

Importance de l'endommagement de l'amidon dans les aliments pour animaux

L'amidon contenu dans les aliments pour animaux est modifié par les nombreux traitements technologiques mis en oeuvre. Mieux comprendre la nature de ces modifications permet d'interpréter les résultats des différentes méthodes utilisées pour mesurer l'endommagement de l'amidon et prévoir sa digestibilité.

L'amidon constitue la principale source de glucose consommée par les hommes et les animaux dans le monde, car il est abondant et bon marché. Les aliments pour monogastriques contiennent de 20 à 50 % d'amidon selon l'espèce consommatrice et l'état physiologique (respectivement jusqu'à 50 % et 70 % du maïs pour les volailles et les porcs). L'amidon est largement présent dans les ingrédients de nombreux aliments (tableau 1) : céréales (50-80 %), légumineuses (25-50 %) et tubercules (60-92 %). Au point de vue de sa structure, l'amidon est un mélange de macromolécules, l'amylose et l'amylopectine, qui s'organisent en grains semi-cristallins. L'amylose est composée de plusieurs milliers d'unités glucosyl, liées par des liaisons de type α -(1,4) : ce n'est pas une chaîne linéaire stricte, car elle présente un faible nombre de ramifications en longues chaînes. L'amylopectine, une macromolécule ramifiée, est d'un

poids moléculaire plus élevé (plusieurs millions) et est composée de chaînes contenant de 10 à 50 unités glucosyl, reliées par des liaisons de type α -(1,4) : ces chaînons sont interconnectés selon un schéma arborescent par des liaisons de type α -(1,6) ne représentant que 5 à 6 % de l'ensemble des liaisons constitutives de la macromolécule. Ces deux types de macromolécules sont reliées par des liaisons hydrogène ; certaines zones du grain d'amidon sont organisées de manière très régulière, conférant à l'ensemble une structure semicristalline. Les grains d'amidon diffèrent largement par leurs formes (de la sphère au batonnet), leurs tailles (de 1 μ à 100 μ) et leurs teneurs en amylose (de 0,5 à 65 %) (Guilbot et Mercier 1985). A température ambiante, l'amidon granulaire natif est complètement insoluble dans l'eau et n'a pas ses propriétés fonctionnelles spécifiques de pouvoirs épaississant, gélifiant et liant. Les grains peuvent être attaqués par de nombreuses α -amylases et glucoamylases. Cependant, comme leurs taux de dépolymérisation observés à partir d'amidons natifs sont très inférieurs à ceux obtenus avec de l'amidon gélatinisé, on peut considérer qu'ils sont résistants à l'état natif.

Les animaux adultes monogastriques, mis à part ceux des espèces carnivores (chien, truite, etc), digèrent très bien, sous leurs formes natives (tableau 1), les amidons des céréales (blé, orge, riz normal, maïs normal), du manioc, du taro et des légumineuses, comparativement aux amidons de pommes de terre, de canna et des amidons riches en amylose (maïs, pois et riz) qui sont moins facilement hydrolysables (Dreher *et al* 1984). Néanmoins

Résumé

Les principales modifications de l'état de l'amidon, qui se produisent au cours des étapes de transformation et de fabrication des aliments pour animaux, sont l'augmentation de surface spécifique, une diminution de la cristallinité et une dépolymérisation de l'amylose et de l'amylopectine. Les différentes méthodes *in vitro* qui permettent d'étudier les facteurs influençant les cinétiques d'hydrolyse de l'amidon sont présentées. La microscopie permet des observations qualitatives. Les déterminations quantitatives sont fondées sur la susceptibilité aux amylases, les solubilités en milieux aqueux et alcooliques ainsi que l'absorption d'eau. Ces différents tests permettent de prédire la digestibilité de l'amidon dans la partie supérieure du tractus digestif. L'analyse par réflectance dans le moyen infra-rouge pourrait devenir un outil de contrôle en ligne.

Tableau 1. Teneur en amidon des céréales, des tubercules et racines, des légumineuses et des fruits ; caractéristiques de leurs amidons (Guilbot et Mercier 1962, Bewa 1978, Champ et al 1984, Dreher et al 1984).

Source	Amidon (% MS)	Amylose (% amidon)	Hydrolyse in vitro * (%)	Digestibilité apparente ** in vivo (%)
Céréales				
Maïs	65-80	20-24	70-100	98-100
Maïs riche en amylose	50-65	60-65	15-45	66-77
Maïs cireux	65-70	0-1	90-100	98
Avoine	55-60	26-28	75	-
Riz	75-90	20-35	18-100	98-100
Seigle	60-62	-	75	97-99
Sorgho	65-75	1-35	56	-
Blé	65-70	25-30	70-100	98-100
Racines/Tubercules				
Arrow root	90-92	-	20	80-96
Canna	75-80	27	4	53
Manioc	80-85	17	55	95-97
Pomme de terre	60-65	20	3-10	27-78
Taro	60-77	8,8-17,3	100	99
Légumineuses				
Haricot	30-35	33-35	20-91	90-100
Haricot doré	25-30	33-35	40-67	100
Féverole	30-43	31-34	70-100	99
Pois	43-48	31-35	65-95	99
Fruit				
Banane verte	15-25	15-18	11-31	49

* Etendue maximale de l'hydrolyse in vitro par l'alpha-amylase.

** Digestibilité mesurée sur rats.

Les monogastriques adultes digèrent très bien les amidons des céréales et des légumineuses. Mais pour les animaux jeunes, des traitements sont nécessaires pour détruire la structure cristalline des grains d'amidon.

des traitements hydrothermiques détruisant la structure cristalline des grains d'amidon sont nécessaires dès lors que l'on introduit des aliments amylicés dans les rations d'animaux jeunes ou carnivores. De plus, de nombreux traitements technologiques tels que le broyage et l'agglomération entraînent aussi d'importantes modifications de l'amidon. La modification de l'état de l'amidon est donc une caractéristique générale des aliments pour animaux.

La digestion de l'amidon

Après son ingestion, l'amidon est hydrolysé dans un premier temps par l' α -amylase de la salive, puis par l' α -amylase du pancréas, et par plusieurs enzymes glycolytiques sécrétées par la bordure en brosse de l'intestin. Il est absorbé comme glucose dans la première partie de l'intestin grêle. Si l'amidon n'est pas entièrement hydrolysé par les enzymes amylolytiques endogènes, il est alors attaqué par les nombreuses bactéries du gros intestin et peut être fermenté en acides gras volatils (AGV) et en gaz (CO_2 , H_2 , CH_4). Ces AGV sont beaucoup moins énergétiques (2,4 kcal/g) que le glucose (4 kcal/g).

L'endommagement de l'amidon, défini comme tout changement dans la structure granulaire qui entraîne une moindre résistance à l'action des amylases, peut être évalué à l'aide de nombreuses méthodes expérimentales, qui peuvent être utilisées dans la pratique afin de contrôler l'intensité du procédé de fabrication et la qualité du produit final. L'endommagement de l'amidon est fonction de la nature et de l'intensité des procédés intervenant dans la préparation des aliments. Il dépend également, mais dans une moindre mesure, de la structure histologique des grains et des graines. Ainsi, traité dans les mêmes conditions, le blé dur est moins résistant à la dégradation mécanique que le blé tendre (Finney et al 1988).

1 / Les modifications de l'amidon

Les grains d'amidon peuvent subir des transformations par application de plusieurs moyens physiques : température, cisaillement, impact, frottement (Delort-Laval et Mercier 1976). La gélatinisation correspond, approximativement, à la désorganisation et au gonflement du grain, la majeure partie de la solubilisation n'intervenant cependant que plus tard, au cours de l'empesage. C'est une conséquence de la rupture des liaisons hydrogène entre les

segments de chaînes linéaires dans les cristallites et, dans une moindre mesure, entre les molécules dans les régions amorphes.

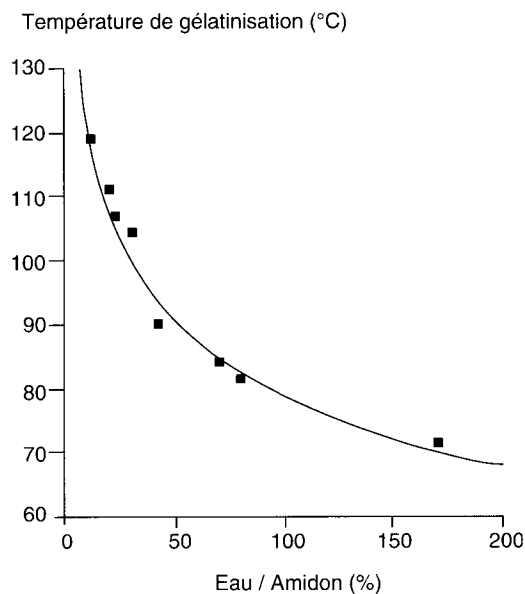
Ce procédé classique de gélatinisation, à température de 50-70° C avec un excès d'eau (rapport eau/amidon supérieur à 1,5), est d'un faible intérêt pratique pour la fabrication d'aliments pour animaux, dans lesquels la teneur en eau est faible (de 10 à 30 %). Dans ces conditions de faible humidité, la gélatinisation doit plutôt être considérée comme la fusion des cristallites, fusion qui intervient à des températures plus élevées (100-150° C) (Lelièvre 1976, Donovan 1979, Biliaderis *et al* 1980, Colonna et Mercier 1985). Dans un milieu peu hydraté, la température de fusion ne doit pas être confondue avec la température classique de gélatinisation. L'analyse enthalpique différentielle (AED) mesure et enregistre la quantité de chaleur nécessaire dans le processus de gélatinisation ou de fusion : la fusion des cristallites et le changement de conformation des macromolécules de l'amidon, accompagné d'une hydratation, sont tous deux des phénomènes endothermiques. Les études se basant sur l'AED ont montré qu'il n'y a pas de discontinuité permettant de distinguer la gélatinisation de la fusion, mais on considère généralement que la première intervient dans un milieu présentant un excès d'eau (plus de 300 % d'eau ajoutée à la matière sèche) et qu'elle peut être segmentée en deux étapes : gonflement des granules puis solubilisation des molécules. La fusion correspond à la disparition de la cristallinité native de l'amidon à faible hydratation, sans que la forme granulaire disparaisse nécessairement. Il a été montré que la température de fusion T_m varie selon la teneur en eau et obéit à l'équation de Flory (1953), où l'inverse de la température de fusion T_m est reliée positivement à la fraction volumique de l'eau v_1 :

