ÉVALUATION DE DIVERS TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES DES CÉRÉALES

II. — ÉTUDES HISTOLOGIQUES ET CYTOCHIMIQUES DES CARYOPSES DU MAÏS ET DE L'ORGE. EFFETS DES TRAITEMENTS D'EXPANSION ET DE FLOCONNAGE

Blanche FARBER et D. GALLANT

*Station de Biochimie et Physicochimie des Céréales, C. E. R. D. I. A., I. N. R. A.,
91305 Massy*

RÉSUMÉ

Par des techniques complémentaires (microscopie photonique et microscopie électronique à balayage), les caractéristiques histologiques et cytochimiques de l'orge et du maïs ont été décrites avant et après transformations intervenues au cours de traitements technologiques (expansion et floconnage).

La localisation des constituants biochimiques cellulaires du grain a été effectuée par des colorations réputées spécifiques.

L'expansion (popping) du maïs, provoque des réactions de caractère hétérogène selon la nature des tissus et leur localisation dans les caryopses. De l'extérieur vers l'intérieur du grain on distingue plusieurs zones. Tout d'abord en périphérie dans les parties non expansées, l'amidon est peu ou pas empesé et la matrice protéique y est alors étirée; près des zones en expansion les grains d'amidon sont vacuolisés: cette structure est dite « en bulle de savon »; enfin l'albumen central présente une structure alvéolaire où l'amidon est totalement gélifié et repoussé contre les parois cellulaires. Dans cette partie du caryopse le dommage est tel que les parois cellulaires peuvent être également détruites.

Dans le cas de l'orge, la réaction est plus homogène, les grains d'amidon sont dans leur ensemble légèrement empesés et la matrice protéique est étirée.

Le floconnage — surtout dans le cas du maïs — produit un bouleversement de l'organisation structurale des cellules: les parois sont fracturées ou cassées et le contenu cellulaire est plus ou moins dispersé. Cependant au niveau des organites on observe d'une part un léger empesage et une fissuration des grains d'amidon (ce qui dénote un traitement hydrothermique en 2 temps), d'autre part un aspect fragmenté et réticulé de la matrice protéique.

Dans leur ensemble ces deux traitements hydrothermiques montrent une désorganisation plus ou moins importante du centre du grain et, au contraire, une relative préservation de la zone périphérique (couches aleuroniques et sous-aleuroniques).

Une étude critique des traitements de coloration et la confrontation des résultats obtenus par microscopie photonique et par microscopie électronique à balayage a permis de différencier les modifications cellulaires et tissulaires attribuables aux traitements hydrothermiques de celles provenant d'artefacts de préparation.

I. — INTRODUCTION

La cytologie des céréales mures a été jusqu'à présent très peu étudiée et évidemment encore moins celle des céréales transformées après un traitement technologique, WOLF *et al.* (1952 *e-d*), BRADBURY *et al.* (1956), DEL ROSARIO *et al.* (1968), WOLF *et al.* (1969), WOLF et KHOO (1970), SECKINGER et WOLF (1967, 1973), SIMMONDS (1972), BUTTROSE (1962) ont précisé l'histologie et la cytologie de diverses céréales mures ou en cours de maturation.

Seuls REEVE et WALKER (1969) ont décrit la structure microscopique de céréales expansées et ont montré qu'elles réagissent différemment au traitement. Ainsi, l'orge ne s'expande que très peu par rapport au maïs. De plus la différence de composition protéique entre albumen corné et farineux du maïs conditionne la capacité d'expansion des caryopses.

Les transformations mises en évidence peuvent se résumer ainsi :

- a) gélification plus ou moins poussée des grains d'amidon ;
- b) rupture des parois cellulaires ;
- c) formation de vides intracellulaires et de « bulles » dans les grains d'amidon des parties les plus expansées de l'albumen ;
- d) modification plus faible de la zone aleuronique et de la zone proche du scutellum.

Aucune étude de microscopie n'a été jusqu'à présent réalisée sur les céréales floconnées.

