ALIMENTATION ET NUTRITION HUMAINES

Coordonnateurs

Henri Dupin, Jean-Louis Cuq

M.-I. Malewiak, C. Leynaud-Rouaud, A.-M. Berthier

E S F
éditeur

© *1992 ESF éditeur*
ISBN 2.7101.0892.5

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (Alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

LISTE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

François BAUDIER,

Docteur en médecine, Délégué général adjoint au Comité Français d'Education pour la Santé (CFES).

Anne-Marie BERTHIER,

Diététicien, Centre de recherche et d'information nutritionnelles (CERIN).

Laure BICHON,

Pharmacien biologiste, nutritionniste à la SAFRANE (Sensibilisation, Animation, Formation et Recherche en Alimentation et Nutrition en rapport avec l'Environnement).

Marie-Sylvie BILLAUX,

Pharmacien, Chef du service de Documentation à l'Association des Praticiens pour l'Information en Nutrition et Diététique (APRID).

Jean BILLON,

Docteur vétérinaire, Chef du service de Microbiologie alimentaire au Laboratoire central des Services Vétérinaires.

Francis BORNET,

Docteur en Médecine, Responsable des recherches en nutrition du Groupe Béghin Say, Gruppo Ferruzzi, Attaché des Hôpitaux de Paris.

Jean CAUSERET,

Docteur ès Sciences, Directeur de recherche honoraire à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).

Marc CHAMBOLLE,

Ingénieur agronome INA, Conseiller scientifique à la Direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF).

Matty CHIVA,
Docteur ès Lettres, Professeur à l'Université Paris X, Nanterre, Département de Psychologie de l'enfant.

Jean-Louis CUQ,
Docteur ès Sciences, Professeur à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Laboratoire du Génie biologique et Sciences des aliments.

Anne-Marie DARTOIS,
Diététicien, Ingénieur de recherches à l'INSERM, Hôpital des Enfants malades, Paris.

Gérard DEBRY,
Professeur à la Faculté de Médecine de Nancy, Directeur du Centre de Nutrition humaine de l'Université de Nancy I et du Laboratoire de Nutrition humaine de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes.

Jean-Pierre DESCHAMPS,
Professeur de Santé publique à l'Université de Nancy I, Directeur du Centre de Médecine préventive de Vandoeuvre-les-Nancy.

Jean-Claude DILLON,
Docteur en Médecine, Professeur de Nutrition humaine à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Chargé d'enseignement au Département de Santé publique de l'Université Paris VI.

Henri DUPIN,
Docteur en Médecine, Professeur honoraire (Biologie) au Conservatoire National des Arts et Métiers, ancien Directeur de l'Institut Scientifique et Technique de l'Alimentation du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM).

Alain DURAN,
Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Inspecteur chargé des questions de nutrition à la Direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF).

Jean-Claude FAVIER,
Docteur en Pharmacie, Docteur ès Sciences, Directeur de recherches à l'Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM), Centre informatique sur la Qualité des Aliments (CIQUAL).

Madeleine FAVRE-BERRONE,
Docteur en Médecine, Hôpital Charles Foix, Ivry-sur-Seine.

Max FEINBERG,
Ingénieur agronome, Docteur ès Sciences, Directeur de recherches à l'INRA, Directeur du Centre informatique sur la Qualité des Aliments (CIQUAL).

Marielle du FRAYSSEIX,
Diététicien, Direction de l'Action sociale à l'enfance et à la santé de la Ville de Paris.

Stéphane GUILBERT,
Ingénieur ISIM, Docteur ès Sciences, Directeur de recherches en Génie et Technologie alimentaire au CEEMAT- CIRAD, Montpellier.

Joseph GUIRAUD,
Docteur ès Sciences, Professeur à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

Michel HENRY,
Ingénieur agronome et ENSMIC, ancien Directeur de recherches des Laboratoires de la Société Olida.

Serge HERCBERG,
Docteur en Médecine, Docteur ès Sciences, Chargé de recherches à l'INSERM, Directeur adjoint de l'Institut Scientifique et Technique de la Nutrition et de l'Alimentation au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM).

Jayne IRELAND-RIPERT,
Ingénieur de recherches de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA), chercheur au Centre informatique sur la Qualité des Aliments (CIQUAL).

Anne LATOUR-RAULIN,
Directeur de l'Agence pour la Recherche et l'Information en Fruits et Légumes frais (APRIFEL).

Jean LENOIR,
Ingénieur agronome INAPG, Professeur à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Laboratoire de Technologie.

François LERY
Ingénieur agronome, Membre de l'Académie d'Agriculture de France.

Catherine LEYNAUD-ROUAUD,
Docteur en Médecine, Docteur de 3e Cycle, Nutritionniste à la SAFRANE (Sensibilisation, Animation, Formation et Recherche en Alimentation et Nutrition en Rapport avec l'Environnement).

Jeanine LOUIS-SYLVESTRE,
Docteur ès Sciences, Directeur de recherches à l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, Laboratoire de Neurobiologie de la Nutrition, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Marie-Irène MALEWIAK,
Docteur ès Sciences, Maître de Conférences à la chaire de Biologie du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM).

Philippe MANCHON,
Docteur ès Sciences, Maître de Conférences à la chaire de Biologie du Conservatoire National des Arts et Métiers.

Anne-Marie MASSE-RAIMBAULT,
Docteur en Médecine, Chef de service au Centre International de l'Enfance.

Jean-Pierre de MONDENARD,
Docteur en Médecine, Centre de médecine du Sport, Chennevières.

Jean-Marie NAVARRO,
Docteur ès Sciences, Professeur à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Microbiologie industrielle.

Stylianos NICOLAIDIS,
Docteur en Médecine, Docteur ès Sciences, Professeur de Neurochirurgie, Directeur de l'UA 637 du CNRS (Neurobiologie des régulations) à l'Institut de Biologie du Collège de France.

Jacques PAQUIN,
Docteur vétérinaire, Société Guillomarc'h, Vannes.

Georges PÉQUIGNOT,
Docteur en Médecine, Directeur de recherches honoraire à l'INSERM.

Guy PICLET,
Directeur de recherches à l'Institut Français de Recherches pour l'Exploitation des Mers (IFREMER), Expert-conseil de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).

Luc PICON,
Docteur en Médecine, Docteur ès Sciences, Professeur à l'Université Paris VII.

Jean-Christophe TOSI,
Docteur vétérinaire, Inspecteur aux Services vétérinaires d'Hygiène alimentaire, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt.

Aldo UZZAN,
Directeur Général honoraire de l'Institut Technique des Etudes et Recherches sur les Corps Gras (ITERG), Conseiller scientifique du Groupe d'Etudes des Protéines Végétales (GEPV).

Guy VERMEIL,
Docteur en Médecine, ancien Chef de service à l'Hôpital d'Orsay.

Pierre-Marie VINCENT,
Ingénieur agronome EPF de Zurich, Président de l'Association française du Droit de l'Alimentation, ancien Conseiller en Législation alimentaire de la Société Roquette frères.

Philippe WALKER,
Praticien hospitalier au Centre Hospitalier Régional de Bourges, Médecin attaché à l'Hôpital Saint-Louis, Paris.

Certains chapitres de ce livre portent le nom d'une personne – aujourd'hui disparue – qui avait contribué à la rédaction du *Manuel d'Alimentation humaine*. Nous souhaitons rappeler le nom et la fonction de chacune d'elles.

Jean CLAUDIAN,
Médecin des Hôpitaux de Bucarest. Chercheur à la section de Nutrition de l'INSERM.

Raymond JACQUOT,
Directeur du Centre de Recherches sur la Nutrition au CNRS, Directeur à l'Ecole des Hautes Etudes.

Yvonne SERVILLE,
Licenciée ès Sciences, Diététicienne, Professeur d'Enseignement ménager. Maître de recherches à la section de Nutrition de l'INSERM.

Jean TRÉMOLIÈRES,
Docteur en Médecine, Docteur ès Sciences, Professeur de Biologie au Conservatoire National des Arts et Métiers, Directeur de l'Unité de Recherches en Nutrition et Diététique de l'INSERM.

Roger VEISSEYRE,
Professeur, chaire des Industries alimentaires à l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon.

SOMMAIRE

Ce livre comporte quinze parties

Première partie	L'alimentation des hommes. Evolution des concepts, évolution des consommations.
Deuxième partie	Aliments et nutriments.
Troisième partie	La digestion.
Quatrième partie	Nutrition cellulaire. Métabolisme des nutriments.
Cinquième partie	Besoins nutritionnels. Apports conseillés pour la satisfaction de ces besoins.
Sixième partie	Comportement alimentaire. Physiologie. Psychologie.
Septième partie	Les différents groupes d'individus, leurs besoins : nourrissons et jeunes enfants, enfants et adolescents, femmes enceintes, personnes âgées.
Huitième partie	Les repas à domicile et hors domicile.
Neuvième partie	Alimentation et santé. Alimentation et pathologies.
Dixième partie	Les aliments.
Onzième partie	Cuisson, conservation des aliments, technologies.
Douzième partie	Microbiologie alimentaire.
Treizième partie	Toxicologie. Pollution.
Quatorzième partie	Salubrité, qualité de l'aliment. Législation et réglementation. Protection des consommateurs.
Quinzième partie	Table de composition des aliments : réalisation, utilisation, limites.

Annexes :
Lexique
Index alphabétique

10

LES GRAINES DE LÉGUMINEUSES

Jean-Louis CUQ et Catherine LEYNAUD-ROUAUD

INTRODUCTION

Les graines de légumineuses appartiennent à une famille botanique très importante du point de vue économique et nutritionnel. La sous-famille des Papilionacées représente une source très importante d'aliments, pour l'homme sous forme de graines, et pour les animaux sous forme de fourrages et de graines. C'est dans les genres *Viciae, Phaseoleae, Lupineae, Glycineae, Diocleae* qu'on rencontre les plantes qualifiées de protéagineux, dont les graines sont les plus riches en protéines. Parmi ces graines on peut citer, par exemple, le soja ou l'arachide *(Glycineae)*, la fèverole, la fève ou le pois *(Viciae)*, le haricot *(Phaseoleae)*, le lupin *(Lupineae)*. Certaines de ces graines, qualifiées d'oléagineuses, sont caractérisées par des teneurs élevées en lipides. Certaines graines portant cependant le qualificatif d'oléagineuses, comme le tournesol, le coton ou le maïs, n'appartiennent pas à cette famille botanique. Les légumes secs sont des légumineuses particulièrement riches en amidon et à teneur peu élevée en lipides.

Ces graines sont caractérisées par une forte teneur en protéines, ce qui a été – alors que la notion même de protéine n'était pas connue – à l'origine du vieux dicton français « le haricot est la viande du pauvre ».

PRODUCTION, RENDEMENT ET ÉCONOMIE

Les graines de légumineuses étant considérées comme des *sources importantes de protéines,* leur production peut être évaluée par rapport à la quantité de protéines qu'elles apportent.

A l'échelle mondiale, la production de protéines de céréales dépasse 140 millions de tonnes (blé 35 %, maïs 25 %, riz 17 %, orge 12,5 %), celle des oléagineux atteint 40 millions de tonnes (soja 55 %, coton 16 %, arachide 12,5 %, tournesol 8,5 %, colza 7 %, coprah 2 %, sésame 1,3 %) et celle d'autres légumineuses comme le pois, la fèverole, le pois chiche ou la lentille (8,5 millions de tonnes). La culture de ces graines se caractérise par des rendements de production de protéines par hectare et par an très élevés. *Ces rendements sont compris entre 500 et 750 kg de protéines par hectare et par an, alors qu'ils ne sont que d'environ 80 kg pour les protéines de viande de bœuf.* C'est cette différence qui explique en grande partie les écarts de prix considérables entre ces protéines.

L'évolution de la production annuelle totale de ces graines oléagineuses est essentiellement corrélée à celle du soja *(Glycine max.)*. Consommé depuis l'antiquité en Extrême-Orient, ce n'est que depuis les années 1920-1930 que la culture intensive du soja a été pratiquée aux *Etats-Unis.* Depuis, sa production mondiale n'a cessé de croître et dépasse aujourd'hui les 100 millions de tonnes de graines, dont plus de 65 % proviennent des Etats-Unis (figure 1).

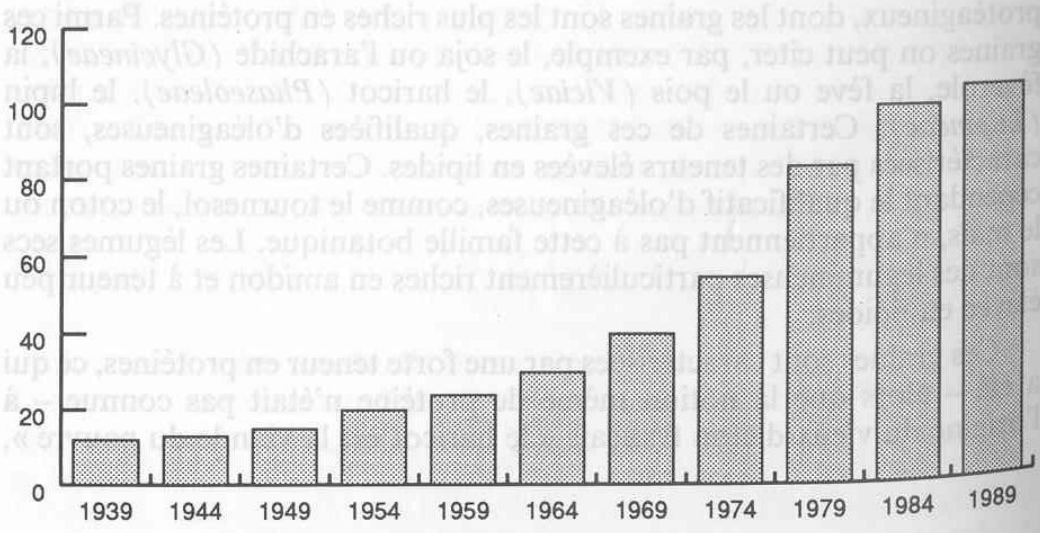


Figure 1

Production mondiale de graines de soja (en millions de tonnes).

Dans ce pays, *un véritable complexe d'activités* s'est mis en place autour du soja, associant agriculteurs, coopératives, négociants, firmes agro-alimentaires, universités, instituts de recherche et l'Etat. Un nouveau modèle de production et de consommation a été ainsi créé, modèle qui est toujours générateur de débouchés croissants pour cet oléagineux. D'abord considéré jusqu'à il y a une trentaine d'années comme une source d'huile, c'est surtout comme source très importante de protéines qu'il est utilisé actuellement. Favorisée par un prix de vente relativement bas, la pénétration du soja, d'abord aux Etats-Unis puis en Europe et au Japon, est étroitement liée à la modernisation des méthodes d'élevage et à l'évolution des habitudes de consommation. Les tourteaux riches en protéines (45 %) sont largement utilisés dans l'alimentation du bétail, des volailles, des porcs et des animaux domestiques. Depuis une trentaine d'années, une proportion de plus en plus grande de soja est consacrée à la fabrication de produits destinés à l'alimentation humaine (farine délipidée, concentrat, isolat dont la production dépasse les 2 millions de tonnes).

Parallèlement, une véritable dépendance vis-à-vis des importations de soja n'a fait que s'accroître. Ainsi, après le pétrole et le bois, les approvisionnements en « protéines » contribuent d'une façon considérable au déficit de la balance commerciale française et dépassent 5 milliards de francs. Environ 85 % des produits riches en protéines destinés à l'alimentation animale sont importés, le soja représentant à lui seul environ 80 %, soit près de 3,5 millions de tonnes de tourteau.

Au cours de ces vingt dernières années, les productions mondiales annuelles des autres oléagineux se sont, soit stabilisées comme celle du coton (aux environs de 27 millions de tonnes de graines) ou de l'arachide (aux environs de 12 millions de tonnes), soit légèrement développées comme celle du colza (de 7 à 12 millions de tonnes entre 1971 et 1981) ou du tournesol (de 10 à 15 millions de tonnes entre 1971 et 1981).

En France, en raison de difficultés agronomiques rencontrées pour développer la culture du soja, la culture d'autres plantes protéagineuses (tournesol, colza, fèverole, pois, lentille, lupin, haricot, pois chiche) s'est développée sans pour autant permettre de réduire de façon significative notre déficit dans l'approvisionnement en protéines. En 1985, les productions françaises de graines de tournesol, colza, pois, fèverole et soja ont été respectivement d'environ 1500, 1300, 950, 120 et 70 milliers de tonnes.

CONSOMMATION DES LÉGUMINEUSES

En France, la consommation des graines de légumineuses et plus particulièrement des légumes secs a *régulièrement diminué depuis un siècle.* De 9,9 kg par personne et par an en 1880, cette consommation est passée à 5,5 puis 3,7 et 1, respectivement en 1937, 1960 et 1985. Ce phénomène, décrit par Périssé et collaborateurs en 1969, correspond au changement de notre alimentation en fonction de notre niveau de vie. Quand le revenu moyen du consommateur augmente, sa consommation de produits végétaux, et en particulier de légumes secs, diminue tandis que celle de produits d'origine animale ou de sucre augmente. Parmi les légumes secs, les fèves occupaient jusqu'au XIXe siècle une place importante dans l'alimentation alors que leur consommation a presque disparu actuellement. Les haricots et, à un degré moindre, les lentilles et les pois ont vu leur consommation diminuer et, grâce à la mise à la disposition des consommateurs de conserves industrielles, se stabiliser.

Les haricots secs sont produits en Beauce, dans le Val de Loire, en Bretagne, en Vendée et dans le Nord-Pas de Calais. *Les lentilles* viennent du Berry, de l'Eure-et-Loire et de l'Auvergne (lentilles vertes du Puy). Depuis peu de temps des essais d'acclimatation des *pois chiches* sont faits dans le Sud-Est.

Dans quelques pays, la consommation de certains légumes secs, qui fait partie intégrante de l'alimentation traditionnelle, reste relativement importante et contribue beaucoup à l'apport protéique du régime. Ainsi, *lentilles, fèves et pois chiches* sont encore largement utilisés dans des pays d'*Afrique du Nord* et du *Proche-Orient.* En *Amérique Centrale,* en *Amérique du Sud* et dans de nombreux *pays africains* Sud-sahariens, la consommation de *haricots (et/ou de fèves)* est encore élevée et permet de limiter les risques de carence protéique. Dans ces pays il n'est pas rare que cette consommation dépasse les 15 kg par personne et par an.

L'arachide, cultivée en *Extrême-Orient,* en *Afrique tropicale* et en *Amérique,* est surtout considérée comme une source d'huile. Riche en protéines, sa consommation permet d'accroître la valeur nutritionnelle des régimes à base de céréales ou de manioc.

Le soja, originaire d'Asie, est très largement utilisé en alimentation humaine dans tout le *Sud-Est asiatique* et en *Amérique latine.* L'augmentation de sa consommation dans les autres pays résulte d'une « exportation » des préparations culinaires traditionnelles, mais aussi du développement de technologies modernes de valorisation des constituants de cette graine et plus particulièrement des protéines.

COMPOSITION DE QUELQUES GRAINES DE LÉGUMINEUSES

Les graines de légumineuses comprennent trois principales parties :

• *Une enveloppe* protectrice dont l'épaisseur, le poids relatif et la rigidité varient d'une graine à une autre. Ainsi, par rapport à 100 g de graines, elle représente environ 7 g pour le soja, 17 pour le colza, 25 pour le tournesol. Très pauvre en eau, elle est en grande partie composée de fibres (telles que celluloses, hémicelluloses et lignines).

Tableau 1

Composition moyenne de quelques graines de légumineuses et d'oléagineux
(en grammes pour 100 grammes de graines).

Graine	Eau	Protéines	Lipides	Glucides totaux	Fibres	Minéraux totaux
Soja	11	38	18	24	12	5
Colza	10	20	42	21	17	5
Arachide	9	23	45	18		4,5
Tournesol	9	23	35	22	15	6
Coton	8	44	27	12		5
Pois lisse frais	82	5,5	0,3	11	8	0,4
Pois cassé sec	9	23	1,5	60	12	3,5
Pois chiche	10	20	5	58	15	4
Fève fraîche	88	3,8	0,2	6	4	0,4
Haricot blanc	11	23	2	55	17	4
Lentille	11	25	1	54	12	3
Fèverole	11	27	1,5	52	17	5
Lupin	12	34	10	35	20	3,5

Minéraux
(en milligrammes pour 100 grammes).

Graine	Ca	Na	Mg	K
Soja	250	10	290	1 100
Colza	300			
Arachide, Tournesol, Coton	130	35	200	600
Pois lisse frais	20	130	25	
Pois cassé sec	70		140	
Pois chiche	150	25	30	
Fève fraîche	15	5	30	
Haricot blanc	145	20	170	
Lentille	80	30	80	1 000
Fèverole	110	10	180	1 200
Lupin	180	10	150	900

• *Deux cotylédons* qui contiennent des protéines de réserve souvent localisées dans des corpuscules (corps protéiques), des lipides, des glucides (amidons, celluloses, hémicelluloses, pectines, hexoses, saccharose, raffinose, stachyose, etc.) en quantités variables selon la graine, des minéraux, des vitamines et d'autres composés pouvant être appelés mineurs (présents en quantités infimes) mais dont le rôle est important : favorable pour certains, en particulier pour la prévention des maladies cardio-vasculaires et de certains cancers, défavorables pour d'autres, c'est-à-dire ayant des effets anti-nutritionnels ou même toxiques, lorsque certaines précautions ne sont pas prises pour leur préparation. Les légumineuses qualifiées d'oléagineux sont caractérisées par des teneurs élevées en lipides (entre 18 et 45 %), tandis que les autres légumineuses possèdent des teneurs importantes en glucides et plus particulièrement en amidon, ce polymère représentant entre 60 et 80 % des glucides totaux. De par leur composition, les légumineuses sont de bonnes sources de minéraux, dont la disponibilité peut être réduite chez certaines graines par des phytates.

• *Un germe* ou hypocotyle qui représente 1 à 3 % du poids de la graine ; sa teneur en protéines, lipides et glucides est respectivement voisine de 40, 10 et 45 %.

Les teneurs en vitamines du groupe B (B_1, B_2 et PP) des graines de légumineuses sont relativement satisfaisantes. La teneur en fer est voisine de 6 à 8 mg pour 100 g de graine et celle en soufre varie selon les légumineuses entre 150 et 300 mg.

VALEUR NUTRITIONNELLE DES GRAINES DE LÉGUMINEUSES

Les graines de légumineuses sont consommées par l'homme depuis des siècles, à l'état frais ou sec, après cuisson

Elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'épluchage, mais aujourd'hui, c'est leur *temps de cuisson* qui décourage beaucoup de personnes qui en mangeraient volontiers. Il faut savoir que le trempage n'est pas nécessaire pour toutes ces graines, pas pour les lentilles en particulier. Elles peuvent être cuites à un moment qui convient et être consommées en différé, soit après un séjour d'un ou deux jours en bas du réfrigérateur (sous film plastique), soit en les décongelant au bain-marie ou dans une casserole à feu doux. Les lentilles, par exemple, se congèlent froides après cuisson, sept minutes en autocuiseur, ou quinze minutes en cuisson simple après égouttage.

Tableau 2

Valeur nutritionnelle de quelques légumineuses.

Graine	kJ/100 g	CEP	CUD	Acide aminé limitant	Facteurs toxiques ou antinutritionnels ou de flatulence
Soja	1 750	1,1*	85	MET	IT, saponines, FF, lectines, phytate gluconinolates
Colza	2 200	2,6	80	équilibré	Thioglucosides, phytate, FF
Arachide	2 150	1,6		MET	Glucosinolates
Tournesol	1 950	2,1		LYS	Polyphénols
Coton	1 850	2,3		LYS-MET	Gossypol, phytate
Petit pois cru	305	1,7	86	MET	IP, phytate, FF, lectines, facteurs cyanogénétiques
Pois chiche	1 500	1,7		MET	IP, phytate, FF
Fève	150	1,7		MET	Facteurs de favisme, tannins, IP, FF, phytate, lectine
Haricot	1 400	1,8	81	MET	FF, acides aminés, lectines, glucosinolates, f. cyanogénétiques
Lentille	1 400	1,9	88	MET	FF, facteurs cyanogénétiques
Fèverole	1 400	1,9		MET	Facteurs de favisme, tannins, IT, FF, polyphénols, phytate, lectines

CEP : cœfficient d'efficacité protéique (caséine 2,6)
CUD : cœfficient d'utilisation digestive
IT : inhibiteurs trypsiques
IP : inhibiteurs de protéases
FF : facteurs de flatulence
* CEP du soja cuit (2,3)

Pour ceux qui n'ont pas, ou plus, l'habitude d'en manger, les légumes secs sont plutôt à proposer en petites quantités (50 g, poids cru, pour les adultes), bien cuits et, pourquoi pas, avec d'autres légumes dans des soupes ou en purée. On peut prévoir également, pour les personnes délicates, des plantes carminatives finement hachées (estragon, sarriette, cerfeuil, etc.).

Ce sont des aliments *riches en protéines* et *pauvres en lipides,* ce qui fait de leur consommation un facteur d'équilibre alimentaire pour la plupart des habitants des pays industrialisés, dont la consommation de lipides est excessive.

Chez les légumes secs, la méthionine constitue l'acide aminé limitant des protéines qu'ils contiennent. *Chez les céréales, c'est la lysine* qui est l'acide aminé limitant. Il est possible, par *complémentation,* d'améliorer la valeur biologique des protéines des légumes secs et des protéines des céréales : le déficit en acide aminé limitant des unes est diminué par l'apport des autres en cet acide aminé.

Leur contenu en *fibres* est également un facteur favorable pour le transit intestinal et donc pour la prévention de certains cancers, puisque

les composés cancérogènes ou co-carcinogènes sont ainsi moins longtemps en contact avec la muqueuse, mais aussi, par certains de leurs composants, pour la prévention des cardiopathies ischémiques. En effet, on a observé, avec l'ingestion de lentilles, de haricots ou de pois, une *diminution de la cholestérolémie,* certainement liée à une augmentation du catabolisme du cholestérol, induite par une non-absorption des acides biliaires par complexation avec ces composants des fibres.

Les amidons des légumes secs ont un faible index glycémique (glucides complexes et présence d'anti-amylase) : les diabétiques peuvent les consommer sans que leur sécrétion d'insuline soit beaucoup stimulée.

Ils apportent des quantités intéressantes de *vitamines du groupe B* et de *minéraux,* magnésium, potassium (intéressant pour la prévention de l'hypertension artérielle) et *fer* en particulier. Ce dernier est moins bien absorbé que celui des produits animaux, néanmoins il l'est d'autant mieux que la teneur en phytates des graines est faible.

On doit signaler enfin les *propriétés anti-oxydantes* des légumes secs, celles des pois étant bien connues et utilisées pour la préparation d'aliments comme des potages incluant du lard, facilitant leur conservation.

La consommation des légumineuses est donc à encourager, avec des viandes et des charcuteries comme on en a pris l'habitude, mais aussi avec des poissons ou, de façon plus intéressante nutritionnellement, avec des céréales.

Ces graines contiennent des dérivés toxiques ou anti-nutritionnels qui ont fait l'objet de très nombreuses études

Il s'agit le plus souvent de composés synthétisés par la plante ou apportés par des contaminations. Ces facteurs peuvent être préjudiciables pour l'homme en cas de consommation de la *graine crue.* Cependant leur concentration est souvent faible et ils sont généralement détruits par traitement thermique ou extraits par l'eau de cuisson. Par ailleurs, ces facteurs sont, pour la plupart d'entre eux, éliminés au cours de la germination et/ou après fermentation. Il faut enfin signaler que des variétés à teneur en composés anti-nutritionnels faible, voire nulle, ont été obtenues par sélection génétique.

Parmi les plus importants facteurs toxiques ou antinutritionnels rencontrés chez les légumineuses, on peut citer :

1) *Les inhibiteurs de protéases*

Il s'agit de protéines de masses molaires comprises entre 5 000 et 20 000 daltons qui se fixent de façon quasi irréversible sur certaines protéases digestives (trypsine et chymotrypsine). L'inactivation qui en résulte se traduit alors par une hypersécrétion compensatrice de l'organisme et donc par des hypertrophies d'organes (pancréas avec l'inhibiteur de Kunitz). Les protéases complexées avec ces molécules ne sont pas digérées ; la perte d'azote endogène est alors considérable et se traduit globalement par un déficit très important en méthionine. Ces inhibiteurs sont facilement inactivés par traitement thermique (cuisson, autoclavage, etc.).

2) *Les hémagglutinines ou lectines*

Ce sont des molécules protéiques de masse molaire élevée (entre 60 000 et 110 000 daltons). Après ingestion, elles se fixent sur les membranes des entérocytes dont elles altèrent certaines des fonctions. Consommées régulièrement, elles peuvent provoquer des retards de croissance, des colites, des anémies. Ces composés qui ont la propriété d'agglutiner spécifiquement les hématies, sont facilement inactivés par la chaleur.

3) *Les thioglycosides ou glucosinolates*

Il s'agit d'hétérosides dont la formule générale est la suivante :

$$\begin{array}{c} R - C = N - S0_4H \\ | \\ S - \text{glucose} \end{array}$$

Chez le soja et l'arachide, R correspond à des dérivés de phénols et chez les crucifères (colza), à des isothiocyanates dont la nature conduit à des thioglycosides variables (progoitrine, sinigrine, gluconapine, etc.). Au cours du broyage de la graine, ces composés sont mis au contact d'une enzyme endogène (la myrosinase) et transformés en glucose, sulfate et isothiocyanates (ITC). A partir de la progoitrine il se produit une cyclisation des ITC conduisant à la formation de 5-vinyl thiooxazolidone (VTO). Les ITC et la VTO diminuent l'acceptabilité des aliments et stimulent la sécrétion de l'hormone TSH (thyroïdostimuline hypophysaire) ; il en résulte une perturbation de la synthèse de thyroxine (hypertrophie thyroïdienne) et, par voie de conséquence, du métabolisme de l'iode. Ce sont ces substances qui limitent la consommation des farines délipidées de colza en alimentation humaine. Il existe actuellement des variétés sans thioglycosides qui permettront une plus large utilisation des produits dérivés de ces graines.

4) L'acide phytique

Il s'agit d'un polyacide (hexamétaphosphate de myoinositol) capable de former des complexes avec des cations divalents dont l'assimilation est alors fortement perturbée (fer, zinc, calcium, magnésium, manganèse, cuivre).

L'acide oxalique conduit également à une baisse de biodisponibilité de ces cations en formant des oxalates.