$$T_m^{-1} - T_m^{\circ-1} = (R\Delta H_u)(V_u/V_1) (v_1 - X_2v_1^2)$$

où R représente la constante des gaz, H_u l'enthalpie de fusion par monomère anhydroglucosyl, V_u/V_1 le rapport des volumes molaires de l'unité répétée et du solvant (eau), T_m° (°K) le point exact de fusion des cristallites polymères non dilués. La température de fusion T_m augmente jusqu'à 150-200° C quand la teneur en eau diminue (figure 1). Bien que la teneur en eau soit un facteur essentiel, d'autres facteurs tels que les teneurs en sel et en sucres ne sont pas sans jouer un rôle important, déplaçant aussi les températures de fusion vers des valeurs plus élevées.

Dans la littérature, de nombreuses études décrivent les différents amidons et leur comportement de gélatinisation (Guilbot et Mercier 1985) : le tableau 2 donne la température de fusion et l'enthalpie de divers amidons. L'énergie nécessaire peut être fournie soit par la dissipation visqueuse issue de l'impact et du cisaillement au cours du traitement, soit par conduction thermique. La température de fusion sans eau des cristallites les plus parfaits se situe entre 150° C et 220° C avec une enthalpie correspondante entre 6,8 et 36,8 J/g, selon l'origine botanique de l'amidon. D'après

Figure 1. Température de gélatinisation de l'amidon de maïs en fonction de la teneur en eau (Colonna et Mercier 1985).



l'équation de Flory (1953), on peut estimer, qu'avec des conditions de traitement classiques (pour un amidon à 13 % d'humidité), les valeurs de température de fusion des amidons de céréales passent à 115-130° C pour 10% d'eau ajoutée et à 100-120° C pour 20% d'eau ajoutée.

Durant tout traitement, trois transformations essentielles peuvent se produire : augmentation de la surface d'attaque disponible dans la phase solide, diminution de la cristallinité et dépolymérisation des molécules d'amidon.

1.1 / Augmentation de la surface d'attaque disponible dans la phase solide

Ce type de changement intervient par fragmentation de la matière première (c'est-à-dire des grains et graines), par exemple lors de la mouture et du broyage, qui rendent les macromolécules d'amidon plus accessibles, et également en cas d'abrasion mécanique et de fragmentation des grains. Toutes les céréales sont, dans cet état fragmenté, plus sensibles à l'hydrolyse (Snow et O'Dea 1981). Les polyosides pariétaux (fibres) exercent seulement un effet inhibiteur sur la vitesse d'hydrolyse quand ils forment une barrière physique limitant l'accès des enzymes hydrolytiques à l'amidon (Kon *et al* 1971) : après broyage fin, aucune différence n'est observée entre des échantillons renfermant des quantités variables de fibres (Snow et O'Dea 1981). Les grains d'amidon, quelle que soit leur taille (Stark et Yin 1986), sont endommagés par des traitements mécaniques, d'impact et de cisaillement. La surface des granules d'amidon, qui est lisse en microscopie électronique à balayage, devient rugueuse et craquelée après ce type de traitement mécanique

La surface d'attaque est augmentée par fragmentation de la matière première, par exemple lors de la mouture et du broyage. Toutes les céréales sont, dans cet état fragmenté, plus sensibles à l'hydrolyse.

Tableau 2. Température de fusion (T_{m0} et T_m) et enthalpie des différents amidons (MC : teneur en eau en % de la matière sèche).

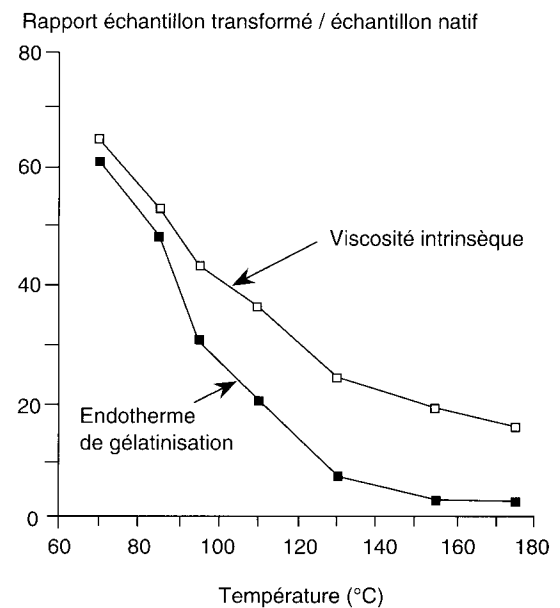
Origine de l'amidon	Meilleurs cristallites		Amidon hydraté			Référence	
	T_{m0} (°C)	LH ₀ (kJ/m/Glu)	MC (%MS)	T_m (°C)	LH (kJ/kg)		
Haricot Adzuki	203	67,7	48	112	18,4	Biliaderis <i>et al</i> 1980	
Féverole	-	-	47	97	13,8	Biliaderis <i>et al</i> 1980	
Lentille	166	79,0	48	95	10,9	Biliaderis <i>et al</i> 1980	
Maïs normal	-	-	46	89	13,8	Biliaderis <i>et al</i> 1980	
	normal	160	129,6	150	55-70	12,5	Colonna et Mercier 1985
	cireux	-	-	48	97	16,7	Biliaderis <i>et al</i> 1980
	riche en amylose	-	-	48	114	17,6	Biliaderis <i>et al</i> 1980
	riche en amylose	152	160,9	150	55-125	3,3	Colonna et Mercier 1985
Pois lisse	194	66,0	48	101	14,6	Biliaderis <i>et al</i> 1980	
Pois lisse	157	51,4	150	55-65	13,4	Colonna et Mercier 1985	
Pois ridé	171	57,7	150	55-125	4,6	Colonna et Mercier 1985	
Pomme de terre	168	56,4	160	66	17,6	Donovan 1979	
	-	-	46	85	18,4	Biliaderis <i>et al</i> 1980	
	166	57,7	100	90	-	Donovan <i>et al</i> 1983	
Blé	210	29,3	95	82	-	Lelièvre 1973	
	192	25,1	190	74	-	Lelièvre 1976	
	216	40,5	100	94	-	Donovan <i>et al</i> 1983	

(Stark et Yin 1986). Il est possible que certains grains soient alors nettement divisés et fragmentés. Cependant, il demeure toujours une petite proportion de grains non endommagés. Ce type de transformation est particulièrement important dans la meunerie, pour la fermentation de la pâte à pain (Audidier *et al* 1966a, Stevens et Evers 1983) et dans l'agglomération des aliments pour animaux (Mercier *et al* 1968, Mercier et Guilbot 1974). A l'aide de tests enzymatiques, il apparaît que le broyage accroît la susceptibilité des matériaux amyliques de deux fois (Schweizer *et al* 1988) à sept fois (Wong *et al* 1985). Soulignons enfin que les broyages en milieu humide (amidonnerie de maïs) n'ont que peu d'influence sur l'état de l'amidon.

1.2 / Diminution de la cristallinité

Les amidons qui sont devenus amorphes par cuisson sont très rapidement hydrolysés. Les amidons natifs des céréales et des pommes de terre présentent respectivement des diagrammes de diffraction des rayons X de type A et de type B (Guilbot et Mercier 1985), qui disparaissent après cuisson. La technique de diffraction des rayons X a été largement employée afin d'étudier les effets de la cuisson-extrusion sur la structure de l'amidon (Colonna *et al* 1989). Cette méthode physique est la meilleure méthode pour estimer la cristallinité ; cependant, elle réclame beaucoup de temps, car tous les échantillons doivent être au même niveau d'activité d'eau pour toute comparaison. A l'inverse, l'AED peut être employée afin de mesurer l'endotherme de gélatinisation, comparé à celui de l'amidon natif (figure 2). L'AED est une méthode très sensible qui peut être employée pour mesurer l'endotherme de gélatinisation résiduel comparé à celui de l'amidon natif. L'amidon très

Figure 2. Viscosité intrinsèque et endotherme de gélatinisation de l'amidon de maïs extrudé à diverses températures, par rapport à l'amidon natif (Colonna *et al* 1989).



transformé ne montre pas d'endotherme de gélatinisation (Colonna *et al* 1987 et 1989) tandis que des grains partiellement endommagés présentent un endotherme réduit.