La microscopie électronique à balayage (S.E.M. : scanning electron microscopy) a pu être utilisée pour mieux préciser non seulement l'anatomie de céréales mures mais aussi pour déterminer les modifications structurales de la cellule après certaines interventions industrielles (séchage, maltage, meunerie) ou après extraction spécifiques de certains constituants tels que l'amidon, les protéines ou les lipides cellulaires (ARANYI et HAWRYLEWICZ, 1969, HARPSTEAD, 1971 ; POMERANZ et SACHS, 1972 ; POMERANZ, 1973).

C'est dans ce contexte que nous avons étudié les transformations tissulaires et cellulaires de l'orge et du maïs à maturité après expansion (popping) ou floconnage (flaking) des caryopses. Ces traitements se traduisent par des altérations de l'organisation des cellules et de leurs constituants biochimiques. L'albumen qui contient l'essentiel des composants extraits (protéines et amidon) a principalement fait l'objet de nos investigations. Nous avons essentiellement utilisé deux techniques d'observation complémentaires : la microscopie photonique et la microscopie électronique à balayage.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. — Matériel

Nos investigations ont porté sur des caryopses mures de *Zea mays* L. et d'*Hordeum vulgare* L. non traités, ainsi que sur les échantillons expansés et floconnés dont le traitement est décrit par ailleurs (DELORT-LAVAL et MERCIER, 1976) : nous observons que les grains de maïs

expansés (« Pop corn ») présentent une grande hétérogénéité de réactivité vis-à-vis du traitement, certains d'entre eux étant plus ou moins fissurés, d'autres étant éclatés et très expansés. Au contraire, les grains d'orge ont réagi d'une manière plus homogène. A la suite du traitement mécanique, le maïs floconné est très aplati et paraît translucide. Son aspect très modifié par rapport à l'échantillon témoin laisse présager un très grand bouleversement au niveau cellulaire.

2. — Techniques cytochimiques

Des caryopses sont découpés en tranches d'environ 1 mm d'épaisseur, fixés par le réactif de Bouin modifié par LANGERON (1934), déshydratés par passages répétés dans des bains d'alcools de titres croissants, puis inclus dans du paraplast (mélange de polymères plastiques et de paraffine dont le point de fusion est de 56°C). La fixation et la déshydratation sont effectuées sous vide pour améliorer la pénétration des réactifs dans les tissus.

La localisation des composés pectiques et des polyholosides insolubles est réalisée par coloration avec l'oxysesquichlorure de ruthénium, pour les premiers, et par la réaction à l'acide périodique-Schiff (PAS) pour les seconds.

Les coupes réalisées étant trop fines (10 microns d'épaisseur) pour pouvoir observer les grains d'amidon entiers, nous avons prélevé ces derniers et les avons examinés en lumière polarisée afin de déterminer leur degré d'endommagement.

Les substances protéiques sont mises en évidence par leur coloration rose à la ninhydrine-Schiff, ou verte après traitement au « fast-green » en solution acide.

La méthode de FEULGEN-ROSSENBECK effectuée sur coupes fines du matériel fixé a permis de détecter les acides nucléiques et de localiser les noyaux cellulaires dans l'albumen des divers échantillons.

La mise en évidence des lipides a été tentée. Afin d'éviter leur dissolution au cours des opérations d'inclusion, de déparaffinage et de montage, cette étude particulière a été effectuée à main levée sur des coupes de matériel frais que nous avons colorées par le noir Soudan en solution alcoolique. Dans les autres cas, les coupes fines ont été réalisées à l'aide du microtome à glissière Leitz modèle 1300 à partir des blocs d'inclusion de paraplast. Après coloration des coupes, les observations sont effectuées avec un microscope Wild (M 20) équipé d'une chambre photographique 24 × 36.

3. — Préparation du matériel pour l'observation en microscopie électronique à balayage

Des fragments de 1 à 2 mm d'épaisseur de caryopses sont collés sur un porte-objet avec du « Silver paint », glu à l'argent. Par évaporation sous vide, on effectue ensuite un dépôt homogène de carbone puis d'or de 100 à 120 Angströms.