5) Les composés cyanogénétiques

Ces composés libèrent, par hydrolyse enzymatique ou chimique, de l'acide cyanhydrique qui est extrêmement toxique. Leur teneur dans les graines de légumineuses couramment consommées sont telles que leur incidence est négligeable. L'acide cyanhydrique éventuellement formé est éliminé par cuisson dans l'eau.

6) Les facteurs du favisme

Le favisme est une maladie hémolytique apparaissant chez des sujets prédisposés, déficients en glucose-6-phosphate déshydrogénase et consommant certaines graines de légumineuses (fèves et pois). Le syndrome hémolytique observé dans le favisme serait lié à l'action de lectines (vicine, convicine) qui sont inactivées par la chaleur.

7) Les glycosides isoflavoniques

Ces composés présents dans les graines de nombreuses légumineuses possèdent des propriétés œstrogènes qui se traduisent surtout par des retards de croissance. Leur teneur reste négligeable dans les graines consommées par l'homme.

8) Le gossypol

Il s'agit d'un composé polyphénolique toxique, spécifique aux graines de coton, dans lesquelles il est localisé dans des cellules spécifiques

(glandes à gossypol). Ce polyphénol provoque des dommages hépatiques (œdèmes, hémorragies). Il existe actuellement des variétés de coton sans gossypol ; par ailleurs la toxicité de cette substance est fortement abaissée après addition de sulfate ferreux.

9) Les allergènes

De nombreuses substances allergisantes sont présentes dans les graines de légumineuses et de céréales (gluten) ; elles induisent essentiellement des lésions digestives et cutanées. Chez le soja, des propriétés allergisantes ont été identifiées dans la fraction protéique 2 S.

10) Les antivitamines

Ces substances, encore mal connues, ont des effets spécifiques sur certaines vitamines (E dans le haricot, B6 dans le lin, etc.). De plus, le broyage des graines met au contact les vitamines et des hydrolases spécifiques (thiaminase qui hydrolyse la vitamine B1 par exemple) ce qui se traduit par une perte de valeur nutritionnelle.

Tous les composés toxiques ou anti-nutritionnels susceptibles de se trouver dans les graines de légumineuses peuvent contribuer à limiter leur utilisation en alimentation humaine. Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'elles constituent des sources importantes en énergie, en minéraux et surtout en protéines. *Leur cuisson améliore généralement leur appétence, favorise la digestibilité des amidons et des protéines qu'elles contiennent et inactive la plupart de leurs éventuels composants toxiques ou anti-nutritionnels.*

Les facteurs entraînant des désagréments : flatulence

Certaines légumineuses contiennent des composés glucidiques qui induisent, après ingestion, de la *flatulence (production de gaz intestinaux)*, suivie parfois de *crampes abdominales* et de *diarrhée*. Ainsi, l'ingestion de 100 g de haricots secs peut se traduire par la formation de plusieurs litres de gaz. Les substances responsables de cette flatulence sont des *polyosides* qui comportent des liaisons α osidiques entre les

carbones C1 d'une molécule de galactose et C6 d'une molécule de glucose par exemple. Parmi ces composés, les plus souvent rencontrés chez les légumineuses sont le raffinose (α galactose 1-6 β glucose 1-2 α fructose), le stachyose (α galactose 1-6 raffinose) et le verbascose (α galactose 1-6 stachyose). Leur teneur peut atteindre plus de 5 g pour 100 g de graines. Non hydrolysés par les glucosidases intestinales, ces molécules parviennent alors au contact des bactéries intestinales. Celles-ci possèdent un équipement enzymatique leur permettant l'hydrolyse et l'utilisation métabolique, dont une des résultantes est une production de gaz (surtout CO_2). Hydrosolubles, *ces composés peuvent être en partie éliminés par cuisson dans l'eau,* surtout si l'on utilise plusieurs eaux de cuisson successives.

UTILISATIONS TRADITIONNELLES DES OLÉAGINEUX

En Extrême-Orient, environ 2 millions de tonnes de graines d'oléagineux, et plus particulièrement de soja, sont consommés par l'homme sous forme d'aliments traditionnels. Parmi ceux-ci on peut citer :

• *Le tofu.* Par broyage dans l'eau de graines de soja et pressage, on obtient du jus de soja. Celui-ci est souvent improprement appelé « lait de soja » : son aspect est en effet proche mais sa teneur en calcium est dix fois moindre que celle du lait. Par addition de sulfates de calcium et de magnésium et ébullition, le jus de soja fournit un caillé qui est recueilli par filtration : c'est le tofu. Depuis plusieurs dizaines d'années, il est incorporé, aux Etats-Unis, dans de nombreuses préparations alimentaires (saucisses, pizza, lasagnes, desserts, glaces, boissons, potages, chocolat, etc.). Le développement de cette gamme de produits a commencé plus tardivement en France mais semble prendre de l'ampleur depuis quelques années. Ces produits, désignés par le terme « soyfoods », ont l'avantage d'apporter des protéines sans apporter d'acides gras saturés.

• *Le sufu* est du tofu soumis à fermentation, puis aromatisé.

• *Le tempeh.* Ce produit est obtenu à partir de graines de soja dépelliculées puis cuites et ensemencées avec un *Rhizopus.*

• *Le miso.* Il s'agit d'un produit très répandu au Japon. Il est obtenu par fermentation d'un mélange de soja et de riz préalablement cuits. Cette pâte rentre dans la composition de très nombreux aliments.

• *Le shoyu* est une sauce à base de soja, riz et blé cuits puis fermentés, dont il existe de nombreuses variantes. Il s'agit d'une sauce brune, très

riche en acides aminés libres, de flaveur prononcée. Elle est utilisée pour relever de très nombreux plats.

La germination de ces graines ainsi que leur *fermentation* présente de nombreux avantages qui peuvent être généralisés aux autres graines de légumineuses. Au cours de la germination, les teneurs en vitamines C et B sont augmentées, ainsi que la digestibilité des protéines, alors que les oligosaccharides, responsables des phénomènes de flatulence, sont détruits en moins de 48 heures. Avec la fermentation, on observe aussi une augmentation de la teneur en vitamines B, y compris en vitamine B12, et une amélioration de la qualité protéique. Par ailleurs, la plus grande partie des facteurs anti-nutritionnels et potentiellement toxiques disparaît après fermentation, ce qui a été à l'origine du développement de méthodes microbiologiques de détoxification. Enfin, il faut signaler les effets bénéfiques des aliments fermentés sur la flore intestinale.

TECHNOLOGIES MODERNES DE VALORISATION

C'est par la mise au point de technologies adaptées que s'est accrue la disponibilité des protéines de légumineuses, aussi bien en alimentation humaine qu'animale. Le principe de base de ces technologies consiste d'abord en un *fractionnement* plus ou moins poussé des divers composants des graines. Les fractions ainsi obtenues, et plus particulièrement la fraction protéique, sont ensuite consommées après restructuration ou après incorporation dans des produits alimentaires ou des plats cuisinés.

En ce qui concerne la terminologie des produits obtenus, *la farine* correspond à une mouture de la graine généralement dépelliculée et délipidée, *le tourteau* aux flocons délipidés, *le concentrat protéique* à un produit contenant entre 50 et 75 % de protéines et *l'isolat protéique* à une préparation dont la teneur en protéines dépasse 90 %. Les rendements de fractionnement sont généralement supérieurs à 80 % pour les protéines et dépassent 95 % dans le cas des huiles. Tous ces produits sont nommés *Matières Protéiques Végétales* (MPV), avec précision de leur teneur en protéines exprimée en %.

Fractionnement des composants des graines de légumineuses

Bien que les technologies mises en jeu soient spécifiques pour chaque espèce de graine de légumineuse, il est possible de décrire d'une façon schématique les diverses opérations conduisant au fractionnement.

1) Dépelliculage

Les enveloppes de ces graines sont riches en fibres indigestibles et sont généralement éliminées par des moyens mécaniques (abrasion et tamisage). Ces enveloppes sont utilisées pour l'alimentation des ruminants. Cette opération de dépelliculage n'est pas toujours nécessaire quand les produits sont destinés à subir un fractionnement plus poussé, ou quand il s'agit de fabriquer des produits destinés à l'alimentation animale.

2) Broyage ou mise en flocons

Cette opération est réalisée au moyen de broyeurs ou de rouleaux et conduit à l'obtention de farines ou de flocons. Les cotylédons et germes à faible teneur en fibres peuvent être d'abord soumis à un toastage (grillage) puis moulus : le produit obtenu est la farine entière (full fat).

Les technologies de fractionnement utilisables à ce niveau varient en fonction de la teneur en huile ou en amidon des graines.

Le fractionnement par voie sèche ou turboséparation s'applique dans de bonnes conditions aux graines riches en amidon (pois, fèverole) tandis que le fractionnement par voie humide est réalisable sur toutes les graines de légumineuses.

3) Fractionnement par voie sèche ou turboséparation

Cette technologie est applicable aux farines finement broyées et à faible teneur en huile, dans lesquelles il existe deux populations de particules différenciées par leur taille et leur densité (grains d'amidon qui constituent la fraction lourde et fines particules riches en protéines qui constituent la fraction légère). La séparation est réalisée dans un flux d'air spiral et peut être répétée un certain nombre de fois pour augmenter son efficacité.

La fraction légère constitue un concentrat dont la teneur en protéines est voisine de 75 %.

4) Fractionnement par voie humide

Dans cette technologie, l'huile est d'abord extraite par solubilisation avec un solvant, dans le cas des graines oléagineuses ou riches en lipides.

Pour obtenir des produits enrichis en protéines, deux principales voies technologiques sont employées. Dans la première, les protéines sont maintenues dans la farine et on réalise une extraction la plus poussée possible des autres composants. Dans la deuxième, les protéines sont d'abord solubilisées (le résidu insoluble étant éliminé), puis précipitées sélectivement, les autres composants solubles étant à leur tour éliminés. Dans le premier cas on obtient un concentrat et dans le deuxième un isolat.

- **Extraction de l'huile par solvants**

Cette opération est réalisée sur les légumineuses riches en huile (oléagineux). L'extraction de l'huile des flocons s'effectue actuellement à température modérée et à contre-courant au moyen de solvants (hexane) ; elle s'avère nécessaire pour fabriquer des isolats ou concentrats de bonne qualité. Après élimination de l'hexane par distillation, l'huile et d'autres composés (lécithines du soja) sont purifiés.

Les flocons déshuilés sont désolvatés au moyen de désolvatiseurs à vapeur ou flash.

- **Toastage et/ou broyage des flocons**

La farine est traitée en milieu humide dans des conditions telles que les protéines qu'elle contient restent insolubles. Trois technologies conduisant à des concentrats aux propriétés différentes sont utilisées :

– *1. Extraction en milieu alcoolique à 60 %.* Dans ces conditions l'alcool dénature et insolubilise les protéines qui restent associées aux glucides insolubles (amidon, fibres). Dans la phase hydroalcoolique sont extraits, avec des rendements variables, les composés solubles (sucres, sels minéraux, acides aminés, etc.). Après centrifugation, le concentrat est séché. Les protéines qu'il contient sont peu solubles, ont une bonne capacité de rétention d'eau (3,5 fois leur poids sec), n'ont pas de pouvoir émulsifiant et ont un goût neutre. Ce type de produit est utilisable en boulangerie et incorporable à des produits carnés.

– *2. Extraction à pH voisin de 4,5.* Dans ce cas, le pH choisi correspond au pH isoélectrique des protéines. Après centrifugation et neutralisation, le concentrat est séché. Les protéines sont très solubles dans l'eau, ont un bon pouvoir émulsifiant et une bonne capacité de rétention d'eau. Ces produits sont utilisables dans des boissons ou comme agents liants.

– *3. Extraction en milieu aqueux à chaud.* Dans cette troisième technologie, les protéines sont dénaturées et insolubilisées par la chaleur. Les protéines présentes dans ces concentrats, légèrement jaunes et d'un goût agréable, sont peu solubles.

La composition de concentrats obtenus par ces trois méthodes à partir de graines de soja est indiquée dans le tableau 3.

Tableau 3

Composition de concentrats de soja obtenus par voie humide (en %).

Composant	Milieu d'extraction		
	Alcool	Acide	Chaleur
Protéines	66	65	67
Eau	7	7	6
Lipides	0,3	0,3	0,2
Fibres	3,5	3,5	3,8
Cendres	6	5	4
Glucides insolubles	17,2	19,2	19

- **Fabrication d'isolats**

La première étape de cette fabrication consiste en une solubilisation optimale des protéines. Dans les graines de légumineuses, les protéines constituent une réserve. Elles peuvent être classées en trois familles, en fonction de leur solubilité :

– *1. Les albumines solubles dans l'eau* et dont la masse molaire est voisine de 12 000 daltons (fraction 2 S). Localisées dans les grains d'aleurone, elles représentent environ 20 % des protéines totales.

– *2. Les globulines solubles dans les solutions salines diluées* représentent 60 à 90 % des protéines totales des graines de légumineuses. Deux groupes de globulines peuvent être décrits :

– les *légumines* dont la masse molaire est comprise entre 300 000 et 400 000 daltons. Il s'agit de protéines polymériques dont deux monomères (MM de 20 000 et 40 000) sont liés par pont disulfure pour former un ensemble capable de s'associer par groupes de 6. Le nom attribué à ces protéines varie avec la nature de la graine (glycinine pour le soja, légumine pour la fèverole, arachine pour l'arachide, etc.).

– les *vicilines* constituent un groupe plus hétérogène dont la masse molaire est voisine de 150 000 daltons. Il s'agit de glycoprotéines constituées de plusieurs sous-unités. Elles correspondent à la conglycinine du soja, à la conarachine de l'arachide, à l'alcaline A du coton, à la phasoléine du haricot ou à la viciline du pois.

– *3. Les glutélines solubles en milieu fortement alcalin.* Par rapport à l'ensemble des protéines leur proportion varie de 0 (soja, lupin, haricot) à environ 15 % (tournesol, pois, fèverole).

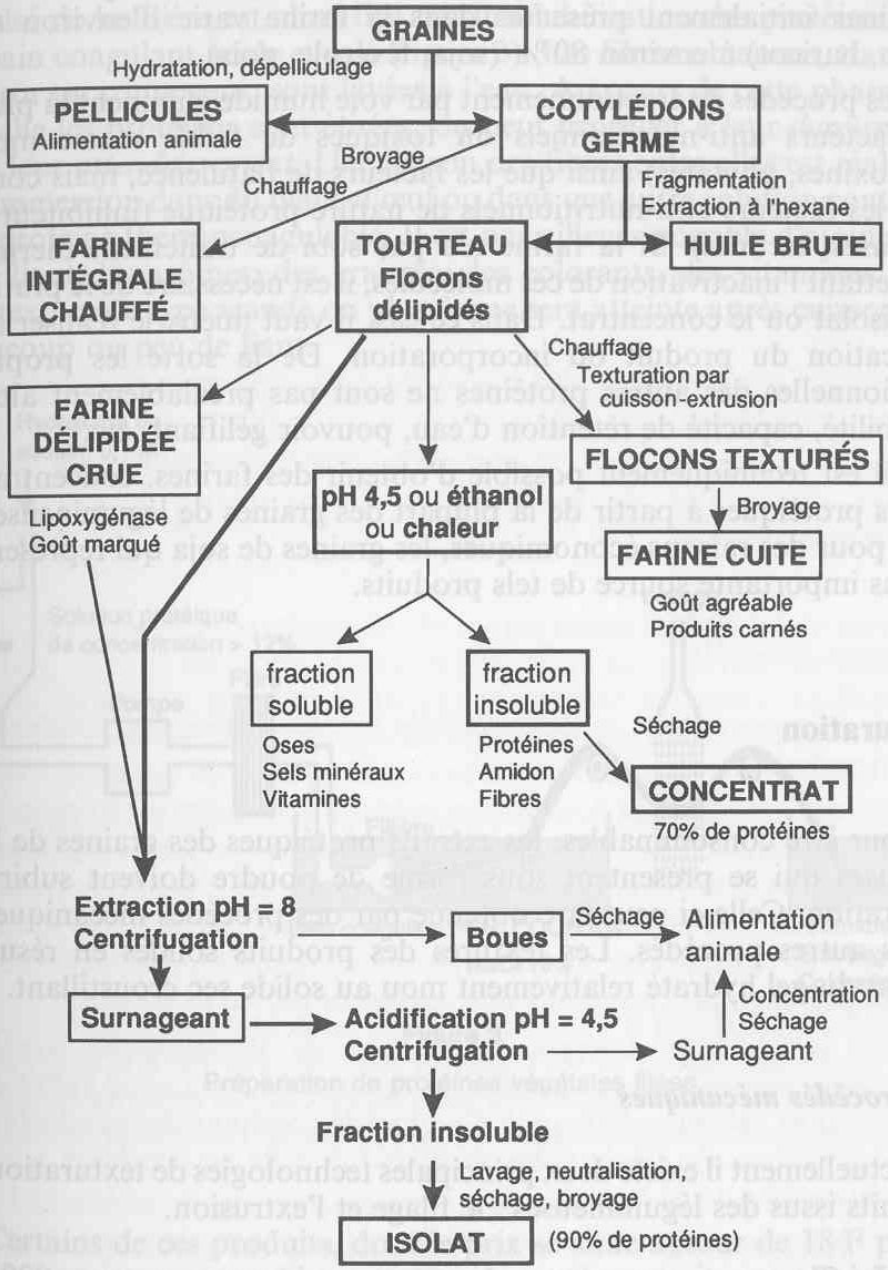


Figure 2

Schéma de la fabrication de produits riches en protéines à partir d'une graine de soja.

La solubilisation optimale de l'ensemble de ces protéines requiert donc des milieux légèrement salés et dont le pH est légèrement alcalin (8 < pH < 12). Dans ces conditions, plus de 90 % des protéines totales sont solubilisées. Une filtration ou une centrifugation permet d'éliminer

des composés insolubles. Le rendement global de récupération des protéines initialement présentes dans la farine varie d'environ 65 % (lupin, haricot) à environ 80 % (soja, fèverole, pois).

Ces procédés de fractionnement par voie humide éliminent la plupart des facteurs anti-nutritionnels ou toxiques de faible masse molaire (aflatoxines, phytates) ainsi que les facteurs de flatulence, mais concentrent les facteurs anti-nutritionnels de nature protéique (inhibiteurs des protéases, lectines). Si la farine n'a pas subi de traitement thermique permettant l'inactivation de ces molécules, il est nécessaire de le pratiquer sur l'isolat ou le concentrat. Dans ce cas, il vaut mieux le réaliser après fabrication du produit ou incorporation. De la sorte les propriétés fonctionnelles des autres protéines ne sont pas préalablement altérées (solubilité, capacité de rétention d'eau, pouvoir gélifiant, etc.).

S'il est techniquement possible d'obtenir des farines, concentrats et isolats protéiques à partir de la plupart des graines de légumineuses, ce sont, pour des raisons économiques, les graines de soja qui représentent la plus importante source de tels produits.

Texturation

Pour être consommables, les extraits protéiques des graines de légumineuses qui se présentent sous forme de poudre doivent subir une texturation. Celle-ci peut être obtenue par des procédés mécaniques ou divers autres procédés. Les textures des produits solides en résultant varient du gel hydraté relativement mou au solide sec croustillant.

1) Procédés mécaniques

Actuellement il existe deux principales technologies de texturation des produits issus des légumineuses : le filage et l'extrusion.

- **Le filage**

Ce procédé n'est applicable qu'à des produits dépourvus d'amidon (moins de 1 %) et dont la teneur en protéines dépasse 90 % (isolats par exemple). De plus, il est nécessaire que les protéines non dénaturées aient une masse molaire au moins égale à 100 000 daltons. Dans une première étape, les protéines sont solubilisées en milieu fortement alcalin permettant d'atteindre des concentrations très élevées. Le mélange très visqueux obtenu, qualifié de *collodion,* est « forcé » au travers d'une filière munie de très nombreux orifices (quelques centaines) dont le diamètre est voisin

du dixième de millimètre. Le « flux protéique cylindrique multiple » expulsé de la filière est alors figé par insolubilisation des protéines dans un bain coagulant acide et salé (figure 3). Les fibres obtenues, transportées sur un convoyeur, sont lavées à l'eau. Au cours de cette phase dans laquelle les protéines sont étirées, on peut procéder à leur *durcissement* ou à leur *attendrissement*. Une liaison des fibres entre elles est réalisable par immersion dans du blanc d'œuf ou dans une autre solution contenant une protéine thermocoagulable. Il est par ailleurs possible d'ajouter à ce bain liant des arômes, des graisses, des colorants, des vitamines. Ainsi une texture de type viande ou plus ferme sera atteinte après cuisson avec beaucoup ou peu de liant.

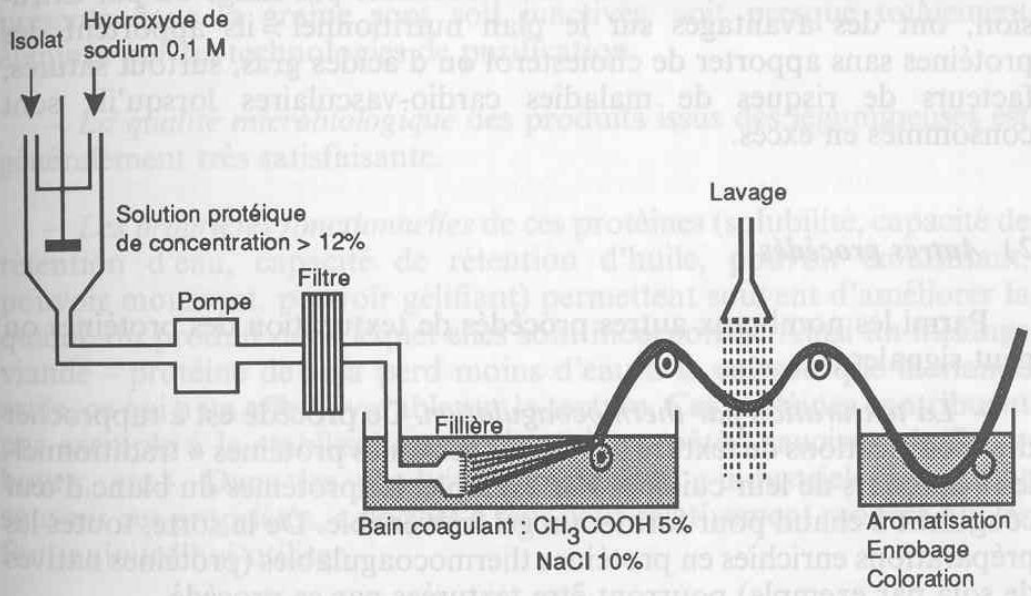


Figure 3

Préparation de protéines végétales filées.

Certains de ces produits, dont le prix se situe autour de 18 F par kg en 1990, sont comparables aux viandes maigres cuites, ce qui les fait dénommer « analogues de viandes ». Il faut signaler enfin que cette technologie est très polyvalente et permet de concevoir des produits nouveaux ou d'imiter des produits déjà existants (blanc de poulet, filet mignon, beignets frits, etc.).

- **L'extrusion**

Cette technologie beaucoup plus développée que le filage permet actuellement la fabrication industrielle de produits cuits expansés secs,

du type *biscottes ou biscuits* d'apéritifs (voir « Cuisson et conservation de nos aliments ; cuisson-extrusion »). Il est également possible d'obtenir des produits texturés humides (analogues de viandes, de crabe, etc.). Dans ce procédé, les ingrédients entrant dans la composition choisie de l'aliment sont introduits dans un cylindre creux au sein duquel tourne une vis sans fin, dont le pas diminue jusqu'à la filière de sortie. Du fait des forces de cisaillement et de la compression, il se produit une restructuration du mélange, aboutissant à une texture qui est fonction de nombreux paramètres (température, débit matière, vitesse de rotation de la vis, teneurs en eau, amidon, protéines, lipides, etc.).

Les produits contenant des MPV, obtenues par filage ou par extrusion, ont des avantages sur le plan nutritionnel : ils apportent des protéines sans apporter de cholestérol ou d'acides gras, surtout saturés, facteurs de risques de maladies cardio-vasculaires lorsqu'ils sont consommés en excès.

2) *Autres procédés*

Parmi les nombreux autres procédés de texturation des protéines on peut signaler :

– *La texturation par thermocoagulation.* Ce procédé est à rapprocher des modifications de texture subies par certaines protéines « traditionnelles » au cours de leur cuisson. Par exemple, les protéines du blanc d'œuf coagulent à chaud pour former un gel irréversible. De la sorte, toutes les préparations enrichies en protéines thermocoagulables (protéines natives de soja par exemple) pourront être texturées par ce procédé.

– *La gélification.* Certaines protéines de légumineuses (soja en particulier) possèdent la propriété de donner des gels sous l'effet de la chaleur ou en présence d'éthanol. Ce procédé conduit à des produits dont la teneur en eau est élevée (plus de 85 %) et celle en protéines relativement faible (5 à 15 %).

– *L'expansion par micro-ondes.* Ce procédé est applicable aux produits dont la teneur en eau est relativement élevée. Sous l'effet de l'élévation de la température provoquée par les microondes, l'eau s'évapore, les protéines coagulent en s'expansant.

– *La texturation par congélation.* Au cours de la congélation, il apparaît des cristaux et une phase liquide dans laquelle la concentration en solutés augmente au fur et à mesure que la température diminue. La concentration en protéines dans cette phase peut atteindre des valeurs qui conduisent à une dénaturation irréversible des protéines, ce qui conduit, à la décongélation et après cuisson, à des textures de type gel.

LES PROTÉINES DE LÉGUMINEUSES DANS NOS ALIMENTS TRADITIONNELS

Un certain nombre de considérations doivent être prises en compte avant de décrire les potentialités multiples de l'utilisation des protéines extraites de légumineuses (surtout du soja à l'heure actuelle).

– Les protéines présentes dans les isolats ou les concentrats ont une *excellente valeur nutritive.*

– *Les éventuels composés toxiques* ou anti-nutritionnels initialement présents dans la graine sont soit inactivés, soit presque totalement éliminés par les technologies de purification.

– *La qualité microbiologique* des produits issus des légumineuses est généralement très satisfaisante.

– *Les propriétés fonctionnelles* de ces protéines (solubilité, capacité de rétention d'eau, capacité de rétention d'huile, pouvoir émulsifiant, pouvoir moussant, pouvoir gélifiant) permettent souvent d'améliorer la qualité du produit dans lequel elles sont incorporées. Ainsi un mélange viande - protéine de soja perd moins d'eau à la cuisson que la viande seule, ce qui a un effet favorable sur la texture. Ces protéines contribuent par exemple à la stabilisation des émulsions (pâtés, saucisses de Strasbourg, etc.). Dans les produits alimentaires « industriels », ce sont souvent ces propriétés, associées à leur coût relativement modéré qui les font aujourd'hui utiliser.

– *Leur incorporation* sous forme structurée à des plats cuisinés est possible jusqu'à un taux qui est fonction de la nature des plats. Leur incorporation dans des sauces ne pose généralement pas de gros problèmes. La réhydratation de ces protéines est souvent rapide.

– Les préparations alimentaires, industrielles ou domestiques, dans lesquelles sont incorporées des protéines de légumineuses, sont *moins chères dans le cas de produits carnés et plus chères dans le cas de produits peu riches en protéines (pâtisseries).* En effet, il s'agit, dans le premier cas, d'une substitution de viande chère par une protéine de moindre coût et, dans le second cas, d'une amélioration de la valeur protéique ou des propriétés fonctionnelles au moyen d'une protéine végétale plus chère qu'une farine amylacée.

Sans entrer dans trop de détails, nous allons décrire quelques produits dans lesquels les préparations dérivées des graines de légumineuses, et plus particulièrement du soja, sont utilisées.

1) Produits de pâtisserie, biscuiterie, confiserie

Dans ces produits, les farines de soja garantissent une excellente répartition du liquide dans la pâte et stabilisent les transferts d'eau entre le produit cuit et l'atmosphère. L'adsorption des lipides sur les protéines se traduit par un crémage foisonnant et une émulsification homogène. Le rôle joué par certains composants des farines (lécithines, α-tocophérols) est fondamental dans la fabrication de certains produits.

Actuellement, c'est surtout la farine qui est utilisée dans ces secteurs de notre alimentation. Les effets de son incorporation sont précisés pour quelques denrées alimentaires.

- **Pâtes jaunes**

L'addition de 10 % de farine de soja à de la farine de blé permet une augmentation de la teneur finale en protéines, voisine de 5 %. Le mélange obtenu possède une excellente capacité de rétention d'eau mais perd de son élasticité par diminution relative du taux de gluten. Ces pâtes permettent une plus grande addition de sucre et leur travail est plus homogène. L'incorporation d'eau, d'œufs ou de lait se fait très facilement. La lécithine apportée par la farine de soja non délipidée (2 %) contribue, avec les protéines, à atteindre un bon pouvoir émulsifiant. Par ailleurs, les antioxydants ralentissent les phénomènes de rancissements générateurs de goûts et odeurs désagréables. Les pâtes enrichies se moulent et se démoulent plus facilement. Enfin, il faut signaler que la résistance des biscuits secs est améliorée par addition d'environ 5 % de farine de soja.

- **Crèmes**

Les propriétés antioxydantes et surtout émulsifiantes de la farine rendent les crèmes plus facilement dispersibles en bouche et leurs arômes sont mieux perçus.

- **Confiserie**

Dans certains produits (caramels au lait), l'addition de farine se traduit par un goût de noisette pas toujours désiré. Dans les pâtes d'amande, son utilisation est intéressante en raison de ses propriétés émulsifiantes. En chocolaterie, son incorporation au taux de 2 % retarde le blanchiment.

2) *Produits de boulangerie*

L'incorporation de la farine de soja crue à raison de 0,4 % (ou de fève) aux pâtes fermentées permet d'activer l'oxydation et le blanchiment au cours du pétrissage grâce à l'activité lipoxygénasique, ce phénomène étant connu depuis de nombreuses années.

Une incorporation de farine délipidée cuite, de concentrat ou d'isolat, permet d'enrichir le pain en protéines. A partir d'une teneur voisine de 5 %, le volume du pain diminue, la croûte devient plus foncée (réaction de Maillard), plus fine et moins croustillante. Par contre, la texture de la mie reste souple et élastique et sa conservation est meilleure qu'avec un pain normal. La flaveur originale du « pain français » est modifiée mais reste agréable.

Il est possible de fabriquer des pains et des biscottes diététiques dont la teneur en protéines doit dépasser respectivement 14 et 30 %. Farine délipidée cuite, concentrat toasté et isolat sont utilisables dans de tels produits et dans ceux décrits ci-dessous.