Les étapes de broyage et de fractionnement en milieu sec conduisent en partie, au passage des grains d'amidon dans un état moins organisé, voire amorphe. En raison de la fusion et de la gélatinisation partielles, obtenues à la suite de la plupart des traitements hydrother-

Le broyage et le fractionnement en milieu sec font passer les grains d'amidon dans un état moins organisé, voire amorphe, qui les rend hydrolysables très rapidement.

miques de l'industrie alimentaire (floconnage, agglomération, etc) (Mercier 1971, Colonna *et al* 1976), la structure des grains d'amidon devient plus grossière et poreuse (semblable à une éponge), plus accessible aux enzymes. Mais la dégradabilité plus grande s'explique aussi par l'accroissement de la capacité de liaison à l'eau, qui ainsi assure une meilleure diffusion des enzymes au sein des grains. Avec des amidons complètement gélatinisés, l'hydrolyse est rapide, sans aucune étape distincte dans la cinétique de dégradation. Les grains gélatinisés sont gonflés et ne montrent aucune biréfringence, devenant des "fantômes". Observées en microscopie photonique ou électronique à balayage, ces structures, composées surtout d'amylopectine, correspondent aux parties des grains restantes après la gélatinisation, à l'inverse des fractions solubilisées, comprenant surtout de l'amylose.

Au cours du stockage, tous les produits amylicés peuvent présenter une lente réassociation des molécules au stade semi-sec (i.e. staling), conduisant à un accroissement de la cristallinité, révélée par diffractométrie des rayons X (structure de type B) et par l'AED. Ce phénomène est important pour les produits comportant au moins 50% d'eau, où il vient alors annihiler les effets bénéfiques de la cuisson. Il est négligeable pour les aliments secs (moins de 20% d'eau).

1.3 / Dépolymérisation des molécules d'amidon

Peu de liaisons glycosidiques sont rompues par broyage (Craig et Stark 1984, Stark et Yin 1986). Dans les cas les plus extrêmes apparaît une importante fraction soluble dans l'eau froide, composée d'amylose et d'amylopectine. Certaines études indiquent une plus grande solubilisation de l'amylopectine, dans le cas de l'orge (Craig et Stark 1984, Stark et Yin 1986). Une explication plausible serait que les macromolécules d'amylopectine, d'une taille plus importante, sont ainsi plus susceptibles à la rupture des liaisons entre les cristallites des grains d'amidon lors des fractures de grain d'amidon. Alors que certains traitements, par exemple le floconnage, entraînent des dépolymérisations minimales en tant qu'effets secondaires, la cuisson-extrusion (Colonna *et al* 1989), l'irradiation ou le chauffage à l'état sec (Colonna *et al* 1987) favorisent des dépolymérisations intenses avec, à terme, une moindre cohésion granulaire. Ainsi la masse moléculaire moyenne, estimée grâce à la mesure de la viscosité intrinsèque, diminue quand la température d'extrusion de l'amidon de maïs augmente (figure 2). Les macromolécules, dont la masse moléculaire est plus faible que dans l'état natif, sont plus solubles et donc facilement attaquées par les enzymes digestives (tableau 3). La figure 3 présente l'évolution de la solubilité et de la fraction facilement dégradée de l'amidon de maïs extrudé à différentes températures.

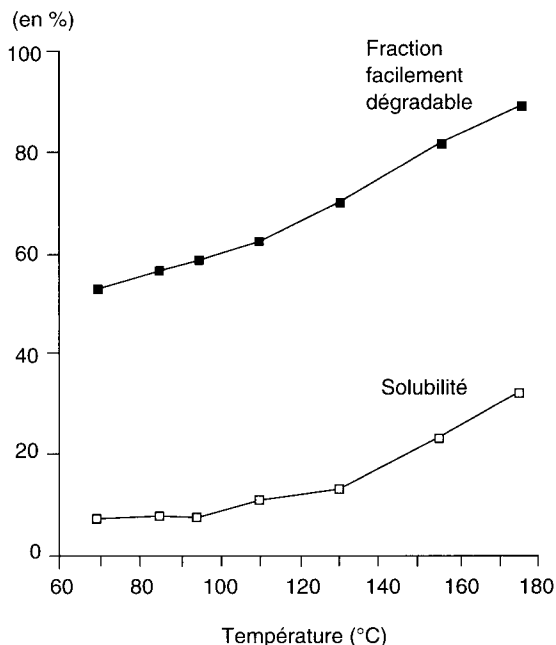
Bien que la cuisson augmente la sensibilité de l'amidon à l'hydrolyse, le niveau d'endommagement de l'amidon reste très variable, en

Tableau 3. Influence du traitement sur l'endommagement de l'amidon de graines de céréales (Delort-Laval et Mercier 1976).

Céréale	Traitement	α -glucanes solubles	α -amylolyse*	
			Ri	E
Orge	Normal	2,7	5,5	10
	Expansé	2,5	45,0	78
	Floconné	4,1	34,0	72
Maïs	Normal	1,7	2,0	3
	Aggloméré	2,0	11,0	24
	Expansé	1,7	11,0	30
	Floconné	6,7	43,0	65
	Extrudé	2,9	50,0	73
Blé	Normal	1,4	3,5	8
	Aggloméré	3,8	35,0	72
	Expansé	2,2	27,0	56
	Floconné	4,8	33,0	52
	Extrudé	3,5	51,0	79

* Ri et E sont respectivement le taux initial et la fraction facilement dégradée de l'amidon attaqué par l' α -amylase (voir figure 1).

Figure 3. Solubilité et fraction facilement dégradée de l'amidon de maïs extrudé à différentes températures (Mercier et Feillet 1975).



Les traitements entraînent des dépolymérisations minimales (floconnage) ou intenses : c'est le cas de la cuisson-extrusion, l'irradiation ou le chauffage à l'état sec. Les macromolécules sont alors plus solubles et donc facilement attaquées par les enzymes digestives.

fonction de l'intensité du traitement et des conditions de stockage. Les principaux paramètres à considérer sont toujours la teneur en eau et la température maximale qui est atteinte. On doit souligner le fait qu'aucun critère absolu n'a été reconnu pour mesurer exactement l'endommagement de l'amidon. De plus, chaque test, qui est plus ou moins spécifique d'un changement de structure à une certaine échelle (macromoléculaire, cristalline, granulaire), peut amener à une estimation du degré de changement différente de celles obtenues par d'autres méthodes. Ainsi pendant la cuis-

son-extrusion, la baisse de la masse moléculaire intervient après la baisse de l'enthalpie de gélatinisation. Une difficulté expérimentale rencontrée en étudiant l'influence des variables d'un traitement sur les propriétés fonctionnelles est, qu'en changeant une variable tout en laissant les autres constantes, on n'a aucune idée des interactions entre les variables, sauf si on examine un grand nombre de combinaisons. Une solution à ce problème est d'utiliser systématiquement les plans d'expérience avec des représentations par les surfaces de réponse.

2 / Mesures

A l'aide des méthodes enzymatiques, la détermination précise et spécifique de la teneur en amidon des aliments est devenu facile (AFNOR 1988). Avant de décrire et de critiquer les techniques de mesure de l'endommagement de l'amidon, il faut garder en mémoire qu'un aliment est un milieu hétérogène dans lequel l'échantillonnage est difficile. Par conséquent, comme la taille des particules est un paramètre critique (Schweizer *et al* 1988), cela doit être vérifié avec soin. Des divergences entre les méthodes vont résulter des différences dans la taille des particules : les particules de taille importante vont restreindre la diffusion de l'eau (et les enzymes) dans les grains d'amidon profondément enfouis. Le terme endommagement de l'amidon ne représente pas simplement un changement, mais une somme de changements structuraux détectables par différentes techniques. Le niveau de l'endommagement de l'amidon est fonction à la fois du nombre de grains d'amidon endommagés et de leur niveau individuel de désorganisation. Plusieurs protocoles expérimentaux de mesure sont apparus au fil des années, mais la plupart se basent sur les caractéristiques structurelles en tant que manifestations du changement intervenant quand les fantômes sont formés, et non sur la persistance des grains natifs.

2.1 / Observation qualitative

Les techniques microscopiques (Jones 1940) ont été les premières utilisées pour examiner les changements subis par les grains d'amidon. Certaines propriétés de l'amidon endommagé n'apparaissent que s'il a été mis en contact avec de l'eau : après addition d'eau, les structures granulaires dégradées augmentent considérablement de volume, d'environ 50 %, ce qui suggère une perte de structure. Ainsi des artefacts peuvent apparaître en raison de l'addition d'eau, avant l'examen. Comme le principal facteur limitant pour les enzymes est la pénétration à l'intérieur du grain, la vitesse à laquelle des trous apparaissent à la surface est un bon indicateur de l'hydrolyse enzymatique (Mercier *et al* 1968, Gallant *et al* 1972). Le problème essentiel associé à l'emploi de la microscopie traditionnelle dans l'étude de structures complexes est l'interprétation correcte des images : cette analyse doit se concentrer sur l'organisation structurale (analyse quantitati-

ve de l'image par données géométriques et densitométriques) plutôt que sur l'apparence des seuls constituants. Le développement des méthodes d'analyse d'images est une opportunité pour réactiver ces techniques microscopiques.

