

Bases biochimiques du brunissement des pâtes alimentaires

Feillet P., Autran J.C., Icard-Vernière C.

in

Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.).
Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges

Zaragoza : CIHEAM

Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40

2000

pages 431-438

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=60007_1

To cite this article / Pour citer cet article

Feillet P., Autran J.C., Icard-Vernière C. **Bases biochimiques du brunissement des pâtes alimentaires.** In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges* . Zaragoza : CIHEAM, 2000. p. 431-438 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40)



<http://www.ciheam.org/>
<http://om.ciheam.org/>

Bases biochimiques du brunissement des pâtes alimentaires

P. Feillet, J.C. Autran et C. Icard-Vernière

Unité de Technologie des Céréales et des Agro-polymères, Institut National de la Recherche Agronomique, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 1, France

RESUME – La couleur des pâtes alimentaires résulte de la superposition d'une composante jaune, recherchée, et d'une composante brune, indésirable. On avance l'hypothèse que le brunissement des pâtes est la somme du brunissement intrinsèque de l'albumen (paramètre dominant dans le cas où la semoule transformée est peu contaminée par les parties périphériques du grain), de réactions enzymatiques (activité des polyphénol oxydases) dont l'intensité dépend du degré de pureté des semoules, et de réactions de Maillard pouvant se produire lorsque des températures élevées de séchage sont utilisées. De nouvelles cibles de sélection pour la création de variétés peu brunissantes sont proposées.

Mots-clés : Blé dur, pâte alimentaire, brunissement, polyphénol oxydase, réaction de Maillard, luminance intrinsèque de l'albumen.

SUMMARY – “Biochemical bases for the brownness of food pastas”. Color of pasta products results from the superposition of yellowness and brownness. It is hypothesised that pasta brownness is the sum of the intrinsic brownness of endosperm (main parameter if the processed semolina is not contaminated by the outer layer of the kernel), of enzymatic reactions (polyphenol oxidase activity) whose intensity depends on the purity of semolina and of Maillard reactions which could occur when high temperatures of drying are used. New breeding targets are identified.

Key words: Durum wheat, pasta product, brownness, polyphenol oxidase, Maillard reaction, intrinsic luminance of endosperm.

Introduction

L'aspect des pâtes alimentaires est déterminé par trois groupes de paramètres : la couleur (qui résulte de la superposition d'une composante jaune et d'une composante brune), le nombre et l'origine des piquûres (piquûres brunes dues à la présence de particules de sons, piquûres noires provenant de grains mouchetés) et la texture des produits (gerçures, bulles d'air, points blancs et état de surface des pâtes sèches qui dépendent des conditions de fabrication des pâtes). Les bases biochimiques de la composante jaune de la couleur, dont l'intensité dépend de la teneur en pigments caroténoïdes et en lipoxygénase de l'albumen, sont bien documentées. L'origine du brunissement est plus complexe et ses fondements physico-chimiques et technologiques font toujours l'objet de controverses (Feillet et Dexter, 1996).

Les travaux réalisés à la fin des années 60 ont montré que le brunissement des pâtes était une caractéristique variétale des blés durs mis en œuvre (Matsuo et Irvine, 1967) et que les variétés de type méditerranéen (Montferrier et Bidi 17 par exemple) possédaient des indices de brun très supérieurs à ceux de variétés d'origine nord-américaine telles que Lakota et Wells (Grignac, 1970). Les conditions de développement des blés durs sont néanmoins un facteur très important de l'expression de ce caractère. Selon Matsuo *et al.* (1982), l'analyse de 30 variétés cultivées pendant 2 années et en 2 lieux montre que les contributions de la variété, de l'année et du lieu de culture à la variance du brunissement des pâtes sont respectivement égaux à environ 15,7%, 0,9% et 68%. Ces résultats ont été confirmés plus récemment par Autran *et al.* (1986). En particulier, pour des échantillons issus de la même variété, le brunissement est d'autant plus important que la teneur en protéine du grain est élevée (Alause et Feillet, 1970 ; Grignac, 1970 ; Kobrehel *et al.*, 1974 ; Dexter *et al.*, 1982), mais les fondements physico-chimiques de cette relation ne sont pas connus.