Ainsi, toute la surface de la préparation est rendue conductrice et laisse circuler les charges négatives excédentaires.

L'appareil utilisé pour ces examens est le JSM-50A Jéolco qui enregistre les images sur plan-film polaroids.

L'examen par microscopie électronique à balayage des échantillons tels quels permet ainsi d'éviter les artefacts susceptibles de se produire au cours des traitements chimiques de coloration.

III. — OBSERVATIONS ET RÉSULTATS

I. — Histologie et cytochimie des caryopses non traités (Pl. I et fig. 1 a)

Les caryopses d'orge et de maïs sont recouverts par plusieurs assises tégumentaires : le tégument du fruit (ou péricarpe), le tégument de la graine (ou épiderme du nucelle). Sous ces enveloppes protectrices (Pl. I, fig. 3) l'albumen des caryopses de l'orge et du maïs est schématiquement subdivisé en deux zones : la couche à aleurone (la plus externe) et l'albumen amylofère.

FIG. 1. — Représentation schématique de l'état d'un caryopse avant et après traitement hydrothermique

- a) caryopse non traité ;
- b) caryopse après expansion (cas du maïs) ;
- c) caryopse d'orge après floconnage ;
- d) fragment de caryopse de maïs après floconnage.

a) *La couche à aleurone.*

Cette couche qui s'interrompt au niveau de l'embryon est composée de plusieurs strates cellulaires dans le cas de l'orge (Pl. I, fig. 2, 3) alors qu'elle n'en comprend qu'une dans le cas du maïs. Les cellules aleuroniques sont petites, cubiques et à parois relativement épaisses. Ces dernières, qui fixent la fuschine basique après oxydation périodique sont dites PAS + ; leur lamelle moyenne est colorée par le rouge de ruthenium. Au microscope électronique à balayage, elles apparaissent composées de fins feuillets.

Autour d'un noyau sphérique, de nombreux grains d'aleurone, petits corpuscules ronds, sont pressés les uns contre les autres dans une matrice cytoplasmique (Pl. I, fig. 2, 3). Les grains d'aleurone réagissent aux colorants des protéines (fast-green et ninhydrine Schiff).

La présence de lipides homophasiques est mise en évidence à ce niveau sous forme de fines gouttelettes, colorées en bleu-noir par le noir Soudan. Les cellules aleuroniques se distinguent de celles du reste de l'albumen par l'absence de grains d'amidon.

b) *L'albumen amylifère.*

Ce tissu est hétérogène quant à la forme, la taille et la composition chimique des cellules qui le composent. Les cellules de l'albumen profond sont généralement polygonales, leurs parois sont très fines, souvent contournées. Leur noyau, lorsqu'il est visible, est très déformé et coloré par le Feulgen et par l'hématoxyline. Ces cellules contiennent essentiellement des grains d'amidon étroitement associés entre eux par des protéines intersticielles.

Comme dans le cas du blé (GALLANT et GUILBOT, 1973), l'albumen de l'orge montre deux générations de grains d'amidon, de gros grains de forme lenticulaire et de petits, en amas, de forme polygonale (Pl. I, fig. 4, 5). Dans l'albumen de maïs on distingue une zone farineuse et une zone cornée. L'albumen périphérique, corné, contient de petits grains d'amidon polygonaux, étroitement assemblés par des protéines intersticielles en fins feuillets (Pl. I, fig. 6). A la surface de ces grains d'amidon on observe de nombreuses petites dépressions (Pl. I, fig. 6). Celles-ci représenteraient une génération tardive de petits grains d'amidon (GALLANT, 1973) qui laissent leur empreinte à la surface des gros grains. On remarque également de petits corpuscules de même dimension (2 à 5 microns) noyés dans les feuillets protéiques, les « protein bodies » ou « zein bodies ». Les cellules de l'albumen farineux, par contre, contiennent des grains d'amidon plus volumineux, plus ou moins sphériques, noyés dans une matrice protéique lâche et ne renfermant pas de corpuscules protéiques ni de petits grains d'amidon (Pl. I, fig. 7).