Plus généralement, la microscopie convient bien aux traitements de broyage. Les grains endommagés montrent une moindre biréfringence et une absorption accrue de rouge Congo et d'iode : certains peuvent avoir considérablement gonflés dans l'eau, ce qui vient atténuer leur apparence. Les grains fortement endommagés peuvent se comporter comme des grains gélatinisés en présence d'un excès d'eau : ce phénomène s'explique par une fusion causée par les échauffements locaux lors du broyage. Le pourcentage des grains qui ont perdu leur biréfringence est classiquement appelé le degré de gélatinisation. Dans la pratique technologique, le nombre minimum de grains colorés qu'on peut obtenir à partir de grains d'amidon natifs (non traités) représente moins de 2% ; arbitrairement le niveau 100% d'amidon mécaniquement endommagé correspond au niveau où le nombre de grains colorés est d'au moins 98 %.

La plupart des traitements hydrothermiques, tels que la cuisson-extrusion, détruisent partiellement les structures granulaire et cristalline du grain d'amidon (Mercier *et al* 1979). La microscopie a, de ce fait, peu d'intérêt pour ces traitements physiques intenses. Cependant cette désorganisation dépend de la base physico-chimique du traitement physique employé, de son intensité, de l'hydratation de l'amidon et de sa composition (rapport amylose / amylopectine, teneur en lipides). Ainsi, après floconnage, les grains d'amidon de blé sont en partie gonflés, tandis que certains d'entre eux montrent toujours une faible biréfringence. Dans le cas du blé éclaté et cuit à la vapeur, l'amidon est plus ou moins complètement gélatinisé. Cette gélatinisation incomplète de l'amidon dans les flocons de blé explique probablement la moindre disponibilité comme le montre la réponse du glucose plasmatique après intubation de rats avec du blé floconné, en comparaison avec du blé bouilli, éclaté ou cuit à la vapeur (Holm *et al* 1985).

En revanche, les études histologiques et cytochimiques de céréales brutes ou traitées sont incapables de prévoir leur digestibilité ou leur efficacité alimentaire (Aumaitre 1976, Essatara *et al* 1976, Farber et Gallant 1976). Le principal avantage de ces approches plus globales est de fournir une vue d'ensemble des substances traitées afin de comprendre le type de transformation et éventuellement l'homogénéité (Farber et Gallant 1976). Même si cette technique est facile à employer, la difficulté pour quantifier les observations et le besoin d'un savoir-faire souvent "artisanal" limitent beaucoup son utilisation.

2.2 / Détermination quantitative

Les trois méthodes les plus connues pour mesurer l'endommagement de l'amidon sont basées sur l'augmentation de la susceptibilité

Les observations au microscope permettent de comprendre les transformations de l'amidon mais pas de prévoir leurs effets sur sa digestibilité.

enzymatique (c'est-à-dire l'hydrolyse en oligosaccharides), les solubilités différentielles en fonction du solvant (température, alcool) et le pouvoir d'absorber l'eau et les colorants dissous. Pour la quantification, une valeur d'endommagement nul est donnée soit à l'échantillon le moins endommagé disponible (initial), soit à l'échantillon d'amidon duquel tous les fantômes ont été enlevés, par solubilisation ou hydrolyse.

a / Susceptibilité enzymatique

Du fait que les grains d'amidon endommagés sont plus facilement hydrolysés que les grains d'amidon natifs, il est possible de quantifier l'amidon endommagé par toute comparaison portant soit sur les vitesses d'hydrolyse, soit sur les taux finaux atteints. L'augmentation de la susceptibilité à l'hydrolyse amylasique a fourni la base de nombreuses méthodes visant à quantifier l'endommagement de l'amidon. Tous les résultats *in vitro* peuvent être considérés comme des mesures de l'hydrolyse d'ensemble de l'amidon dans des conditions d'enzyme en quantité limitée : *in vivo*, les activités de limite-dextrinase et de la maltase sont indispensables, faute de quoi l'accumulation du maltose pourrait diminuer ou stopper l'activité de l' α -amylase. En revanche l'accumulation du glucose n'a quasiment pas d'effet inhibiteur sur l' α -amylase *in vitro* (Rodriguez *et al* 1987). La plupart de ces méthodes sont des méthodes à point final où les α -glucanes solubilisés (glucose et oligosides) sont mesurés après hydrolyse soit par l' α -amylase (Sandstedt et Mattern 1960, Leach et Schoch 1961, Donelson et Yamazaki 1962, Farrand 1964, Audidier *et al* 1966b) soit par la β -amylase (Stewart 1960, Sullivan *et al* 1962). Depuis, la procédure de Denelson et Yamazaki (1962) est devenue une méthode officiellement approuvée par l'AACC. Les unités obtenues par la méthode Farrand (1964) sont trois fois plus grandes que par cette méthode (Williams et Lesieur 1970). La β -amylase est bien adaptée aux amidons très endommagés car elle est incapable d'hydrolyser les grains d'amidon natifs, quelle que soit leur origine biologique. De plus le dosage d'un seul produit pour la réaction, le maltose, simplifie considérablement l'expression des résultats. A l'opposé, l' α -amylase convient mieux aux amidons peu ou moyennement endommagés, ainsi que le montre l'application de ces différentes techniques aux farines de blé obtenues par turbo-séparation (Audidier *et al* 1966a). Sur des amidons très dégradés, l' α -amylolyse est trop rapide, empêchant toute différenciation. Par la suite, des tests fondés sur la glucoamylase (Chiang et Johnson 1977) et des combinaisons pullulanase- β -amylase (Kainuma *et al* 1981) ont été proposés pour déterminer le degré de gélatinisation et de dégradation de l'amidon dans les produits amylacés. Toutes ces méthodes requièrent un excès d'amylase afin d'éclipser toute activité amylasique endogène. Poursuivant leurs études (Guilbot et Mercier 1962) concernant l'effet des traitements technologiques sur les modifications des grains d'amidon, Tollier et Guilbot (1974) ont proposé

(figure 4) une méthode cinétique qui permet la détermination graphique de la vitesse initiale, de la vitesse finale et de la fraction facilement dégradabile de l'hydrolyse par l' α -amylase ; les molécules solubilisées à partir de l'amidon apparaissant lors de l' α -amylolyse sont extraites par de l'éthanol à 80° GL (extraction des dextrines d'un degré de polymérisation égal ou inférieur à 10). A l'inverse de la β -amylase, la plupart des méthodes fondées sur l' α -amylase fournissent une valeur de l'amidon dégradé pour les amidons natifs. Le plus souvent, les amidons présentant un diagramme de diffraction de type B sont plus résistants que ceux avec un diagramme de diffraction de type A. Dans le cas des produits à base de maïs, ce test de l' α -amylase montre que la taille des particules de la mouture (Mercier et Guilbot 1971) a une légère influence sur le niveau d'endommagement des grains d'amidon. Cependant, plus le diamètre des agglomérés est petit, plus la susceptibilité à l' α -amylase est élevée, du fait de l'autoéchauffement de la matière pendant qu'elle passe à travers la filière (figure 5). Pour chaque test enzymatique, le point le plus

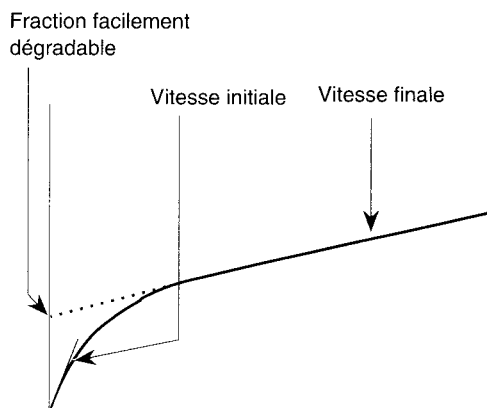


Figure 4.
Cinétique de l'alpha-amylolyse *in vitro*.