Les bases moléculaires du brunissement des pâtes alimentaires demeurent mal connues. Deux hypothèses principales ont été émises :

(i) Selon Matsuo et Irvine (1967), le brunissement serait dû à la présence dans l'albumen d'une protéine cuivrique dont la teneur peut être appréciée en déterminant l'absorption à 400 nm d'un extrait aqueux de semoule.

(ii) Selon Kobrehel *et al.* (1972), la principale source de variation de l'indice de brun des variétés de blé dur est l'activité peroxydasique des semoules.

On sait, d'autre part, que le brunissement des pâtes est d'autant plus marqué que la teneur en matière minérale des produits de mouture est élevée (Irvine et Anderson, 1952 ; Houliaropoulos *et al.*, 1981). De plus, le brunissement s'accroît sensiblement lorsque des températures élevées sont appliquées en cours de séchage (Feillet *et al.*, 1974), suite à l'intensification des réactions de Maillard (Pagani *et al.*, 1992).

Ce travail a pour objet de préciser les bases moléculaires du brunissement des pâtes alimentaires. S'appuyant sur une analyse critique de la littérature et sur les résultats obtenus récemment dans notre unité de recherche, il montre que le brunissement des pâtes alimentaires serait fonction de la luminance intrinsèque de l'albumen des blés durs mis en œuvre, d'un brunissement d'origine enzymatique (polyphenol oxydases) lié au degré de purification des semoules et à la formation de composés de la réaction de Maillard dans certaines conditions de séchage.

Notion de brunissement et de luminance. Méthode de détermination

Pour un observateur, la coloration d'un spaghetti est le résultat d'une interaction entre la courbe A de visibilité de l'œil (luminance relative des couleurs du spectre émises à la même énergie) et la réflectance (courbe B) des produits examinés (Fig. 1). La courbe C qui résulte de cette interaction, obtenue en multipliant les ordonnées de la première courbe par celles de la seconde, appelée courbe de visibilité des pâtes, se différencie principalement de la courbe A par un aplatissement général dont rend compte la réflectance de la pâte à 550 nm. Celle-ci est d'autant plus faible que la pâte est moins lumineuse, c'est-à-dire plus grise, ou, suivant la terminologie des fabricants de pâte, plus "brune". La courbe de visibilité d'un produit idéalement blanc se superposerait avec la courbe de visibilité de l'œil ; celle d'un corps noir serait la droite d'ordonnée nulle. Dans le premier cas, la luminance serait égale à 100 et son complément à 100, l'indice de brun, égal à 0 ; dans le deuxième cas, luminance et indice de brun seraient respectivement égaux à 0 et à 100 (Alause et Feillet, 1970).

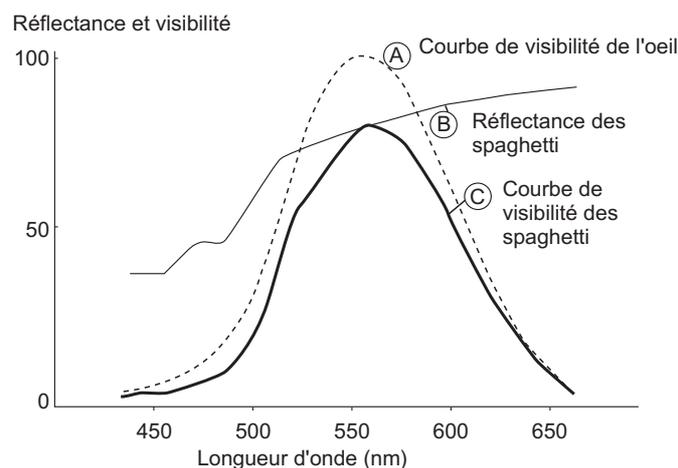


Fig. 1. Base physiologique de la perception du brunissement des pâtes alimentaires.

