant été possible de classer et de différencier de façon significative, en fonction de leur effet apparent sur le *W* et l'indice SDS, quelques-unes des sous-unités gluténines. Un tel résultat semble permettre d'ores et déjà d'intégrer l'outil biochimique à la panoplie de tests de prédiction de la qualité en sélection déjà existants en Algérie. Une simple recherche électrophorétique des types gluténines de haut poids moléculaire positivement associés à la qualité peut en effet permettre d'identifier les lignées possédant un potentiel élevé de qualité boulangère.

Il est bien certain que la qualité boulangère demeure une notion extrêmement complexe, mettant en jeu, outre l'aspect quantitatif des protéines, de nombreux constituants (gliadines, glycoprotéines, enzymes, lipides) et pouvant donc difficilement être expliquée en totalité par un ou deux paramètres biochimiques simples. Cela est d'ailleurs en accord avec le niveau des corrélations trouvées avec les sous-unités gluténines lequel, tout en étant significatif, reste relativement faible. Pour une lignée en cours de sélection, on peut donc considérer l'appartenance à un type électrophorétique, par exemple no. 5-10, comme une condition nécessaire, mais non forcément suffisante, à l'expression d'une qualité élevée. Il est cependant possible au sélectionneur, par un choix judicieux des géniteurs et un screening dans la descendance des croisements d'associer sur le même géotype le maximum de constituants positivement associés à la qualité. L'utilisation d'une méthode biochimique telle que l'électrophorèse en sélection variétale, avec les nombreux avantages qu'elle possède (miniaturisation, possibilité de travailler sur de grandes séries et à un stade précoce, y compris sur un demi-grain à la génération F₂, rapidité, informatisation possible de la saisie et du traitement des données, déterminisme génétique simple des constituants

protéiques séparés) est donc en mesure d'aider à l'efficacité de la sélection et à l'amélioration progressive du potentiel de qualité des génotypes.

Dans la dernière partie de ce travail on a cherché à mieux expliquer certaines bases physicochimiques des corrélations observées entre les données de qualité et la présence de sous-unités gluténines particulières. Le simple fait de former un gluten et de le soumettre à un traitement thermique a ainsi mis en évidence une tendance différente de certaines sous-unités à s'insolubiliser, comme si elles possédaient une aptitude supérieure à s'associer, à former des liaisons, à entrer dans des complexes. Il est particulièrement frappant d'observer que les sous-unités ainsi repérées sont, pour la plupart, celles (notamment les no. 1, 2*, 5 et 10) qui ont été trouvées positivement associées à la qualité (W , indices de sédimentation). Bien qu'il s'agisse d'un résultat encore préliminaire, qui demande à être confirmé sur de nouveaux échantillons d'origine génétique différente, il s'agit selon nous d'un point important à souligner car c'est un des tous premiers exemples de démonstration d'une liaison entre une relation génétique et une propriété fonctionnelle.

Cette recherche devra dans l'avenir être poursuivie et élargie à l'étude des autres fractions gluténines, notamment celles de 'faible poids moléculaire' qui entrent également dans la composition des agrégats du gluten et de la pâte. Des preuves plus directes de la fonctionnalité des différents constituants protéiques devront également être recherchées au niveau moléculaire, grâce à l'étude complète des séquences de gènes.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Gérard Branlard et Mme Mireille Dardevet de la Station d'Amélioration des Plantes INRA de Clermont-Ferrand pour l'aide qu'ils leur ont apportée dans l'identification des bandes électrophorétiques gluténines.