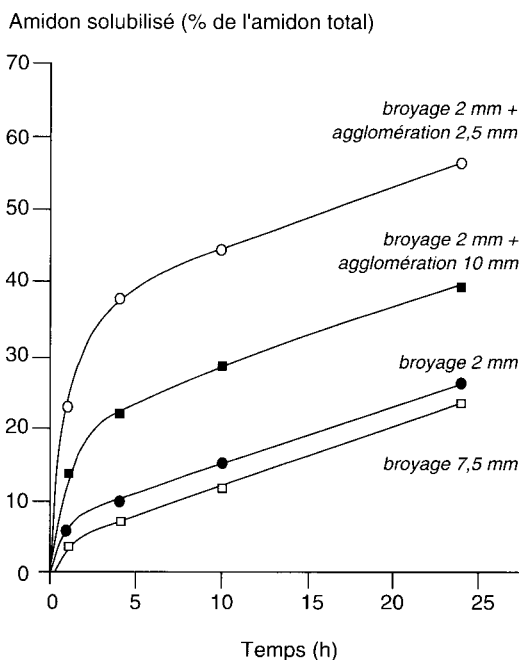


Figure 5.
Cinétique de l'amylolyse *in vitro* (Mercier et Guilbot 1974).

délicat et subjectif est de sélectionner le critère qui permet de différencier les échantillons en fonction de leur degré de transformation. Schweizer *et al* (1988) ont sélectionné un temps d'hydrolyse de 60 min de l'amidon brut de blé et de l'amidon cuit de riz comme référence, respectivement, pour les aliments indigestibles et complètement digestibles. Jenkins *et al* (1980) ont décrit un système *in vitro* au sein duquel l'aliment et les hydrolases sont dans un tube de dialyse, ce qui permet de surveiller l'apparition des produits de la digestion des glucides dans le milieu, hors du sachet de dialyse. Néanmoins, la cinétique de transfert à travers le tube de dialyse introduit un autre facteur limitant au sein d'un système déjà très complexe. L'amylolyse *in vitro* du granule d'amidon, extrait des tubercules frais (Bewa 1978) ou après leur incorporation dans des rations alimentaires après mélange ou agglomération, montre l'influence très importante du traitement industriel de l'aliment sur l'intégrité du grain d'amidon. Le rapport amidon/enzyme est crucial pour la vitesse d'hydrolyse et le niveau final de solubilisation (Colonna *et al* 1988, Schweizer *et al* 1988).

L'étude *in vitro* des facteurs impliqués dans la cinétique de l'hydrolyse de l'amidon dans des conditions simulant l' α -amylolyse *in vivo* est un thème très intéressant. Des corrélations ont été établies entre les tests *in vitro* et les données *in vivo* afin de démontrer leur utilité dans la nutrition animale ou humaine (tableau 4). Globalement les tentatives pour prévoir l'efficacité alimentaire à partir de la digestibilité *in vitro* n'ont pas été couronnées de succès (Champ *et al* 1982 et 1984). De même Borgida (1976) n'a pas pu corréler la valeur nutritionnelle du maïs traité thermiquement aux résultats de l' α -amylolyse. Les tests de l' α -amylolyse ont souvent été corrélés aux digestibilités *in vivo* de l'amidon. De façon générale, les études de digestibilité apparente *in vivo* montrent un degré final d'amylolyse plus élevé que dans les études *in vitro* (tableau 1). Néanmoins il a été démontré que certains types de procédés de cuisson sont inefficaces sur les digestibilités *in vivo* des amidons du maïs et du blé, alors que leurs susceptibilités enzymatiques correspondantes *in vitro* étaient considérablement augmentées (Aumaitre *et al* 1972). Mais cette évaluation de la digestibilité totale n'est pas suffisante pour prévoir la valeur nutritionnelle de l'amidon, car des valeurs élevées de digestibilité *in vivo* peuvent être obtenues avec des amidons complètement digérés dans la partie supérieure du tractus digestif, et avec des amidons partiellement fermentés dans le gros intestin. Des corrélations plus rigoureuses pourraient être faites avec la digestibilité dans l'iléum (partie terminale de l'intestin grêle) mais aucun résultat n'est disponible.

Plusieurs auteurs (O'Dea *et al* 1981, Jenkins *et al* 1982, Björck *et al* 1984a et b, Lee *et al* 1985) ont aussi établi des comparaisons entre l'hydrolyse *in vitro* par les α -amylases pancréatiques de l'homme, du porc ou du lapin et des études *in vivo* du glucose post-prandial et de la réponse à l'insuline chez l'homme adulte, le porc ou le lapin. Elles présentent

souvent une bonne corrélation (ex : $r = 0,83$; $p < 0,01$) (Lee *et al* 1985) mais les résultats *in vitro* présentent généralement une différence quantitative quant à l'ampleur des réponses obtenues pour divers échantillons d'amidon.

Dans le but d'obtenir de meilleures concordances avec les résultats *in vivo*, Gee et Johnson (1985) ont simulé la digestion d'un homogéinat d'aliment ou des suspensions d'amidon avec une première exposition à un environnement acide (pH 2,5) suivie d'une hydrolyse par l' α -amylase et la pronase. Holm *et al* (1985) ont introduit une étape pepsine dans les essais *in vitro* utilisant l' α -amylase pancréatique. Récemment Schweizer *et al* (1988) ont présenté une méthode améliorée pour mesurer les vitesses de digestion des aliments amylicés *in vitro* et une nouvelle manière de calculer les indices de digestion (ID). Schweizer *et al* (1988) ont conclu que la corrélation générale entre le test *in vitro* et les réponses glycémiques n'est encore pas parfaite. Pour les aliments, d'autres facteurs devraient être étudiés : la mastication pendant la prise de nourriture, la viscosité de la farine, la vidange gastrique, l'influence des matières grasses et des protéines.

Ces résultats montrent qu'il est difficile d'établir des comparaisons directes entre l'hydrolyse de l'amidon *in vivo* et *in vitro*. De meilleures corrélations sont obtenues entre l' α -amylolyse précédée d'une protéolyse (pour les amidons non purs) et la réponse du glucose post-prandial. La susceptibilité enzymatique est un déterminant important de la réponse glycémique. Ce test *in vitro* est dans la plupart des cas inefficace pour prévoir la digestibilité *in vivo* des amidons. Pour les amidons peu digestibles, des enzymes entérobactériennes peuvent être impliquées au niveau du côlon, ce qui augmente la digestibilité apparente *in vivo*, même pour les amidons de tubercules. Cette digestion microbienne, résultant en la formation d'acides gras à courtes chaînes, permet un gain calorique pour les animaux. C'est pourquoi les mesures de la digestibilité *in vitro* devraient être mieux corrélées à la digestibilité dans l'intestin grêle. Même si ces tests sont incapables de prévoir la valeur nutritionnelle, ils sont utiles en vue d'un premier examen de la susceptibilité de l'amidon dans l'alimentation humaine et animale.

b / Extractibilité à l'eau froide et dans les solutions alcooliques

Une autre propriété, à partir de laquelle l'endommagement de l'amidon peut être quantifié, est le degré de solubilité des α -glucanes solubles à température ambiante. Les capacités de gonflement et les solubilités sont mesurées par la méthode de centrifugation, avec un excès d'eau ou de solution alcoolique : la taille des particules et la température sont deux paramètres expérimentaux qu'il faut contrôler avec précision. Les relations entre ces deux caractéristiques, toutes deux basées sur la disparition de la structure cristalline, dépendent des traitements technologiques. Cette méthode peut être affinée en mesurant seulement

La digestibilité *in vitro* de l'amidon n'est pas suffisante pour prévoir sa valeur nutritionnelle : des valeurs élevées peuvent être obtenues avec des amidons complètement digérés dans la partie supérieure du tractus digestif, et avec des amidons partiellement fermentés dans le gros intestin.

Amylase	Substrats	Données de l'amylolyse	Corr*	In vivo	Espèce	Référence
α -amylase	Blé Maïs	Amidon endommagé	0 0	Efficacité alimentaire Utilisation digestive des nutriments	Poulet Porc Bovins à l'engrais	Sullivan et al 1962
α -amylase PP α -amylase BS α -amylase PP + BS	Amidon de maïs	E, Ri (22h)	+ 0 ++	Digestibilité de l'amidon	Poulet	Szylit 1973
α -amylase BS	Sous-produits amylacés de pois	E, Ri, Rf (120 min)	0	Efficacité alimentaire	Poulet	Champ et al 1984
α -amylase BS	Amidons de pois et de féverole	E (120 min)	0 0	Efficacité alimentaire Digestib. amidon	Rat	Champ et al 1984
α -amylase BS	Graines de légumineuses	Hydrolyse de l'amidon après 4h de réaction enz.	0	Digestibilité des glucides	Rat	Geervani et Theophilus 1981
α -amylase BS	Graines de légumineuses crues et cuites	E (120 min)	\pm	Digestibilité de l'amidon	Poulet	Mansouri 1983
α -amylase BS	Maïs cru et floconné	E, Ri, Rf (4h)	+	Digestion de l'amidon	Porc	Borgida 1976 Delort-Laval et Mercier 1976
α -amylase pancréatique	Graines de légumineuses	Courbe d'hydrolyse (60 min)	+	Digestibilité des glucides	Rat	Shurpalekar et al 1979
α -amylase BS	Tubercules tropicaux	Courbe d'hydrolyse (5 h) Digestion de l'amidon après 4h d'amylolyse in vitro	\pm	Digestib. amidon Efficacité alimentaire	Poulet	Gallant et al 1982
Extrait pancréatique de rat Pancréatine Glucoamylase R. Niveus	Amidons de banane, de pomme de terre et de maïs	Digestion de l'amidon après 3h ou 24h de réaction enzymatique	\pm	Digestib. amidon Efficacité alimentaire	Rat	Sugimoto et al 1980
α -amylase PP 1) phase gastrique (pH 2,5 ; 1h ; 37°C) 2) hydrolyse de l' α -amylase pronase	Aliments, amylacés	Courbe d'hydrolyse (180 min) Durée pour atteindre 50% d'hydrolyse	+	Glycémie post-prandiale	Homme	Gee et Jonhson 1985
α -amylase pancréatique du lapin et de l'homme	Amidons natifs et transformés	Hydrolyse de l'amidon après 10 min, 1h ou 22h de réaction enzymatique	++	Glycémie et insulinémie post-prandiales	Lapin	Lee et al 1985
α -amylase salivaire humaine	Amidons séchés et de farine de blé	Courbe d'hydrolyse (120 min)	+ \pm \pm	Glycémie et insulinémie post-prandiales pH dentaire	Rat Rat Homme	Björck et al 1984 a, b
α -amylase PP	Blé floconné et cuit à la vapeur ou éclaté	Courbe d'hydrolyse (60 min)	\pm \pm	Glycémie et insulinémie post-prandiales	Rat	Holm et al 1985
Pepsine (pH 1,5 ; 60 min) puis α -amylase PP	" "	" "	+ +	" "	Rat	Holm et al 1985
α -amylase PP	Amidons de maïs et de blé autoclavés	" "	+	Digestibilité de l'amidon	Rat	Björck et al 1987
Pepsine (pH 1,5 ; 60 min) puis α -amylase PP	Pains à base de blé	" "	+	" "	Rat	Björck et al 1987
α -amylase salivaire humaine	Pains	Oligosaccharides à 1, 2 et 3h	+	Glycémie post-prandiale	Homme	Jenkins et al 1987
α -amylase salivaire humaine et pancréatine porcine	Riz traité, pomme de terre et maïs doux	" "	+	Glycémie post-prandiale	Homme	Brand et al 1985
Pepsine (pH 1,5 ; 60 min) puis pancréatine porcine	26 aliments courants de l'Homme	Sucres réducteurs	++	" "	Homme	Schweizer et al 1988