La luminance L^* , parfois appelée "clarté", est déterminée par spectrophotométrie de réflexion. On mesure simultanément L^* et les indices tristimulus b^* et a^* (CIE, 1986) : quand leurs valeurs sont positives, ces deux derniers indices rendent compte respectivement de la coloration plus ou moins jaune (présence de pigments caroténoïdes) et plus ou moins rouge (présence de produits de la réaction de Maillard) des produits.

Dans ce travail, L^* est mesuré par colorimétrie tristimulus ; le brunissement est égal à $(100 - L^*)$. La luminance intrinsèque de l'albumen (LIA), assimilée à celle des semoules purifiées, est déterminée selon la méthode décrite par Kobrehel *et al.* (1974) : 30 g de semoule sont comprimés sous forme d'un disque d'environ 10 mm d'épaisseur en appliquant une pression de 175 kg/cm² pendant 90 s ; on mesure ensuite la luminance des disques par colorimétrie tristimulus. La luminance potentielle des pâtes alimentaires (LPPA) est déterminée en transformant les semoules en disques de pâtes dans des conditions voisines de celles décrites par Matveef et Alause (1967) avec les deux modifications suivantes : une fois formé, le pâton est laissé pendant 2 heures à 40°C afin de permettre le développement d'un éventuel brunissement d'origine enzymatique ; après laminage, 4 disques de pâte sont découpés puis superposés avant compression sous 175 kg/cm² pendant 90 s de manière à former un disque d'épaisseur voisine de 4,5 mm.

Brunissement lié à la luminance intrinsèque de l'albumen

Les luminances de l'albumen de 11 variétés de blé dur, couvrant une gamme de variétés anciennes et récentes, et des disques de pâte correspondants sont données Table 1.

Table 1. Luminance de l'albumen et des disques de pâtes de 11 variétés de blé dur

Variétés	LIA [†]	LPPA ^{††}	Variétés	LIA	LPPA
Bidi 17	87,3	59,4	Lloyd	89,2	63,4
Agridur	88,3	59,2	Néodur	89,2	61,8
Exeldur	88,6	59,3	Ixos	89,4	61,8
Ardente	88,7	59,6	Excalibur	89,6	63,5
Exodur	89,1	63,3	Duriac	90,8	65,1
Galadur	89,1	61,8			

[†]LIA = Luminance intrinsèque de l'albumen.

^{††}LPPA = Luminance potentielle des pâtes alimentaires.

L'analyse de ces données conduit aux deux conclusions préliminaires suivantes :

(i) Il existe des différences importantes de LIA entre les variétés, l'écart entre les valeurs extrêmes atteignant 3,5 points : la semoule de Bidi 17 est foncée, celle de Duriac très claire.

(ii) Les valeurs de LIA et de LPPA sont liées par une corrélation hautement significative ($r = 0,84^{**}$).

La mesure de LIA et de LPPA de 150 lignées¹ issues des croisements Ixos x Lloyd, Néodur x Primadur et Néodur x Lloyd confirme ces premières conclusions : valeurs extrêmes des LIA respectivement égales à 86,7 et 92,3 ; coefficient de corrélation entre LIA et LPPA égal à 0,84^{**}.

Il ressort de cette série de résultats que la valeur de LIA est un facteur explicatif important de la valeur de LLPA. Compte tenu du bon accord entre cette conclusion, les hypothèses d'Irvine (1971) et les travaux de Kobrehel *et al.* (1974), la recherche de variétés de blé dur à faible LIA est donc un objectif que doivent se fixer les obtenteurs.

La question se pose alors d'identifier les bases moléculaires de LIA.

Les observations de Matsuo et Irvine (1967) selon lesquelles les extraits aqueux des semoules qui produisent les pâtes alimentaires les plus brunes sont systématiquement "rouge-bruns" sont de ce point de vue particulièrement intéressantes. Elles ont en effet été confirmées par Walsh (1970), puis par Matsuo *et al.* (1982) qui ont trouvé une corrélation hautement significative entre la luminance des pâtes alimentaires et l'absorption à 400 nm d'un extrait par l'eau des semoules. Les travaux plus récents de

¹ Aimablement fournies par P. Roumet, Unité de Génétique et d'Amélioration des Plantes, INRA, Montpellier.