Observés entre nicols croisés, les petits et gros grains d'amidon isolés de l'albumen des caryopses présentent une nette croix de polarisation. Celle-ci montre que la structure cristalline des grains d'amidon est intacte.

II. -- *Altérations intervenant au cours de l'expansion des caryopses*
(Pl. II et fig. 1 b)

De profondes modifications, essentiellement au niveau de l'albumen amylifère, apparaissent dans l'organisation des tissus et des structures cellulaires des caryopses d'orge et de maïs.

Les cellules aleuroniques et sous-aleuroniques conservent leur organisation générale. Ces couches cellulaires restent solidaires entre elles. On peut en attribuer la cause à l'épaisseur relativement importante des parois pectocellulosiques. En effet, dès que les parois s'amincissent, une très grande désorganisation cellulaire accompagne l'expansion. Le contenu des cellules aleuroniques est cependant modifié : on observe souvent une vacuole au centre de ces cellules et les grains d'aleurone semblent éclatés et amalgamés au cytoplasme cellulaire.

L'albumen de maïs présente une hétérogénéité zonale de réaction à l'expansion. Au contraire, celui de l'orge est transformé de façon plus homogène. L'organisation cellulaire est préservée dans l'albumen corné du maïs expansé, alors qu'au niveau de l'albumen farineux les parois sont souvent rompues en de très nombreux points et les protéines interstitielles sont très étirées et fragmentées (Pl. II, fig. 11, 12).

Dans cette dernière zone très expansée, les grains d'amidon sont totalement gélifiés et amalgamés les uns aux autres formant une masse compacte d'amidon et de protéines, adhérant à la paroi cellulaire — l'albumen présente alors une structure alvéolaire : des vides intracellulaires s'organisent dans un ensemble d'amidon gélifié, de protéines coagulées et de parois pectocellulosiques rompues (Pl. II, fig. 10, 13). Un stade moins avancé de l'expansion a pu être observé dans un secteur proche de la couche à aleurone en coupe épaisse de matériel frais après coloration par le réactif iodo-ioduré en solution alcoolique et par examen au microscope électronique à balayage.

Les grains d'amidon paraissent accolés les uns aux autres formant une sorte de réticulum, chacun d'entre eux étant percé par une bulle d'air plus ou moins volumineuse (plus réduite à l'extérieur du caryopse) (Pl. II, fig. 9 a, 9 b). Cette structure représente le « bubble soap like structure », décrite par REEVE et WALKER (1969).

Les modifications des grains d'amidon et de la matrice protéique sont plus importantes pour le maïs que pour l'orge. En effet, pour ce dernier le contenu cellulaire demeure compact et un décollement le sépare de la paroi. Ce décollement s'accompagne d'un étirement de protéines interstitielles (Pl. II, fig. 8), les grains d'amidon lenticulaires de l'orge apparaissent plus déformés que les petits grains polygonaux (Pl. II, fig. 8). Aussi bien pour l'orge que pour le maïs nous avons observé une migration des lipides homophasiques colorés par le noir Soudan dans l'albumen amylofère sous forme de petites gouttelettes.

Schématiquement, à partir de l'état présenté par les grains d'amidon on peut remarquer quatre stades successifs dans l'expansion :

- 1) grains d'amidon non encore modifiés ;
- 2) grains d'amidon légèrement empesés (dépression centrale) ;
- 3) grains d'amidon renfermant une bulle d'air (conservation de l'aspect granulaire) ;
- 4) grains d'amidon totalement gélifiés (perte de l'aspect granulaire).

A partir de ces observations on peut conclure que les grains d'amidon d'orge n'ont subi en moyenne qu'un début d'empesage, marqué par diverses déformations : grains en cupule à dépression centrale, ou allongés, ou plus ou moins gonflés.

Entre nicols croisés, les grains d'amidon ne sont plus biréfringents à l'exception de la zone périphérique du caryopse où certains d'entre eux montrent encore une biréfringence partielle.