Des produits hypoglucidiques (moins de 70 % de glucides) et hypocaloriques (les protéines apportent plus de 30 % des calories totales) sont réalisables par incorporation de ces dérivés de graines de légumineuses.

3) *Produits de la charcuterie*

Dans ces produits, ce sont surtout les propriétés fonctionnelles et nutritionnelles apportées par les protéines de légumineuses qui sont recherchées. La diminution du coût de fabrication constitue également un facteur non négligeable. Les isolats sont généralement employés par saupoudrage, en solution ou en émulsion avec eau et gras.

Les saucisses et saucissons, les saucisses à pâte émulsionnée (saucisse de Strasbourg), les viandes hachées, les quenelles, les garnitures de raviolis supportent très bien l'incorporation de protéines végétales. La législation l'autorise jusqu'à 30 % maximum (pour le poids des MPV réhydratées) du poids final du produit, et avec obligation de leur mention et de modification de l'appellation d'origine du produit dans lequel elles sont incorporées.

*
**

Il apparaît donc clairement que l'incorporation de ces produits riches en protéines à nos aliments est possible dans un très grand nombre de cas. Il appartient aux concepteurs de nos aliments, qu'il s'agisse de cuisine domestique ou de fabrication industrielle, de faire preuve d'ima-

gination pour utiliser ces nouvelles sources de protéines. Ainsi, leur incorporation est réalisable dans des aliments très variés : viandes hachées, charcuteries diverses, pâtes, pain, pâtisseries, boissons, lait et dérivés, etc.

Enfin, il faut préciser que des décrets régissent, en France et bientôt au niveau de la Communauté Economique Européenne, les définitions et les diverses utilisations des protéines végétales dans les denrées alimentaires.

QUELQUES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cheftel J.C., Cuq J.L., Lorient D., *Protéines alimentaires. Biochimie. Propriétés fonctionnelles. Valeur nutritionnelle. Modifications chimiques,* Editions Lavoisier/Technique et Documentation, 320 p.
- Dupin H., *Les aliments,* Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.
- « Farines et protéines d'oléagineux et légumineuses en alimentation humaine », Paris 12-15 mai 1975. *Revue française des Corps gras,* N° spécial 1975.
- Nijhoff M., Junk W. editors, *Plant Proteins for Human Food,* Academic Publishers Groups, The Hague, 1981.
- Rouaud C., Bichon L., « Légumes secs et santé », *FFN,* Bulletin 35, 1988, p.16-23.

11

LES LÉGUMES ET LES FRUITS

Catherine LEYNAUD-ROUAUD, Anne LATOUR-RAULIN,
Jean-Louis CUQ, Yvonne SERVILLE †

Les végétaux comestibles, les oléagineux mis à part, sont habituellement repartis en deux groupes :

– céréales, tubercules, légumes secs ;

– légumes et fruits.

Dans ce dernier groupe, la distinction entre aliments crus et cuits est importante, et pendant longtemps on les a considérés séparément. Sans que cette division soit reprise, les caractéristiques des uns et des autres seront présentées distinctement, sur le plan de la consommation et de la valeur nutritionnelle en particulier, avec les modifications apportées par la cuisson et la conservation.

Les pommes de terre et les châtaignes seront également présentées à part dans ce chapitre.

VALEUR ALIMENTAIRE DES LÉGUMES ET FRUITS

Composition

Les valeurs moyennes sont données, pour les fruits et légumes frais, par 100 g de partie comestible crue, dans le Tableau 1 :

Tableau 1

Composition moyenne des fruits et légumes frais.

	Fruits frais	Légumes frais
Eau	75 à 90 %	80 à 95 %
Glucides	• agrumes et fruits rouges 7 à10 % • fruits à noyaux et à pépins figues 10 à 15 % • bananes : 20 % sucres simples, dont la quantité augmente avec la maturité rarement amidon (bananes)	• parties aériennes 1 à 6 % • racines : 2 à 6 % sucres simples (oignons, tomates, carottes) inuline (artichauts, salsifis) souvent amidon
Fibres	1 à 4 % (parfois plus : 7 % dans les framboises, les coings) pectine, (surtout dans pommes, coings, groseilles, cassis)	2 à 5 % (parfois plus : 9 % dans le persil) pectine seulement dans certains (carottes, tomates)
Lipides	< 0,5 %	< 0,5 %
Protéines	1 %	0,5 à 3 % (5 % dans petits pois, fèves fraîches, navets)
Minéraux	apports importants en – potassium (bananes) – calcium (agrumes, baies) – magnésium (bananes, kiwis) et beaucoup d'autres minéraux : fer, manganèse, cuivre,... et apports extrêmement faibles en sodium	apports importants, surtout dans les légumes feuilles, en – potassium – calcium – magnésium – fer – cuivre, ... certains sont assez riches en sodium
Vitamines	très riches en vitamines hydrosolubles : • C (surtout agrumes, baies et fruits rouges, kiwis) • du groupe B très riches en provitamine A : fruits très colorés	• C (surtout choux, feuilles vertes, poivrons, fenouil) • du groupe B très riches en provitamine A légumes très colorés
Autres constituants	• acides organiques, surtout citrique (agrumes et baies) malique (pommes) et tartrique (raisins) • tanins (âcreté, astringence) • composés polyphénoliques (saveurs, couleurs) • enzymes	• acides organiques, surtout citrique, malique et oxalique (oseille épinards, bettes) • composés polyphénoliques
Energie	• source faible, variant avec la teneur en glucides, en moyenne 230 kJ (55 kcal)	• source négligeable, variant avec la teneur en glucides, en moyenne 125 kJ (30 kcal)

D'autres fruits ont une composition très différente :

• *les fruits séchés* (abricots, dattes, figues, raisins...) :

– la teneur en eau est inférieure à 25 %, et les glucides représentent jusqu'à 80 % du poids.

• *les fruits oléagineux :*

– frais : 13 % de lipides dans les olives vertes, 36 % dans les noires et 22 % dans les avocats

– secs :

. seulement 5 à 25 % d'eau, 5 à 15 % de glucides, 3,5 % (noix) à 15 % (amandes) de fibres, et bien sûr beaucoup de lipides, plus de 50 %, sauf 36 % pour les noisettes ;

. leurs apports en calcium (45 à 250 mg/100 g), magnésium (60 à 280 mg/100 g, voire plus de 400 mg/100 g pour les noix du Brésil), fer (1,5 à 7 mg/100 g) et autres minéraux sont importants, ainsi qu'en vitamine E (20 mg pour 100 g de noisettes ou d'amandes) ;

. leur teneur en protéines est élevée (8 à 22 %).

La pomme de terre et la châtaigne sont à considérer à part.

• *La pomme de terre* occupe – ne serait-ce que par les quantités consommées – une place particulière parmi les légumes.

Sa teneur en eau (environ 80 %), sa teneur en lipides (0,1 %), celle en protéines (2 %) sont assez proches de celles des autres légumes.

Par contre, la teneur en glucides (amidon), d'environ 18 %, est nettement plus élevée que celle de la plupart des légumes.

La valeur énergétique est donc plus élevée mais la teneur en protéines beaucoup plus faible que celle des céréales (7 à 12 %), ou du pain (7 %) ou des légumes secs (21 %).

La pomme de terre se distingue de la plupart des autres légumes par sa faible teneur en calcium. La quantité de vitamine C est assez élevée – de l'ordre de 17 mg pour 100 g – lors de la récolte, mais elle baisse progressivement au cours du stockage, les pertes pouvant atteindre 30 % ; en outre, la cuisson – dans l'eau ou dans l'huile – entraîne des pertes importantes.

Si la teneur de la pomme de terre crue en lipides est très faible (0,1 %), les préparations frites dans l'huile fixent une quantité importante de matières grasses : les frites contiennent de 10 à 15 % de lipides, et les chips de 35 à 38 %.

Comme il a été indiqué dans le chapitre « Evolution de la consommation des divers aliments en France », les quantités de pommes de terre consommées par habitant et par an ont diminué de plus de 50 % entre 1925 et 1985 (avec de grandes différences selon les régions et les catégories socio-professionnelles). Les quantités vendues à l'état brut ont fortement régressé au profit des produits transformés : flocons pour préparation de purées, frites surgelées, pommes dauphines surgelées, etc.

• *Les châtaignes* se distinguent nettement de la plupart des autres fruits. L'amande du fruit du châtaignier est très riche en glucides : 36 à 40 %, ce qui lui confère une valeur énergétique élevée, de l'ordre de 190 kcal pour 100 g.

La teneur en protéines est modeste, de 2 à 3 %. La teneur en vitamine C est beaucoup plus faible que celle de la plupart des fruits.

Les châtaignes occupaient autrefois une place importante dans l'alimentation des familles rurales, durant plusieurs mois, dans toutes les régions de production (Ardèche, Massif Central, Rouergue, Corse) mais la consommation a rapidement diminué lorsque celle de la pomme de terre s'est développée.

Valeur nutritionnelle

Les végétaux doivent tout d'abord être sains, donc non pollués par des souillures (terre), des parasites ou des résidus chimiques, ce qui demande un lavage convenable.

Pour pouvoir être consommés crus, ils doivent être digestibles, c'est-à-dire avoir une consistance assez tendre et contenir peu d'amidon cru, indigeste. La teneur en fibres augmente avec l'âge des légumes, soit à l'état naturel (fruits, salades), soit après râpage (carottes, céleris-raves, etc.).

Les fruits doivent être bien mûrs, tout particulièrement les bananes dont la teneur en amidon diminue avec la maturation, jusqu'à en contenir moins de 1 % lorsqu'elles sont complètement jaunes.

Leurs principaux apports

1) *Vitamines*

Les fruits et légumes sont la source quasi exclusive de vitamine C pour l'organisme humain. Certains fournissent aussi le « facteur vitaminique P » (flavonoïdes), qui agit en synergie avec la vitamine C.

Ils apportent aussi des vitamines du groupe B et de la provitamine A (bêta-carotène).

Les teneurs données en vitamines sont des moyennes, elles varient suivant les variétés, les méthodes de culture, les époques de récolte... et surtout suivant les manipulations, le temps écoulé entre récolte et consommation, les modalités de cuisson, les techniques de transformation et de conservation. Aussi faut-il être attentif à les conserver au frais et à l'abri de la lumière, à limiter les temps de stockage et de trempage et à les éplucher avec des couteaux inoxydables, ceci le plus près possible des repas.

Il convient de varier les fruits et légumes car, comme le montre le Tableau 2, les apports en provitamine A et en vitamine C ne sont pas liés. En effet, la provitamine A est surtout abondante dans les légumes et fruits fortement colorés en jaune, rouge ou vert (la chlorophylle masque la couleur de la provitamine A), alors que la richesse en vitamine C va

Tableau 2

Teneurs les plus élevées en provitamine A et en vitamine C de fruits et légumes crus (sauf mention).

Espèces	Provitamine A (µg de β carotène/ 100 g)
carottes	12 000
épinards (cuits)	6 000
cresson	3 000
brocolis (cuits)	2 500
choux verts (crus)	2 100
mangues	1 900
abricots	1 500
laitues	1 000
tomates	600
pêches	405
cassis	200
prunes	180

Espèces	Vitamine C (mg/100 g)
cassis	200
goyave	180
persil	150
poivrons	100
kiwi	94
citrons	80
fraises	60
cresson	60
choux	55
oranges	50
brocolis (cuits)	50
mangue	30
épinards (cuits)	25

plutôt de pair avec l'acidité du produit. D'une manière générale, les parties les plus vitaminées sont les parties les plus colorées : les feuilles vertes des salades sont donc les meilleures.

Les détails concernant la cuisson et la conservation seront envisagés par la suite.

2) *Minéraux*

Ils sont importants en quantité et en variété.

– certains auteurs attribuent à leur rapport potassium/sodium élevé l'accentuation du rôle diurétique de l'eau qu'ils contiennent, pour les cerises et le raisin en particulier.

– le calcium, le potassium et les autres métaux sont abondants, ce qui fait des fruits et des légumes des aliments alcalinisants, alors que le goût acide de certains pourrait faire croire le contraire : les acides organiques qui en sont responsables sont en fait catabolisés par l'organisme.

Quoi qu'il en soit, ils sont la seconde source de calcium après les produits laitiers. L'utilisation biologique du calcium des légumes et des fruits est très voisine de celle du calcium du lait. Il est à noter cependant que les espèces riches en acide oxalique (épinards, oseille, bettes et surtout rhubarbe) risquent d'amener une perte de calcium durant le transit intestinal par formation d'oxalate de calcium insoluble.

Les minéraux et oligo-éléments, ainsi que les vitamines hydrosolubles, diffusent dans l'eau de trempage. Le lavage est donc conseillé, sans trempage prolongé. Pour ne pas perdre ces minéraux et vitamines, il est également intéressant de consommer l'eau de cuisson lorsque son goût le permet.

3) *Fibres alimentaires*

La nature de ces fibres varie suivant les espèces :

– plus de cellulose dans les légumes que dans les fruits ;
– plus de lignine dans les fruits que dans les légumes ;
– pectine surtout dans certains fruits (baies, pommes,...).

Une consommation suffisante de fibres alimentaires, apportées par les fruits, les légumes, les produits céréaliers et les légumes secs, régularise le transit intestinal (Voir le chapitre « La digestion »). Toutes les fibres, sauf la lignine, jouent ce rôle, grâce à leur pouvoir hygroscopique.

La pectine a de surcroît des propriétés hypocholestérolémiantes à moyen terme. Ceci a été observé chez des hamsters, puis chez des

hommes qui avaient ingéré des pommes (à raison de trois par jour, avec la peau), l'effet ayant été d'autant plus marqué que la cholestérolémie initiale était élevée. Il est à noter que cet effet global est supérieur à la somme des effets des composants connus comme étant hypocholestérolémiants : pectine surtout, mais aussi fructose, acides gras insaturés, vitamine C, magnésium, etc. L'hypothèse d'une synergie favorable de l'ensemble des composants de la pomme dans les proportions naturellement présentes a donc été formulée, ainsi que celle de l'existence de composés hypocholestérolémiants non encore identifiés (4) *.

4) Autres constituants

Présents en quantités infimes, les composés polyphénoliques sont connus pour leur rôle dans la couleur des fruits et légumes. Ils ont aussi des effets sur l'organisme humain que l'on connaît de mieux en mieux (2). On savait que les tanins étaient constipants, on s'est aperçu que les coumarines faisaient partie des facteurs antiseptiques, et l'on affine aujourd'hui nos connaissances sur l'action protectrice vis-à-vis de la cancérogénèse de ces mêmes coumarines et aussi des composés flavonoïdes, indoliques et autres substances phénoliques (3).

Partant de la constatation que la diminution du risque de cancer oro-digestif était corrélée, pour des groupes exposés (forts consommateurs d'aliments fumés notamment) avec une augmentation de la consommation de légumes de couleur jaune ou verte, des chercheurs poursuivent leurs travaux sur les mécanismes d'action des substances citées, présentes dans ces légumes, et sur les effets suivant les doses. Ces effets s'ajoutent à ceux des fibres, du β carotène, mieux connus, et d'autres substances comme des acides organiques, le sélénium et les tocophérols, tous présents dans les fruits et légumes.

Il faut enfin rappeler, pour conclure sur la valeur nutritionnelle des fruits et légumes, qu'ils apportent à l'organisme une eau appréciable et pour sa quantité et pour sa qualité.

MODIFICATIONS APPORTÉES PAR LA CUISSON À LA COMPOSITION DES VÉGÉTAUX

Les légumes, quel que soit l'organe dont ils proviennent, et les fruits sont constitués de cellules dont la paroi, souvent qualifiée de pecto-

---

* Les numéros entre parenthèses renvoient aux références bibliographiques en fin de chapitre.

cellulosique, contient, à des teneurs variables selon le produit et son degré de maturité, des polymères complexes. En effet, cette paroi est essentiellement composée de microfibrilles de cellulose (jusqu'à plus de 20 % du poids sec) associées en un réseau complexe à d'autres polymères glucidiques comme les hémicelluloses ou les xylanes, ou encore à d'autres polymères comme les pectines qui sont des polymères d'acide galacturonique à niveau variable d'estérification, ou les lignines qui sont des polymères complexes produits par les polyphénols. Ce sont les propriétés des cellules parenchymateuses des tissus vasculaires, de soutien ou de protection qui conditionnent le plus la texture des fruits et des légumes.

La cuisson dans l'eau a pour but principal de modifier les interactions entre molécules de polymères et ainsi d'améliorer la consistance ou la texture.

Si le légume contient de l'amidon, celui-ci se gélatinise et rend plus facile la mastication et la digestion.

Mais d'autres constituants des aliments végétaux subissent des modifications importantes au cours de la cuisson. Les substances colorantes et sapides subissent des transformations chimiques qui s'accompagnent de modifications importantes de la couleur et du goût.

Certains composants des végétaux crus, importants quant à leur rôle nutritionnel, comme les minéraux et certaines vitamines sont affectés par la cuisson et partiellement perdus, soit par dissolution dans l'eau, soit par inactivation sous l'effet de la chaleur (voir le chapitre « Qualité de nos aliments et technologie »).

L'eau est le composant le plus important sur le plan pondéral de la plupart des légumes. A pression atmosphérique, la cuisson par immersion dans de l'eau bouillante à 100 °C se traduit, pour un légume donné, par une pénétration de chaleur qui se fait par conduction. Cette pénétration de chaleur est à l'origine des différences de températures observées entre la surface du légume et son « cœur ».

La cuisson présente l'avantage principal d'améliorer la digestibilité de certains légumes en assouplissant leurs structures fibreuses et en gélatinisant leur amidon. Certains d'entre eux ne sont d'ailleurs consommables qu'après cuisson. Il faut signaler aussi qu'elle inactive dans certains légumes des facteurs antinutritionnels et des enzymes responsables de dégradations ou modifications diverses.

Les effets défavorables de la cuisson sur les légumes affectent essentiellement des qualités organoleptiques, comme le goût et la couleur, et des qualités nutritionnelles, comme les teneurs en certaines vitamines et en minéraux.

Effets de la cuisson sur la teneur en vitamines et en minéraux

La température a pour effet principal d'accélérer la vitesse des réactions chimiques. Si une vitamine est susceptible d'être transformée en un composé inactif, la vitesse de cette transformation sera d'autant plus élevée que la température sera haute. Chaque vitamine donnera une réaction de dégradation particulière, réaction caractérisée par sa « sensibilité relative » à la température (énergie d'activation). Ainsi, dans les légumes, ce sont surtout les vitamines B_1 et C qui ont des vitesses de dégradation les plus importantes aux températures de cuisson. En conséquence, ce sont ces deux vitamines qui subissent les pertes par destruction les plus significatives. La cuisson réalisée pendant des temps courts à des températures même élevées (autocuiseur) permet d'atteindre le niveau de texture choisi en préservant davantage les vitamines.

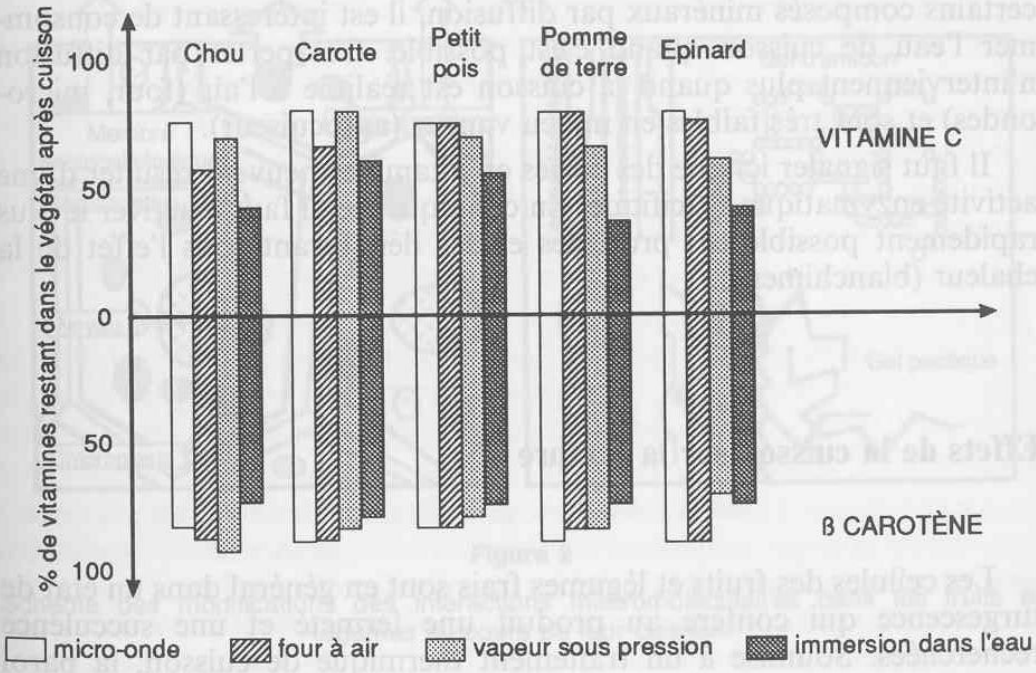


Figure 1

Variations des teneurs en vitamines de quelques légumes au cours de leur cuisson (durée permettant de qualifier le produit de bien cuit).

L'ébullition préalable de l'eau diminue la concentration en oxygène dissous, en abaissant sa solubilité. De la sorte, les réactions de dégradation mettant en jeu cet oxygène sont minimisées et des vitamines dégradables par oxydation, comme la vitamine C ou la provitamine A, sont partiellement préservées. Dans la cuisine sous vide ou dans un autocuiseur, ce type de pertes par oxydation est insignifiant. Il faut signaler enfin que des enzymes catalysant la dégradation de vitamines

sont inactivées sous l'effet de la chaleur (acide ascorbique oxydase, par exemple) et qu'il est donc recommandé de plonger directement les légumes dans l'eau bouillante pour que cette inactivation soit la plus rapide possible.

La chaleur accélère aussi les vitesses de transfert de matière. Ainsi les vitamines et les substances minérales hydrosolubles diffusent d'autant plus vite du produit végétal vers le milieu aqueux que la température est élevée et la surface de contact importante. Les pertes les plus faibles sont observées avec des végétaux entiers ou en gros morceaux, dont les structures tissulaires sont peu altérées. Ainsi par exemple, les pommes de terre pelées puis bouillies perdent par diffusion environ 15 % de leur vitamine C initiale, alors que cette perte est insignifiante quand elles sont cuites avec leur peau. Il en est de même pour la vitamine B_1 au cours de la cuisson des châtaignes. Il est donc clair que, la cuisson dans l'eau contribuant à une diminution des teneurs en certaines vitamines et certains composés minéraux par diffusion, il est intéressant de consommer l'eau de cuisson quand c'est possible. Ces pertes par diffusion n'interviennent plus quand la cuisson est réalisée à l'air (four, micro-ondes) et sont très faibles en milieu vapeur (autocuiseur).

Il faut signaler ici que des pertes en vitamines peuvent résulter d'une activité enzymatique spécifique. En conséquence, il faut inactiver le plus rapidement possible ces protéines en les dénaturant sous l'effet de la chaleur (blanchiment).

Effets de la cuisson sur la texture

Les cellules des fruits et légumes frais sont en général dans un état de turgescence qui confère au produit une fermeté et une succulence recherchées. Soumise à un traitement thermique de cuisson, la paroi cellulaire pectocellulosique se désorganise partiellement et perd souvent ses propriétés de perméabilité ; la rétention d'eau diminue, la turgescence et donc la fermeté du produit s'en trouvent modifiées.

Les traitements thermiques, réalisés en présence d'eau endogène au produit végétal, contribuent à rompre un petit nombre de liaisons hydrogène impliquées dans la stabilisation des réseaux de microfibrilles de *cellulose* et d'hémicelluloses. Il en résulte une dissociation partielle qui confère au produit cuit une meilleure tendreté et une meilleure digestibilité, car l'accès aux hydrolases (amylases, protéases) est plus facile (voir Figure 2).

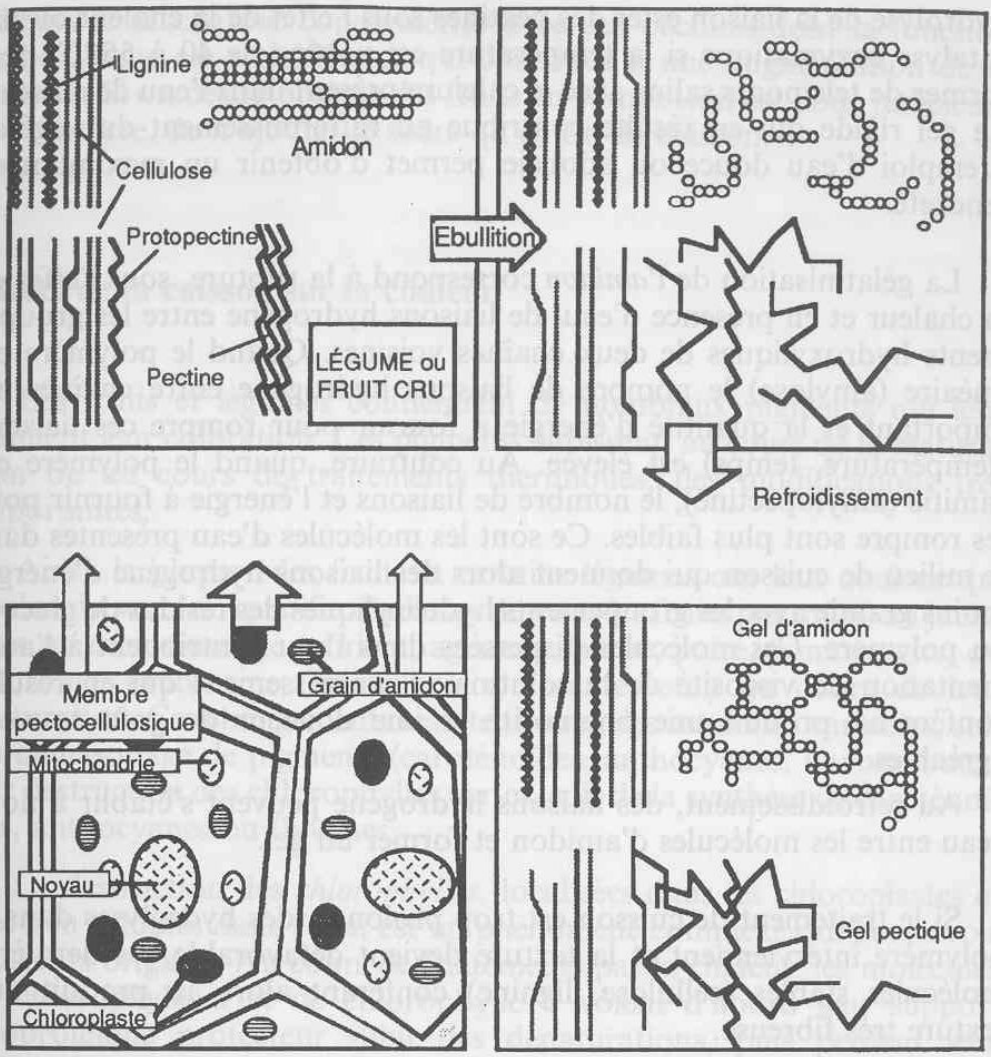


Figure 2

Schéma des modifications des interactions macromoléculaires dans les fruits et légumes au cours de leur cuisson.

Les liaisons hydrogène qui associent les molécules de *pectines* à celles de celluloses sont rompues sous l'effet de la chaleur, de même que celles qui associent entre elles les molécules de pectines, qu'il s'agisse d'acide polygalacturonique ou de pectine estérifiée. Les molécules ainsi libérées passent en solution au niveau de laquelle la viscosité augmente et peuvent, au refroidissement, reformer entre elles quelques liaisons hydrogène ou des liaisons ioniques, par l'intermédiaire de l'ion calcium, qui figent le réseau en un gel plus ou moins solide. Ainsi, l'acide polygalacturonique, initialement présent dans le végétal ou néoformé par

Les anthocyanes sont des pigments de couleur bleue, pourpre ou rouge, qui possèdent des groupements polarisables dont la structure évolue en fonction du pH. Ils se comportent comme des indicateurs colorés : en milieu acide, ils sont souvent rouges, et en milieu alcalin bleus ou violets. Ces variations de couleur sont observées chez le raisin dont le pH augmente au cours de la maturité (diminution des acides et augmentation des sucres). Le chou rouge est un bon exemple de ces changements de coloration : il est rouge en dessous de pH 4, devient pourpre à pH 6,7 puis violet et bleu à pH 9.

Les polyphénols présents dans la plupart des végétaux constituent les substrats principaux du brunissement enzymatique. Ainsi, sous l'action de la polyphénoloxydase, ces composés s'oxydent en quinones rougeâtres instables, qui évoluent ensuite en polymères bruns ou même noirâtres. Pour éviter que ces réactions ne se produisent, en particulier au moment de la mise en morceaux des produits qui met en contact enzyme et substrat, il faut préalablement inactiver ces enzymes par blanchiment. Les polymères de ces polyphénols sont facilement formés dans certains légumes et fruits (salsifis, carottes, champignons, pommes) et il est possible de minimiser leur formation par addition d'un réducteur comme par exemple l'acide ascorbique présent dans le jus de citron.

Les flavones sont des pigments jaunes souvent associés dans les végétaux à des glucosides. Leur contribution à la coloration est généralement secondaire. Néanmoins, ce sont ces composés qui sont responsables du jaunissement du chou-fleur, des oignons, du riz ou encore des pommes de terre au cours de leur cuisson en milieu alcalin.

Effets de la cuisson sur le goût

Saveurs et arômes des fruits et légumes dépendent de la présence de très nombreux composés chimiques.

Ainsi, l'acidité, facilement perçue, est fonction de la présence d'acides organiques comme les acides citrique, malique, tartrique.

Le goût sucré est essentiellement fonction de la concentration en glucides comme le saccharose, le fructose ou le glucose. Tous ces composés sont hydrosolubles ; la cuisson dans l'eau les extrait du végétal dont la saveur est alors profondément modifiée. Il est donc souhaitable, pour les conserver au mieux, de cuire le produit dans le minimum d'eau possible, ou mieux, dans sa seule eau de constitution.

L'astringence de certains produits végétaux est liée à la présence de polyphénols et de tanins. Les phénols sont plus facilement solubilisés dans l'eau de cuisson que les tanins.