Miskelly (1984) sur la coloration des nouilles chinoises fabriquées avec des farines de blés tendres aboutissent à la même conclusion.

Compte tenu d'une part de la similitude de composition en acides aminés de la "protéine brune" de Matsuo et Irvine (1967) et d'une *o*-diphénolase isolée du blé par Interesse *et al.* (1983), d'autre part d'une activité PPO importante dans l'albumen de blé dur en cours de maturation (Kruger, 1976), il est possible que la "protéine brune" soit le produit de la réaction entre une ou plusieurs PPO et leurs substrats au cours de la formation des grains. Des travaux sont en cours dans notre laboratoire pour vérifier cette hypothèse.

L'existence d'une corrélation élevée entre LIA et LPPA n'est pas cohérente avec les conclusions des travaux de Kobrehel *et al.* (1972) selon lesquelles l'activité peroxydasique (POD) des semoules jouerait un rôle essentiel dans le déterminisme du brunissement des pâtes alimentaires. Dans ce cas, en effet, des réactions de brunissement enzymatique se développeraient au cours de la fabrication des pâtes et devraient l'emporter sur la luminance initiale des semoules pour déterminer le brunissement final des produits. Nous avons donc cherché à vérifier si ces conclusions, obtenues après analyse d'un nombre limité de variétés appartenant à deux familles très différenciées de variétés de blé dur d'origine méditerranéenne ou nord-américaine, étaient généralisables.

Ainsi que l'illustre la Fig. 2, la valeur du coefficient de corrélation ($r = -0,37$) liant l'activité POD et LPPA de 88 échantillons de semoules de blés durs (15 variétés cultivées en 4 lieux dont deux avec deux niveaux d'apport azoté) infirme les résultats antérieurs. L'analyse des semoules des 150 lignées issues des croisements Ixos x Lloyd, Néodur x Primadur et Néodur x Lloyd confirme également l'absence de relation entre l'activité POD et LPPA ($r = -0,40$).

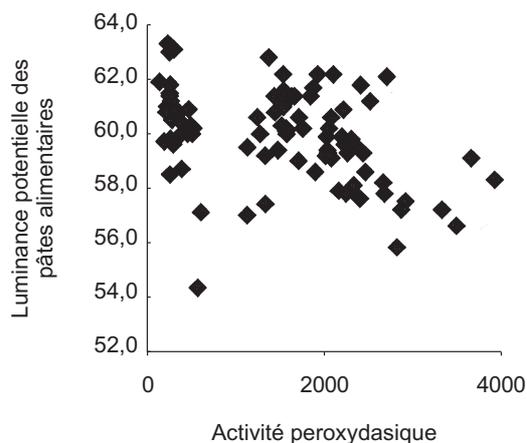


Fig. 2. Activité peroxydasique (POD) et luminance potentielle des pâtes alimentaires (LPPA) de 88 semoules de blé dur.

Les deux remarques suivantes confortent ces observations :

(i) Comme l'a récemment montré Icard-Vernière (1999), en bon accord avec les travaux de Delcros *et al.* (1998) sur les pâtes boulangères, les peroxidases ne sont probablement pas actives au cours de la fabrication des pâtes alimentaires, sans doute en raison de l'indisponibilité de peroxyde d'hydrogène, son substrat primaire.

(ii) L'activité POD des semoules, à l'opposé de la luminance des pâtes, est principalement contrôlée par l'origine génétique des blés.

Contrairement aux hypothèses émises au début des années 70, il est très peu probable que l'activité POD joue un rôle dans l'expression de LPPA. Il en est de même pour l'activité polyphénol oxydasique qui est voisine de zéro dans l'albumen (Kruger, 1976) et, donc également, dans les semoules lorsque celles-ci sont correctement purifiées.