III. — Transformations intervenant au cours du processus de floconnage des caryopses (Pl. III et fig. 1 c, 1 d)

La température maximale (130°C) durant le floconnage est très inférieure à celle qui est atteinte durant l'expansion (280°C). On pourrait donc penser rencontrer des bouleversements moins importants au niveau de certains organites cellulaires. Cependant, il se surajoute un effet mécanique (aplatissage) dont l'effet est considérable sur la structure des caryopses.

Les fragments de caryopse de maïs sont littéralement écrasés. C'est à leur niveau que nous rencontrons les modifications les plus profondes. Seuls quelques fragments de couche à aleurone subsistent à la périphérie de l'albumen amylofère (Pl. III, fig. 15, 17). Le contenu des cellules aleuroniques est rétracté et souvent fracturé. Cependant les grains d'aleurone sont encore bien visibles à fort grossissement.

L'albumen corné du maïs, comme dans le cas de l'expansion, est moins désorganisé que l'albumen farineux. Il n'en reste que quelques fragments, allongés dans une direction perpendiculaire à l'écrasement, comprenant des morceaux de parois, associés à la matrice protéique.

L'albumen de l'orge est moins désorganisé et les cellules sont moins dissociées que dans le cas précédent. Un espace de rétraction parfois important sépare chacun des contenus cellulaires (Pl. III, fig. 17).

Les grains d'amidon montrent une dépression centrale et les petits grains semblent avoir été écrasés sur les grains les plus gros (Pl. III, fig. 18).

Les grains d'amidon les plus gros sont à la fois déprimés et fissurés (Pl. III, fig. 14, 16, 18) aussi bien pour le maïs que pour l'orge. On peut penser que ces fissures sont formées lors du passage des caryopses entre les cylindres après la phase hydrothermique (empesage partiel). Contrairement à ce que l'on observe pour l'expansion, tous les grains d'amidon de l'albumen des caryopses floconnés sont empesés.

DISCUSSION

Comme REEVE et WALKER (1969), nous avons observé dans certaines parties de l'albumen expansé des structures très caractéristiques dites en « bulles de savon », dans lesquelles chaque grain d'amidon renferme une vacuole centrale. L'examen de matériel frais nous a permis de détecter d'autres stades plus avancés de l'expansion, notamment la structure alvéolaire où tout un groupe de grains d'amidon et même de cellules peuvent être empesés et repoussés par système lacunaire.

Les températures de gonflement (SEIDEMAN, 1966) sont de 60 à 62°C pour l'amidon de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) et de 67 à 72°C pour celui du maïs (*Zea mays* L.). Les températures atteintes durant l'expansion (280°C) ou le floconnage (130°C) dépassent largement ces valeurs et il s'y ajoute de surcroît des effets dus à la pression de vapeur et aux processus mécaniques. Cependant, le floconnage, effectué sous une chaleur humide pendant un temps relativement long s'est avéré être un traitement moins violent que l'expansion qui s'opère sous une chaleur sèche. Les grains d'amidon et les protéines ont réagi différemment selon leur nature et

leur disposition dans le caryopse ; mais en général les protéines des structures périphériques qui ne semblent pas désorganisées par les traitements, paraissent coagulées et il est probable qu'elles sont partiellement ou totalement dénaturées. Nous avons aussi remarqué que le contenu cellulaire de l'albumen de l'orge a été moins fortement transformé que celui du maïs avec, chez ce dernier, une réponse très hétérogène d'un caryopse à l'autre, de nombreux grains n'étant absolument pas expansés.

Précisons par ailleurs que les techniques employées pour la cytochimie (fixations, déshydratations alcooliques, bains de toluène, inclusions, colorations diverses) altèrent dans une certaine mesure les structures des caryopses floconnés ou expansés comme celles des témoins. De plus, les grains traités sont encore plus endommagés par ces techniques du fait de leur excessive fragilité.