L'arôme des fruits et légumes est fonction de la présence de très nombreux composés organiques volatils, comportant des groupements alcool, aldéhyde, cétone, ester, terpène, etc. Ces composés ont une solubilité dans l'eau qui est variable selon leur nature et qui croît avec la température ; leur volatilité est par ailleurs augmentée aux hautes températures. Enfin, il faut signaler que des réactions d'oxydation peuvent contribuer à détruire certains composants d'arômes insaturés. Après cuisson, la concentration en chacun des composants initiaux de l'arôme est donc profondément modifiée, et le nouvel équilibre en composants aromatiques est tel que le produit est souvent jugé moins goûteux et moins parfumé. C'est pour cette raison qu'il est souhaitable d'essayer de conserver au mieux le goût et l'arôme au cours de la cuisson des produits végétaux. Pour atteindre cet objectif, il faut procéder à une cuisson dans le minimum d'eau possible, et limiter le temps de cuisson au minimum nécessaire pour obtenir la texture souhaitée. Signalons enfin que la cuisson sous vide, réalisée dans des emballages scellés, permet d'éviter la plupart des pertes qui pourraient se produire par distillation et par oxydation.

La cuisson de certains légumes peut générer des goûts ou arômes très désagréables. Ainsi, certains thioglycosides sont décomposés, sous l'effet de la chaleur, en phénols et sulfure d'allyle (oignon, ail, poireau) et même en sulfure d'hydrogène à l'odeur nauséabonde très caractéristique. Comme ces composés sont volatils, il faut les laisser distiller en début de cuisson, en laissant le récipient qui les contient largement ouvert. Cette distillation sera d'autant plus rapide que la surface de contact entre le produit et l'eau sera élevée (oignons hachés par exemple). Il faut néanmoins éviter un temps de cuisson trop prolongé, car la synthèse de sulfure d'hydrogène donnera un goût marqué et désagréable au produit.

ÉTUDE PRATIQUE

Production

On s'intéressera ici tout particulièrement à la production française, tout en sachant que le marché est de plus en plus intercommunautaire et international.

Production ininterrompue

• **pour les légumes :**

– carottes, dont la production est continue toute l'année en Provence ; se concentre sur mai-juin pour les Pays de la Loire et s'étale de juillet à avril pour la Basse-Normandie et la Bretagne ;

– choux-fleurs, produits majoritairement de l'automne au printemps dans la plupart des régions, avec cependant l'offre du Nord-Pas-de-Calais de juin à septembre ;

– poireaux des Pays-de-Loire, Nord-Pas-de-Calais et Rhône-Alpes ;

– champignons de couche de la Vallée de la Loire ;

– salades, dont les régions du Sud de la France assurent la production hivernale ;

– oignons, épinards, céleris branche.

Il est à noter que les cultures sous serre élargissent considérablement ce choix.

• **pour les fruits :**

Nombre de fruits exotiques sont présents toute l'année : les bananes d'Afrique et des Antilles, les oranges, les citrons, les ananas, etc., dont la saison de moindre importation est l'été.

Quant aux fruits métropolitains, la réfrigération permet d'en présenter en toutes saisons sur les marchés, notamment les pommes et les poires.

Production saisonnière

Quoi qu'il en soit, certaines espèces sont produites en grandes quantités dans des régions et à des époques bien déterminées. Les périodes de cours minimum coïncident avec ces époques. Les tableaux ci-après résument l'essentiel de la production saisonnière des légumes et des fruits.

Qualité : le choix

Les légumes apportent un élément incontestable de variété dans les menus ; les fruits jouent un rôle analogue.

Tableau 3

Légumes
Principales zones de production départementales et régionales
(CTIFL 1990).

Artichaut	Finistère Nord, Côtes d'Armor, Pyrénées Orientales, Côte d'Azur.
Asperge	Gard, Vaucluse, Hérault, Bouches-du-Rhône, Loir-et-Cher, Languedoc-Roussillon, Aquitaine, Val de Loire...
Aubergine	Provence-Côte d'Azur, Sud-Ouest.
Carotte	Manche, Bretagne, Normandie, Provence.
Chou de Bruxelles	Nord-Pas de Calais, Finistère, Maine-et-Loire...
Concombre	Loiret, Yonne, Val de Loire, Bouches-du-Rhône.
Courgette	Bouches-du-Rhône, Vaucluse, Gard, Lot-et-Garonne.
Endive	Nord-Pas de Calais, Finistère, Picardie, Normandie.
Epinard	Bretagne, Nord-Pas de Calais, Bassin Parisien.
Fenouil	Provence-Côte d'Azur.
Haricots verts	Finistère, Morbihan, Lot-et-Garonne, Nord-Pas de Calais, Picardie.
Haricots à écosser	Bretagne, Nord-Pas de Calais, Bassin Parisien.
Mâche	Région Nantaise.
Navet	Manche, Bretagne, Provence, Loiret.
Petits pois	Nord-Pas de Calais, Picardie, Bretagne.
Poivron	Provence, Lot-et-Garonne.
Radis	Yvelines, Pays de Loire, Loiret, Haute Garonne, Bouches-du-Rhône, Alpes Maritimes...
Salsifis	Pays Nantais, Est.
Tomate	Provence, Pyrénées Orientales, Lot-et-Garonne, Bordure Atlantique...

Tableau 4

Fruits
Principales zones de production départementales et régionales
(CTIFL 1990).

Abricot	Drôme, Pyrénées Orientales, Vallée du Rhône.
Cerise	Vallée du Rhone, Tarn-et-Garonne, Languedoc-Roussillon...
Fraise	Aquitaine (surtout Dordogne et Lot-et-Garonne), Vallée du Rhône, Maine-et-Loire, Loir-et-Cher.
Kiwi	Haute Corse, Aquitaine, Drôme, Pyrénées Orientales...
Melon	Provence-Côte d'Azur, Lot-et-Garonne, Gers, Poitou...
Noix	Dauphiné, Périgord.
Pêche, Nectarine	Pyrénées Orientales, Drôme, Gard, Tarn-et-Garonne...
Petits fruits rouges	Centre, Bourgogne, Limousin.
Poire	Bouches-du-Rhône, Tarn-et-Garonne, Aquitaine, Val de Loire, Vaucluse.
Pomme	Vaucluse, Maine-et-Loire, Bouches-du-Rhone, Tarn-et-Garonne, Aquitaine, Pays de Loire, Provence-Côte d'Azur.
Prune	Tarn-et-Garonne, Lorraine, Bouches-du-Rhône, Lot-et-Garonne...
Raisin	Vaucluse, Tarn-et-Garonne, Provence, Languedoc, Aquitaine...

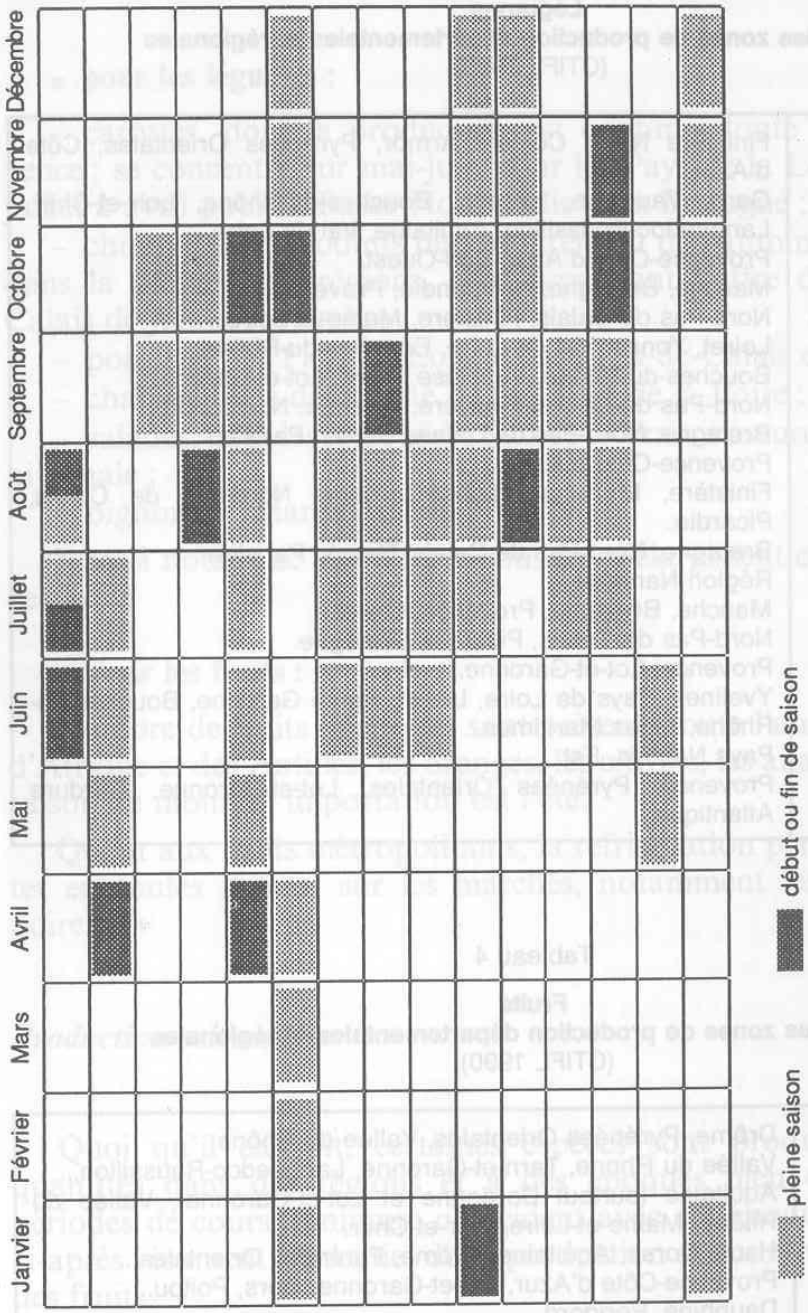


Tableau 5

Production française de fruits.

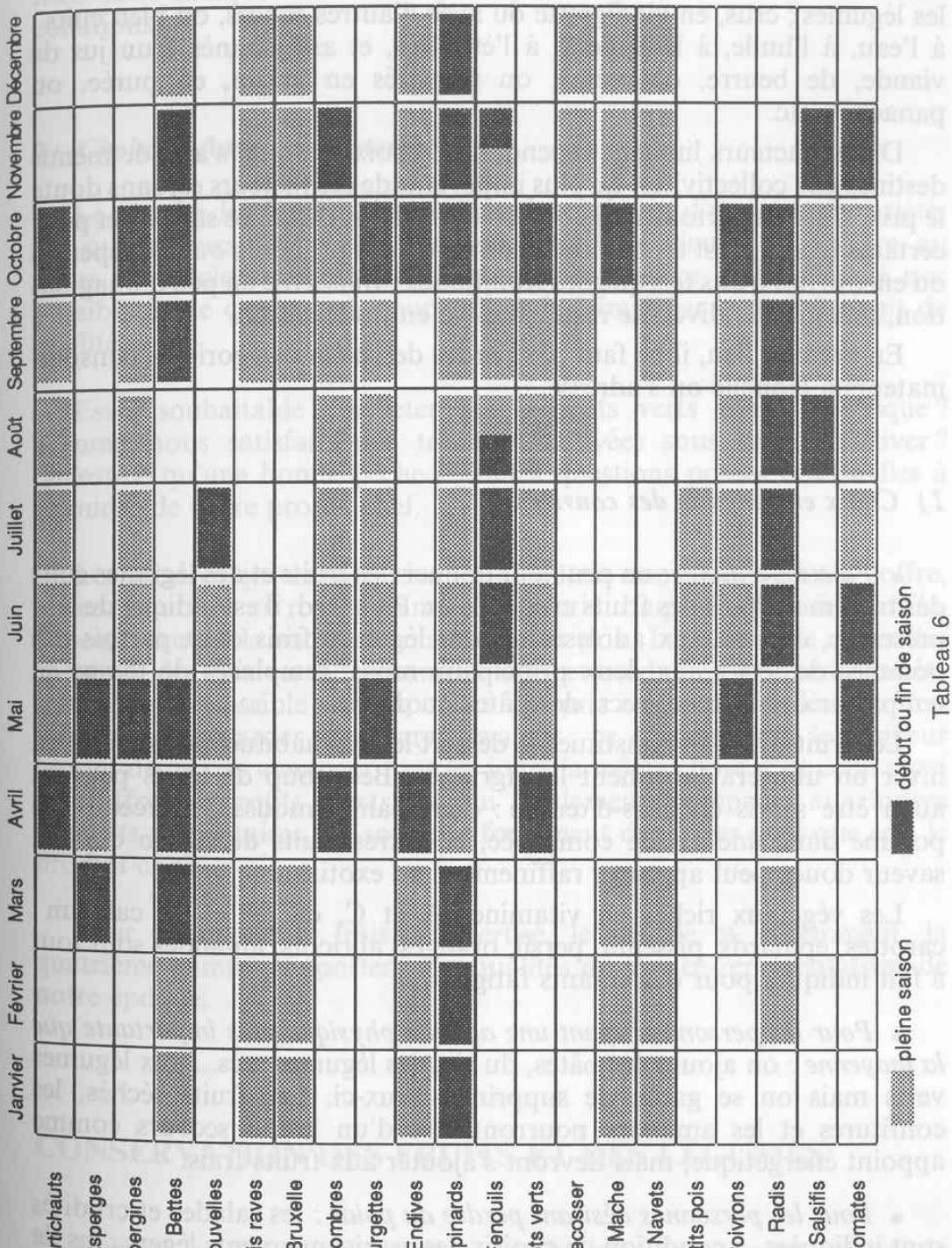


Tableau 6

Production française de légumes.

Cette variété tient non seulement au grand nombre des espèces, mais aussi aux nombreuses façons de les préparer, au moins en ce qui concerne les légumes ; crus, en vinaigrette ou avec d'autres sauces, ou bien cuits : à l'eau, à l'huile, à la vapeur, à l'étouffée, et assaisonnés d'un jus de viande, de beurre, de crème, ou préparés en gratin, en purée, ou panachés, etc.

Divers facteurs limitent cependant le choix lorsqu'il s'agit de menus destinés aux collectivités. Le plus important de ces facteurs est sans doute le prix. Cela est surtout vrai pour les légumes en certaines saisons et pour certains fruits. Il est alors difficile de servir des primeurs ou des asperges ou encore des fruits tels que des framboises. Mais avec un peu d'imagination, une grande diversité reste possible en toute saison.

En premier lieu, il ne faut pas perdre de vue la catégorie de consommateurs à laquelle on s'adresse.

1) Choix en fonction des convives

• *Pour les enfants :* on peut leur donner des fruits et des légumes cuits dès trois mois, puis des fruits crus écrasés. Plus tard, il est indiqué de leur présenter, comme aux adolescents, des légumes frais dont parfois des pommes de terre, aux deux principaux repas, remplacés de temps en temps par des légumes secs, des pâtes ou du riz.

Les fruits doivent constituer le dessert le plus habituel des jeunes : en hiver on utilisera largement les agrumes. Beaucoup de fruits peuvent aussi être servis en hors-d'œuvre : demi-pamplemousse, morceaux de pomme dans une salade composée, et autres fruits de saison dont la saveur douce peut apporter raffinement ou exotisme.

Les végétaux riches en vitamines A et C, en fer et en calcium : carottes, épinards, pissenlit, persil, oranges, abricots, amandes sont tout à fait indiqués pour des enfants fatigués.

• *Pour les personnes ayant une activité physique plus importante que la moyenne :* on ajoute des pâtes, du riz, des légumes secs... aux légumes verts mais on se garde de supprimer ceux-ci. Les fruits séchés, les confitures et les amandes pourront être d'un grand secours comme appoint énergétique, mais devront s'ajouter aux fruits frais.

• *Pour les personnes désirant perdre du poids :* les salades et crudités sont indiquées, à condition de choisir des assaisonnements légers : jus de citron, fines herbes, sauces au yaourt maigre,... Tous les légumes, préparés avec peu de matières grasses, sont les bienvenus ; quant aux fruits, on limitera la consommation des plus sucrés : bananes bien sûr, mais aussi figues, raisins...

• *Pour les femmes enceintes ou qui allaitent :* des légumes et des fruits frais sont indiqués aux trois principaux repas, et lors d'éventuelles collations.

2) *Choix en fonction du marché*

Le marché des fruits et légumes est, de nos jours, d'une grande variété. S'il suit le cours des saisons, il a également la particularité de s'être, au cours des siècles, complètement internationalisé, ce qui a décuplé nos possibilités de choix sans pour autant les simplifier quand il s'agit de qualité.

Est-il souhaitable d'acheter des haricots verts venus d'Afrique ? Sommes-nous satisfaits des tomates cultivées sous serre en hiver ? Qu'est-ce qu'une bonne pêche ? Toutes questions posées et difficiles à résoudre de notre propre chef.

Les saisons, qui ne sont plus toujours très marquées quant à l'offre, restent pourtant un repère en matière de prix. La production fait l'offre, l'abondance ou le risque de manquer, les prix. Là encore, le cours des choses et des prix est suffisamment large et modulé pour que la variété soit toujours possible et l'emporte à des prix raisonnables dès que l'on sait un peu regarder, comparer, évaluer ; ce qui est alors le meilleur moyen de ne pas « manger tous les jours la même chose », et celui aussi de s'offrir ces petits « extras » qui finalement, comparés aux autres produits alimentaires, ne sont pas forcément des folies quel que soit le produit choisi.

Pour compléter le frais, l'appertisé, le surgelé et, récemment, la quatrième gamme, apportent des qualités de service représentatives de notre époque.

CONSERVATION DES FRUITS ET DES LÉGUMES

Depuis la plus haute Antiquité, l'homme a toujours essayé de protéger ses aliments pour ne pas être à la merci des saisons. Plus récemment, certains procédés de conservation des fruits et légumes ont bénéficié des acquisitions récentes, tant sur le plan technique, mécanique ou industriel, que sur le plan nutritionnel.

Les confitures

Les Romains conservaient les jus de fruits en les évaporant et en augmentant ainsi leur teneur en sucre, ils obtenaient ce que nous appelons le raisiné plutôt qu'une confiture. La confiture, bien que connue au Moyen Age, ne devint denrée courante qu'avec la vulgarisation du sucre, au début du XIXe siècle.

Les confitures sont obtenues en cuisant des fruits avec du sucre ; fabriquées avec le jus clair tamisé des fruits cuits, elles portent le nom de gelées, avec les fruits écrasés en bouillie, celui de marmelades.

1) Définition légale

La fabrication et le commerce des confitures, gelées, marmelades, sont réglementés par le décret du 19 décembre 1910 (Titre III, modifié par le décret du 16 septembre 1925, et Titre VI, modifié par le décret du 16 novembre 1951).

Les dénominations *« confitures »* et *« gelées »* sont réservées aux produits obtenus exclusivement avec du sucre raffiné ou du sucre blanc cristallisé et des fruits ou jus de fruits frais ou conservés autrement que par dessiccation. Les *« marmelades »* peuvent renfermer de la cassonade ou du sucre roux.

Ces dénominations peuvent être accompagnées du nom d'un ou plusieurs fruits, suivi de la mention « pur fruit, pur sucre ».

La mention « pur sucre » est interdite lorsqu'il y a eu substitution d'une partie du sucre raffiné ou blanc cristallisé par de la cassonade ou du sucre roux dans le cas des confitures et gelées, et par d'autres matières sucrées alimentaires dans le cas des marmelades.

L'utilisation de fruits confits, sirops de fruits, arômes artificiels, colorants, gélifiants, etc., n'est permise qu'à la condition d'employer l'une des dénominations « fantaisie », « colorée », « artificiel », éventuellement complétée par d'autres indications sur la nature des substances utilisées. Toutefois, l'emploi de faibles quantités de pectine et d'acides organiques est admis sans mention (circulaire du 30 janvier 1961).

Les *« compotes »* échappent à ces définitions pour tomber sous celles des conserves de fruits stérilisées.

Les dénominations « confiture », « gelée » ou « marmelade » ne peuvent pas être utilisées lorsque ces produits contiennent de la pomme ou certains fruits ordinairement considérés comme légumes, sans en faire mention sur l'étiquette en commençant par l'élément dominant, par exemple : « confiture de fraises et pommes » ou « confiture de pommes

aux fraises », selon que la fraise est l'élément le plus ou le moins abondant.

Tableau 7

Signification des dénominations commerciales.

	Confiture	Gelée	Marmelade
Pur fruit, pur sucre	Fruits. Sucre raffiné ou sucre blanc cristallisé. Eau 40 % maximum. Faibles quantités de pectine et d'acides organiques tolérées.	Jus de fruits. Sucre raffiné ou sucre blanc cristallisé. Eau 40 % maximum. Faibles quantités de pectine et d'acides organiques tolérées.	Fruits écrasés. Peut renfermer du sucre roux ou de la cassonade. Eau 45 % maximum. Faibles quantités de pectine et d'acides organiques tolérées.
Pur fruit	Comme ci-dessus mais substitution d'une partie du sucre par de la cassonade ou du sucre roux.	Comme ci-dessus mais substitution d'une partie du sucre par de la cassonade ou du sucre roux.	Comme ci-dessus mais substitution d'une partie du sucre par d'autres matières sucrées alimentaires.
Fruits et pommes	Addition de pommes, mais en quantité moindre que les fruits.		
Pommes et fruits	Addition de pommes, mais en quantité supérieure aux fruits.		
Fantaisie	Utilisation de fruits confits, sirop de fruits confits, arômes artificiels, colorants, gélifiants, etc.		

La teneur en eau des confitures et gelées ne doit pas excéder 40 g pour 100 g de produit ; dans les marmelades, cette proportion doit être au maximum de 45 g pour 100 g.

Ces dispositions représentent l'essentiel de la réglementation en vigueur (voir Tableau 7). Elle protège bien les consommateurs contre les fraudes et tromperies, mais elle est assez compliquée et ne permet pas à l'acheteur de connaître rapidement la composition du produit acheté. Une réforme de la réglementation, tant française que de la CEE, est à l'étude.

2) *Matières premières*

• **Le sucre**

Le seul autorisé en France pour les confitures et gelées « pur sucre » est le saccharose. On s'adresse au sucre blanc cristallisé du commerce. On trouve aujourd'hui des confitures ou gelées allégées en sucre et quelques-unes avec édulcorants.

• **Les fruits**

Les fruits utilisés en confiturerie sont très nombreux ; l'origine, la variété, la maturité du fruit interviennent considérablement dans la qualité de la confiture.

Les principales méthodes de préconservation de fruits sont les suivantes :

– entreposage en frigorifique entre $-1^{o}C$ et $+5^{o}C$ pour des conservations de courte durée ;

– surgélation et entreposage à $-18^{o}C$ ou au-dessous pour les conservations de longue durée de certains fruits, notamment les fraises, framboises, groseilles ;

– pasteurisation en bidons de fer blanc ;

– antiseptique : le seul toléré en France est le SO_2, utilisé à la dose de 1,5 g par kg de fruit, à condition que la dose résiduelle n'excède pas 20 mg par kilo dans le produit fini.

3) *Technologie*

La confiturerie est une industrie à la fois simple dans sa technique et compliquée dans ses réactions chimiques et physico-chimiques.

Les fruits sont triés, calibrés, dénoyautés, pelés, égrappés, équeutés suivant les cas.

On ajoute le sucre dans les proportions prévues.

• **Cuisson**

La cuisson très rapide (10 minutes environ) s'effectue dans des bassines ouvertes à double fond, ou dans des cuiseurs sous vide, dans un minimum d'eau.

L'ébullition très brève permet de cuire les fruits, de dissocier pectine et cellulose et de dissoudre le sucre dans la phase liquide.

La cuisson sous vide à basse température (65°C environ) présente des avantages : la dégradation de la pectine est réduite, la caramélisation préjudiciable à la saveur et à la couleur du produit fini est évitée, les vitamines sont préservées.

Cependant le confiturier travaillant sous vide termine souvent sa cuite * sous pression normale pendant quelques minutes, de façon à atteindre une température suffisante pour l'hydrolyse partielle du saccharose et la mise en pots.

Le contrôle de la cuisson peut se faire par la pesée, par l'essai à la cuiller, par la température d'ébullition (104 à 106°C), par réfractométrie et, dans le cas de la cuisson sous vide, par mesure du volume d'eau évaporée et recondensée.

Le remplissage des boîtes et des bocaux se fait à chaud à une température supérieure à 75°C, suffisante pour « stériliser » en milieu acide le récipient et son couvercle, et réaliser ainsi une autopasteurisation.

4) Prise en gelée

La prise en gelée ou gélification correspond à la formation d'un réseau tridimensionnel des pectines macromoléculaires avec « piégeage » des molécules d'eau et des solutés. Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de dissocier par la chaleur le polymère pectique de ses associations dans le fruit (associations par liaisons hydrogène avec d'autres molécules pectiques ou avec des celluloses ou des protéines). Au cours du refroidissement, l'agitation moléculaire diminue et permet l'installation d'interactions entre molécules « déroulées » ; il se forme alors une structure solide dans laquelle la quantité de « gélifiant » est peu importante (voir Figure 3).

Les substances pectiques des fruits correspondent à des polymères d'acide galacturonique dont la fonction carboxylique est estérifiée ou non par du méthanol. Dans les fruits « à confiture », environ 60 à 75 % des groupements carboxyliques sont ainsi estérifiés (voir Figure 4).

Ces molécules polymères peuvent renfermer jusqu'à plusieurs centaines de monomères ; ce nombre varie peu autour d'une valeur moyenne pour un fruit donné. Des oses comme l'arabinose, le rhamnose ou le galactose sont souvent impliqués dans la structure du polymère. Les pectines existantes appartiennent à un des trois groupes défini par son degré d'estérification (pectines hautement méthoxylées ou HM, pectines faiblement méthoxylées ou FM et acide polygalacturonique). La figure 5 caractérise ces diverses substances pectiques.

---

* Terme professionnel.

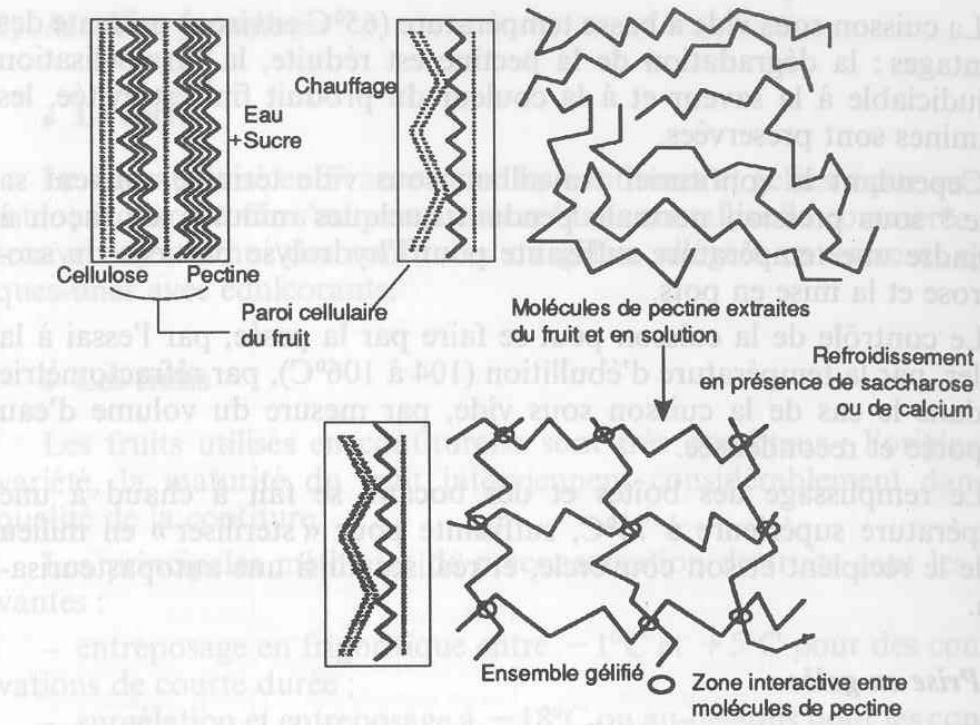


Figure 3

Schéma du rôle joué par les pectines dans la fabrication d'une gelée ou d'une confiture.

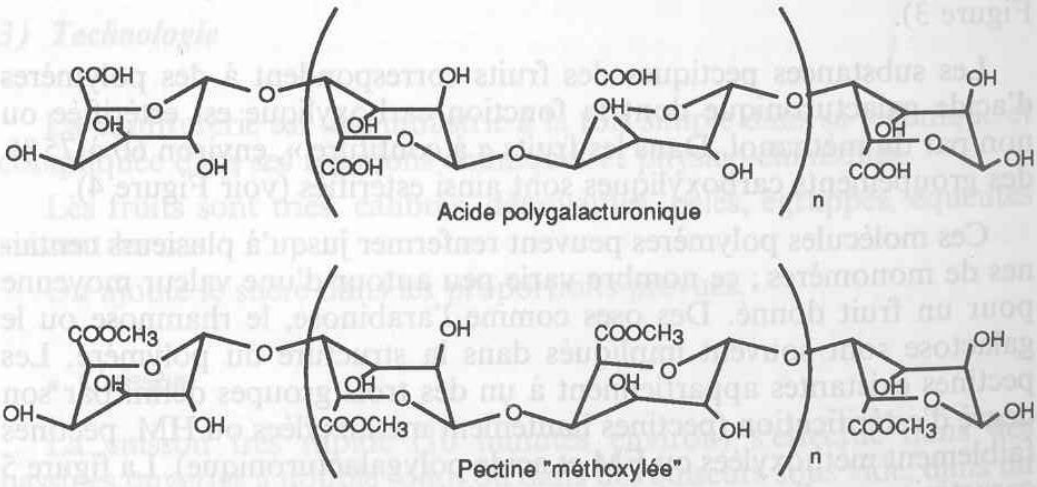


Figure 4

Structure d'un acide polygalacturonique et d'une pectine méthoxylée.