Brunissement lié au degré de purification des semoules

Le degré de purification des semoules, apprécié par la teneur en matières minérales (TMM), exerce un effet prononcé sur le brunissement des pâtes alimentaires : plus la semoule est contaminée par les parties périphériques du grain, plus les pâtes correspondantes sont brunes et ternes (Feillet et Dexter, 1996). C'est ce qu'illustre la courbe de la Fig. 3. Si on élimine la farine B1 (identifiée par un carré dans la figure), dont le brunissement potentiel des pâtes alimentaires (BPPA) anormalement élevé est dû à sa contamination par les poussières présentes en surface et dans le sillon des grains, le coefficient de corrélation entre BBPA et TMM est $r = 0,953^{**}$.

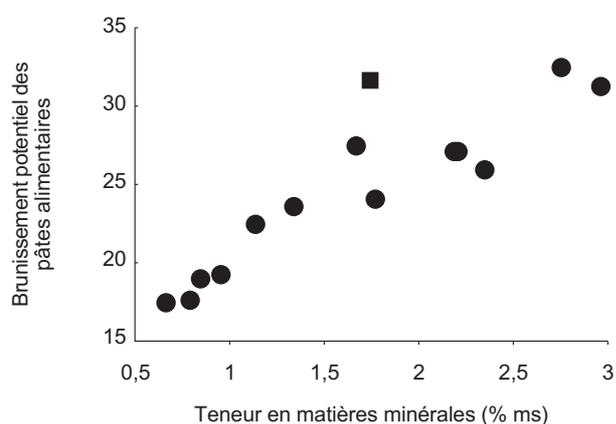


Fig. 3. Brunissement potentiel des pâtes alimentaires (BPPA) des produits de mouture de la variété de blé dur Valdur en fonction de leur teneur en matières minérales (d'après Houliaropoulos *et al.*, 1981).

La comparaison des valeurs de la luminance intrinsèque des produits de mouture LIPM (mesures faites sur produits secs et comprimés sous forme de disque comme dans le cas des semoules purifiées) aux valeurs LPPA de ces mêmes produits, montre que LPPA n'est pas corrélé à LIPM ($r = 0,15$), contrairement à ce qui est observé avec des semoules purifiées (Table 2).

Table 2. Luminance intrinsèque (LIPM) et luminance potentielle des pâtes alimentaires (LPPA) des produits de mouture de la variété Lloyd[†]

Produits ^{††}	LIPM	LPPA	Produits ^{††}	LIPM	LPPA
Semoule S1	86,8	67,7	Farine (B1+B2)	89,4	54,0
Semoule S2	87,6	58,6	Farine B3	88,4	65,8
Semoule S3	87,7	63,0	Farine B4	89,1	57,9
Semoule S4	86,1	63,4	Farine B5	84,1	48,9
Semoule S5	84,8	57,6	Farine D1	91,2	60,2
Semoule S6	86,6	60,4	Farine D2	89,1	56,4
Semoule ST	86,3	61,6	Farine D3	87,3	52,8

[†]Les conditions de mouture sont celles décrites par Chaurand *et al.* (1999).

^{††}Semoule ST = Semoule totale ; B = broyage ; D = désagrégage.

De nombreux arguments militent en faveur de l'apparition d'un brunissement d'origine polyphénol oxydasique, qui viendrait s'ajouter au brunissement intrinsèque des produits mis en œuvre, lors de la transformation en pâtes alimentaires de semoules insuffisamment purifiées :

(i) L'effet "brunissant" des polyphénol oxydases est bien reconnu chez les végétaux.

(ii) Les conditions de fabrication des pâtes alimentaires (hydratation et température de séchage notamment) sont favorables au développement d'activités polyphénol oxydasiques.

(iii) L'activité PPO des passages de mouture du blé tendre croît avec leur niveau de contamination par les enveloppes du grain (Hatcher et Kruger, 1993) et on peut penser qu'il en est de même chez les blés durs.

(iv) L'intensité du brunissement des chapatties et des nouilles chinoises est attribué au niveau de l'activité PPO des farines utilisées (Abrol et Uprety, 1970 ; Baik *et al.*, 1994).

La relation entre l'activité PPO et LPPA des produits de mouture du blé dur ainsi que l'incidence sur LPPA des conditions de séchage (teneur en eau et température des produits) des produits hydratés sont en cours d'étude dans notre unité de recherche pour préciser cette hypothèse.