Tableau 4.
Comparaison des données
de l' α -amylolyse et des
études in vivo (α -amylase
PP : α -amylase
pancréatique porcine,
BS = B-Subtilis)

* Corr = Corrélation : ++ très élevée, + élevée, \pm faible, 0 nulle

l'amylose soluble (Medcalf et Gilles 1965, Dermott Mac 1980, Wootton et Chaudry 1980), à partir de l'observation classique que l'amylose est plus solubilisée pendant la gélatinisation que l'amylopectine. Cependant l'endommagement mécanique dû aux traitements commerciaux de broyage a comme conséquence une proportion accrue d'amylopectine de masse moléculaire plus faible dans le milieu d'extraction que dans le résidu granulaire (Craig et Stark 1984). En observant la cinétique de solubilisation de l'amidon à l'aide d'un viscosimètre (à contrainte de cisaillement constante) (Dickinson *et al* 1982), il est possible de discriminer les échantillons d'amidon endommagé, bien que cette méthode soit longue et fastidieuse. Quand la dépolymérisation a pu intervenir, les molécules peuvent être séparées en une fraction soluble dans l'éthanol à 80° GL (masse moléculaire <2000), une fraction soluble dans l'éthanol à 40° GL (20° C) (masse moléculaire < 1000) et une fraction soluble seulement dans l'eau (20° C) (Mercier 1977).

La solubilité dans l'eau convient bien pour suivre les modifications intenses de l'amidon, par exemple celles qui interviennent au cours de la cuisson-extrusion de la semoule de maïs à différentes températures. En effet le test de l' α -amylase est incapable de discriminer les échantillons (Mercier et Feillet 1975) (tableau 3). L'extractibilité et l'hydrolyse enzymatique mesurent des modifications structurales différentes qui interviennent simultanément (tableau 3), ce qui explique des degrés de modifications extimées très différents par les deux méthodes. En ce qui concerne les céréales traitées par broyage, le degré d'accord entre les déterminations basées sur les deux principes de l'hydrolyse amylasique et l'extractibilité de l'amylase est globalement satisfaisant (Stevens et Evers 1983). Cependant les méthodes enzymatiques sont plus à même de prévoir de façon sûre l'absorption d'eau par les farines, sauf celles qui ont de hauts niveaux d'extraction et des particules de grande taille, inaccessibles aux enzymes (Evers 1982). La digestibilité *in vitro* augmente en même temps que l'importance de la solubilité de l'amidon, mais ces deux phénomènes ne sont pas en relation proportionnelle (Wootton et Chaudry 1980).

Le rôle physiologique de cette fraction soluble n'est pas négligeable. Il a été démontré chez les poulets qu'une petite quantité de dextrines dans la ration diminue le niveau d'ingestion et donc l'efficacité alimentaire. Il en résulte une augmentation importante de la production d'acide lactique dans le jabot des poulets. Une rapide absorption de glucose ou d'acide lactique dans la veine porte pourrait avoir entraîné une sensation artificielle de satiété et, par là, une réduction de l'ingestion d'aliments (Szylił 1973).

c / Capacité d'absorption de l'eau

L'absorption accrue d'eau par les grains endommagés est un autre test. Les grains incomplètement gélatinisés absorbent plus d'eau que les granules natifs : l'amidon natif a une absorption de l'ordre de 0,33 g d'eau par g

d'amidon, alors que les échantillons d'amidon endommagés à 100 % par le broyage absorbent environ 1 g d'eau par g d'amidon. En employant une étape de centrifugation, une relation linéaire entre la digestibilité et la rétention d'eau est observée, avec une plus forte corrélation que celle basée sur l'extractibilité de l'amylose (Stevens et Evers 1983). Cependant des capacités d'absorption d'eau plus élevées sont aussi obtenues à partir d'amidon gélatinisé dans des conditions de faible traitement mécanique. Par exemple, le séchage sur cylindre chauffant des amidons de pois ou de féverole accroît leur capacité d'hydratation jusqu'à 10,4 (Champ *et al* 1984). Cependant on doit souligner le fait que l'amidon peut présenter un gonflement intense (jusqu'à 5-10 g d'eau par g d'amidon) et garder encore un haut degré de cristallinité, ainsi qu'on l'observe par diffractométrie des rayons X (Varriano, Marston *et al* 1980) sur les produits classiques de panification.

Le niveau d'ingestion de la ration est fonction de la capacité d'absorption d'eau de ses constituants. Ainsi les rations riches en amidons extrudés (180° C) ou séchés sur cylindre chauffant sont ingérées par des rats en plus petite quantité que les rations avec des amidons soit natifs soit extrudés à 115° C (Champ 1985). Cette propriété est une conséquence d'une diffusion plus grande de l'eau et du gonflement des grains dont la structure cristalline a été rompue ; cela n'est jamais dû à un accroissement d'associations plus permanentes entre l'amidon et l'eau. En panification, ce critère est fréquemment employé pour estimer la capacité d'absorption d'eau de la farine, due à l'amidon. Toutefois d'autres composants de la farine (pentosanes) sont aussi impliqués dans l'absorption d'eau.

2.3 / Analyses par réflectance infra-rouge

Toutes les méthodes précédentes demandent du temps et du savoir-faire. Ces dernières années s'est développée l'analyse par réflectance dans le proche infra-rouge (NIR). Des corrélations ont été trouvées entre les réflectances à différentes longueurs d'onde dans la zone du proche infra-rouge et les propriétés décrites précédemment (Osborne et Douglas 1981). Pour 148 échantillons de farine commerciale, en employant des données logarithmiques (réflectance) à 1442, 1580, 2060 et 2258 nm, de bonnes calibrations sont obtenues avec la susceptibilité enzymatique, exprimée en unités Farrands (Farrand 1982) : ces longueurs d'onde correspondent à des harmoniques et des combinaisons de fréquences vibratoires dues à des bandes hydroxyl libres et liées à l'hydrogène, dans l'amidon. On a obtenu un coefficient de corrélation de 0,906 et un écart-type résiduel de 3,5 unités Farrands. De même, un coefficient de corrélation de 0,969 a été obtenu entre la NIR et la méthode de l' α -amylase, en comparaison avec un résultat de 0,880 entre cette dernière méthode et l'extractibilité de l'amylose (Evers 1982). 72 échantillons de blé, broyés à l'aide d'un cyclone Udyn, ont permis d'obtenir des résultats similaires : la corréla-

L'endommagement de l'amidon peut également être quantifié par le degré de solubilité des α -glucanes solubles à température ambiante et par l'absorption accrue d'eau par les grains endommagés.

tion avec la méthode enzymatique est élevée, et la fourchette d'erreur similaire à ce qu'on a déjà vu (Finney *et al* 1988). Il y aurait maintenant à rechercher sur les corrélations directes entre la NIR et les propriétés choisies (digestibilité apparente *in vivo*, acceptabilité). L'avenir est aux déterminations en routine fournies par la NIR, à condition que la calibration soit effectuée rigoureusement. Cependant cette technique est incapable de fournir une explication des effets observés *in vivo*. Dans le cas du blé tendre occidental, l'amidon endommagé (AE) dans une farine présente la régression suivante :

$$AE (\%, \text{ méthode enzymatique}) = 0,731011 \times AE (\%, \text{ NIR}) + 0,246234$$

avec un écart type de prédiction de 0,246 % x AE (Finney *et al* 1988). Le principal avantage de cette technique est qu'elle peut devenir un critère de première qualité pour la régulation des chaînes de fabrication, anticipant sur la panne des machines, et pour les variations dans la qualité des matières premières.