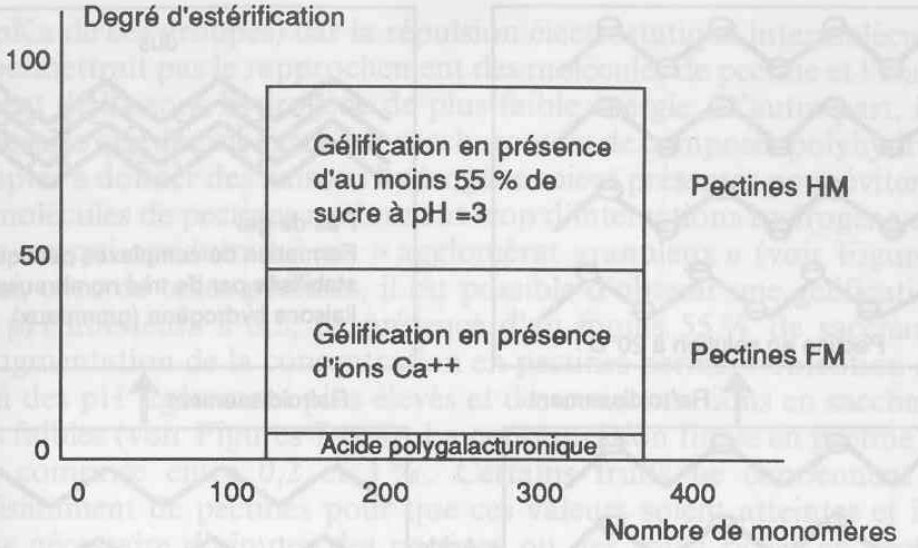


Figure 5

Caractéristiques des substances pectiques.

Il existe dans les fruits des enzymes capables d'hydrolyser les ponts osidiques (pectinases, polygalacturonase) ou les liaisons ester (pectine-méthyl estérase). Il est donc important d'inactiver le plus rapidement possible ces enzymes par traitement thermique (chauffage rapide) pour conserver à la pectine ses propriétés. Néanmoins, il ne faut pas oublier qu'un tel traitement en milieu acide, milieu le plus communément rencontré dans les fruits, peut aussi conduire à une hydrolyse du polymère. Quand on sait que la formation du gel dépend de plusieurs paramètres, parmi lesquels la longueur de la molécule et son degré d'estérification sont fondamentaux, on imagine aisément l'attention qu'il est nécessaire d'apporter à ces molécules pour réaliser une confiture ou une gelée.

5) Mécanisme de la formation du gel

Ce mécanisme dépend des conditions du milieu (pH, teneur en saccharose), de la nature et de la concentration de la pectine, mais requiert toujours des molécules de plus d'une centaine de monomères (une cuisson trop prolongée en milieu acide hydrolyse le polymère dont la longueur résiduelle ne permet plus d'assurer la formation du réseau à l'origine du gel).

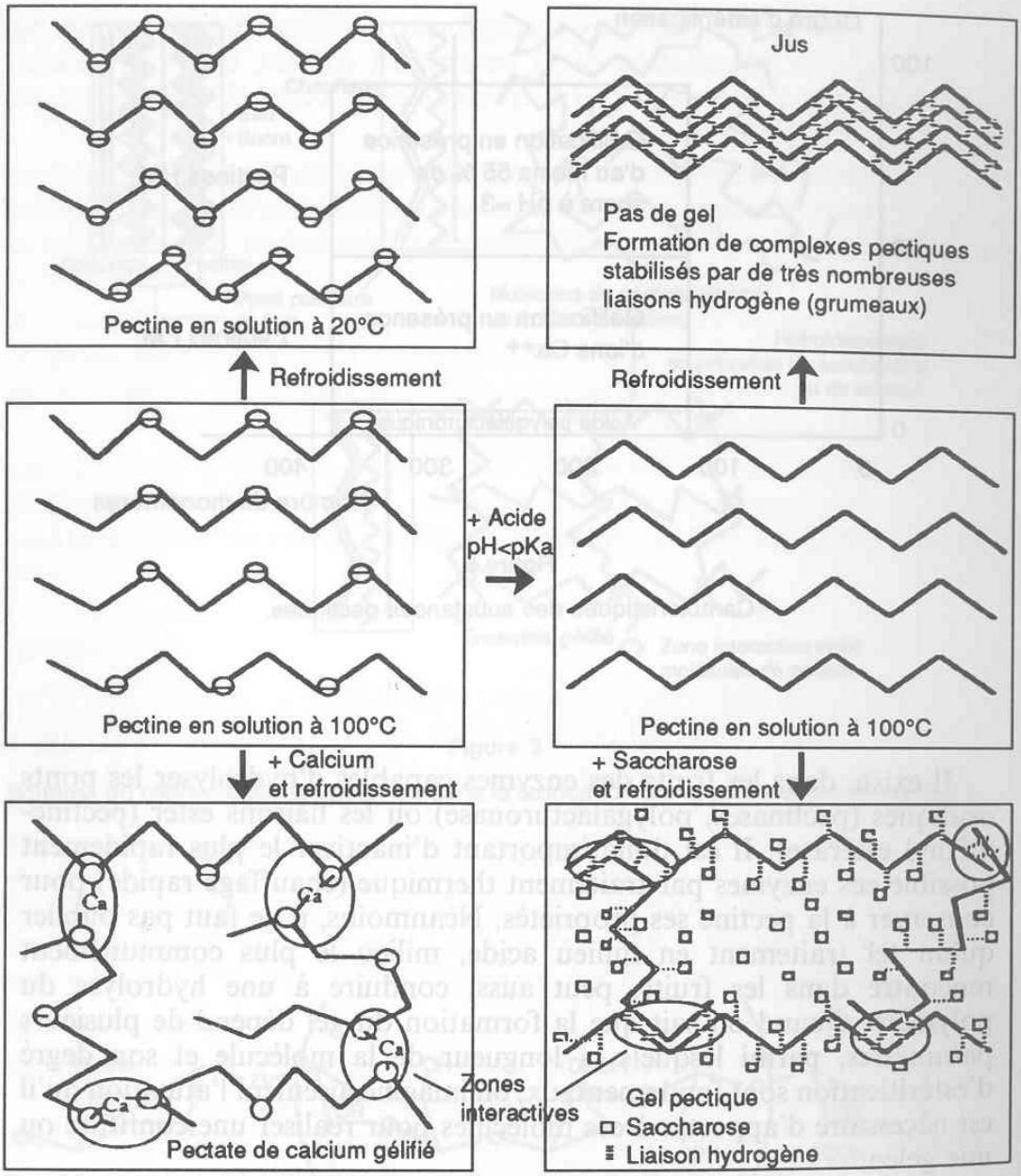


Figure 6

Schéma de formation des différents gels pectiques.

• Gélification avec des pectines HM

Les interactions pectiques intermoléculaires par liaisons hydrogène responsables de la formation du réseau doivent être localisées au niveau de zones limitées. Pour cela il faut, d'une part, que les groupements carboxyliques ne soient pas chargés négativement (pH du milieu inférieur

au pKa de ces groupes) car la répulsion électrostatique intermoléculaire ne permettrait pas le rapprochement des molécules de pectine et l'établissement de liaisons hydrogène de plus faible énergie. D'autre part, il est nécessaire que des molécules de saccharose ou de composés polyhydroxylés aptes à donner des liaisons hydrogène soient présentes pour éviter que les molécules de pectines ne donnent trop d'interactions hydrogène entre elles, ce qui conduirait à un « agglomérat granuleux » (voir Figure 6). Ainsi, avec de telles pectines, il est possible d'obtenir une gélification à des pH inférieurs à 3,5, en présence d'au moins 55 % de saccharose. L'augmentation de la concentration en pectines permet l'obtention d'un gel à des pH légèrement plus élevés et des concentrations en saccharose plus faibles (voir Figures 7 et 8). La concentration finale en pectine doit être comprise entre 0,2 et 1 %. Certains fruits ne contiennent pas suffisamment de pectines pour que ces valeurs soient atteintes et il est alors nécessaire d'ajouter des pectines ou des fruits riches en pectines pour pouvoir obtenir une gélification.

- **Gélification avec des pectines FM ou de l'acide polygalacturonique**

La gélification est indépendante de la présence de composés aptes à former des liaisons hydrogène (saccharose) car le mécanisme de gélification est lié à la formation de ponts ioniques du type :

$$-- COO^- -- Ca^{++} -- COO^- --$$

Cette gélification se produira pour des pH supérieurs au pKa des groupements carboxyliques des résidus d'acide galacturonique (voir Figure 8). Les gels peuvent donc être obtenus en la seule présence de pectine FM ou d'acide galacturonique (0,5 à 1 %) et de sels de calcium (0,1 %).

- **Domaine de faisabilité des gels à partir des pectines HM et FM**

Les paramètres à prendre en considération avec les pectines HM sont donc : la nature de la pectine (degré d'estérification, masse molaire) et sa concentration, le pH, la teneur en saccharose, la température et la durée de la cuisson. Plus la concentration en saccharose est élevée et plus la température d'ébullition du mélange est grande ; la concentration maximale au-delà de laquelle il cristallise est voisine de 67 % à 20°C.

Si le pH est bas (voisin de 2,5), le risque d'hydrolyse des pectines est alors très grand (Figure 7) avec comme conséquence une réduction de la masse molaire et une impossibilité de formation du gel.

Si la concentration en pectines augmente entre 0,2 et 1 % (limite au-delà de laquelle le gel devient irrégulier), la formation du gel à partir de pectines HM sera réalisable à des pH plus élevés et à des teneurs plus basses en sucre (Figure 8).

La préconservation par le SO_2 détruit la vitamine B_1.

Quant à la cuisson, elle porte peu atteinte à la vitamine B_1, mais elle détruit partiellement la vitamine C très oxydable à l'air en présence de cuivre ou de fer.

Les cuiseurs sous vide en acier inoxydable présentent donc un intérêt au point de vue de la conservation de la vitamine C.

On admet en général que la perte moyenne en vitamine C dans la confiture industrielle au cours de la préparation est de 25 % environ. La teneur reste ensuite constante pendant plusieurs années dans les conditions normales de conservation.

Les légumes déshydratés

Le séchage est un des plus vieux modes de conservation. L'activité de l'eau contrôle les réactions de dégradations biochimiques et microbiologiques. Mais ce n'est que la connaissance approfondie des structures et de la biologie cellulaires, associée aux progrès de la technologie, qui a permis de réaliser scientifiquement la déshydratation des légumes. Il s'en est suivi de grands progrès en fonction du but poursuivi : réduire au maximum la différence entre légumes frais et légumes déshydratés, puis réhydratés.

Or la quantité d'eau à retirer des légumes frais est énorme puisque la teneur en eau de ces produits varie de 88 à 95 % et doit être réduite, après déshydratation, entre 5 et 12 %.

1) Technologie

- **Préparation**

Les légumes doivent être frais (c'est pourquoi les usines de déshydratation se trouvent généralement sur les lieux de production). Ils sont triés et lavés.

- **Coupage**

Le coupage est important : un mauvais coupage, c'est-à-dire un coupage non net, blesse les tissus vivants en écrasant les cellules et altère profondément la couleur et la saveur.

On coupe en très petits morceaux (par exemple un poireau de 25 à 30 cm donne 400 à 500 coupes).

• **Blanchiment. Précuisson**

Pour la plupart des légumes (l'ail, l'oignon, les champignons exceptés) il est nécessaire d'effectuer avant séchage un blanchiment.

Actuellement le déshydrateur s'oriente vers la production de légumes déshydratés précuits. En effet, les fabricants de potages, gros utilisateurs de légumes déshydratés, désirent de plus en plus présenter des produits à la disposition des « gens pressés ». Le blanchiment est alors remplacé par une cuisson presque totale, afin que le légume déshydraté ne nécessite plus qu'une cuisson de quelques minutes qui coïncide avec le temps de réhydratation.

• **Séchage**

Il faut éviter le racornissement en surface, qui se produit si le tissu végétal très riche en eau est brusquement soumis à une atmosphère de faible humidité. Pour cela, les légumes sont, par exemple, soumis progressivement à un flux d'air de plus en plus sec. L'appareil peut être un sécheur-tunnel ou un sécheur à plateaux.

2) Modifications apportées à la valeur alimentaire

Les résultats analytiques obtenus sur les légumes montrent que la valeur nutritive et vitaminique des légumes déshydratés est à peu près identique à la valeur nutritive et vitaminique des légumes frais, à la condition de traiter les légumes immédiatement après leur récolte.

3) Achat de légumes séchés

Il n'existe pas de réglementation visant les légumes séchés. Les acheteurs ont tout intérêt à s'adresser à des producteurs sérieux. La dégustation constitue le meilleur critère à appliquer aux légumes séchés ; en particulier, leur couleur, leur odeur et leur goût doivent être aussi proches que possible de ceux des produits frais, après une courte ébullition (5 à 15 minutes) dans l'eau salée. Les principaux défauts à éviter sont l'absence de saveur, les odeurs et goûts étrangers (principalement dits « de foin ») et la texture fibreuse.

Les légumes lyophilisés

La lyophilisation ou cryo-dessiccation est une technique de déshydratation à très basse température, sous vide, qui permet de faire passer l'eau des légumes et des fruits de l'état solide à l'état de vapeur sans passer par l'état liquide (sublimation).

• Technologie

Après préparation, comme pour la déshydratation, la lyophilisation comprend deux stades :

– congélation rapide vers $-35^{o}C$ par exemple, qui garde intactes les cellules et solidifie l'eau ;

– déshydratation des légumes sous vide poussé, en communication avec une enceinte de $-30^{o}C$ à $-60^{o}C$. L'eau se sublime et se dépose dans cette dernière enceinte.

Par ce procédé, la teneur en eau peut être abaissée jusqu'à 1 %.

La réhydratation fait le plus souvent reprendre plus d'eau que n'en avaient les produits frais (10 kg de légumes frais donnent 1 kg de légumes lyophilisés qui donne 11 kg de légumes réhydratés).

Le volume du produit ainsi desséché reste identique à celui du produit frais et sa structure très poreuse rend sa réhydratation quasi instantanée. Avec de nombreux légumes cuits, l'aspect et le goût du produit réhydraté sont difficiles à discerner de ceux du produit frais.

Pratiquement, on lyophilise surtout les champignons, mais de bons résultats ont été obtenus avec les jus de fruits et divers légumes et, ainsi que chacun sait, avec le café.

Les fruits déshydratés

1) Technologie

Les pommes et les poires « tapées » sont traitées au four à 90-95°C, puis comprimées entre deux planchettes de bois alors qu'elles sont encore chaudes. Les pruneaux sont desséchés par un procédé analogue.

A côté de ces préparations artisanales, voire familiales, les fruits secs sont l'objet de traitements industriels. Pour éviter leur noircissement – dans le cas des pommes, poires, abricots, etc., – on les blanchit tout d'abord en présence de petites quantités d'anhydride sulfureux. Le produit séché ne doit pas en renfermer plus de 200 mg pour 100 grammes selon la loi ; cette dose considérable risque cependant d'être mal tolérée par certaines personnes qui feraient un usage immodéré des fruits ainsi traités. Après quoi, les fruits sont desséchés soit dans des « évaporateurs », soit sous l'action des rayons infra-rouges. Selon leur origine, la température de dessiccation varie de 70 à 85°C dans les évaporateurs.

La lyophilisation des fruits est possible au même titre que celle des légumes, mais les fruits crus lyophilisés puis réhydratés perdent leur turgescence comme les fruits congelés.

La déshydratation des fruits est réalisable par immersion dans des solutions hypersucrées. Cette technologie permet de contrôler les transferts de matière (perte d'eau, gain de sucre) et assure au produit de bonnes qualités nutritionnelle et organoleptique.

2) *Modifications apportées à la valeur alimentaire*

En moyenne, les fruits secs renferment 20 % d'eau, 3 % de protéines, 70 à 75 % de glucides assimilables, 3 à 5 % de fibres. Ils apportent 280 kcal (1 200 kJ) pour 100 grammes. Si la déshydratation est bien conduite, ils constituent une excellente source de vitamines A et C. Les pommes, poires, pêches, séchées industriellement par les procédés modernes contiennent des quantités appréciables de béta-carotène et 10 mg de vitamine C pour 100 grammes. Au contraire, les figues ou les dattes séchées au soleil ne renferment plus de vitamine C et leur teneur en vitamine A est sensiblement plus faible. On a peu de données sur la vitamine B1, mais elle est détruite en grande partie dans le cas des fruits traités à l'anhydride sulfureux. En raison de leur teneur élevée en fibres, les fruits secs servent à lutter contre la constipation.

3) *Conservation*

Les facteurs limitants de la conservation des fruits secs sont les levures et les acariens. Il faut surtout les protéger contre la reprise d'eau dans des atmosphères à humidité relative élevée, qui contribue à l'augmentation défavorable de l'activité de l'eau.

Les légumes et fruits fermentés

Un autre moyen de conserver certains légumes est de leur faire subir une *fermentation dirigée*. On traite ainsi les navets et surtout les choux.

1) Choucroute

• Technologie de la choucroute

La choucroute – conserve de chou – est préparée à partir de choux spéciaux (choux blancs, genre chou cabus, tels le chou quintal d'Alsace et le chou Brunswick) récoltés en France dans les régions du Nord et de l'Est. Ces choux sont découpés en lanières après enlèvement des trognons : cette opération mécanique est importante car, selon son exécution, la choucroute sera d'une présentation plus ou moins belle. Toutes ces lanières, en général de 3 à 4 mm de largeur, sont placées dans des fermenteurs de grande capacité (10 m^3), en lits séparés les uns des autres par une certaine quantité de sel – la quantité de sel est de l'ordre de 2 à 3 % de celle du chou. A la surface des lanières on dispose des feuilles de chou très larges ; au-dessus, on place un plateau de bois qu'on leste avec des blocs de béton. Le poids du lest est d'environ 40 à 50 % du poids total des choux. Placé dans ces conditions anaérobies, le chou va être soumis à une fermentation lactique dont l'arrêt du dégagement gazeux indiquera la fin.

La fermentation est dirigée grâce au sel qui inhibe le développement de certains micro-organismes et favorise la prolifération d'autres espèces comme les genres *Lactobacillus* et *Streptococcus.*

• Modifications apportées à la valeur alimentaire

Examiné sous l'aspect des vitamines, le chou est extrêmement riche en vitamine C, très riche en vitamines B et contient un peu de vitamine A. Transformé en choucroute, sa teneur en vitamine B_{12} est augmentée et celle en vitamine C à peine modifiée, la fermentation s'effectuant presque complètement à l'abri de l'air. La fermentation semble d'autre part avoir des effets bénéfiques sur la flore intestinale.

• Conservation

La choucroute peut être conservée stérilisée en boîte. C'est pourquoi nous trouvons sur le marché, à côté de la choucroute fraîche, de la choucroute en boîte. Cette dernière peut se présenter sous trois aspects :

A côté de ces préparations artisanales, voire familiales, les fruits secs sont l'objet de traitements industriels. Pour éviter leur noircissement – dans le cas des pommes, poires, abricots, etc., – on les blanchit tout d'abord en présence de petites quantités d'anhydride sulfureux. Le produit séché ne doit pas en renfermer plus de 200 mg pour 100 grammes selon la loi ; cette dose considérable risque cependant d'être mal tolérée par certaines personnes qui feraient un usage immodéré des fruits ainsi traités. Après quoi, les fruits sont desséchés soit dans des « évaporateurs », soit sous l'action des rayons infra-rouges. Selon leur origine, la température de dessiccation varie de 70 à 85°C dans les évaporateurs.

La lyophilisation des fruits est possible au même titre que celle des légumes, mais les fruits crus lyophilisés puis réhydratés perdent leur turgescence comme les fruits congelés.

La déshydratation des fruits est réalisable par immersion dans des solutions hypersucrées. Cette technologie permet de contrôler les transferts de matière (perte d'eau, gain de sucre) et assure au produit de bonnes qualités nutritionnelle et organoleptique.

2) *Modifications apportées à la valeur alimentaire*

En moyenne, les fruits secs renferment 20 % d'eau, 3 % de protéines, 70 à 75 % de glucides assimilables, 3 à 5 % de fibres. Ils apportent 280 kcal (1 200 kJ) pour 100 grammes. Si la déshydratation est bien conduite, ils constituent une excellente source de vitamines A et C. Les pommes, poires, pêches, séchées industriellement par les procédés modernes contiennent des quantités appréciables de béta-carotène et 10 mg de vitamine C pour 100 grammes. Au contraire, les figues ou les dattes séchées au soleil ne renferment plus de vitamine C et leur teneur en vitamine A est sensiblement plus faible. On a peu de données sur la vitamine B1, mais elle est détruite en grande partie dans le cas des fruits traités à l'anhydride sulfureux. En raison de leur teneur élevée en fibres, les fruits secs servent à lutter contre la constipation.

3) *Conservation*

Les facteurs limitants de la conservation des fruits secs sont les levures et les acariens. Il faut surtout les protéger contre la reprise d'eau dans des atmosphères à humidité relative élevée, qui contribue à l'augmentation défavorable de l'activité de l'eau.

doit avoir pour but de détruire ou d'inhiber totalement, d'une part les enzymes, d'autre part les micro-organismes et leurs toxines, dont la présence ou la prolifération pourrait altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à l'alimentation humaine.

Il n'existe aucune réglementation d'ensemble concernant les conserves de légumes et de fruits. On trouve des dispositions fragmentaires dans le décret du 15 avril 1912, modifié par ceux du 15 septembre 1932 et du 15 août 1937.

Le Centre Technique des Conserves de Produits Agricoles établit des normes qui sont assimilées aux usages « loyaux et constants » lorsqu'elles ont été approuvées par le Ministre de l'Agriculture.

D'une façon générale, la mise en conserve s'applique à des légumes et fruits frais. Les conserves de légumes secs trempés ou régénérés sont soumises à des prescriptions spéciales d'étiquetage.

Le reverdissage de certains fruits ou légumes naturellement verts est autorisé au moyen du complexe cuivrique des chlorophylles et des chlorophyllines, à l'exclusion de toute autre substance, et à condition de n'utiliser que la dose strictement nécessaire à produire la coloration (arrêté ministériel du 15 octobre 1964). Cette technique n'est pas en usage en France.

La coloration des fraises, bigarreaux, cerises, framboises et quetsches en conserve, à l'aide de certains colorants rouges de synthèse, est également permise ou tolérée sous certaines conditions.

2) *Technologie des conserves de légumes*

Celle-ci comporte les principales étapes suivantes :

- **Préparation**

Les légumes frais sont lavés et parés comme pour l'usage culinaire normal.

- **Blanchiment**

Ils subissent généralement un blanchiment à l'eau bouillante, salée ou non, ou à la vapeur. L'intérêt de cette opération est de détruire les enzymes, en particulier les oxydases qui altéreraient la vitamine C lors des opérations ultérieures et les polyphénoloxydases à l'origine de modifications défavorables de la couleur.

• **Emboîtage et jutage**

Ces divers traitements précédents et le « jutage » varient avec les espèces. Par exemple :

– les pois sont écossés, lavés et blanchis pendant 2 à 8 minutes ; emboîtés, on leur ajoute soit une couverture d'eau salée (petits pois au naturel), soit un jus composé d'eau salée, oignons, sucre, aromates, salade, etc. (pois à l'étuvée) ;

– les épinards sont triés, lavés à l'eau tiède, triés à nouveau, blanchis à l'eau bouillante salée à 1 %, égouttés, emboîtés (épinards en branches) et jutés à l'eau salée à 2 %. Dans le cas des épinards en purée, on rince après blanchiment et on passe au hachoir ; le produit est alors réchauffé, salé et emboîté.

• **Préchauffage**

Après emboîtage et jutage, les boîtes sont généralement préchauffées, ce qui a pour effet de dilater leur contenu et d'exclure les gaz dissous avant fermeture. On élimine ainsi le maximum d'oxygène, ce qui permet de mieux conserver la vitamine C.

• **Sertissage**

• **Stérilisation**

Les boîtes serties sont soumises à un traitement de stérilisation en autoclave, de durée et de température variables selon la nature et l'acidité du produit. La stérilisation hors du récipient, suivie d'emboîtage aseptique commence même à être industrialisée.

• **Refroidissement**

Après le traitement de stérilisation, les boîtes sont refroidies rapidement dans l'eau pour éviter les effets de surcuisson dus à la lenteur du refroidissement à l'air des boîtes entassées.

3) Technologie des conserves de fruits

Les techniques sont voisines de celles des conserves de légumes. Cependant, les fruits ne sont généralement pas blanchis ; on les emboîte après dénoyautage (abricots, cerises), pelage, découpage et épépinage éventuel.

Le jutage se fait soit à l'eau bouillante (fruits au naturel), soit au sirop de sucre calculé pour obtenir 18 à 20° Baumé final (fruits au jus) ou 28° Baumé final (fruits au sirop).

Les boîtes sont préchauffées, serties et stérilisées, mais l'acidité de la plupart des fruits autorise l'usage de températures inférieures ou égales à 100°C et de durées plus courtes (abricots en boîte 1/1 : 10 à 20 minutes à 100°C).

Pour les jus de fruits, voir le chapitre « Les boissons ».

4) Modifications apportées à la valeur alimentaire

- **Par les récipients**

Les boîtes sont de quatre types principaux :

– Fer-blanc nu : l'attaque du fer-blanc entraîne une dissolution d'étain dans le produit d'autant moins rapide que moins d'oxygène ou de substances oxydantes sont en contact. Les fers-blancs modernes type L et MR sont très supérieurs au fer traditionnel pour les produits acides. L'étain est considéré comme inoffensif. Sa teneur en plomb est sévèrement contrôlée.

Les produits très acides donnent parfois un dégagement d'hydrogène au contact de la boîte par réaction avec le métal (risques de bombage physico-chimique).

– Fer-blanc verni anti-acide : un vernis à base de résines synthétiques recouvre le fer-blanc ; ces boîtes sont surtout utilisées lorsque l'étain réagit avec le produit conservé (jus de raisins rouges par exemple).

– Fer-blanc verni anti-soufre : un vernis à base d'oxyde de zinc dit « vernis sulfatine » est utilisé dans le cas des légumes riches en soufre, susceptibles de produire de l'hydrogène sulfuré qui donnerait du sulfure de fer noir au contact du fer de la boîte. Le sulfure de zinc, de couleur blanche, qui se forme alors, ne nuit plus à l'aspect du produit.

– Il existe un quatrième type de boîtes qui sont recommandées pour des produits agressifs tels que fruits et légumes à pigments anthocyaniques. Ce sont des boîtes dites revernies ou réchampies. On s'assure que le métal ne sera pas en contact avec l'aliment en pulvérisant un second vernis, soit sur la surface interne de la boîte, soit sur l'agrafe seulement.

– Enfin, il existe également maintenant des emballages type Tétrapak.

- **Par une conservation prolongée**

La conservation des produits acides en boîtes de fer-blanc, verni ou non, n'est cependant pas indéfinie ; elle varie beaucoup avec la nature du produit. Une conserve de fruits très ancienne, encore bactériologiquement et chimiquement saine, risque cependant de posséder un aspect peu attractif : les jus d'agrumes brunissent ou ternissent au cours du temps ; les pois, les choux-fleurs, etc., risquent de noircir (sulfuration).

Une inscription en code sur l'un des fonds comporte notamment l'année de fabrication, désignée par une lettre de l'alphabet suivie par un nombre représentant le jour de fabrication. Le Service de la Répression des Fraudes a demandé que le code soit abandonné au profit de l'une des modalités suivantes : par exemple le 6 février 1979, 37e jour de l'année, était estampé et codé P 037, P désignant l'année 1979. Ceci devient : 79037 ou 06 fév. 79.

On peut admettre que les conserves de fruits acides et les jus de fruits se gardent très bien au moins une année et souvent deux, tandis que les conserves de légumes se gardent très bien deux à quatre ans selon les cas.

Il s'agit là, bien entendu, de conservation des propriétés organoleptiques et nutritives (vitamines).

La température d'entreposage a une importance prépondérante ; en règle générale, on doit entreposer au frais les conserves de produits acides (température si possible inférieure à + 10°C), surtout si l'on a en vue une conservation de longue durée (stock de sécurité). Il faut cependant éviter l'humidité qui favorise la rouille des récipients.

Il faut souligner que la durée de conservation d'un produit appertisé dépend essentiellement du respect de certaines règles :

– *par le fabricant :* absence d'oxygène dans la boîte et refroidissement rapide ;

– *par le négociant :* entreposage à des températures modérées.

5) Achat des conserves

L'achat des conserves est souvent plus délicat que celui des produits frais ; il faut se méfier des « lots » de conserve de marque inconnue, vendus aux enchères ou par des grossistes peu scrupuleux. L'ouverture de plusieurs boîtes prises au hasard renseignera toujours l'acheteur mieux que l'étiquette ; il ne faut pas hésiter à vider le produit dans un récipient large et plat, et au besoin à le réchauffer dans sa boîte, pour examen et dégustation ; en aucun cas le contenu de boîtes bombées ou floches ne doit être consommé. Ces boîtes doivent être détruites impérativement ; le bombage pouvant résulter d'un développement bactérien rend le produit suspect de contenir des toxines bactériennes, ou des micro-organismes pathogènes.

Les légumes et fruits surgelés

Il faut mentionner enfin le procédé de conservation par surgélation (congélation rapide vers −30°C ou au-dessous, suivie d'un entreposage à une température au plus égale à −18°C).

La surgélation a pour effet de diminuer les vitesses des réactions métaboliques et de dégradation et permet des conservations de longue durée.

Précisons que les produits surgelés ne sont pas stériles mais doivent être exempts de germes pathogènes (décret du 9 septembre 1964).

Beaucoup de fruits et de légumes peuvent être surgelés ; cependant les laitues, concombres, céleris, tomates, raisins, bananes s'y prêtent mal, car leur aspect à la décongélation devient peu présentable. Les fruits à congeler doivent être mûrs, mais encore fermes à la récolte.

1) Technologie

- **Préparation**

Triage, lavage et parage comme pour la stérilisation.

- **Blanchiment**

Le blanchiment est utilisé pour les légumes ; il inactive les enzymes. Leur activité, quoique très ralentie par le froid, pourrait se manifester au cours du stockage ou au moment de la décongélation par des modifications défavorables de couleur, odeur, saveur.

- **Sucrage**

Les fruits ne pouvant pas être blanchis, on peut les sucrer (un tiers à un quart du poids des fruits). L'addition d'acide citrique ou d'acide ascorbique (antioxydants) contribue à éviter le brunissement.

- **Surgélation**

Le Décret du 9 septembre 1964 précise que l'opération de surgélation doit être conduite de manière à franchir très rapidement la zone de cristallisation maximale et à atteindre, le plus tôt possible après préparation, une température égale ou inférieure à −18°C à « cœur », c'est-à-dire jusqu'au centre du produit.

Dans l'industrie, on utilise des appareils à soufflerie d'air froid ou à contact ; l'azote liquide est utilisé lorsqu'une congélation ultra-rapide est recherchée.

La congélation dans les congélateurs domestiques peut aussi donner de bons résultats.

2) *Conservation*

Les produits surgelés doivent être maintenus depuis leur congélation jusqu'à remise au consommateur, à une température égale ou inférieure à − 18 °C.