Brunissement lié à la réaction de Maillard

Dès 1974, Feillet *et al.* montraient que l'application de très hautes températures (90°C) en cours de séchage pouvaient provoquer un brunissement important des pâtes alimentaires. De nombreux travaux ultérieurs devaient confirmer ces premières observations (Manser, 1980 ; Dexter *et al.*, 1981 ; Abecassis *et al.*, 1989). L'intensité du brunissement, généralement accompagné par l'apparition de composante rouge (valeur tristimulus a^* positive), est fonction du diagramme de séchage retenu.

Ainsi que l'ont clairement démontré Pagani *et al.* (1992) en dosant la teneur en furosine des pâtes sèches, ce brunissement est dû la formation de produits de la réaction de Maillard. Selon ces auteurs, cette réaction est d'autant plus marquée que la teneur en eau des pâtes est proche de 15% ms, que la température de séchage est élevée et que la durée de traitement est prolongée. Très faible quand les pâtes sont séchées à des températures inférieures à 60°C, la teneur en furosine peut devenir très élevée à 90°C.

Le développement de la réaction de Maillard, et donc du brunissement des pâtes, ne dépend pas uniquement des conditions de séchage. La teneur en sucre réducteur des produits, elle-même fonction des activités α -amylasique et β -amylasique et du taux d'amidons endommagés des semoules, ainsi que des conditions de pastification, est un élément déterminant de l'intensité de la réaction (Pagani *et al.*, 1996).

Conclusion

Il ressort de ce travail que la luminance des pâtes alimentaires (ou le brunissement, son complément à 100) pourrait s'exprimer suivant l'équation :

$LPA = f(LIA, \text{ brunissement enzymatique lié à la pureté des semoules, réactions de Maillard liées aux conditions de séchage})$

Avec $LPA = \text{luminance des pâtes alimentaires}$
 $LIA = \text{luminance intrinsèque de l'albumen}$

L'intensité du brunissement enzymatique serait en partie liée à l'activité PPO des produits de mouture, celle de la réaction de Maillard à la teneur en sucres réducteurs des pâtes avant séchage.

Ces conclusions rejoignent celles de Kim *et al.* (1991) selon lesquels la couleur du gluten commercial de blé tendre peut être attribuée à des chromophores endogènes de l'albumen, à des réactions de brunissement enzymatique qui interviennent au cours de l'isolement du gluten par voie humide et à des réactions de Maillard qui se manifestent au cours du séchage. Elles sont également en bon accord avec les hypothèses émises par Irvine (1971) au début des années 70 et avec celles, plus récentes, de Miskelly (1984) pour expliquer le brunissement des nouilles chinoises.

L'efficacité de la sélection de nouvelles variétés de blé dur pour le caractère "indice de jaune élevé" des pâtes alimentaires s'explique par l'excellente héritabilité de cet indice et par la possibilité d'utiliser des méthodes chimiques d'analyse peu coûteuses et se prêtant à des déterminations en série (dosage de la teneur en pigments caroténoïdes, détermination de l'activité lipoxygénasique). Il en est différemment du caractère "indice de brun". Dans ce cas, on se trouve en effet dans la situation la plus

défavorable : faible héritabilité du caractère, mise en œuvre de méthodes lourdes d'analyse reposant sur la fabrication de semoules puis de disques de pâtes. Certes, cette situation n'a pas empêché de progresser au cours des trente dernières années ; celles-ci ont en effet été marquées en France par la disparition des variétés les plus brunissantes. Il apparaît cependant que de nouveaux progrès pour un caractère où les différences entre les variétés cultivées se sont sensiblement réduites passeront par la prise en compte plus directe des bases moléculaires du brunissement.

La possibilité de faire la part entre les facteurs qui contribuent à l'intensité de l'indice de brun des pâtes alimentaires peut permettre aux sélectionneurs de hiérarchiser les cibles sur lesquelles ils devraient faire porter leurs efforts :

(i) La première et principale priorité est d'accroître la LIA, dont il faudra préciser l'héritabilité et les bases moléculaires ; en ce domaine, Matsuo et Irvine (1967) ont ouvert une voie de recherche particulièrement intéressante : leurs travaux insuffisamment approfondis méritent d'être repris.