Il est donc parfois difficile de faire la juste part entre les artefacts causés par ces techniques et certaines modifications dues aux traitements technologiques. Les coupes de matériel frais ainsi que les observations directes par microscopie à balayage ont contribué à mieux définir la part incombant aux artefacts proprement dits puisque ces dernières techniques permettent d'observer l'état réel des structures. Ainsi, les parois trop fragmentées des cellules de l'albumen, l'éclatement parfois très important des structures cellulaires (par exemple, le maïs expansé) sont des exemples qui illustrent sous leurs formes les plus extrêmes les artefacts dus aux techniques de préparation du matériel. Ces dernières amplifient en quelque sorte les dommages dus aux traitements technologiques.

Les dosages biochimiques et les essais d'efficacité alimentaire ont toujours été effectués à partir d'échantillons broyés. Dans le cas présent, ces essais sont des analyses globales qui s'opposent à nos observations ponctuelles et qui reflètent l'état des lots mis en expérimentation ; c'est pourquoi les résultats seront dans une certaine mesure difficiles à généraliser. En effet, le lot de maïs expansé étant hétérogène, de très nombreux caryopses n'étant que fissurés (amidon intact), l'analyse globale d'un tel échantillon ne fournira, tant en ce qui concerne les dosages biochimiques que les essais nutritionnels, que des résultats par défaut. Au contraire, pour un même traitement, les orges traitées qui ont réagi de façon homogène, fourniront des résultats plus quantitatifs.

Nous conclurons sur 2 points :

a) Les études histologiques et cytochimiques des échantillons avant et après traitements technologiques nous ont permis de préciser l'importance des modifications tissulaires et cellulaires produites au cours des processus d'expansion et de floconnage des caryopses.

En général, les tissus périphériques des grains sont moins fortement endommagés et cela est un aspect non négligeable du point de vue nutritionnel, surtout du fait que les principaux acides aminés et les vitamines du grain sont localisés dans la couche à aleurone.

Les parois cellulaires sont fissurées ou brisées et l'amidon, dans les régions modifiées, est partiellement ou totalement empesé, ce qui favorise la pénétration des enzymes et facilite la digestion dans le bol alimentaire. Enfin, l'effet de l'expansion s'est révélé assez hétérogène alors que celui du floconnage (le maïs étant concassé puis aplati) a été beaucoup plus homogène.

b) Une réflexion s'impose sur le plan technologique à propos de l'expansion. Il semblerait que la technique pouvant convenir à l'orge ait été employée sans modification pour le maïs. Les examens que nous avons effectués sur les grains fissurés mais non expansés montrent que les grains d'amidon des cellules de l'albumen sont intacts ou très légèrement empesés.

Pour obtenir un résultat homogène et produire l'expansion de tous les caryopses de maïs, il serait nécessaire d'augmenter le taux d'hydratation des grains, d'utiliser une température plus élevée, ou bien d'allonger la durée de chauffage des caryopses. Il est certain qu'alors les dosages biochimiques et les essais de nutrition seraient comparables à ceux de l'orge.

Enfin, il serait nécessaire de faire varier les paramètres des traitements hydrothermiques (température, quantités de vapeur, temps), afin de mieux décrire les modifications consécutives des grains.

Reçu pour publication en juin 1975.

SUMMARY

EFFICIENCY OF VARIOUS TREATMENTS OF CEREALS.

II. — HISTOLOGICAL AND CYTOCHEMICAL STUDIES OF MAIZE AND BARLEY CARYOPSIS. EFFECTS OF POPPING AND FLAKING TREATMENTS

Using complementary techniques (light and scanning electron microscopy), the histological and cytochemical characteristics of barley and maize grains before and after popping and steam flaking are described.

The localization of the biochemical cell constituents of the grain was done by means of the most specific staining methods. Popping of maize grains caused heterogenous reactions according to the constitution and localization of the different tissues within the cereal grain. From the outer to the central part of the latter, different zones could be differentiated. In the unpopped peripheral zones, starch granules were little or not at all swollen and the protein matrix was stretched. Near the popped zones, starch granules were partly swollen and a bubble was found in their center (a « soap-bubble » like structure). The inner part of the endosperm showed an alveolar structure where starch was completely gelatinized and pushed against the remnant cell walls.