La durée de conservation des fruits et légumes congelés (ou surgelés) dépend de la température. Plus la température est basse, plus longue est la conservation ; elle est de l'ordre de 1 an à − 18 °C et de 2 ans à − 25 °C. Les produits surgelés sont désormais soumis aux exigences de l'arrêté du 22 août 1979 qui prévoit l'indication, sur l'emballage, de la date de congélation et de la date limite d'utilisation optimale. Cette dernière n'est pas une date limite de vente ; elle indique seulement que les produits ont perdu un peu de leurs qualités initiales.

D'autre part, la constance de la température est importante. De petites fluctuations de quelques degrés seulement sont préjudiciables à la conservation.

3) *Conseils pour l'achat de produits surgelés*

Les denrées surgelées ne doivent être achetées que chez un dépositaire convenablement équipé pour la conservation à − 18 °C (ou à une température plus basse).

Toutefois, de nombreux détaillants exposent les produits surgelés de façon trop prolongée, dans des congélateurs ouverts, en tas qui dépassent la limite supérieure du meuble. Certains paquets peuvent subir une décongélation partielle nuisible. L'achat de ces paquets est à éviter. Il y a lieu de refuser également les produits dont l'emballage présente des signes évidents de dégradation.

4) *Utilisation des produits surgelés*

Au moment de l'utilisation, deux cas peuvent se produire :

- **Décongélation rapide** lorsque le produit est destiné à la cuisson.

On le plonge en bloc dans l'eau bouillante (cependant les épinards et asperges doivent être un peu décongelés avant cuisson pour fractionner le bloc). L'eau de cuisson doit être très peu abondante pour limiter les

pertes facilitées par la désorganisation des tissus due à la congélation. La durée de cuisson doit être réduite aux 2/3 environ de celle des légumes frais, pour tenir compte du blanchiment.

• **Décongélation lente** lorsque le produit est destiné à être consommé cru.

Le produit est placé plusieurs heures à l'avance dans un endroit frais (au réfrigérateur d'abord, de préférence) de façon à obtenir une décongélation aussi lente que possible.

Un mode d'emploi précisant notamment le mode de décongélation, les précautions à prendre pour la préparation culinaire du produit ou sa conservation au domicile du consommateur, doit obligatoirement figurer sur l'emballage.

Des quantités importantes de légumes et de fruits congelés servent de matière première aux industries de l'appertisation et de la confiturerie.

5) Modifications de la valeur alimentaire

Les produits surgelés sont très proches des produits frais. S'ils ont été bien préparés et maintenus constamment à très basse température (respect de la « chaîne du froid »), ils sont généralement de qualité excellente.

Conservation sous atmosphère contrôlée

Il est également possible de ralentir la vitesse des phénomènes respiratoires en diminuant la teneur en oxygène de l'atmosphère jusqu'à une valeur qui n'engendre pas de fermentations. Les premiers travaux sur l'effet favorable de faibles teneurs en oxygène sur la conservation des fruits et légumes ont été réalisés en France par Bérard en 1820. Ce n'est qu'un siècle plus tard que deux Anglais, Kidd et West, ont proposé l'emploi d'atmosphères modifiées pour améliorer la conservation des pommes et des poires. Depuis, de très nombreux travaux ont montré que la conservation à des températures plus ou moins supérieures à la température de formation de cristaux de glace et dans des atmosphères à faible teneur en oxygène mais enrichies en anhydride carbonique, préservent mieux les fruits et légumes que la seule conservation à basse température. Ces atmosphères contrôlées connaissent actuellement de très nombreuses applications au niveau industriel, avec des entrepôts frigorifiques à atmosphère contrôlée.

Produits de quatrième gamme

Au niveau domestique, les connaissances acquises, aussi bien en physiologie, biochimie et technologie végétale qu'au niveau des films d'emballage, ont permis la mise au point des produits végétaux de quatrième gamme. Rappelons ici que les « numéros de gamme » qui qualifient certains de nos aliments sont au nombre de cinq.

En ce qui concerne les fruits et légumes, ceux qui sont consommés en l'état constituent la première gamme ; leur appertisation conduit à des fruits et légumes de deuxième gamme, et leur congélation à des produits de troisième gamme. La cinquième gamme correspond aux denrées cuites sous vide.

Les fruits et légumes de quatrième gamme sont des produits crus et frais, conditionnés dans des emballages à usage domestique ou collectif, prêts à l'emploi et ayant été soumis à une ou des préparations telles qu'épluchage, découpage ou autre, préparations qui affectent leur intégrité initiale. Ils sont généralement conditionnés dans un emballage en matière plastique (polyéthylène, polypropylène, films composites, etc.) qui sert de compartiment à une atmosphère modifiée, naturellement ou non, et conservés à la température de réfrigération optimale du végétal. La durée limite de conservation (DLC) est voisine d'une semaine. Actuellement, les salades d'une seule variété ou mélangées constituent l'essentiel de la production, le reste étant représenté par les carottes râpées, les mélanges de légumes pour soupe, le chou blanc et le chou rouge émincés.

La facilité de préparation liée aux modifications récentes de nos habitudes alimentaires, caractérisées en particulier par la diminution du temps de préparation de nos repas, et la fraîcheur apparente des produits de quatrième gamme ont contribué à leur succès. Ainsi, la production française est passée d'environ 500 tonnes en 1984 à plus de 50 000 tonnes en 1990, une cinquantaine d'usines fabriquant environ 500 000 sachets par jour.

Ces produits de quatrième gamme doivent être réglementairement conservés à des températures inférieures à 8 °C. Pour assurer la meilleure stabilité microbiologique, la désinfection par de l'hypochlorite est autorisée à la dose maximale de 120 ppm. L'addition d'acides ascorbique et/ou citrique et/ou de métabisulfite de sodium est parfois tolérée pour des produits sensibles au brunissement enzymatique. L'emballage en atmosphère modifiée permet d'améliorer la durée de conservation des produits de quatrième gamme.

Pour chaque produit, les teneurs en gaz carbonique et en oxygène sont ajustées pour inhiber ou ralentir certaines réactions liées aux

phénomènes respiratoires, de sénescence et de ramollissement. Le découpage des fruits et légumes accélère leur respiration et, pour en réduire l'intensité, la teneur en oxygène est abaissée en dessous de 8 % et celle en gaz carbonique est augmentée aux environs de 1 %. Quand un fruit ou un légume est emballé, sa respiration conduit à une augmentation naturelle de la teneur en gaz carbonique et à un abaissement de celle en oxygène. La composition de l'atmosphère dans l'emballage résulte de l'intensité respiratoire du végétal et de la vitesse de diffusion des gaz au travers du matériau d'emballage. L'injection d'un mélange gazeux au moment du conditionnement impose une composition initiale dont les variations en fonction du végétal, de la température, du temps et de la nature du film d'emballage sont optimales.

Les effets de ces atmosphères modifiées sur les produits sont identiques à ceux observés lors de conservations en atmosphère contrôlée (AC), cette dernière technologie étant surtout employée pour de longues conservations de fruits et légumes entiers dans des entrepôts industriels.

L'emballage en atmosphère modifiée avec des produits de quatrième gamme est toujours accompagné d'une humidité relative très élevée, ce qui limite la déshydratation mais favorise la prolifération de microorganismes phytopathogènes cryophiles, parmi lesquels on trouve des bactéries, des levures et des moisissures. Pour optimiser la durée de conservation des produits de quatrième gamme, il est donc possible d'agir :

– sur le produit végétal par un choix judicieux de la taille des morceaux ou du pH ;

– en modulant l'activité respiratoire qui dépend des concentrations en oxygène et en gaz carbonique, mais surtout de la température ;

– en contrôlant la vitesse de diffusion des gaz au travers du film d'emballage, vitesse qui est fonction de la température, de la composition du film, du gradient de concentration entre milieu extérieur et intérieur. En effet, selon sa perméabilité, le film d'emballage peut laisser entrer peu d'oxygène et sortir peu de gaz carbonique. Les films les plus couramment utilisés sont, avec une perméabilité décroissante, en polyéthylène basse densité, en polystyrène, en polypropylène, en chlorure de polyvinyle ou en polyester. Il est actuellement possible de maîtriser les évolutions des concentrations en gaz depuis la mise en sachet jusqu'à la consommation ;

– en traitant avant ensachage le produit végétal par un agent microbicide pour réduire la charge initiale.

C'est par optimisation de la composition en gaz de l'atmosphère et de la température qu'est assurée la conservation la plus longue et la meilleure, quant à la qualité des fruits et légumes (voir Tableau 8).

CONSEILS POUR L'ACHAT, LA CONSERVATION ET L'UTILISATION DOMESTIQUE DES LÉGUMES ET DES FRUITS

Achat des légumes

Artichauts : feuilles dures, sans tache.

Asperges : tige ferme, lisse, non ligneuse. Pointe fermée.

Aubergines : peau lisse, brillante, sans tache. Pédoncule épineux, gonflé de sève.

Carottes : bien colorées, fermes. Peau brillante, non ridée.

Courgettes : fermes, épiderme légèrement piquant sous la main. Couleur régulière, coupe de la tige fraîche, blanche et non ratatinée.

Haricots verts : peu ou pas de fil, cassure nette, grains pas trop gros. Fermes et rebondis, épiderme « ganté » (aspect du velours).

Melons : la peau craquelée autour du pédoncule et l'arôme sont des indices de qualité. Le port de l'étiquette « Top Melon » garantit un taux de sucre minimum et un équilibre acide/sucre nécessaire à sa qualité gustative.

Petits pois : ne doivent présenter aucune trace de rouille, moisissure ou fermentation. Les gousses bien fermées, d'une belle couleur verte. Les grains tendres.

Salades : fermes, non flétries, présentant une certaine humidité.

Tomates : fermes, sans tache ni meurtrissure. Les choisir de différents calibres et à différents stades de maturité en fonction de l'utilisation.

Achat des fruits

Abricots : bien colorés, fermes mais souples sous la pression des doigts, à manipuler avec précaution car ils sont fragiles.

Agrumes : bien formés, de coloration homogène, brillants, fermes et lourds.

Bananes : de couleur jaune légèrement mouchetée de brun, exemptes de meurtrissures et de pourriture aux extrémités, notamment à l'attache.

Pêches : ne pas se fier à la couleur. Fermes mais souples sous la pression des doigts, à manipuler avec précaution car elles sont fragiles.

Poires : continuent à mûrir après cueillette. Les choisir à différents stades de maturité. Souples, mais pas trop, sous la pression des doigts, notamment autour du pédoncule.

Pommes : refuser les pommes trop petites, malformées, brunies ou de variétés de goût désagréable.

Prunes : plus une prune est recouverte de pruine, léger voile blanc où les doigts laissent une trace, plus elle est fraîche.

Raisins : leur état de fraîcheur se juge à la pruine, petite pellicule blanche qui recouvre les grains dont la coloration doit être la plus uniforme possible. La rafle doit être souple et verte.

Conservation domestique des fruits et légumes

Les légumes et les fruits ne sont pas des corps inertes. Ils continuent à vivre, c'est-à-dire à évoluer, après avoir été récoltés. On les manipulera donc avec précaution et on les stockera dans de bonnes conditions : local obscur, frais, aéré, pommes tête en bas et poires tête en l'air.

Les phénomènes de maturation des fruits et légumes sont suivis de phénomènes de sénescence, généralement associés ou précédés par des dégradations d'origine microbienne. Maintenir l'intégrité de ces produits végétaux après leur récolte pendant le plus longtemps possible a toujours été un objectif important, tant au niveau domestique qu'industriel.

Généralement, la maturation correspond à des modifications conférant au fruit un ensemble de qualités souhaitées atteignant un optimum à un moment donné (couleur, goût, aspect, texture, teneur en vitamines, etc.). Pour la plupart des *fruits,* cet état est de courte durée et une désorganisation tissulaire lui succède. Il est donc nécessaire pour prolonger leur disponibilité tout en maintenant leurs qualités, de maîtriser leur conservation. Pour cela, il est souvent nécessaire d'une part de cueillir les fruits avant leur complète maturité et, d'autre part, de ralentir les phénomènes biochimiques impliqués dans les phénomènes de maturation, par réfrigération et/ou contrôle de l'atmosphère dans laquelle ils sont entreposés.

En ce qui concerne les *légumes,* les phénomènes de maturation induisent des transformations d'origine biochimique, souvent peu favorables à leur texture (synthèse de fibres) mais aussi au niveau de leur goût (synthèse d'amidon à partir de sucres simples). Il est bien connu que la plupart des légumes « jeunes » sont plus tendres et plus sucrés (petits pois par exemple).

Quand un fruit ou un légume est récolté, il n'est plus alimenté en sève par la plante qui l'a produit, ce qui ne l'empêche pas de rester vivant et d'être le siège de réactions biochimiques liées à sa *respiration,* réactions dont la vitesse augmente avec la température. L'intensité de tels phénomènes varie beaucoup d'un végétal à un autre ; cependant plus elle sera intense et plus difficile sera la conservation. Rappelons que la respiration consomme de l'oxygène et des glucides, et qu'en l'absence d'oxygène, des fermentations anaérobies défavorables se produisent. L'éthanol et les divers composés organiques qui en résultent sont toxiques pour le tissu végétal au niveau duquel ils engendrent des nécroses et des modifications de goût défavorables.

La respiration se traduit aussi par un dégagement de chaleur, d'eau et de gaz carbonique, et c'est ce phénomène qui contribue le plus à limiter la conservation des produits végétaux.

Les fruits peuvent être classés en deux groupes, en fonction de l'allure des variations de leur intensité respiratoire, en fonction du temps (quantité d'oxygène consommée par unité de temps et par unité de masse). Certains fruits – comme l'abricot, l'avocat, la banane, certains melons, la pêche, la poire, la pomme, la tomate – présentent une augmentation temporaire de leur intensité respiratoire, qualifiée de *pic climactérique.* C'est à ce moment précis que des changements de couleur, de texture et de goût interviennent et accompagnent la maturation. D'autres fruits – tels que ananas, cerise, citron, figue, fraise, orange, raisin – et la plupart des légumes ne présentent pas ce phénomène et ont une variation continue de leur intensité respiratoire. L'éthylène joue le rôle important dans tous ces mécanismes et est qualifié d'hormone de maturation ; il favorise l'apparition du pic climactérique à des teneurs comprises entre 1 et 10 ppm. Il faut éviter l'accumulation de cette hormone végétale gazeuse pour prolonger la conservation des fruits par ventilation ; si ce composé, produit par un fruit mûr, s'accumule au voisinage de fruits pas encore mûrs, il déclenchera rapidement l'ensemble des réactions associées à la maturation.

Il est donc nécessaire, pour conserver au mieux fruits et légumes, d'éliminer par ventilation l'eau synthétisée, car elle favorise la prolifération microbienne, et la chaleur produite, car elle peut contribuer à l'accélération des réactions endogènes au végétal. Cependant, une atmosphère trop sèche déshydratant très rapidement le fruit, l'idéal est de se placer à une humidité relative, comprise entre 85 et 95 %.

Pour ralentir la vitesse de l'ensemble des réactions biochimiques associées à la respiration, il faut abaisser la température en réfrigérant le végétal. Cependant une température de conservation trop basse, située en dessous du point de congélation d'une partie de l'eau du végétal, engendrera des modifications irréversibles et défavorables. Chaque fruit

Tableau 8

Conditions optimales de conservation prolongée de quelques fruits et légumes

	TEMPÉRATURE	ATMOSPHÈRE contrôlée		DURÉE DE CONSERVATION (jours)		
	(°C)	% O_2	% CO_2	**Air**	**Atmos. contrôl.**	**Hypobare**
Fruits						
abricot	−1 à 0	1 à 2	2 à 3	14	50	84
ananas	7	2 à 5	0	12	15	40
avocat	7	1	9	30	60	100
banane	13	2	5	21	60	150
cerise	−1 à 2	1 à 2	1 à 3	7	21	28
citron	10 à 15	0 à 3	0 à 5	130	220	
fraise	−0,5 à 5	4 à 10	0 à 20	5	10	21
framboise	0	2 à 5	0 à 20	3	5	5
mangue	13	5	5	14	21	28
melon	10	2 à 5		14	21	
nectarine	0	1 à 3	5	21	42	
orange	0 à 10	15	0	42	90	
pamplemousse	7	2 à 5	2 à 5	28	42	100
papaye	13	1 à 2	0	14	21	28
pêche	−1 à 0	1 à 2	5	21	56	84
poire	−2 à 1	1 à 2	1 à 5	60 à 200	100 à 300	
pomme	−1 à 4	3	3 à 5	120 à 200	200 à 300	
prune	−1 à 0	1 à 2	1 à 5	7	21	35
raisin	−1 à 0	5	2 à 5	120	150	
Légumes						
artichaut	−1 à 0	2 à 5		21	28	28
asperge	0 à 2	1 à 3	5 à 15	14	21	28
brocoli	0	2 à 5	10	14	21	
carotte	−1 à 1	1 à 4		120	180	
céleri	0	1 à 4		28	35	
champignon	0	1 à 2	10 à 15	5	8	18
chou-fleur	0	1 à 2	5 à 10	30	70	120
chou de Brux.	−1 à 0	2 à 14	5 à 10	21	40	100
concombre	8 à 10	3 à 5		14	28	42
épinard	0	1 à 2		7	14	28
haricot vert	0 à 7	2 à 5	15	7	21	21
laitue	0	2 à 5	0	7	14	14
oignon	−2 à 0	2 à 5	5 à 10	21	42	42
petit pois*	−1 à 0	5 à 10	5 à 7	14	28	42
p. de terre	5 à 10			150 à 250		
tomate mûre	8 à 12	3 à 5	0	7	14	21
tomate verte	13 à 20	3 à 5	0	7	14	21

* petits pois en cosse.

ou légume possède une température optimale de conservation en dehors de laquelle il est susceptible de subir des dommages plus ou moins graves. Par ailleurs, certains fruits ont une température critique en dessous de laquelle ils perdent définitivement leur faculté à mûrir (agrumes, ananas, banane, melon, etc.) tandis que d'autres acquièrent une excellente qualité quand leur conservation à l'état réfrigéré est suivie d'une phase de maturation complémentaire (poire).

Il ne faut pourtant pas croire que le froid puisse rendre à des légumes défraîchis leur qualité initiale. On ne doit placer au froid que des fruits ou des légumes en très bonne condition, plutôt un peu au-dessous de leur état de pleine maturité (pommes, poires,...). La conservation risque d'être de trop courte durée si le fruit est mis au froid déjà mûr.

On évitera de placer au réfrigérateur les bananes, qui ne supportent pas longtemps une température inférieure à +12°C, et les oranges qui dégagent des composés à odeur prononcée risquant d'imprégner d'autres denrées.

Les températures à appliquer et les durées de conservation sont très variables selon les espèces et les variétés. Le Tableau 8 pourra en donner une idée ; il est valable pour une conservation d'une durée la plus longue possible. Si l'on ne dispose que d'une seule température (+5°C par exemple), certains produits ne la supporteront que pendant un temps court et il faudra donc surveiller leur évolution. C'est le cas pour les réfrigérateurs ménagers. Les grandes collectivités et le commerce peuvent disposer de chambres froides maintenues à diverses températures. Grâce aux chambres froides, les achats peuvent se faire en plus grosses quantités, c'est-à-dire à des prix plus avantageux pour une qualité plus régulière. A l'échelon ménager il est plus intéressant, pour la qualité et la variété, d'acheter seulement de petites quantités et de les renouveler régulièrement.

PLACE DANS L'ALIMENTATION DES LÉGUMES ET DES FRUITS

Etude de la consommation

1) Tendances de consommation

La consommation de fruits en France a pris un essor particulier seulement après 1920 environ et elle n'a cessé de croître rapidement

depuis lors, de 31 kg par personne et par an en 1951 à 82 kg par personne et par an en 1987.

La consommation des fruits et des légumes est, depuis longtemps, devenue accessible en France. Seules certaines espèces ont un prix plus élevé que d'autres, comme certains fruits exotiques et surtout la plupart des produits hors saison. Mais les critères de prix ne sont pas les seuls à déterminer la consommation, les mœurs alimentaires intervenant aussi dans les choix des consommateurs. Tout ceci est à considérer dans les enquêtes socio-économiques qui nous montrent que la consommation des fruits et des légumes frais chez les habitants de nos villes augmente progressivement avec l'augmentation du revenu.

Dans l'ensemble, la consommation des légumes augmente plus faiblement que celle des fruits, bien que la part des produits surgelés soit plus importante pour les légumes.

2) Consommation de fait

La consommation des légumes en France est donnée, d'après l'INSEE, dans le Tableau 9. On peut remarquer que, pour tous les postes, après avoir enregistré une chute au début des années 1980, on observe une augmentation régulière depuis, surtout pour les légumes.

On note que la consommation d'agrumes et de kiwis est plus élevée que la moyenne dans les familles aisées et que les bananes sont davantage consommées dans les familles modestes.

Pour les légumes, ce sont les agriculteurs qui sont les plus forts consommateurs ; les régions méridionales ont une moyenne supérieure aux autres régions françaises.

3) Place dans le budget

Les fruits et légumes doivent être considérés comme un élément essentiel de la ration alimentaire. Mais comme la valeur de ces aliments n'a aucun rapport avec leur contenu énergétique ou protidique, leur « coût nutritionnel » ne peut pas être calculé d'après les critères communs. Affirmer que les calories apportées par les fruits ou par les salades sont beaucoup plus chères que les calories du pain ou des pommes de terre est un non-sens. Leur valeur est représentée par leur contenu vitaminique, leur équilibre minéral, donc leur densité nutritionnelle intéressante, leur rôle favorable sur le transit digestif et surtout leur palatabilité exceptionnelle, qui sont difficilement mesurables.

Tableau 9

Evolution de la consommation de fruits et légumes
en kg, par personne et par an, en France.

	1978	1981	1984	1987
FRUITS				
Avocats	0,4	0,5	0,9	1,3
Bananes	8	7	7	6,7
Agrumes	16,4	15,2	17	17,5
Autres fruits frais	46,5	43,6	47	48,5
Total fruits frais	71	66	72	74
Fruits surgelés	0,04	0,06	0,1	0,13
Fruits secs	1,2	1,1	1	1,2
Fruits au sirop	2	2,7	3,4	3,1
Confitures	2	2	2	2,3
Compotes	0,9	1,1	1,2	1,3
TOTAL	77	73	81	82
LÉGUMES				
Légumes frais	96,2	89	94	95
Légumes surgelés	2,3	2,5	3,1	4,5
Légumes appertisés	18	17,2	20	20
TOTAL	116,5	108	117	119,5

Dans le budget, à l'intérieur de la rubrique « Alimentation et boissons », le poste fruits et légumes n'a subi que de faibles fluctuations depuis 1970. Il est passé de 14 % environ de la consommation alimentaire des ménages à domicile en 1970 et 1975, à 12 % en 1980, pour remonter à 13,2 % en 1985, et il représente aujourd'hui 15 %, se situant en deuxième place, avec les « laits, fromages, œufs », derrière les « viandes ».

4) Place dans l'alimentation

En 1985, la contribution des aliments aux apports nutritionnels de 223 adultes usagers de la restauration collective a été étudiée (5) et permet de préciser, pour les fruits et légumes, qu'ils fournissent, sur la journée :

- 9,5 % de l'énergie, 8 % des protéines,
- 19,5 % du calcium, 32 % du magnésium et 19 % du fer.

Quant aux vitamines, leur apport en vitamine C est essentiel, et la part des apports en provitamine A considérable.

Caractères de l'appétit pour les fruits et légumes

1) Les fruits

Leur consistance pulpeuse, juteuse ainsi que leur palatabilité exceptionnelle font des fruits mûrs à l'état naturel un des aliments les plus convoités par l'homme. Les fruits sont, pour les mêmes raisons, les seuls aliments qui se mangent sans pain.

L'appétit pour les fruits frais consommés crus est d'un type tout à fait spécial. Il n'a aucun rapport avec la faim qui pousse l'homme vers la plupart des aliments courants. Ce qu'on recherche et qu'on apprécie dans les fruits, c'est leur fraîcheur, leur propriété rafraîchissante qui comporte un certain degré d'acidité et un goût légèrement sucré, un arôme d'un type particulier, un arôme fruité.

Dans le comportement alimentaire de l'homme, les fruits ont des utilisations différentes :

– un aliment que l'on déguste à n'importe quel moment de la journée ou qui, parfois, étanche la soif ;

– un aliment de dessert, agréable en fin de repas, dont l'usage traditionnel reste recommandable ;

– plus moderne en France, et plus favorable à la digestion pour beaucoup, est cette idée de commencer le repas avec des fruits que l'on peut d'ailleurs associer aux crudités sous forme de salade composée : les mélanges possibles sont question de goût et de créativité où les agrumes, comme les fruits de saison, offrent une large gamme de saveurs.

En matière de « goût », les fruits frais ont donc des relations de substitution avec toutes les friandises et les desserts sucrés et aussi avec les boissons rafraîchissantes. C'est cette orientation « vers le sucré » qui explique le fait qu'en certaines occasions, on ajoute du sucre à certains fruits pour accentuer leur qualité dominante, à tort peut-être puisqu'un fruit mûr est déjà sucré et qu'un jus de citron peut très différemment mais tout aussi bien rehausser le goût de ce fruit.

On dit que les fruits sont particulièrement appréciés des femmes et surtout des enfants pour cette tendance « sucrée », certainement mais la subtilité et la variété de leurs saveurs et de leurs textures sont sans doute d'autres raisons de les aimer. Quant aux personnes âgées, elles recherchent les fruits qui n'ont pas besoin d'être épluchés.

2) *Les légumes crus*

Les légumes frais que l'on peut consommer sans cuisson préalable sont souvent ceux à feuilles vertes qui, à un certain moment de leur développement, sont particulièrement tendres (salades, cresson, pissenlit, épinards,...) et des légumes-fruits (tomates, concombres), certains légumes-racines (radis, carottes, céleris-raves) ainsi que plusieurs variétés de choux. Mais ces crudités à tendance salée n'ont rien à voir avec les fruits et peuvent sembler souvent fades si on ne les relève pas d'assaisonnement.

Les légumes-racines sont en général râpés puis préparés « en salade » comme la plupart des crudités. La sauce froide est composée de sel, d'huile ou de crème, d'un liquide acide (jus de citron ou vinaigre) et aussi, à volonté, de fines herbes et, en substitution de l'huile, de yaourt ou de fromage blanc.

Rappelons ici que les légumes ne contiennent pratiquement pas de matières grasses et que la légèreté de l'assaisonnement est la garantie de cette qualité.

Enfin, certaines feuilles aux propriétés aromatiques particulièrement puissantes, comme le persil, le cerfeuil, l'estragon, la coriandre, etc., les fines herbes à l'état frais (comme d'ailleurs séchées) sont utilisées comme condiments particulièrement agréables.

On trouve dans ce terme « assaisonnement » qui a longtemps voulu dire « relever le goût d'un mets moins sapide par l'adjonction d'une substance végétale savoureuse ou odorante » le terme de « saison ». Aussi faut-il se tourner vers cette variété saisonnière des végétaux que les autres aliments (viandes, poissons, œufs, produits laitiers...), présents tout au long de l'année et, de ce fait, plus monotones, accompagneront.

3) *Les légumes cuits*

Les espèces végétales utilisées par l'homme sont infiniment plus nombreuses que les espèces animales comestibles ; de plus, chaque espèce végétale possède des qualités sensorielles nettement différenciées, et chaque organe de la même plante a des qualités physiques, chimiques et sensorielles qui lui sont propres. Ajoutons enfin que ces qualités varient considérablement avec le stade de développement, avec l'âge de la plante.

Ainsi, à chaque époque de l'année, le monde végétal apporte dans l'alimentation humaine des éléments sensoriels nouveaux.

Les légumes frais avec leurs caractères tellement différents apportent cet élément de variété, d'une saison à l'autre, d'un jour à l'autre et dans le cours du repas, d'un plat à l'autre. Nos légumes comprennent, comme

on le sait, des organes très différents au point de vue de la morphologie botanique : des grains, des baies, des feuilles, des tiges, des bourgeons, des racines, des tubercules et même des fruits comme les tomates, les aubergines, les concombres, les courgettes, etc., les fruits en termes botaniques n'étant pas toujours des fruits dans le langage alimentaire.

Les légumes cuits sont un élément indispensable dans la composition des repas. Leur action rafraîchissante due surtout à l'acidité particulièrement agréable des végétaux frais diminue un peu dans les plats de légumes cuits. Mais la diversité de leurs goûts et de leurs arômes nuancent la cuisine de saveurs multiples et délicates.

Conseils pratiques pour la consommation des légumes et des fruits

1) A l'état cru

• Substitutions

La variété est à conseiller. Au fil de l'année, les légumes et les fruits sont interchangeables.

L'équivalence sur laquelle il faudrait se baser dans ces substitutions serait plutôt l'apport en vitamine C. Certains mois, les sources de vitamine C les moins coûteuses peuvent être les tomates, ou les salades ou les oranges, etc.

De toute manière, il reste bon, pour le prix comme pour la qualité nutritionnelle, d'acheter en pleine saison des fruits et des légumes mûrs.

• Quantités journalières conseillées

Les vitamines hydrosolubles apportées par les crudités ne se stockent pas dans l'organisme. Il est donc recommandé de pouvoir les trouver dans ces aliments chaque jour et, de préférence, à chaque repas.

Une certaine latitude doit être laissée aux consommateurs quant aux quantités de crudités à consommer, rarement déficitaires en été : par contre, en hiver et au printemps mieux vaut veiller à un apport minimum. On conseille ainsi, comme apport moyen quotidien pour un adulte (quantité telle qu'achetée avec déchets moyens) :

– Légumes crus (une portion) ..... 75 à 100 g
– Fruits crus (1 ou 2 unités) ..... 150 à 200 g

Ces quantités devront être augmentées dans les cas suivants :

– adolescents (calcium) ;
– femmes enceintes ou allaitantes (fibres, calcium, vitamine C) ;
– ouvriers travaillant en atmosphère surchauffée (eau, minéraux) ;
– maladies infectieuses (vitamines, minéraux).

On donnera plus de fruits et moins de légumes crus aux enfants jeunes et aux personnes âgées mastiquant difficilement.

Les jus de fruits sont particulièrement utiles dans l'alimentation de l'enfant et du malade.