(ii) La deuxième priorité est de diminuer la teneur en polyphénol oxydase des couches périphériques du grain, en particulier de la couche à aleurone, de manière à réduire l'intensité des réactions de brunissement enzymatique lorsque la purification des semoules est insuffisante.

(iii) La troisième priorité est de restreindre la formation des produits de la réaction de Maillard au cours du séchage des pâtes : des blés durs à faibles activités amylasiques et dont la résistance des granules d'amidon à l'endommagement serait élevée (si une variabilité génétique de caractère existe chez les blés durs, et à la condition de ne pas générer des effets négatifs sur la qualité culinaire des produits) doivent être recherchés.

Nos travaux portent actuellement sur la première de ces priorités. Ils visent à élucider les mécanismes qui participent à la synthèse de composés de coloration brune (ou grise) dans l'albumen au cours de la formation du grain et à comprendre les bases moléculaires de l'effet de la teneur en protéine du grain sur la valeur de LIA. L'hypothèse privilégiée est que les polyphénol oxydases, dont la teneur dans l'albumen des grains en cours de maturation est élevée, avant de tendre vers zéro dans l'albumen du grain mûr (Kruger, 1976), pourraient jouer un rôle déterminant dans la formation de ces pigments bruns. Si cette hypothèse se vérifiait, il devrait être alors possible de développer une méthode immunochimique rapide de dosage de la (des) molécule(s) brunissante(s) de l'albumen, de préciser son (leur) héritabilité et de mettre à la disposition des obtenteurs un outil simple, peu coûteux et efficace de sélection sur le caractère "brunissement des pâtes alimentaires". Chercher à abaisser l'activité PPO de l'albumen du grain au cours de sa maturation, voire la teneur en substrats de la PPO de celui-ci, deviendrait alors *in fine* l'objectif prioritaire des obtenteurs.

Remerciements

Les auteurs remercient le GIE Blé Dur et le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (France) pour le soutien apporté à ces travaux.

Références

- Abecassis, J., Chaurand, M., Matencio, F. et Feillet, P. (1989). Einfluss des Wassergehaltes der Teigwaren bei der Hochtemperaturtrocknung. *Getreide Mehl und Brot*, 43 : 58-62.
- Abrol, Y.P. et Uprety, D.C. (1970). Studies on darkening of whole wheat dough. *Current Sci.*, 40 : 421-422.
- Alause, J. et Feillet, P. (1970). Metodo semplice ed obiettivo per la previsione del colore delle paste alimentari. *Technica Molitoria*, 21: 511-517.
- Autran, J.C., Abecassis, J. et Feillet, P. (1986). Statistical evaluation of different technological and biochemical tests for quality assessment in durum wheats. *Cereal Chem.*, 63 : 390-394.
- Baik, B.K., Czuchajowska, Z. et Pomeranz, Y. (1994). Comparison of polyphenol oxidase activities in wheats and flours from Australian and U.S. cultivars. *J. Cereal Sci.*, 19 : 291-296.
- Chaurand, M., Lempereur, I., Roulland, T.M., Autran, J.C. et Abecassis, J. (1999). Genetic and agronomic effects on semolina milling value of durum wheat. *Crop Sci.*, 39 : 790-795.
- CIE (1986). *Colorimetry*. CIE Publication 15.2, 2^{ème} édn, Vienna.