The reaction was more homogenous for barley : starch granules were generally slightly swollen, and the protein matrix was stretched. Steam flaking, especially with maize, produced a disorganization of the cell structure : the cell walls were broken and the cell content was more or less dispersed. However, in details, the starch granules were very slightly deformed. They showed a beginning of gelatinization and their surface was always fissured (revealing a moist-heat treatment in 2 steps). The protein matrix seemed to be reticulated and fragmented. These two moist-heat treatments brought about a more or less pronounced disorganization of the endosperm of the grains, but resulted in a good protection of the outer layers (aleurone and adjacent layers).

A critical study of the staining treatments and a comparison of the results obtained by light and scanning electron microscopy allowed to differentiate the cellular and tissular changes imputable to moist-heat treatments from those depending on preparation artefacts.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARANYI C., HAWRYLEWICZ E. J., 1969. Applications of scanning electron microscopy to cereal specimens. *Cer. Sci. Today*, **14**, 230-233.
- BRADBURY D., MACMASTERS M. M., CULL I. M., 1956. Structure of the mature wheat kernel. *Cer. Chem.*, **33** : 111. Microscopic structure of the endosperm of hard red winter wheat (361-373). IV. Microscopic structure of the germ of hard winter wheat (373-391).

- BUTTROSE M. S., 1962. Ultrastructure of the developing wheat endosperm. *Austr. J. Biol. Sci.*, **16**, 305-317.
- DELORT-LAVAL J., MERCIER C., 1976. Évaluation de divers traitements technologiques des Céréales I. Choix des traitements et étude de leur influence sur la fraction glucidique du blé, de l'orge et du maïs. *Ann. Zootech.*, **25**, 3-12.
- DEL ROSARIO A. R., BRIONES V. P., VIDAL A. J., 1968. Composition and endosperm structure of developing and mature rice kernel. *Cer. Chem.*, **45**, 225-234.
- GALLANT D., 1973. Évolution de la dimension des grains d'amidon au cours de la maturation du caryopse du maïs. Ultrastructure observée par T.E.M. et S.E.M. (à paraître).
- GALLANT D., GUILBOT, A., 1973. Développement des connaissances sur l'ultrastructure du grain d'amidon. I. L'amidon de blé. *Die Stärke*, **25**, 335-342.
- HARPSTEAD D., 1971. High lysine corn. *Scientific American*, **225**, 34-37.
- LANGERON M., 1934. *Précis de microscopie*. Masson (Paris), p. 1205.
- POMERANZ Y., 1973. Structure and mineral composition of cereal aleurone cells as shown by scanning electron microscopy. *Cer. Chem.*, **50**, 504-511.
- POMERANZ Y., SACHS I. B., 1972. Scanning electron microscopy of the oat kernel. *Cer. Chem.*, **49**, 20-22.
- REEVE M., WALKER H. G., 1969. The microscopic structure of popped cereals. *Cer. Chem.*, **46**, 227-241.
- SECKINGER H. L., WOLF M. J., 1967. Lipid distribution in the protein matrix of wheat endosperm as observed by electron microscopy. *Cer. Chem.*, **44**, 669-673.
- SECKINGER H. L., WOLF M. J., 1973. Sorghum protein ultrastructure as it relates to composition. *Cer. Chem.*, **50**, 455-465.
- SEIDEMAN J., 1966. *Stärke Atlas*. Paul Parey, Berlin und Hamburg, p. 360.
- SIMMONDS D. H., 1972. The ultrastructure of the mature wheat endosperm. *Cer. Chem.*, **49**, 212-222.
- WOLF M. J., BUZAN C. L., MACMASTERS M. M., RIST C. E., 1952. Structure of the mature corn kernel. *Cer. Chem.*, **29** : a) Gross anatomy and structural relationship (321-333) ; b) microscopic structure of pericarp, seed coat and hilar layer of dent corn (334-348) ; c) microscopic structure of the endosperm of dent corn (349-361) ; d) microscopic structure of germ of dent corn (362-381).
- WOLF M. J., KHOO U., SECKINGER H. L., 1969. Distribution and subcellular structure of endosperm in varieties of ordinary and high lysine maize. *Cer. Chem.*, **46**, 253-263.
- WOLF M. J., KHOO U., 1970. Mature cereal grain endosperm : rapid glass knife sectioning for examination of proteins. *Stain Technology*, **45**, 277-283.
-