Bibliographie

- BIETZ, J.A., SHEPHERD, K.W. AND WALL, J.S. Single kernel analysis of glutenin: use in wheat genetics and breeding. *Cereal Chemistry*, **52**, 513-532 (1975)
- FEILLET, P. Contribution à l'étude des protéines du blé. Influence des facteurs génétiques, agronomiques et technologiques. *Annales de Technologie Agricole*, **14** (numéro hors série), 94pp. (1965)
- FINNEY, K.F. Fractionating and reconstituting techniques to relate functional (breadmaking) to biochemical properties of bread wheat components. *Cereal Science Today*, **16**, 342-356 (1971)
- HOULIAROPOULOS, E. Détermination, utilisation en sélection variétale et bases biochimiques des propriétés viscoélastiques du gluten de blé tendre. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 123 pp. (1982)
- JEANJEAN, M.F. AND FEILLET, P. Eine neue biochemische Methode zur Ermittlung der Backfähigkeit von Weichweizen. *Getreide, Mehl und Brot*, **33** (5), 127-130 (1979)
- ORTH, R.A. AND BUSHUK, W. A comparative study of the proteins of wheat of diverse baking quality. *Cereal Chemistry*, **49**, 268-275 (1972)
- ORTH, R.A. AND O'BRIEN, L. A new biochemical test of dough strength of wheat flour. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, **42**, 122-124 (1976)
- POMERANZ, Y. Dispersibility of wheat protein in aqueous urea solutions: a new parameter to evaluate breadmaking potentialities of wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **16**, 586-593 (1965)
- ARAKAWA, T. AND YONEZAWA, D. Compositional difference of wheat gluteins in relation to their aggregation behaviour. *Agricultural and Biological Chemistry*, **39**, 2123-2182 (1975)
- ARAWAKA, T., YOSHIDA, M., MORISHITA, H., HONDA, J. AND YONEZAWA, D. Relation between aggregation behaviour of glutenin and its polypeptide composition. *Agricultural and Biological Chemistry*, **41**, 995-1001 (1977)
- HUEBNER, F.R. AND WALL, J.S. Fractionation and quantitative differences of glutenin from wheat varieties varying in baking quality. *Cereal Chemistry*, **53**, 258-269 (1976)
- BUSHUK, W. Flour proteins: structure and functionality in dough and bread. *Cereal Foods World*, **30** (7), 447-451 (1985)
- KASARDA, D.D., BERNARDIN, J.E. AND NIMMO, C.C. Wheat proteins. In: POMERANZ, Y. (Ed.), *Advances in Cereal Science and Technology*, Vol. 1. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, pp. 158-236 (1976)
- MIFLIN, B.J., FIELD, J.M. AND SHEWRY, P.R. Cereal storage proteins and their effect on technological properties. In: DAUSSANT, J., MOSSE, J. AND VAUGHAN, J. (Eds), *Seed Proteins. Phytochemistry Society of Europe Symposium, Series No. 20*. London: Academic Press, 255-319 (1983)
- BIETZ, J.A. AND WALL, J.S. Identification of high molecular weight gliadin and ethanol-soluble glutenin subunits in wheat: relation to gluten structure. *Cereal Chemistry*, **57**, 415-421 (1980)
- PAYNE, P.I. AND CORFIELD, K.G. Subunit composition of wheat glutenin proteins isolated by gel filtration in a dissociating medium. *Planta*, **145**, 83-88 (1979)
- PAYNE, P.I., HOLT, L.M., JACKSON, E.A. AND LAW, C.N. Wheat storage proteins: their genetics and their potential for manipulation by plant breeding. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, **304**, 359-371 (1984)