Conclusion

Chaque traitement technologique entraîne des transformations physiques des grains d'amidon pouvant aller jusqu'à une dépolymérisation. Les unes comme les autres peuvent être quantifiées grâce à divers tests analytiques. Les études paramétriques conduisent à des relations spécifiques entre la solubilité aqueuse et l'absorption d'eau, la susceptibilité de l'amidon à l' α -amylase au cas par cas après chaque traitement particulier et la matière première. Tous ces tests ont pour but de prévoir l'hydrolyse *in vivo* des macromolécules, mais non l'absorption *in vivo* qui peut être une étape critique. De plus l'endommagement de l'amidon, la plupart du temps, va de pair avec une diminution de la qualité protéique. Par conséquent l'estimation de tout traitement technologique devrait prendre en compte les modifications d'au moins ces deux principaux nutriments des aliments pour animaux. Plus généralement il est symptomatique de remarquer la rareté des études structurales de l'amidon après ces traitements de transformation.

Les résultats de ces tests ont été comparés à des données *in vivo* telles que l'ingestion d'aliment, l'efficacité alimentaire, la digestibilité de l'amidon ou la réponse au glucose post-prandial. Il a été démontré depuis longtemps que la plupart des amidons (cuits ou crus) sont complètement digestibles pour les animaux adultes monogastriques et polygastriques (sauf les espèces carnivores). Donc, les variations des caractéristiques structurales provoquées par les traitements technologiques de l'amidon ne peuvent pas agir sur la digestibilité totale *in vivo*. En revanche ces traitements peuvent agir sur la façon selon laquelle l'amidon sera digéré et sur son taux d'absorption comme glucose. Tous les tests *in vitro* qui sont en mesure d'appréhender l'endommagement de l'amidon, sont capables d'expliquer et de prévoir la transformation de l'amidon dans la partie supérieure

du tractus digestif. Ce sont la vitesse et l'ampleur de l'absorption de l'amidon dans l'intestin grêle qui constituent la plus grande source de variation des éléments amylacés.

L'ingestion d'un repas renfermant une grande part d'aliments amylacés ou d'amidon pur semble influencée par la capacité d'hydratation de l'amidon et par sa solubilité. L'efficacité alimentaire est une conséquence du niveau d'ingestion, de la vitesse de digestion et de la capacité d'absorption de l'organisme. Aucun critère *in vitro* n'est aujourd'hui en mesure d'intégrer ces fonctions.

Cet article est paru en anglais dans la revue Sciences des aliments (Editions Lavoisier) sous la référence suivante : COLONNA P., CHAMP M., 1990. Significance of starch damage in feeds. *Sci. des Aliments*, 10, 877-897.

Références bibliographiques

- AFNOR, 1988. Dosage de l'amidon, V 03606.
- Audidier Y., Cerning J., Colas A., De La Guerivière J.F., Guilbot A., Mercier C., Schleicher R., 1966a. Fractions glucidiques, amidon endommagé et activités amylasiques des farines turboséparées. *Ind. Alim. Agric*, 83, 519-527.
- Audidier Y., De La Guerivière J.F., Seince Y., Benoualid K., 1966b. Détermination par une alpha-amylase bactérienne de l'amidon endommagé dans les farines de froment. Application dans les laboratoires de contrôle industriel. *Ind. Alim. Agric.*, 83, 1597-1608.
- Aumaitre A., 1976. Évaluation de divers traitements technologiques. IV. Influence du floconnage et de l'expansion de l'orge et du maïs sur les performances du porcelet sevré à 31 jours ; effets sur la digestibilité des éléments de la ration. *Ann. Zootech.*, 25, 41-51.
- Aumaitre A., Henry Y., Mercier C., Ivorec-Szyllit O., Thivend P., 1972. Etude préliminaire de l'influence d'un traitement hydrothermique sur la valeur alimentaire du blé et du maïs. *Ann. Zootech.*, 21, 1 33-1 37.
- Bewa H. 1978. Amidons des tubercules tropicaux. Efficacité nutritionnelle pour le poulet. Thèse Docteur Ingénieur. Paris VI.
- Biliaderis C.G., Maurice T.J., Vose J. R., 1980. Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. *J. Food Sci.*, 45, 1969-1974.

- Björck I., Asp N.G., Birkhed D., Lundquist I., 1984a. Effects of processing on availability of starch for digestion *in vitro* and *in vivo*. I. Extrusion cooking of wheat flours and starch. *J. Cereal Sci.*, 2, 91-103.
- Björck I., Asp N.G., Birkhed D., Eliasson A.C., Sjöberg L.B., Lundquist I., 1984b. Effects of processing on availability of starch for digestion *in vitro* and *in vivo*. II. Drum drying of wheat flours. *J. Cereal Sci.*, 2, 165-178.
- Björck I., Nyman M., Pedersen B., Siljeström M., Asp N.G., Eggum B.O., 1986. On the digestibility of starch in wheat bread -Studies *in vitro* and *in vivo*. *J. Cereal Sci.*, 4, 91-103.
- Björck I., Nyman M., Pedersen B., Siljeström M., Asp N.G., Eggum B.O., 1987. Formation of enzyme resistant starch during autoclaving of wheat starch : studies *in vitro* and *in vivo*. *J. Cereal Sci.*, 6, 159-172.
- Borgida L.P., 1976. Effet du floconnage sur les modalités de la digestion et la valeur nutritive du maïs pour le porc en croissance. *Ann. Zootech.*, 25, 337-349.
- Brand J.C., Nicholson P.L., Thornburn A.W., Truswell A.S., 1985. Food processing and the glycemic index. *Amer. J. Clin. Nutr.*, 42, 1192-1196.
- Champ M., 1985. Digestion des glucides chez le monogastrique. *Reprod. Nutr. Develop.*, 25, 819-842.
- Champ M., Kozłowski F., Lecannu G., 1982. Caractérisation physico-chimique et valeur nutritionnelle chez le poulet de concentrats amylicés de pois soumis à différents traitements technologiques. *Sci. Alim.*, 2, 163-168.
- Champ M., Delort-Laval J., Kozłowski F., Lecannu G., 1984. Evaluation nutritionnelle chez le rat des sous-produits d'extraction de protéines de pois et de féverole soumis à différents traitements technologiques. *Sci. Alim.*, 4, 293-297.
- Chiang B.Y., Johnson J.A., 1977. Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-toluidine. *Cereal. Chem.*, 54, 429-435.
- Colonna P., Melcion J.P., Mercier C., 1976. Influence de l'irradiation infrarouge et de l'aplatissage sur la fragmentation, la composition du maïs grain et sur l'état de son amidon. *Ann. Technol. Agric.*, 25, 291-308.
- Colonna P., Mercier C., 1985. Gelatinization and melting of maize and pea starches with normal and high-amylose genotypes. *Phytochem.*, 24, 1667-1674.
- Colonna P., Buléon A., Mercier C., 1987. Physically modified starches. In : T. Galliard (ed.), *Starch : Properties and Potentials*, 79-114, Crit. Rep. Appl. Chem. 13, John Wiley & Sons, New York/Toronto.
- Colonna P., Buléon A., Lemarie F., 1988. Action of *Bacillus subtilis* α -amylase on native wheat starch. *Biotechnol. Bioeng.*, 31, 895-904.
- Colonna P., Tayeb J., Mercier C., 1989. Extrusion Cooking of Starch and starchy products. In : Mercier C., Linko P., Harper J.M. (eds.), *Extrusion cooking*, 247319, AACC, Inc. St Paul, Minnesota.
- Craig S.A.S., Stark J.R., 1984. The effect of physical damage on the molecular structure of wheat starch. *Carbohydr. Res.*, 125, 117-125.
- 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.
- Dermott M.C.E.E., 1980. The rapid nonenzymatic determination of damaged flour in flour. *J. Sci. Food Agric.*, 31, 405-413.
- Dickinson E., McKay J.E., Thomas V.D., Warunek C., 1982. An improved viscometric method for monitoring starch degradation. *J. Sci. Food Agric.*, 33, 194-196.
- Donelson J.P., Yamazaki W.T., 1962. Note on a rapid method for the estimation of damaged starch in soft wheat flours. *Cereal Chem.*, 39, 460-462.
- Donovan J.W., 1979. Phase transitions of the starch-water system. *Biopolymers*, 18, 263-275.
- Donovan J.W., Lorenz K., Kulp K., 1983. Differential scanning calorimetry of heat-moisture treated wheat and potato starches. *Cereal Chem.*, 60, 381-387.
- Dreher M.L., Dreher C.J., Berry J.W., 1984. Starch digestibility of foods : a nutritional perspective. *CPC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 20, 47-71.
- Essatara M., Saintaurin DE M.A., Abraham J., 1976. Evaluation de divers traitements technologiques des céréales. III. Effets de l'expansion, de l'extrusion et du floconnage sur la valeur alimentaire du blé et du maïs pour le rat en croissance. *Ann. Zootech.*, 25, 31-39.
- Evers A.D., 1983. The production and measurement of starch damage. *FMBPA Bulletin*, 6, 256-268.
- Farber B., Gallant D.J., 1976. Evaluation 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 du floconnage. *Ann. Zootech.*, 25, 13-30.
- Farrand E.A., 1964. Flour properties in relation to the modern bread processes in the United Kingdom, with special reference to α -amylase and starch damage. *Cereal Chem.*, 41, 98-111.
- Finney P.L., Kinney J.E., Donelson J.R., 1988. Prediction of damaged starch in straight grade flour by near-infrared reflectance analysis of whole ground wheat. *Cereal Chem.*, 65, 449-452.
- Flory P.J., 1953. *Principles of Polymer Chemistry*, 672 p., Cornell University Press, New York.
- Gallant D., Mercier C., Guilbot A., 1972. Electron microscopy of starch granules modified by bacterial α -amylase. *Cereal Chem.*, 49, 354-365.
- Gallant D.J., Bewa H., Buy Q.H., Bouchet B., Szyliet O., Sealy L., 1982. On ultrastructural and nutritional aspects of some tropical tubers starches. *Starke*, 34, 255-262.
- Gee J.M., Johnson I.T., 1985. Rates of starch hydrolysis and changes in viscosity in a range of common foods subjected to simulated digestion *in vitro*. *J. Sci. Food Agric.*, 36, 614-620.
- Geervani P., Theophilus F., 1981. Studies on digestibility of selected legume carbohydrates and its impact on the pH of the gastrointestinal tract in rats. *J. Sci. Food Agric.*, 32, 71-78.