ABRÉVIATIONS

A	: grain d'amidon
Ag	: amidon gélifié
Al	: albumen
alc	: albumen corné
alf	: albumen farineux
alp	: albumen profond
B	: bulle
bp	: biréfringence partielle
C	: cytoplasme
ca	: couche à aleurone
csa	: couche sous-aleuronique
D	: dépression
En	: épiderme du nucelle
er	: espace de rétraction
Ga	: grain d'aleurone
Lm	: lamelle moyenne
N	: noyau
P	: paroi pectocellulosique
p	: péricarpe
pi	: protéines interstitielles
pie	: protéines interstitielles étirées
pif	: protéines interstitielles fragmentées
V	: « vacuole »
vi	: vides intercellulaires

PLANCHE I

FIG. 2

Orge témoin en microscopie photonique ; coloration hématoxyline rouge de ruthénium. Détail de la couche à aleurone.

FIG. 3

Orge témoin en microscopie électronique à balayage ; niveau des couches à aleurone et sous-aleuroniques.

FIG. 4

Détail cellulaire de l'albumen de l'orge ; limite entre albumen sous-aleuronique et albumen profond. Coloration hématoxyline rouge ruthenium, microscopie photonique.

FIG. 5

Détail du contenu cellulaire dans l'albumen profond de l'orge. Microscopie électronique à balayage.

FIG. 6

Détail cellulaire de l'albumen corné de maïs, témoin. Microscopie électronique à balayage.

FIG. 7

Détail cellulaire de l'albumen farineux de maïs témoin. Microscopie électronique à balayage.

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 6

Fig. 7

PLANCHE II

FIG. 8

Contenu cellulaire d'orge expansée. Microscopie électronique à balayage.

FIG. 9

Détail cellulaire de l'albumen de maïs expansé. Structure dite en « bulle de savon » :

- a) coloration par le réactif iodo-ioduré en solution alcoolique,
- b) microscopie électronique à balayage.

FIG. 10

Albumen de maïs expansé. Structure alvéolaire. Détail de l'amidon gélifié. Microscopie électronique à balayage.

FIG. 11

Albumen corné de maïs expansé. Coloration hématoxyline rouge de ruthénium. Microscopie photonique.

FIG. 12

Albumen farineux de maïs expansé. Coloration hématoxyline — rouge de ruthénium. Microscopie photonique.

FIG. 13

Albumen de maïs expansé. Structure alvéolaire. Détail de l'amidon gélifié. Microscopie électronique à balayage.

Fig.
8

Fig. 11

Fig. 12

Fig.
9a

Fig.
9b

Fig.
10

Fig.
13

PLANCHE III

FIG. 14

Albumen de maïs floconné. Microscopie électronique à balayage.

FIG. 15

Couche aleuronique et sous-aleuronique de l'albumen de maïs floconné. Coloration hématoxyline rouge de ruthénium.

FIG. 16

Détail d'un grain d'amidon d'orge floconnée, fissures. Microscopie électronique à balayage.

FIG. 17

Couche aleuronique et sous-aleuronique de l'albumen d'orge floconnée. Coloration hématoxyline — rouge de ruthénium.

FIG. 18

Détail de l'albumen d'orge floconnée. Déformations des grains d'amidon. Microscopie électronique à balayage.

Fig.
14

Fig.
15

Fig.
17

Fig.
16

Fig.
18

Blanche FARBER et D. GALLANT