- PAYNE, P.I., JACKSON, E.A., HOLT, L.M. AND LAW, C.N. Genetic linkage between endosperm storage protein genes on each of the short arms of chromosomes 1A and 1B in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, **67**, 235-243 (1984)
- PAYNE, P.I., HOLT, L.M., JARVIS, M.G. AND JACKSON, E.A. Two-dimensional fractionation of the endosperm proteins of bread wheat (*Triticum aestivum*): biochemical and genetic studies. *Cereal Chemistry*, **62** (5), 319-326 (1985)
- SHEWRY, P.R., TATHAM, A.S., FORDE, J., KREIS, M. AND MIFLIN, B.J. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science*, **4**, 97-106 (1986)
- PAYNE, P.I., HARRIS, P.A., LAW, C.N. HOLT, L.M. AND BLACKMAN, J.A. The high-molecular weight subunits of glutenin: structure, genetics and relationship to bread-making quality. *Annales de Technologie Agricole*, **29** (2), 309-320 (1980)
- BURNOUF, T. AND BIETZ, J.A. Chromosomal control of glutenin subunits in aneuploid lines of wheat: analysis by reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Theoretical and Applied Genetics*, **70**, 610-619 (1985)
- PAYNE, P.I., LAW, C.N. AND MUDD, E.E. Control by homologous group 1 chromosomes of the high-molecular weight subunits of glutenin, a major protein of wheat endosperm. *Theoretical and Applied Genetics*, **58**, 113-120 (1980)
- FORDE, J., MALPICA, J.M., HALFORD, N.G., SHEWRY, P.R., ANDERSON, O.D., GREENE, F.C. AND MIFLIN, B.J. The nucleotide sequence of a HMW subunit gene located on chromosome 1A of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Nucleic Acids Research*, **13** (9), 6817-6832 (1985)
- THOMPSON, R.D., BARTELS, D. AND HARBERD, N.P. Nucleotide sequence of a gene from chromosome 1D of wheat encoding a HMW-glutenin subunit. *Nucleic Acid Research*, **13** (19), 6833-6846 (1985)
- PAYNE, P.I., CORFIELD, K.G. AND BLACKMAN, J.A. Identification of a high-molecular weight subunit of glutenin whose presence correlates with breadmaking quality in wheats of related pedigree. *Theoretical and Applied Genetics*, **55**, 153-159 (1979)
- PAYNE, P.I., CORFIELD, K.G., HOLT, L.M. AND BLACKMAN, J.A. Correlation between the inheritance of certain high-molecular weight subunits of six crosses of bread wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **32**, 51-60 (1981)
- BRANLARD, G. AND LE BLANC, A. Les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire des blés tendres et des blés durs cultivés en France. *Agronomie*, **5** (6), 467-477 (1985)
- BRANLARD, G. AND DARDEVET, M. Diversity of grain protein and bread wheat quality. II. Correlation between high molecular weight subunits of glutenin and flour quality characteristics. *Journal of Cereal Science*, **3**, 345-354 (1985)
- MAUZE, C., RICHARD, M. AND SCOTTI, G. Détermination du gluten. In: MAUZE, C., RICHARD, M. ET SCOTTI, G. (Eds), *Contrôle de la Qualité des Blés: Guide Pratique*. Paris: Institut Technique des Céréales et Fourrages, pp. 131-134 (1972)
- BOURDET, A. AND BERRIER, R. Le test Zeleny et la préparation des farines expérimentales. *Techniques des Industries Céréalières*, **149**, 13-18 (1975)
- AXFORD, D.W.E., MCDERMOTT, E.E. AND REDMA, D.G. Small-scale tests of breadmaking quality. *Milling Feed Fertilizer*, **161**, 18-20 (1978)
- BOURDET, A., BERRIER, R. AND AUTRAN, J.C. Essai de cuisson miniaturisé pour apprécier la force des blés tendres. *La Meunerie Française*, **295**, 11-14 (1973)