• **Conditions de bonne conservation et utilisation des vitamines dans les crudités**

On attachera de l'importance à quelques détails pratiques :

– choisir des légumes et des fruits bien colorés. Ne pas rejeter les feuilles vertes des salades ;
– consommer le plus tôt possible après la récolte ou du moins après l'achat ;
– employer des ustensiles en matériaux inoxydables ;
– laver rapidement légumes et fruits entiers sans les laisser séjourner dans l'eau ;
– râper juste avant d'assaisonner, servir ensuite le plus vite possible ;
– assaisonner d'huile et d'un liquide acide (vinaigre ou citron).

• **Formes d'utilisation**

Légumes crus

– salades vertes diverses.
– hors-d'œuvre : légumes crus râpés (carottes, céleris-raves, choux, etc.), chou-fleur, champignons de couche, tomates, concombres, etc.
– nature : radis, fenouil, carottes, courgettes, concombre (rondelles, bâtonnets, cubes,...).
– avec fromage blanc, yaourt, herbes fraîches (cerfeuil, ciboulette, estragon, coriandre, etc.).

Fruits

– petit déjeuner,
– goûter, autres petits repas,
– boissons, apéritifs : fruits pressés, fruits mixés avec lait (milkshakes) ou avec eau, citron, sucre (mixfrais).

• **Présentation**

La consommation de légumes crus râpés qui donne un bon appoint justement en hiver quand les fruits sont rares, est entrée dans les habitudes. Cette consommation peut se développer en soignant l'assaisonnement et la présentation. On doit attirer sur ce point l'attention des économes chargés des collectivités d'enfants. Les couleurs variées des crudités permettent une agréable présentation qui contribue à exciter l'appétit.

On peut utiliser :

Tableau 10

	Légumes	Fruits
Vert	persil, estragon, salades, cresson, poivrons, cornichons, olives, épinards, chou vert.	groseilles à maquereau, raisins.
Jaune	cœurs de salades, poivrons jaunes.	citron en côtes ou rondelles découpées, pêches, abricots, oranges, melon, etc.
Rouge	tomates, radis, carottes, choux rouges, poivrons	cerises, fraises, framboises, etc.
Blanc	radis, céleris-raves, champignons, choux-fleurs, oignons.	pommes, poires, bananes, etc.
Noir	olives.	raisins, cassis, figues.

2) *A l'état cuit*

Les légumes frais sont un élément essentiel de l'alimentation par leur valeur minérale et vitaminique et par leur apport en fibres alimentaires. Plus l'alimentation est copieuse, plus elle est riche en viande et en farineux, plus elle doit contenir de légumes frais pour assurer un bon fonctionnement de l'intestin et un équilibre calcique.

Les légumes ont aussi l'avantage d'apporter une sensation de satiété sans alourdir l'apport énergétique.

• **Substitution**

Les légumes sont interchangeables suivant la saison. En hiver, on aura parfois intérêt à utiliser les conserves de légumes ou les légumes surgelés qui ont sensiblement la même valeur nutritionnelle.

• **Quantités moyennes conseillées**

Les portions varient selon la nature du plat (potage, entrée ou plat complet), selon les consommateurs et selon la nature même du légume. En effet les poids à l'achat varient considérablement d'un légume à l'autre, selon les déchets. La portion donnée ici est un poids moyen, à augmenter pour les légumes qui ont beaucoup d'épluchures (petits pois, artichauts, etc.) et pour ceux qui réduisent beaucoup de volume à la cuisson (épinards, salade cuite, etc.). Pour une entrée ou hors-d'œuvre, on compte environ la moitié de la quantité prévue pour un plat.

Tableau 11

Portions moyennes en g.

	Légumes frais	
	pour un potage	pour un plat
Enfants	100	200
Adolescents	100	300
Adultes	100	250
Hommes très actifs	100	300
Personnes âgées	100	250

• **Formes d'utilisation**

Les légumes frais sont parfois mal acceptés par certains consommateurs. On peut conseiller du point de vue gustatif :

• la cuisson à la vapeur qui conserve mieux l'arôme, les vitamines et les minéraux ;

• la cuisson braisée ;

• les accompagnements de viandes et de poissons qui s'harmonisent bien avec eux sont, par exemple :

– veau avec petits pois, carottes, épinards, olives, jardinière, etc.

– côtelette de mouton avec laitues braisées, tomates farcies, haricots verts, etc.

– canard avec olives, navets, oignons, petits pois, etc.

– porc avec choux, choux de Bruxelles, choucroute, etc.

– poissons avec tomates, fenouils, haricots verts, etc...

Tout, dans ce domaine, restera recherche d'alliance de textures et de saveurs. Une viande telle que le porc ou le jambon fumé peut supporter un légume fort, un peu rustique comme le chou ; mais un chou traité plus en finesse, avec une touche acidulée de vinaigre, peut être marié avec un poisson. Un fenouil peut parfumer la chair un peu fade d'une volaille,...

3) *Crus et cuits*

L'importance d'une consommation suffisante de fruits et de légumes a été démontrée ces dernières années par des travaux expérimentaux et épidémiologiques. Les spécialistes de Santé Publique en ont tenu compte et on trouve ces produits en très bonne place dans les recommandations faites :

- **A l'échelon national**

Les dix recommandations de l'Avis du Conseil National de l'Alimentation sur la prévention nutritionnelle des maladies cardio-vasculaires (23 février 1989) comportent quatre règles d'hygiène générale et six conseils alimentaires qui sont les suivants :

– Mangez des aliments très variés ;
– Maintenez un poids idéal ;
– Réduisez les graisses ;
– Mangez suffisamment de glucides et de fruits ;
– Faites attention au sel (sodium) ;
– Si vous buvez des boissons alcoolisées... faites-le avec modération ; si vous n'en buvez pas... continuez.

- **A l'échelon européen**

Dans le Code européen contre le Cancer (Commission des Communautés Européennes, mars 1988, 5-6/88), fait aussi de dix articles, les conseils alimentaires sont :

– Modérez votre consommation de boissons alcoolisées, bières, vins ou alcools ;
– Consommez fréquemment des fruits et des légumes frais et des aliments riches en fibres ;
– Evitez l'excès de poids et limitez la consommation d'aliments riches en matières grasses.

QUELQUES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 – CTIFL, *Mémento des fruits et légumes,* 288 p., Paris, 1990.

2 – Delaveau P., « Polyphénols et tanins dans l'alimentation », *Gazette médicale,* 1988, 95, 8, 67-68.

3 – Fiala E.S., Reddy B.S., Weisburger J.H., « Naturally occuring anticarcinogenic substances in foodstuffs », *Ann. Rev. Nutr.* 1985, 5, 295-321.

4 – Girault A., Bled F., Bouvier J.M., Cornet D., Girault M., « Effets bénéfiques de la consommation de pommes sur le métabolisme lipidique de l'homme », Entretiens de Bichat, Thérapeutique, *Cardiologie,* 28 septembre 1988, 76-79, Expansion Scientifique Française, Paris, 1988.

5 – Lambert J.L., Rouaud C., Chateau L., Dupin H., Berthier A.M., *Essais d'évaluation des apports nutritionnels en France,* Tome 2, p.162-177, Publications de l'INRA, Nantes, 1987.

17

LES RESSOURCES ALIMENTAIRES POTENTIELLES

Jean-Louis CUQ

INTRODUCTION

Il existe actuellement sur notre planète plus d'un milliard d'êtres humains qui souffrent de *malnutrition* ; cette situation ira vraisemblablement en s'aggravant dans les prochaines décennies. Dans certains pays, la famine décime des dizaines, voire des centaines de milliers d'enfants, femmes et hommes. Dans leurs évaluations prévisionnelles, les experts de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture : FAO (Food Agricultural Organization) estiment qu'il existera en l'an 2000 un déficit d'environ 0,5 milliard de tonnes de céréales entre la production et le besoin. Ce déficit résultera d'abord de l'augmentation de la population, mais aussi des conditions mêmes de culture (sécheresse) ou encore de l'utilisation de plus en plus importante des céréales pour l'alimentation animale dans les pays riches. L'augmentation du niveau de vie dans les pays industrialisés est suivie d'un accroissement de la consommation de protéines d'origine animale, et plus particulièrement de viande bovine. Or le rendement de transformation des protéines d'origine végétale, consommées par les animaux, en protéines de viande est faible ; ainsi à partir de 100 g de protéines de soja, la poule fabrique 20 g de protéines d'œuf, le porc et le bœuf respectivement 12 g et 5 g de protéines de viande. Ceci se traduit alors, bien que la production soit en augmentation, par un accroissement supplémentaire du déficit en protéines.

Une certaine amélioration de cette situation alimentaire est « politiquement » possible : diminution de la croissance démographique, harmonisation des revenus du commerce international, meilleure répartition individuelle des revenus dans les pays en voie de développement, accroissement cohérent de cultures vivrières. Par ailleurs, une réduction de la production animale pourrait avoir comme conséquence une plus grande disponibilité de nutriments d'origine végétale (glucides et protéines surtout).

Dans la plupart des pays industrialisés, une surconsommation de produits d'origine animale est observée. Dans ces conditions, une certaine « végétalisation » de nos régimes présenterait des avantages non seulement d'ordre économique (économies de calories, de protéines) mais aussi d'ordre nutritionnel (apports moins élevés en acides gras saturés). Il ne faut cependant pas oublier que la consommation d'aliments d'origine animale apporte des protéines d'excellente qualité nutritionnelle et procure un plaisir considérable. De plus, la production des animaux présente quelques avantages : par exemple, l'élevage est à l'origine de la production et du stockage de quantités relativement importantes de graines de céréales et de légumineuses ; il permet aussi l'utilisation de fourrages qui ne peuvent pas être utilisés à d'autres fins dans la production alimentaire (sous-produits animaux ou végétaux comme les pailles traitées à l'ammoniac, protéines de micro-organismes, urée, etc.). Enfin, la production animale peut ne pas être trop dépendante des conditions climatiques (température, pluviosité) ou de la fertilité locale des sols. A l'échelle mondiale, la production des protéines d'origine animale (viande, lait, œufs) a augmenté au cours de ces dernières décennies.

Des progrès significatifs ont été réalisés dans la pratique de l'élevage (sélection de races, insémination artificielle, meilleurs contrôles sanitaires, alimentation améliorée) et aussi au niveau de l'abattage et des diverses opérations qui conduisent à l'obtention d'aliments (automatisation des moyens de fabrication, contrôle rigoureux de l'entreposage et de la distribution, etc.). Par ailleurs, certains « sous-produits » animaux sont actuellement largement valorisés (lactosérum de laiterie, sang, cornes ou plumes des abattoirs, etc.) et les technologies récentes mises à la disposition de l'industrie alimentaire contribuent à une meilleure utilisation des matières premières. Ainsi, le désossage mécanique des volailles ou des bovins et même des poissons permet de récupérer des quantités importantes de viande (ou de chair) qui peuvent être alors consommées après restructuration par des méthodes physico-chimiques diverses.

La pêche et l'aquaculture représentent d'autres sources importantes de protéines d'origine animale. Les techniques de pêche ont bénéficié de progrès technologiques considérables, qui vont de la détection électronique des poissons à leur entreposage et même leur traitement dans des bateaux-usines. Cependant certaines espèces sont surexploitées et la prise totale à l'échelle mondiale n'augmente que légèrement.

Quant à l'aquaculture, elle est de plus en plus pratiquée, en particulier dans certains pays en voie de développement, et fournit plus de 10 millions de tonnes de produits (surtout poissons d'eau douce et coquillages). Certaines espèces (carpes, tilapia) peuvent être élevées dans des plans d'eau variés (rizière par exemple) avec comme source principale d'aliment des déchets ou détritus divers ; les rendements sont alors relativement faibles. L'élevage en mode intensif (alimentation supplémentée ou artificielle) dans des bassins permet d'atteindre des rendements élevés souvent supérieurs à la dizaine de tonnes par hectare et par an.

La récolte et la culture des algues offrent également de réelles possibilités d'avenir.

Traditionnellement consommées en grandes quantités en Extrême-Orient, notamment au Japon, elles sont également présentes en Europe : pour la France, citons les salades d'algues préparées en Bretagne ou les pickles de laminaires dans le Pas-de-Calais. 80 % des algues françaises proviennent du Finistère Nord, plaçant la Bretagne au premier rang européen des régions productrices d'algues. Mais les capacités de ramassage stagnent et il faut recourir à l'aquaculture, qui pourrait permettre d'atteindre des productions suffisantes pour l'exportation. Cette technique est pratiquée dans le monde depuis une trentaine d'années, surtout au Japon, en Corée, en Chine et au Canada.

Les algues sont un des trois embranchements des Thallophytes, les deux autres étant les champignons et les lichens. *Il y a quatre grandes familles d'algues :*

– les algues vertes ou Chlorophycées, qui poussent en surface. Parmi elles, la laitue de mer, dont on peut signaler la richesse en provitamine A ;

– les algues brunes ou Phéophycées, les plus riches en minéraux : varech, goëmon, iziki, wakamé, kombu (laminaires), fucus, etc. ;

– les algues rouges ou Rhodophycées, poussant en profondeur, comme les *Porphyra tenera,* riches en protéines ;

– les algues bleues ou Cyanophycées, très riches en protéines, en particulier les spirulines.

On dénombre au total 25 000 espèces, qui produisent aujourd'hui le tiers de l'oxygène de la planète.

On les utilise aussi à d'autres fins :

- non alimentaires dans des cosmétiques et des médicaments ;
- alimentaires :

– matières premières industrielles pour des additifs ou auxiliaires technologiques, comme épaississants et stabilisateurs : l'agar-agar, les alginates, les carraghénates...

– compléments alimentaires (en poudre ou en comprimés) ;

– aliments à part entière. La teneur en eau à l'état frais est de 80 à 90 %, à l'état sec de 10 à 15 %.

Les algues sont surtout riches en *glucides,* dont une grande part de cellulose, favorable au transit intestinal, et en *protéines,* surtout les algues rouges et bleues : 32 % de la matière sèche pour les *Porphyra tenera,* et jusqu'à 66 % pour les spirulines. Il ne faut cependant pas envisager une consommation d'algues très importante, car elles apportent aussi des acides nucléiques dont une consommation excessive peut faire augmenter l'uricémie.

C'est surtout en raison de leur teneur en *minéraux,* y compris des *oligo-éléments,* et en *vitamines,* que l'introduction d'algues dans l'alimentation est intéressante, d'autant plus que leur apport énergétique est faible (145 kJ, soit 35 kcal pour 100 grammes en moyenne d'algues réhydratées).

100 g d'algues réhydratées contiennent – en moyenne – 220 mg de calcium, 5 mg de fer. Elles apportent aussi de l'iode et, bien sûr, des quantités appréciables de magnésium, de cuivre, zinc, manganèse, nickel.

De nombreuses vitamines sont présentes dans les algues, notamment la A, la E et les B. Elles contiennent en particulier des quantités élevées de vitamine B12, en moyenne 5 microgrammes pour 100 grammes d'algues réhydratées, pouvant être utiles chez les végétariens.

En pratique, elles se consomment crues, après trempage, dans des salades par exemple, ou cuites dans des soupes, des omelettes, ou autour de poissons ; on doit noter également qu'elles activent la cuisson des légumineuses. On les rencontre enfin sous forme de pickles ou dans des pains.

En Occident, les algues sont consommées plutôt comme condiments, et par un petit nombre de personnes. Leur utilisation comme aliment (ce qui est fait au Japon ou en Chine) pourrait être intéressante sur le plan nutritionnel, mais demanderait des précisions concernant les méthodes de conservation, les limites des apports en iode et le contrôle des teneurs essentielles en certains minéraux lourds.

Il n'en reste pas moins vrai que la production alimentaire mondiale doit augmenter. Plusieurs solutions permettent ou permettraient de

satisfaire à cette demande. Ainsi, parmi les solutions de nature à résoudre au moins en partie ce problème, on peut signaler les progrès réalisés dans la production et les technologies de transformation des céréales ou des graines d'oléagineux et de légumineuses. Les céréales constituent la principale source d'énergie et de protéines pour les hommes et les animaux, et leur production n'a cessé de progresser ; de nombreuses variétés ont été sélectionnées pour certains de leurs caractères (bon rendement en culture peu irriguée et sans addition d'engrais, teneurs en protéines et en lysine améliorées, etc.). Il en est de même pour les graines des protéagineux (soja, tournesol, arachide, colza) ou de légumineuses (pois, féverole, lupin) dont la production ne cesse de croître. Il faut tout de même signaler que les variétés sélectionnées pour leur productivité sont souvent plus fragiles, ce qui peut entraîner des désastres quand une maladie des végétaux se déclare en zone de monoculture en variété unique.

En outre, il n'est pas sans inconvénient que la sélection des graines soit entièrement contrôlée par quelques multinationales.

Par ailleurs, des progrès constants ont été réalisés aussi bien au niveau de la culture (extension des terres cultivées, amélioration des sols, irrigation, apports d'engrais optimisés et traitements antiparasitaires sélectifs et efficaces, mécanisation des récoltes) qu'au niveau du contrôle des conditions d'entreposage ou des premières transformations, ou encore de la gestion informatisée des stocks.

SOURCES DE GLUCIDES

Le besoin mondial en glucides, et donc en énergie disponible pour l'homme, ne sera pas satisfait en l'an 2000, essentiellement en raison du déficit prévisible en céréales. Tous les travaux permettant de proposer des solutions à ce problème sont donc largement justifiés, qu'il s'agisse de l'amélioration génétique de variétés de céréales ou d'autres cultures peu exigeantes et à rendement élevé, ou encore de l'amélioration de cultures comme par exemple celle du manioc, ou de l'igname.

La consommation de saccharose, qui augmente généralement avec le niveau de vie, est de plus en plus concurrencée par celle de sirops de glucose qui sont produits à des prix relativement bas, par hydrolyse enzymatique de l'amidon. (Voir les chapitres « Les édulcorants » ; « Le sucre, les produits sucrés et le chocolat »).

SOURCES DE LIPIDES

Il est à peu près certain que la disponibilité mondiale en lipides sera satisfaisante dans les prochaines décennies, surtout en raison de l'extraordinaire extension de la culture du palmier à huile, mais aussi de celle d'oléagineux comme le soja et, à un degré moindre, le tournesol, le coton, le colza ou l'arachide. Par ailleurs, les progrès réalisés dans la sélection génétique de ces oléagineux permettent d'obtenir des huiles d'excellente valeur nutritionnelle à teneur élevée en acide linoléique et à teneur très faible en acide érucique (colza). Enfin, l'évolution remarquable de la technologie des corps gras (extraction, raffinage, fractionnement, hydrogénation, interestérification) apporte une très grande souplesse dans leur utilisation.

SOURCES DE PROTÉINES

De nombreux travaux, commencés il y a déjà quelques dizaines d'années pour certains, sont actuellement réalisés pour valoriser les protéines présentes dans des « contenants » aussi variés que graines, feuilles, micro-organismes (bactéries, levures, moisissures) ou sous-produits comme déchets d'abattoir (sang) ou de fromagerie (lactosérum). Les aliments protéiques ainsi obtenus sont généralement destinés à l'alimentation animale, parfois à l'alimentation humaine.

Dans la plupart de ces sources potentielles de protéines, il est souvent indispensable de purifier ou d'extraire les constituants protéiques du « reste », en particulier quand le matériel brut contient des composés toxiques ou antinutritionnels (teneurs trop élevées en fibres) ou encore quand il n'est pas directement consommable même après cuisson. La terminologie adaptée au niveau de la purification (voir le chapitre « Les graines de légumineuses ») est la suivante :

– *le tourteau* (oléagineux) correspond au produit de broyage brut ou après élimination d'enveloppes ou extraction de lipides,

– *la farine* résulte du broyage en fines particules de la graine (céréales, féverole, pois, lupin, etc.) ou du tourteau ; il s'agit d'un produit dont la teneur en eau est généralement inférieure à 10 % et la teneur en protéines très variable,

– *le concentré* (ou concentrat) correspond à un produit enrichi en protéines généralement par élimination d'autres composants (lipides le plus souvent) ; sa teneur en protéines est voisine de 70 %,

– *l'isolat* résulte d'une purification poussée des protéines ; sa teneur en protéines est alors voisine ou supérieure à 90 %.

Les tourteaux d'oléagineux sont de plus en plus utilisés en alimentation animale, où ils constituent un excellent complément protéique au régime. Par contre les concentrés, et surtout les isolats, sont utilisés dans la fabrication d'aliments existants ou totalement nouveaux (produits filés analogues de viandes par exemple). Dans ce cas, leurs propriétés fonctionnelles sont telles que certaines qualités du produit, auquel ces protéines sont ajoutées, sont améliorées (texture, rétention d'eau, rétention d'huile, etc.).

Tous ces produits sont nommés Matières Protéiques Végétales (MPV) avec indication de leur teneur protéique en pourcentage.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous préoccuperons surtout des « futures » sources potentielles de protéines et de diverses technologies à développer pour les valoriser ; il s'agit essentiellement des parties végétatives vertes des végétaux (feuilles et tiges) et des cellules de microorganismes.

Protéines de feuilles

Les tiges et surtout les feuilles des végétaux contiennent 2 à 4 % de protéines et leur teneur en eau est généralement supérieure à 80 %. La biomasse végétale étant, de loin, la plus importante à la surface de notre planète, il n'est pas étonnant que ce soit une protéine foliaire qui soit la protéine la plus abondante : il s'agit de la ribulose, 1-5-biphosphate carboxylase (RuP_2) qui intervient dans la photosynthèse. Représentant environ 1 à 2 % des protéines foliaires, sa masse estimée à la surface de notre planète est de cent millions de tonnes.

La valorisation des protéines de feuilles n'est actuellement réalisée qu'à partir des feuilles et tiges de plantes cultivées comme les céréales, les légumineuses (soja, pois, luzerne, trèfle) ou encore la canne à sucre par exemple. La valorisation des protéines de feuilles de tabac, un moment envisagée, n'aura d'avenir qu'avec une diminution sensible des coûts de production. En effet, un des atouts de ces sources potentielles de protéines doit être leur faible coût d'exploitation associé, dans la mesure du possible, à des rendements élevés. Dans le cas de la luzerne, ce rendement atteint 3 tonnes de protéines par hectare et par an, rendement qui est respectivement environ 3 fois, 5 fois et 20 fois supérieur à celui de la production de protéines de légumineuses, céréales et viandes. La production d'« herbes » qui repoussent rapidement après avoir été fauchées, pourrait représenter une source quasi inépuisable de protéines.

Ces herbes sont depuis toujours utilisées pour l'alimentation des ruminants, soit en leur état frais (fourrages), soit sous forme d'ensilages. Ces ensilages correspondent à des fourrages conservés par séchage et fermentation lactique.

Malheureusement, la présence de très grandes quantités de fibres (celluloses, hémicelluloses, lignines) ou de produits toxiques (alcaloïdes, glycosides, œstrogènes, tanins, polyphénols, etc.) rendent ces herbes inutilisables par les animaux monogastriques et par l'homme. Pour remédier à cela, il faut donc effectuer une purification plus ou moins poussée des protéines en procédant, par exemple, comme suit : les feuilles fraîches sont broyées puis pressées. Bien que les rendements soient très variables d'une espèce à une autre, il apparaît qu'en moyenne le jus « vert » obtenu contient environ 90 % d'eau et 2 % de protéines (soit environ la moitié des protéines initialement contenues dans la feuille). Le résidu de pressage fibreux constitue un bon fourrage pour ruminants.

Les protéines contenues dans le jus sont très diverses ; ceci résulte du fait qu'elles correspondent surtout à des protéines à activité biologique (enzymes en particulier), car la feuille est une véritable « usine » métabolique où se déroulent des réactions biochimiques très variées (photosynthèse, respiration, etc.). Il devient donc difficile au technologue d'optimiser l'extraction, car les paramètres à adopter pour tel type de protéine ne correspondent pas à tel autre, et comme il existe plus d'une centaine de protéines « majeures » différentes, le rendement d'extraction n'est que rarement élevé. Schématiquement, le jus vert contient deux grandes catégories de protéines : celles d'origine chloroplastique et celles d'origine cytoplasmique. Ce jus peut être directement séché, mais le produit obtenu contient beaucoup de sels minéraux, et parfois des composés antinutritionnels ou toxiques. C'est pour cela qu'il est nécessaire de procéder à une purification des protéines. Pour ce faire, la plupart de ces dernières sont précipitées par la chaleur, puis récupérées par filtration ou mieux par centrifugation, les facteurs toxiques de faible masse molaire restant pour la plupart d'entre eux en solution.

Dans le cas de la luzerne, le jus est d'abord traité à 65°C ; dans ces conditions, ce sont surtout les lipoprotéines chloroplastiques vertes qui précipitent. Après leur récupération par centrifugation (ou filtration), le jus résiduel est alors chauffé à 85-90°C, ce qui conduit à la précipitation des protéines cytoplasmiques « blanches », protéines qui sont à leur tour récupérées par centrifugation. Après séchage, ces produits à teneur élevée en protéines (isolat) sont potentiellement utilisables en alimentation. D'une qualité nutritionnelle satisfaisante (malgré un léger déficit en méthionine), leur incorporation à certains aliments est le plus souvent limitée par leur couleur et leur saveur d'herbe.

En France, la production annuelle de luzerne dépasse 800 000 tonnes. La plus grande partie de cette luzerne est utilisée en alimentation animale, après séchage ou ensilage. Cependant, il existe plusieurs fabricants de produits enrichis en protéines ; ces fabricants produisent déjà plus de 7 000 tonnes de concentré. Le schéma de production d'un de ces produits est indiqué sur la figure 1. Il apparaît ainsi qu'il faut une tonne de luzerne pour produire environ 20 kg d'un concentré aux caractéristiques suivantes : teneurs en eau (5 à 10 %), en protéines (50 %), en lipides (8 %), en minéraux (14 %), en cellulose (3 %) et en xanthophylles (0,1 %).

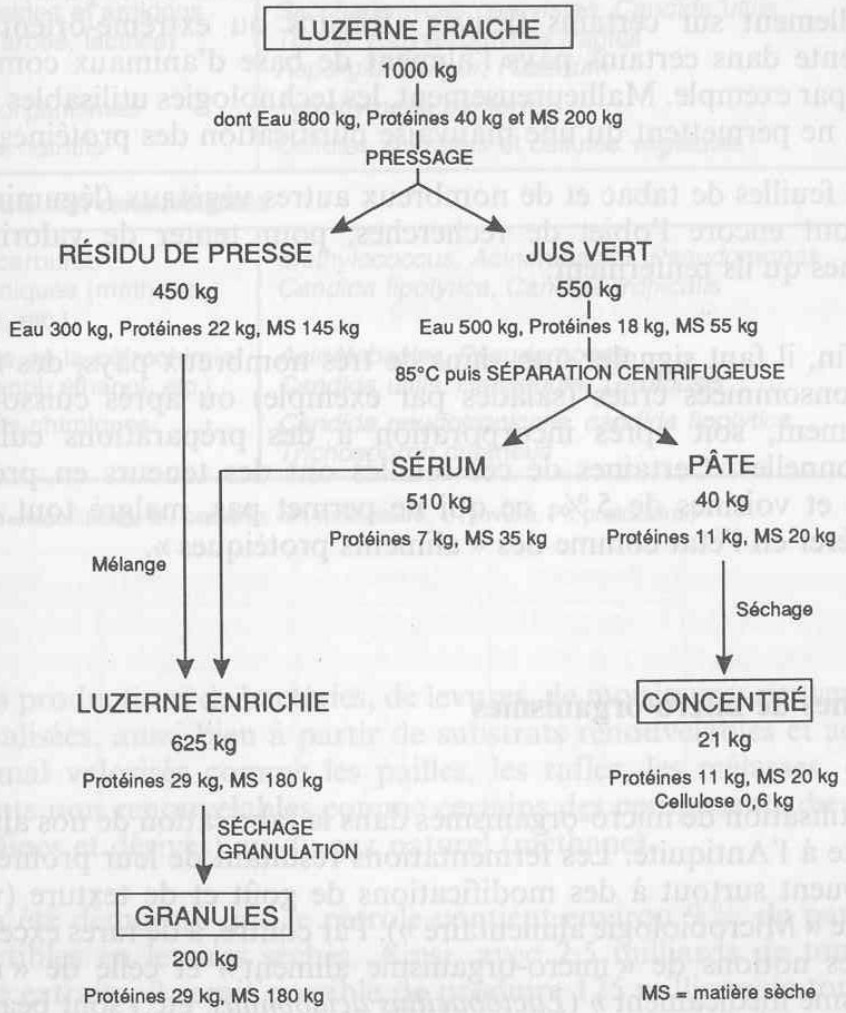


Figure 1

Fabrication de concentré protéique et de granules de luzerne.

Des essais toxicologiques et nutritionnels, réalisés sur des animaux monogastriques, ont montré que ces concentrés présentaient une bonne qualité. La teneur en méthionine des protéines qu'ils renferment est limitante, mais reste supérieure à celle des protéines du soja. Quelques essais réalisés sur l'homme permettent d'envisager leur emploi dans certains types d'aliments. Ce type de concentré est actuellement utilisé en alimentation animale, et plus particulièrement pour l'élevage des volailles et la production d'œufs. La présence de pigments comme les carotènes et xanthophylles dans ces concentrés confère une couleur jaune, souvent recherchée, à la chair et aux œufs.

Des essais récents de valorisation de la jacinthe d'eau ont permis d'évaluer à environ 70 tonnes par hectare et par an le rendement de production de protéines dans des bassins sous serre. Cette plante pousse naturellement sur certains fleuves africains ou extrême-orientaux et représente dans certains pays l'aliment de base d'animaux comme les porcs, par exemple. Malheureusement, les technologies utilisables actuellement ne permettent qu'une mauvaise purification des protéines.

Les feuilles de tabac et de nombreux autres végétaux (légumineuses, etc.) font encore l'objet de recherches, pour tenter de valoriser les protéines qu'ils renferment.

Enfin, il faut signaler que, dans de très nombreux pays, des feuilles sont consommées crues (salades par exemple) ou après cuisson, soit directement, soit après incorporation à des préparations culinaires traditionnelles. Certaines de ces feuilles ont des teneurs en protéines élevées et voisines de 5 %, ce qui ne permet pas, malgré tout, de les considérer en l'état comme des « aliments protéiques ».

Protéines de micro-organismes

L'utilisation de micro-organismes dans la fabrication de nos aliments remonte à l'Antiquité. Les fermentations résultant de leur prolifération contribuent surtout à des modifications de goût et de texture (voir le chapitre « Microbiologie alimentaire »). Par contre, à de rares exceptions près, les notions de « micro-organisme aliment » et celle de « micro-organisme médicament » (*Lactobacillus acidophilus,* etc.) sont beaucoup plus récentes. La production industrielle de corps microbiens, qualifiés de biomasse, utilisables surtout comme source de protéines (on utilise alors souvent la terminologie anglosaxonne de *single-cell protein*) a pris

son essor dans les années 1960. Des milieux de culture et des espèces microbiennes très variés ont été testés. Voir Tableau 1.