- Delcros, J.F., Rakotozafy, L., Boussard, A., Davidou, S., Porte, C., Potus, J. et Nicolas, J. (1998). Effect of mixing on the behavior of lipoxygenase, peroxidase, and catalase in wheat flour doughs. *Cereal Chem.*, 75 : 85-93.
- Dexter, J.E., Crowle, W.L., Matsuo, R.R. et Kosmolak, F.G. (1982). Effect of nitrogen fertilization on the quality characteristics of five north American amber durum wheat cultivars. *Can. J. Plant Sci.*, 62 : 901-912.
- Dexter, J.E., Matsuo, R.R. et Morgan, B.C. (1981). High temperature drying : Effect on spaghetti properties. *J. Food Sci.*, 46 : 1741-1756.
- Feillet, P. et Dexter, J.E. (1996). Quality requirements of durum wheat for semolina milling and pasta production. Dans : *Pasta and Noodle Technology*, Kruger, J.E., Matsuo, B.B. et Dick, J.W. (éds). AACC, St Paul, Minnesota, pp. 95-131.
- Feillet, P., Jeanjean, M.F., Kobrehel, K. et Laignelet, B. (1974). Le brunissement des pâtes alimentaires. *Bull. ENSMIC*, 262 : 190-194.
- Grignac, P. (1970). Amélioration de la qualité des variétés de blé dur. *Ann. Amélior. Plantes*, 20 : 159-188.
- Hatcher, D.W. et Kruger, J.E. (1993). Distribution of polyphenol oxidases in flour millstreams of Canadian common wheat classes milled to three extraction rates. *Cereal Chem.*, 70 : 51-55.
- Houliaropoulos, E., Abecassis, J. et Autran, J.C. (1981). Produits de mouture du blé dur : Coloration et caractéristiques culinaires. *Industries des Céréales*, 12 : 3-13.
- Icard-Vernière, C. (1999). *De la semoule de blé dur aux pâtes alimentaires fraîches : Evénements physiques et biochimiques*. Thèse, Université de Montpellier.
- Interesse, F.S., Ruggiero, P., D'Avella, G. et Lamparelli, F. (1983). Characterization of wheat o-diphenolase isoenzyme. *Phytochemistry*, 22 : 1885-1889.
- Irvine, G.N. (1971). Durum wheat and pasta products. Dans : *Wheat : Chemistry and Technology*, Pomeranz, Y. (éd.). AACC, St Paul, Minnesota, p. 777.
- Irvine, G.N. et Anderson, J.A. (1952). Factors affecting the colour of macaroni IV. Semolina particle size. *Cereal Chem.*, 30 : 334-342.
- Kim, W., Seib, P.A. et Chung, O.K. (1991). Origin of colour in vital wheat gluten. *Cereal Food World*, 36 : 954-959.
- Kobrehel, K., Laignelet, B. et Feillet, P. (1972). Relation entre les activités peroxydasiques et polyphénol oxydasiques des blés durs et le brunissement des pâtes alimentaires. *C. R. Acad. Agric.*, 58 : 1099-1106.
- Kobrehel, K., Laignelet, B. et Feillet, P. (1974). Study of some factors of macaroni brownness. *Cereal Chem.*, 51 : 675-684.
- Kruger, J.E. (1976). Changes in the polyphenol oxidases of wheat during kernel growth and maturation. *Cereal Chem.*, 53 : 201-213.
- Manser, J. (1980). High-temperature drying of pasta products. *Buhler Diagram*, 69 : 11-12.
- Matsuo, B.B. et Irvine, G.N. (1967). Macaroni brownness. *Cereal Chem.*, 44 : 78-85.
- Matsuo, R.R., Irvine, G.N., Kosmolak, F.G. et Leisle, D. (1982). Statistical evaluation of tests for assessing spaghetti-making quality of durum wheat. *Cereal Chem.*, 59 : 222-230.
- Matveef, M. et Alause, J. (1967). Microtest des pâtes alimentaires appliqué à la sélection des blés durs. *Bull. Ecole Française de Meunerie*, 217 : 11-17.
- Miskelly, D.M. (1984). Flour components affecting pasta and noodle colour. *J. Sci. Food Agr.*, 35 : 463-471.
- Pagani, M.A., De Noni, I., Resmini, P. et Pellegrino, L. (1996). Processing and heat damage of dry pasta. *Tecnica Molitoria*, 47 : 345-361.
- Pagani, M.A., Resmini, P. et Pellegrino, L. (1992). Technological parameter affecting the Maillard reaction in pasta processing. *Tecnica Molitoria*, 43 : 577-592.
- Walsh, D.E. (1969). *The protein of durum wheat : Their influence on spaghetti quality*. PhD Thesis, North Dakota State University.