- Guilbot A., Mercier C., 1962. Répercussions sur la digestibilité de l'amidon, des modifications de sa structure physico-chimique au cours de ses transformations technologiques. *Ind. Alim. Agric.*, 79, 939-947.
- Guilbot A., Mercier C., 1985. Starch. in : Aspinall G.O. (ed.), *The Polysaccharides*, vol. 3, 209-282, Academic Press, London/ New York.
- Holm J., Björck I., Asp N.-G., Sjöberg L.-B., Lundquist I., 1985. Starch availability in vitro and in vivo after flaking, steamcooking and popping of wheat. *J. Cereal Sci.*, 3, 193-206.
- Jenkins D.J.A., Ghafari H., Wolever T.M.S., Taylor R.H., Jenkins A.L., Barker H.M., Fielden H., Bowling A.C., 1982. *Diabetologia*, 22, 450-455.
- Jenkins D.J.A., Wolever T.M.S., Taylor R.H., 1980. Rate of digestion of foods and post prandial glycaemia in normal and diabetic subjects. *Brit. Med. J.*, 282, 14-17.
- Jenkins D.J.A., Thorne M.J., Wolever T.M.S., Jenkins A.L., Rao A.V., Thompson L.U., 1987. The effect of starch-protein interaction in wheat on the glycemic response and rate of in vitro digestion. *Amer. J. Clin. Nutr.*, 45, 946-951.
- Jones C.R., 1940. The production of mechanically damaged starch in milling as a governing factor in the diastasic activity of flour. *Cereal Chem.*, 17, 133-169.
- Kon S., Agner J.R., Becker R., Booth A.N., Robbino D.J., 1971. Optimizing nutrient availability of legume food products. *J. Food Sci.*, 36, 635-639.
- Leach H.W., Schoch T.V., 1961. Structure of the starch granule. II. Action of various amylases on granular starches. *Cereal Chem.*, 38, 34-46.
- Lee P.C., Brooks S.P., Kim O., Heitlinger L.A., Lebenthal E., 1985. Digestibility of native and modified starches : in vitro studies with human and rabbit pancreatic amylases and in vivo studies in rabbits. *J. Nutr.*, 115, 93-103.
- Lelièvre J. 1973. Starch gelatinization. *J. Appl. Polym. Sci.*, 18, 293-296.
- Lelièvre J., 1976. *Polymer.*, 17, 854-858.
- Kainuma K., Matsunaga A., Itagawa R., Kobayashi S., 1981. New enzyme -b-amylase-pullulanase- to determine the degree of gelatinization and retrogradation of starch and starch products. *J. Jap. Soc. starch Sci.*, 28, 235-240.
- Mansouri M., 1983. Effet des traitements thermiques sur les facteurs antinutritionnels et la valeur alimentaire de trois légumineuses : *Phaseolus vulgaris*, *Cicer arietinum* et *Lensesculenta*. INA Alger, Magister Sci. Alim.
- Medcalf D.G., Gilles K.A., 1965. Determination of starch damage by rate of iodine absorption. *Cereal Chem.* 42, 546-557.
- Mercier C., 1971. Effects of various US grain processes on the alteration and the in vitro digestibility of starch granule. *Feedstuffs*, 43, 33-47.
- Mercier C., 1977. Influence des traitements technologiques des céréales sur l'état de l'amidon et sa digestibilité in vitro. *Bull. Anc. Elèves. Ecole Franç. Meunerie.*, 278, 3-12.
- Mercier C., Feillet P., 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. *Cereal Chem.*, 52, 283-297.
- Mercier C., Charbonnière R., Guilbot A., 1968. Influence d'un traitement par pression sur la structure granulaire des différents amidons et sur leur sensibilité aux enzymes. *Stärke*, 20, 6-11.
- Mercier C., Guilbot A., 1974. Influence des conditions de granulation du maïs sur les caractéristiques physico-chimiques de son amidon. *Ann. Zootech.*, 23, 241-251.
- Mercier C., Charbonnière R., Gallant D., Guilbot A., 1979. Structural modifications of various starches by extrusion-cooking with a twin-screw french extruder. in : Blanshard J.M.V., Mitchell J.R. (eds.), *Polysaccharides in Food*, 152-170 Butterworths, London/Boston.
- O'Dea K., Snow P., Nestel P., 1981. Rate of starch hydrolysis in vitro as a predictor of metabolic responses to complex carbohydrate in vivo. *Am. J. Clin. Nutr.*, 34, 1991-1993
- Osborne B.G., Douglas S., 1981. Measurement of the degree of starch damage in flour by near infrared reflectance analysis. *J. Sci. Food Agric.*, 32, 328-332.
- Rodriguez I.R., Taravel F.R., Whelan W.J., 1987. Identification of the enzymes responsible for the conversion of starch into glucose in the mammalian digestive tract. *CRC. Crit. Rev. Biotech.*, 5, 243-258.
- Sandstedt R.M., Mattern P.J., 1960. Damaged starch quantitative determination in flour. *Cereal Chem.* 37, 379-390.
- Schweizer T. F., Reimann S., Wursch P., 1988. Definition and measurement of a starch digestion index and a study of factors determining starch digestion rates in foods. *Lebensm. -Wiss. u. -Technol.*, 21, 352-357.
- Surpalekar K.S., Sundaravalli O.E., Rao M.N., 1979. Nutritional value of starches. *Nutr. Rep. Int.*, 19, 111-117.
- Snow P., O'Dea K., 1981. Factors affecting the rate of hydrolysis of starch in foods. *Amer. J. clin. Nutr.*, 34, 2721-2727.
- Stark J.R., Yin X.S., 1986. The effect of physical damage on large and small barley starch granules. *Stärke*, 38, 369-374.
- Stevens D.J., Evers A.D., 1983. Der Mechanismus und die Bedeutung der Starkebeschädigung. *Getreide, Mehl und Brot*, 37, 101-106.
- Stewart B.A., 1960. Determination of starch damage in flour. *Milling*, 146, 491-496.
- Sugimoto Y., Fujit S., Takayat T., Fuwa H., 1980. in vivo digestion of banana starch granules. *Stärke*, 32, 290-294.
- Sullivan B., Anderson M.L., Goldstein A.M., 1962. The determination of starch damage of flour. *Cereal Chem.*, 39, 155-167.
- Szylił O., 1973. Les voies métaboliques de la dégradation de l'amidon dans le jabot de gallus et leurs incidences nutritionnelles. Thèse Sciences Naturelles, Paris.
- Tollier M.T., Guilbot A., 1974. Le maïs grain : préstockage, séchage et qualité. IV. Caractéristiques de la fraction glucidique des échantillons de maïs-grain. *Ann. Zootech.*, 20, 633-640.

Varriano-Marston E., Ke V., Huang G., Ponte J., 1980. Comparison of methods to determine starch gelatinization in bakery foods. *Cereal Chem.*, 57, 242-248.

Williams P.C., Leseelieur G.C., 1970. Determination of damaged flour in flour : a comparative study of present-day procedures. *Cereal Sci. Today*, 15, 4-19.

Wooton M., Chaudry M.A., 1980. Gelatinization and in vitro digestibility of starch in baked products. *J. Food Sci.*, 45, 1783-1784.

Wong S., Traianedes K., O'Dea K., 1985. Factors affecting the rate of hydrolysis in legumes. *Amer. J. Clin. Nutr.*, 42, 38-43.

Summary

Significance of starch damage in feeds.

Starch modifications, occurring during processing and manufacturing of feeds, involve increase of surface area to starch ratio in the solid, decrease in crystallinity and depolymerisation of amylose and amylopectin. The in vitro methods used to study factors that influence hydrolysis rates of starch in feeds are reviewed. Qualitative observations are based on microscopy. Quantitative determinations are based upon enzymatic suscep-

tibilities to α - and β -amylases, cold water and alcoholic solution extractabilities and water absorption capacity. These tests are useful to predict transformations of starch in the upper part of the digestive tract. Near-infrared analysis would become a useful on-line quality criterion for process control.

CHAMP M., COLONNA P., 1993. Importance de l'endommagement de l'amidon dans les aliments pour animaux. *INRA Prod. Anim.*, 6 (3), 185 - 198.