- 34 FEILLET, P., ABECASSIS, J. AND ALARY, R. Description d'un nouvel appareil pour mesurer les propriétés viscoélastiques des produits céréaliers. Application à l'appréciation de la qualité du gluten, des pâtes alimentaires et du riz. *Bulletin de l'Ecole Nationale Supérieure de Meunerie et des Industries Céréalières*, 278, 97-101 (1977)
- 35 DAMIDAUX, R. AND FEILLET, P. Relation entre les propriétés viscoélastiques du gluten cuit, la teneur en protéines et la qualité culinaire des blés durs (*T. durum*). *Annales de Technologie Agricole*, 27, 799-808 (1978)
- 36 PAYNE, P.I. AND LAWRENCE, G.J. Catalogue of alleles for the complex gene loci, Glu-A1, Glu-B1 and Glu-D1 which code for high-molecular weight subunits of glutenin in hexaploid wheat. *Cereal Research Communications*, 11 (1), 29-33 (1983)
- 37 AUTRAN, J.C., ABECASSIS, J. AND FEILLET, P. Statistical evaluation of different technological and biochemical tests for quality assessment in durum wheats. *Cereal Chemistry*, 63 (5), 390-394 (1986)
- 38 BOURDET, A. La biochimie du pain. *La Recherche*, 74, 37-46 (1977)
- 39 GODON, B. Détermination aux derniers stades de la sélection de la valeur d'utilisation des blés tendres dans les industries de cuisson. *Annales de l'Amélioration des Plantes*, 25 (4), 411-428 (1975)
- 40 MONNEVEUX, R., MERLE, J.C. AND BLANC, J.F. Amélioration de la qualité pastière du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Etude des relations entre les diagrammes électrophorétiques des gliadines et certaines caractéristiques technologiques. *Agronomie*, 4 (1), 1-10 (1984)
- 41 QUICK, J.J. AND DONNELLY, B.J. A rapid test for estimating durum wheat quality. *Crop Science*, 20, 816-818 (1980)
- 42 ROUSSET, M. AND AUTRAN, J.C. La qualité des blés. In: BURE, J. (Ed.), *Le Pain*. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique, pp. 15-42 (1979)
- 43 AUTRAN, J.C., GODON, B., KOBREHEL, K., LAIGNELET, B. AND POPINEAU, Y. Recherche de tests de prévision et d'appréciation des caractéristiques quantitatives et qualitatives du gluten de blé. *Sciences des Aliments*, 6, 447-469 (1986)
- 44 ROUSSET, M., TRIBOI, E., BRANLARD, G. AND GODON, B. Influence du génotype et du milieu sur les tests d'appréciation de la valeur d'utilisation du blé tendre (*Triticum aestivum* em. Thell.) dans les industries de cuisson. *Agronomie*, 5 (7), 653-663 (1985)
- 45 BURNOUF, T. AND BOURIQUET, R. Glutenin subunits of genetically related European hexaploid wheat cultivars. Their relation to breadmaking quality. *Theoretical and Applied Genetics*, 58, 107-111 (1980)
- 46 MOONEN, J.H.E., SDHEEPSTRA, A. AND GRAVELAND, A. The positive effects of the high molecular weight subunits 3 + 10 and 2* of glutenin on the bread-making quality of wheat cultivars. *Euphytica*, 32 (3), 735-742 (1983)
- 47 BRANLARD, G. AND ROUSLI, M. Les caractéristiques électrophorétiques des gliadines et la valeur en panification du blé tendre. *Annales de l'Amélioration des Plantes*, 30 (2), 133-149 (1980)
- 48 BRANLARD, G. Correlation between gliadin bands. *Theoretical and Applied Genetics*, 64, 163-168 (1983)
- 49 DAMIDAUX, R., AUTRAN, J.C., GRIGNAC, P. AND FEILLET, P. Relation applicable en sélection entre l'électrophorogramme des gliadines et les propriétés viscoélastiques du gluten de *Triticum durum* Desf. *Compte Rendus des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, 287, Série D, 701-704 (1978)
- 50 WRIGLEY, C.W., LAWRENCE, G.J. AND SHEPHERD, K.W. Association of glutenin subunits with gliadin composition and grain quality in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 15-30 (1982)
- 51 MCCAUSLAND, J. AND WRIGLEY, C.W. Electrophoretic analysis of wheat and rye mixtures in meal, flour and baked goods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 27, 1197-1202 (1976)
- 52 MEIER, P., WINDEMANN, H. AND BAUMGARTNER, E. Aufrennung von Gesamtgliadin aus unterschiedlich hitzebelasteten Weizenmehlen mittels Phasenumkehr-Hochdruckflüssig-Chromatographie. *Zeitschrift fuer Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung*, 180, 467-473 (1985)
- 53 AUTRAN, J.C. AND BERRIER, R. Durum wheat functional protein subunits revealed through heat treatments. Biochemical and genetic implications. In: GRAVELAND, A. AND MOONEN, J.H.E. (Eds), *Gluten Proteins. Proceedings of the 2nd International Workshop on Gluten Proteins, Wageningen, the Netherlands*. Wageningen, The Netherlands: Institute for Cereals, Flour and Bread TNO, pp. 175-183 (1984)