Tableau 1

Substrats potentiels pour la production de biomasse microbienne.

Substrats renouvelables	Micro-organismes	Type
CO_2 - lumière	*Spirulina maxima, Chlorella, Scenedesmus*	A
	Rhodopseudomonas	B
Cellulose (paille, rafles, etc.)	*Cellulomonas, Brevibacterium*	B
	Trichoderma viride	M
Diholosides et amidons (saccharose, lactose)	*Saccharomyces cerevisiae, Candida utilis*	L
	Torula, Kluyveromyces fragilis	L
	Aspergillus niger, Fusarium	M
Micro-organismes	*Tetrahymena pyriformis*	P
Milieux nutritifs	Cellules animales et cellules végétales	
Substrats non renouvelables		
Hydrocarbures paraffiniques (méthane, alcane, etc.)	*Methylococcus, Acinetobacter, Pseudomonas*	B
	Candida lipolytica, Candida tropicalis	L
Dérivés de la pétrochimie (méthanol, éthanol, etc.)	*Acinetobacter, Pseudomonas*	B
	Candida utilis, Hansenula, Torulopsis	L
Déchets chimiques	*Candida peudotropicalis, candida lipolytica*	L
	Trichosporon cutaneus	M

(A : algue unicellulaire, B : bactérie, M : moisissure, L : levure, P : protozaire.)

Des productions de bactéries, de levures, de moisissures peuvent ainsi être réalisées, aussi bien à partir de substrats renouvelables et actuellement mal valorisés comme les pailles, les rafles, les mélasses, que de substrats non renouvelables comme certains des composants du pétrole (paraffines et dérivés) ou du gaz naturel (méthane).

Il a été démontré que le pétrole contient environ 9 % de paraffines convertibles en levures sèches. Ainsi, avec 2,5 milliards de tonnes de pétrole extraits, il serait possible de produire 175 millions de tonnes de levures, soit plus de 110 millions de tonnes de protéines de levure, ce qui correspondrait à une production supérieure aux besoins de l'ensemble des humains. Dans le même ordre d'idées, il a été calculé que la

production de biomasse microbienne à partir d'environ 5 % du gaz naturel produit par la Communauté Economique Européenne, permettrait de combler son déficit protéique.

La technologie de production industrielle de micro-organismes comme source de protéines est, pour la plupart des substrats, parfaitement au point : des usines capables de produire plusieurs dizaines de milliers de tonnes de biomasse par an ont été construites. Cette technologie représente incontestablement un procédé d'avenir pour l'alimentation animale et, à plus long terme, pour l'alimentation humaine. En effet, elle est indépendante du climat et ses rendements de production sont si élevés qu'elle n'exige qu'une faible surface au sol. Si actuellement la production industrielle de protéines de micro-organismes n'a pas atteint un niveau élevé, c'est essentiellement en raison de leur prix de vente, qui est égal ou même supérieur à celui des protéines de tourteau de soja.

Les rendements de production de biomasse varient d'une centaine de kilogrammes à près d'une tonne, par tonne de substrat ; ils dépendent principalement de la nature du substrat et du micro-organisme. La productivité, dont l'optimisation est un des buts du génie microbiologique, atteint dans certaines conditions 3 à 4 g de micro-organisme sec, par heure et par litre de milieu de culture. La composition moyenne de micro-organismes séchés est indiquée dans le tableau 2. Il apparaît ainsi nettement que ces produits possèdent une teneur élevée en protéines, teneur qui atteint dans certains cas 80 %.

Tableau 2

Composition moyenne de micro-organismes séchés
(en pourcentages)

	Bactéries	Levures	Moisissures	Algues
Protéines	55-80	45-65	25-55	25-70
Acides nucléiques	2-30	5-15	4-10	3-15
Lipides	2-10	2-10	2-30	1-30
Minéraux	4-12	3-8	2-4	5-10
Glucides	2-30	1-37	1-35	5-35
Eau	5-10	5-10	5-10	5-10

Actuellement, les principaux micro-organismes produits comme source de protéines sont les levures *(Saccharomyces, Candida, Kluyveromyces)*. Le plus souvent, le milieu de culture utilisé contient des glucides fermentescibles et correspond à un sous-produit industriel (mélasse, lactosérum, etc.). Il existe également sur le marché des préparations protéiques obtenues à partir de bactéries *(Methylomonas, Pseudomonas)*

ou d'algues *(Spirulina)*. Ces produits (Toprina®, Pruteen®, etc.) sont utilisés avec efficacité en alimentation animale et peuvent être considérés soit comme des compléments protéiques en alimentation humaine, soit encore comme des isolats ou concentrats intéressants pour leurs propriétés fonctionnelles. En alimentation humaine, les principaux facteurs qui limitent leur utilisation sont d'une part la présence de composés toxiques organiques ou minéraux (surtout chez les bactéries et les algues), d'autre part les teneurs élevées en acides nucléiques, qui peuvent entraîner une hyperuricémie (goutte, calculs urinaires), la faible digestibilité des protéines qu'ils renferment, et enfin leurs caractéristiques organoleptiques. Par rapport à la protéine de référence FAO, la plupart des protéines d'origine microbienne présentent un léger déficit en acides aminés soufrés (méthionine et cystéine/cystine).

Les techniques de préparation d'isolats protéiques d'origine microbienne varient en fonction du micro-organisme source et devraient passer par les étapes suivantes :

– Rupture cellulaire par des broyeurs mécaniques, homogénéisation ou autolyse. Cette rupture peut être également obtenue par hydrolyse acide ou alcaline, ou par traitement avec un solvant.

– Réduction de la teneur en acides nucléiques par activation thermique des nucléases endogènes ou par traitement chimique (sulfitolyse, hydrolyse alcaline ou acide) jusqu'à des valeurs voisines ou inférieures à 3 %.

– Solubilisation des protéines avec élimination de l'insoluble par filtration ou centrifugation.

– Précipitation des protéines (au pHi, par la chaleur) récupérées par centrifugation puis séchées.

En raison de leur richesse en vitamines, en particulier du groupe B, les levures sont utilisées en compléments nutritionnels. De plus, leur autolysat contenant des acides aminés libres et des peptides au goût marqué (viande, fromage, etc.) sont utilisés pour leur flaveur propre ou comme releveur d'arômes. Leur taux d'incorporation varie de 0,2 % dans les sauces de viande à 95 % dans des « sels » d'assaisonnement.

CULTURES DE CELLULES, GÉNIE GÉNÉTIQUE ET SYNTHÈSE CHIMIQUE

Les technologies de culture *in vitro* de cellules animales ou végétales ont énormément progressé au cours de ces dernières années. En dehors

des possibilités de production de biomasse, il faut mentionner leur utilisation potentielle dans la production de métabolites, d'anticorps, etc. Par ailleurs, il faut signaler que des plantes entières peuvent être obtenues à partir d'une cellule unique et que des variétés hybrides peuvent devenir rapidement disponibles par ces technologies. Ainsi, il est possible de créer de nouvelles variétés possédant de meilleures performances.

Les possibilités offertes par le génie génétique sont immenses et pleines de promesses. Ainsi, il est envisageable de procéder à des améliorations de végétaux en transférant par exemple à leurs cellules isolées des gènes de résistance à certaines maladies, des gènes de synthèse de protéines « intéressantes » du point de vue nutritionnel, des gènes à l'origine d'un développement rapide, des gènes de fixation de l'azote atmosphérique, etc. Certains procédés de fermentation ou de fabrication de protéines d'organismes unicellulaires sont améliorables par des modifications génétiques des micro-organismes producteurs. La suppression de voies métaboliques « inutiles » consommatrices d'énergie permettrait d'obtenir de meilleurs rendements. Il est également possible d'envisager de transférer à des micro-organismes des gènes codant pour la synthèse de protéines d'origine animale ou végétale. Des protéines alimentaires comme l'ovalbumine ont déjà été produites par des bactéries (le plus souvent par *Escherichia coli*) avec des rendements intéressants.

Des nutriments obtenus par synthèse chimique contribuent à améliorer la valeur nutritionnelle de certains produits alimentaires. Ainsi, l'incorporation de méthionine à des produits dérivés du soja (concentrat, isolat) employés en alimentation animale permet d'améliorer de façon significative leur valeur nutritive. Il est parfois plus efficace de fixer par liaison covalente l'acide aminé aux protéines présentes. La consommation d'urée, produite par voie chimique, permet de réduire la consommation protéique chez les ruminants. L'urée ingérée est d'abord transformée par la microflore du rumen en ammoniac ; ce dernier composé est alors assimilé par les micro-organismes et contribue à leur synthèse protéique. En dernier lieu, ces protéines microbiennes sont hydrolysées au niveau du tractus digestif du ruminant et les acides aminés ainsi libérés sont alors absorbés.

Certains sous-produits tels que les pailles peuvent être utilisés dans l'alimentation des ruminants après traitement par l'ammoniac (ammoniac gazeux ou ammoniac généré par addition d'urée et d'uréase). En valorisant des sous-produits, de tels traitements contribuent par ailleurs à économiser des produits plus « nobles ».

CONCLUSION

Au travers des exemples qui viennent d'être donnés, il apparaît que les ressources alimentaires potentielles d'origine animale, végétale, ou même microbienne, sont très grandes. Les connaissances fondamentales et les technologies nécessaires à leur utilisation progressent très rapidement et ne constituent pas, dans la plupart des cas, un facteur limitant. Par ailleurs, dans les pays industrialisés, il est probable que l'évolution du mode d'alimentation facilitera l'utilisation de certaines de ces nouvelles ressources. Enfin, il ne faut pas oublier que, de nos jours, trop d'enfants, de femmes et d'hommes souffrent de malnutrition, voire de famine. Il faut donc faire en sorte que les technologies développées par les scientifiques puissent contribuer le plus efficacement possible à assurer à chaque être humain une alimentation suffisante et agréable.

1

CUISSON ET CONSERVATION DES ALIMENTS

Jean-Louis CUQ et Stéphane GUILBERT

L'homme, au cours de son histoire, a appris à transformer sa nourriture pour pouvoir utiliser des matières premières plus ou moins « indigestes » mais aussi pour que la satisfaction du besoin physiologique correspondant à la prise de nutriments soit associée à un plaisir sensoriel. Ainsi l'emploi du feu pour « cuire » les aliments est pratiqué dans tous les groupes humains connus ; il permet d'obtenir des produits aux qualités nutritionnelles souvent améliorées mais aussi plus appétents. Par ailleurs, par des associations judicieuses de produits variés suivies de traitements divers parmi lesquels la cuisson occupe une place prépondérante, l'homme est parvenu à créer des plats permettant de répondre à ses besoins physiologiques mais aussi de lui procurer des plaisirs sensoriels. Au fil du temps, les techniques de cuisson se sont énormément diversifiées et actuellement, il est possible de soumettre nos aliments à des traitements thermiques très variés, en particulier quant aux températures et durées appliquées.

Parallèlement à l'évolution des techniques de cuisson, l'homme s'est toujours préoccupé de disposer de réserves alimentaires lui permettant d'abord d'éviter les situations de famine et ensuite de disposer en tous lieux et en toutes saisons d'aliments variés d'excellentes qualités nutritives et organoleptiques. Ainsi sont nées les techniques de conservation dont certaines, découvertes empiriquement, remontent à des époques très anciennes dans l'histoire de l'homme (séchage, fermentations, salage, fumage, etc.).

CUISSON DES ALIMENTS

La cuisson de nos aliments se traduit d'abord par des modifications souvent importantes et favorables de leurs qualités organoleptiques aussi bien au niveau de la texture que de la couleur et de la saveur, leur appétence et leur valeur nutritionnelle étant généralement améliorées. Ce procédé peut être caractérisé par une valeur cuisatrice, c'est-à-dire par un couple temps-température qui permet d'atteindre, dans un milieu donné, les qualités préalablement définies du produit cuit.

Les réactions chimiques qui se produisent au cours de la cuisson sont nombreuses et généralement fort complexes. Il apparaît souvent des composés aromatiques (aldéhydes, cétones, etc.) et la texture de certains composants comme les protéines, les amidons ou encore les fibres est profondément modifiée. Les transferts de matières qui interviennent dans ce processus varient en fonction du type même de cuisson et affectent en premier lieu l'eau et parfois les solutés, les matières grasses ou encore certains composants aromatiques. Les transferts de chaleur varient, quant à eux, en fonction de la nature de l'aliment (liquide, pâte, solide) et du milieu chauffant. Ainsi, pour un produit solide le transfert de chaleur de la périphérie vers l'intérieur se fait par conduction, pour un produit visqueux par conduction et convection et pour un produit liquide par convection.

Les sources de chaleur existant actuellement sont variées et proviennent par exemple de la combustion de gaz, de bois, de charbon, de l'échauffement de résistances électriques par effet Joule, de l'échauffement de masses métalliques par induction magnétique, du rayonnement infra-rouge et de micro-ondes électromagnétiques.

Les procédés de cuisson peuvent être schématiquement classés en cinq catégories en fonction du milieu chauffant dans lequel cette opération est réalisée : la cuisson dans l'eau, la cuisson dans la vapeur, la cuisson à l'air, la cuisson dans un corps gras et la cuisson au contact d'une surface chaude.

Cuisson dans l'eau

De nombreux aliments tels que légumes secs, riz, etc., ne deviennent consommables qu'après hydratation. Au cours de leur cuisson il se produit un transfert d'eau dont l'effet le plus net est une augmentation de volume. Par contre, les produits riches en eau tels que les viandes, les

poissons ou encore les légumes frais diminuent souvent de volume et de poids par perte d'eau.

En ce qui concerne les solutés hydrosolubles (vitamines B et C, sels minéraux, arômes) leur transfert par diffusion de l'aliment vers l'eau varie en fonction de leur nature, de la composition du produit, de la température et du temps. Le bouillon de cuisson dans lequel ils diffusent présente alors un intérêt nutritionnel et/ou organoleptique qui est fonction de leur nature et de leur concentration. Des transferts de solutés vers l'aliment se produisent quand leur concentration dans le milieu de cuisson est élevée. Ainsi la cuisson en eau dure se traduit par une pénétration d'ion calcium, ion qui en se complexant avec les pectines contribue au durcissement des légumes ou des fruits. L'addition de sel (de 4 à 8 g/l), de sucre, d'arômes (laurier, thym, etc.) dans l'eau de cuisson permet leur diffusion vers l'aliment.

Dans ce mode de cuisson le transfert de chaleur de la source chauffante vers l'eau se fait généralement par conduction au travers de la paroi du « récipient ». Dans l'eau ces transferts se font par convection. La chaleur spécifique élevée de l'eau (4,18 kJ/kg/°C) permet alors un échauffement rapide de l'aliment. A pression atmosphérique, la température d'ébullition de l'eau est égale à 100°C. Si la pression atmosphérique diminue, comme c'est le cas en altitude, cette température diminue ce qui requiert alors une augmentation de la durée du traitement pour obtenir une valeur cuisatrice équivalente.

1) Cuisson à pression atmosphérique

L'aliment à cuire peut être totalement ou partiellement immergé et en fonction de sa nature se trouve à l'état dispersé (sauce) ou en solution (sirop). Il est toujours préférable de maintenir une ébullition douce, sinon beaucoup d'énergie est inutilement dépensée pour la vaporisation (2,24 kJ sont consommés pour vaporiser 1 gramme d'eau à 100°C). Une diminution du phénomène de vaporisation et donc une économie d'énergie sont possibles par utilisation d'un couvercle. Celui-ci piège entre l'eau et sa surface interne de la vapeur saturante ; ce n'est que quand cette vapeur est perdue que la vaporisation se poursuit. Cependant, certains modes de cuisson nécessitent une réduction du volume de la phase aqueuse et il faut alors permettre la vaporisation.

Deux principales façons de cuire à ébullition peuvent être décrites : la première consiste à placer l'aliment dans l'eau froide et à chauffer progressivement. Dans ces conditions certains des constituants hydrosolubles de l'aliment diffusent dans l'eau qui est alors qualifiée de bouillon. La deuxième consiste à plonger les aliments dans de l'eau bouillante ; il se produit alors des modifications structurales des couches externes

permettant soit d'éviter des phénomènes d'agrégation (pâtes) soit de minimiser les phénomènes de diffusion.

Le pochage correspond à une cuisson à des températures inférieures à 100°C (œufs, poissons).

La cuisson de longue durée à des températures inférieures à 100°C dans une petite quantité de liquide (vin par exemple) permet la réalisation de ragoûts, sauces, civets, etc.

La cuisson à l'étuvée correspond à une cuisson lente d'aliments riches en eau (viandes, légumes frais) dans un récipient clos soumis à un chauffage. L'aliment cuit alors dans son eau, ce qui se traduit par des pertes relativement faibles en composés aromatiques. Dans certains cas, une faible addition d'eau ou de matières grasses favorise ce type de cuisson. La cuisson en « papillote » correspond à ce type de traitement.

2) Cuisson sous pression

Ce type de cuisson est réalisé dans des autoclaves ou des autocuiseurs ou cocotte minute. La température d'ébullition de l'eau augmentant avec la pression, il est possible d'atteindre en système clos des températures comprises entre 100 et 140°C pour des pressions comprises entre 1 bar et 3 bars. La vitesse des réactions chimiques liées à la cuisson augmentant avec la température, il est possible d'obtenir une valeur cuisatrice donnée pour des temps de cuisson d'autant plus courts que la température, et donc la pression, seront élevées. Les avantages de ce mode de cuisson résident d'abord dans le gain de temps qu'il procure, mais aussi dans les pertes moindres en certains nutriments tels que les vitamines.

Cuisson dans la vapeur

L'eau peut servir de milieu de cuisson à l'état de vapeur. La vapeur saturante possédant une chaleur spécifique de 0,43 kJ/kg/°C, l'aliment sera plus long à s'échauffer. Par contre, les pertes de composés hydrosolubles sont moindres que dans tous les systèmes de cuisson dans l'eau.

La température augmentant avec la pression, il est possible d'atteindre des températures supérieures à 100°C à des pressions supérieures à 1 bar. L'autocuiseur ou la cocotte minute représente le type même de l'appareil domestique de cuisson à la vapeur. La température atteinte dans ces cocottes varie avec leur marque ; elle est généralement comprise entre 105 et 110°C. Dans ces conditions, et par comparaison avec la cuisson dans l'eau bouillante à pression atmosphérique, il est possible

d'atteindre une valeur cuisatrice donnée pour des durées de cuisson inférieures d'un facteur voisin de deux.

Cuisson dans l'air

1) Cuisson au-dessus d'un feu ou de braises

Ce mode de cuisson est vraisemblablement le plus ancien. Ainsi la cuisson d'aliments riches en eau au-dessus d'un feu ou de braises peut être associée, dans l'histoire de l'homme, à la découverte du feu. Dans ces conditions la température atteinte à la surface du produit alimentaire peut être extrêmement élevée (entre 300 et 500°C parfois). Il se produit alors, dans le cas de viandes et de poissons ou pour d'autres produits riches en protéines, des modifications structurales de leur surface (saisissement) qui s'accompagnent d'une diminution de leur perméabilité. L'eau et certains composés d'arômes sont alors maintenus dans le produit. Par ailleurs, il se produit, à ces températures élevées, de très nombreuses réactions chimiques dont certaines sont génératrices d'arômes nouveaux : il s'agit par exemple de la réaction de Maillard.

La combustion du bois (cellulose et surtout lignines) produit de très nombreux composés dont certains, polycycliques et aromatiques comme les dérivés de l'anthracène ou du benzopyrène, sont toxiques. Cependant leur concentration dans les aliments grillés est faible. Par contre, le grillage à température élevée des protéines contenues dans l'aliment fournit certains dérivés (carbolines par exemple) dont le pouvoir mutagène est important. Comme il existe une corrélation hautement positive entre pouvoir mutagène et pouvoir cancérigène, il faut donc veiller à ne pas carboniser les aliments afin de minimiser la formation de ces dérivés.

2) Cuisson au four

Il s'agit là d'un mode de cuisson relativement fréquent de nos jours. Dans l'enceinte close que constitue le four, la chaleur est fournie soit par du gaz ou par de l'électricité (résistances ou rayonnement infra-rouge) soit indirectement par des micro-ondes. La gamme de température qu'il est possible d'atteindre dans la plupart des fours domestiques varie entre 100°C et 250°C.

Dans les *fours chauffés au gaz ou à l'électricité,* une ou toutes les surfaces de produit alimentaire peuvent être soumises à la cuisson

(tournebroche, etc.). Il existe parfois des systèmes de brassage de l'air qui permettent une meilleure répartition de la chaleur. A des températures élevées, il se produit rapidement des modifications structurales au niveau de la surface et plus particulièrement au niveau de macromolécules telles que les protéines et les amidons (saisissement). Les modifications de perméabilité qui en résultent permettent d'éviter des pertes importantes d'eau ou d'arômes. Pour minimiser le dessèchement en surface il est possible de verser un liquide chaud sur la surface (eau, huile) ou encore de barder l'aliment en l'entourant de produits gras (graisses). Ainsi, au cours du *rôtissage,* la cuisson peut se faire en présence d'une petite quantité de matière grasse.

La durée de cuisson dans les fours dépend surtout de la température et de la masse du produit.

Le *grillage* au four correspond à une cuisson sous l'effet de rayonnements infrarouges et est équivalent à la cuisson sur des braises (voir paragraphe « Cuisson au-dessus d'un feu ou de braises »). La température atteinte par l'aliment qui peut être chauffé sur une ou sur toutes ses faces varie en fonction de sa distance à l'émetteur et de la puissance de ce dernier.

3) Cuisson par micro-ondes

Dans cette technologie de cuisson, l'aliment est soumis, dans un four, à un rayonnement électromagnétique. Son échauffement résulte alors de l'agitation de molécules non conductrices et présentant une polarité électrique ; la plus abondante de ces molécules dans nos aliments est la molécule d'eau.

Les effets des micro-ondes sur nos aliments ne diffèrent pas des effets d'un traitement thermique équivalent (couple temps/température) réalisé par tout autre mode de chauffage. Dans les conditions d'utilisations actuelles des fours à micro-ondes, c'est-à-dire à pression atmosphérique, les températures atteintes ne dépassent pas 100°C (température d'ébullition de l'eau) et les effets de ce traitement sont donc à rapprocher de ceux de la cuisson dans l'eau. Il n'existe pas d'effets résiduels des micro-ondes sur nos aliments, l'agitation moléculaire (le chauffage) induite par ces ondes étant identique à celle obtenue par tout autre mode de chauffage. Le seul danger que pourrait éventuellement présenter cette technologie résiderait dans un phénomène de fuite d'onde de l'enceinte du four, phénomène que les normes de sécurité imposées aux fabricants rendent quasi impossible.

a) Principe

De l'énergie électrique est d'abord transformée en énergie électromagnétique (onde radio) avec un rendement voisin de 60 % au moyen d'un magnétron constitué d'une triode et d'un circuit oscillant. La fréquence ν, exprimée en hertz, est reliée à son énergie émise par la relation $w = h\nu$ (h est la constante de Planck). Cette énergie électromagnétique se transmet alors aux molécules dipolaires que contient l'aliment. Ces molécules changent ainsi d'orientation avec une fréquence égale à celle du champ électromagnétique, soit 10^7 à 10^{10} fois par seconde. La chaleur résultant de l'agitation des atomes et des molécules, l'agitation des molécules (surtout de celles d'eau) sous l'effet du champ se traduit donc par une élévation de température. La chaleur se transmet ensuite par convection et/ou par conduction aux autres composants non dipolaires de l'aliment.

On peut illustrer ces phénomènes par l'exemple suivant : le réchauffage d'« hamburgers » conditionnés en packs de polystyrène par micro-ondes peut conduire, selon le temps de traitement, à un réchauffement d'autant plus important que la teneur en eau du composant est élevée. Ceci se traduit, presque indépendamment de la position de ce composant dans l'aliment (en surface ou en profondeur), par un gradient de température allant de très élevé pour la sauce riche en eau, à moyennement élevé pour la viande, à faible pour le pain et à nul pour l'emballage.

Certains ions comme Na^+ ou Cl^- peuvent se déplacer et osciller sous l'effet du champ et contribuer ainsi au phénomène d'échauffement.

L'énergie apportée par les micro-ondes décroît avec la profondeur de l'aliment. En effet, de l'énergie est dépensée au fur et à mesure de leur pénétration pour agiter les molécules dipolaires et l'énergie résiduelle diminue. Ainsi, dans l'eau et pour une fréquence de 2 450 MHz l'énergie résiduelle de ces radiations est pratiquement nulle à 15 cm de la surface irradiée, l'échauffement se poursuivant alors par convection. Il n'en reste pas moins vrai que pour la plupart des produits alimentaires dont les dimensions sont souvent inférieures à 15 cm (le point le plus éloigné se situant alors à 7,5 cm de la surface), la pénétration des micro-ondes est profonde et se fait instantanément. L'augmentation de la température est alors proportionnelle à la puissance mise en jeu (modulée par ν et surtout par E) et inversement proportionnelle à la chaleur spécifique du produit. La température de la surface des produits placés dans ces enceintes peut être déterminée par des pyromètres infrarouges.

b) Technologie de la cuisson par micro-ondes

Les fours à micro-ondes sont constitués d'enceintes « étanches » au rayonnement (cages de Faraday), enceintes constituées en grande partie par des matériaux conducteurs (acier, aluminium, alliages, etc.). L'éner-

résultant se multiplier si la température d'entreposage le leur permet (température ambiante pour les bactéries mésophiles). Les risques encourus par le consommateur seraient alors considérables si parmi ces spores se trouvaient celles de *Clostridium botulinum* (voir le chapitre « Microbiologie alimentaire »). C'est pourquoi il est impérieux que ces produits soient immédiatement réfrigérés après leur cuisson ou même mieux, congelés. A l'état réfrigéré, leur conservation est de l'ordre de deux à trois semaines.

Les produits cuits par cette méthode possèdent de bonnes qualités organoleptiques. L'absence d'oxygène en cours de cuisson évite la disparition par oxydation de certains des composants de la flaveur et du goût. De plus la cuisson étant réalisée en milieu clos, les pertes d'arômes par évaporation sont minimes. Par ailleurs, les matières premières entrant dans leur composition sont sélectionnées avec soin, ce qui contribue d'autant à leur qualité.

Cuisson au contact d'une surface solide chaude

Ce type de cuisson est réalisé sur certains aliments (viandes, poisson, pain, etc.) dans des récipients métalliques (recouverts ou non d'une couche de téflon) ou au contact direct d'une zone métallique (grils à viandes), ou d'une pierre chauffée. Le chauffage de la plaque est assuré soit par combustion de gaz ou de bois, soit par des résistances électriques. Les températures atteintes sont généralement très élevées et des modifications chimiques importantes apparaissent en surface de l'aliment (saisissement, grillage). Les effets de ce mode de cuisson, aussi bien du point de vue organoleptique que du point de vue hygiénique sont, à un degré moindre, comparables à ceux observés après cuisson au-dessus d'une braise (voir plus haut).

La *cuisson-extrusion* peut être considérée comme une technologie de cuisson en continu au contact d'une surface chaude. En effet, dans cette technologie relativement récente, le mélange alimentaire souvent constitué de matières premières « purifiées » (amidons, protéines) est introduit dans un cylindre (fourreau) en acier dans lequel tourne une vis sans fin dont le pas se resserre (figure 1). Il existe des cuiseurs-extrudeurs à deux vis qui sont corotatives. Le cylindre peut être chauffé par des résistances électriques ou par induction magnétique (courants de Foucault). La cuisson de l'aliment est alors réalisée par contact avec le métal chaud. Au cours de la progression du mélange il intervient des phénomènes de friction et de compression dont une des conséquences est une élévation

importante de la température ; il peut être alors inutile de chauffer. Avec des mélanges alimentaires peu hydratés (10 à 15 % d'eau) la température atteinte (150 à 220°C) permet, pendant le temps de séjour dans le cylindre qui est de l'ordre de la minute, une cuisson satisfaisante et conduit le plus souvent à la « fusion » de la matière alimentaire.

A la sortie du cylindre, le produit « poussé » par la vis est forcé de sortir au travers d'une filière dont la géométrie conditionne la forme de l'aliment extrudé obtenu (cylindrique, plat, etc.). L'eau, qui dans le mélange se trouvait à une température et une pression très élevées, se vaporise alors instantanément en sortie de filière, ce qui entraîne une expansion. Les dernières opérations à effectuer consistent en un découpage et éventuellement en une aromatisation suivie dans certains cas d'un séchage final au four, ou d'un grillage.

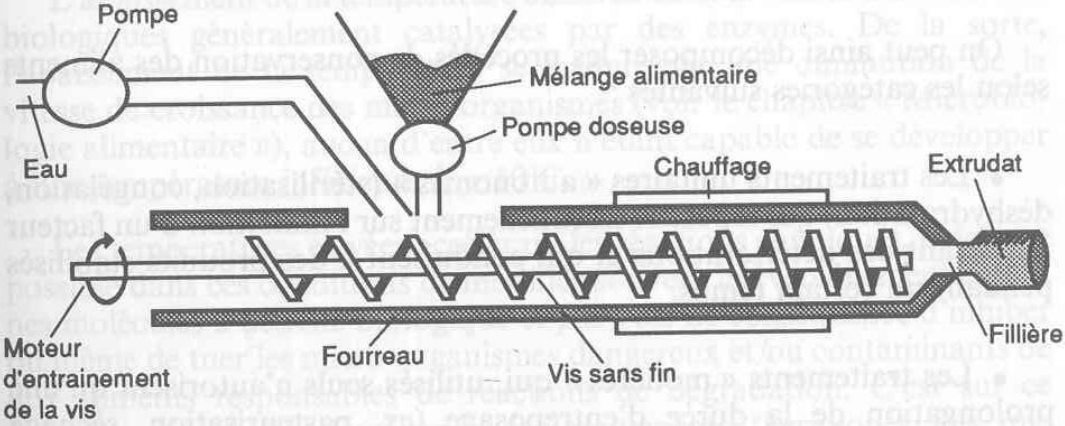


Figure 1

Schéma d'un cuiseur extrudeur monovis.

C'est par cette technologie de cuisson en continu que sont préparés par exemple des aliments comme les pains plats (type « cracotte ») et certains snacks pour l'apéritif.

TECHNOLOGIES DE CONSERVATION

Les procédés de conservation visent la maîtrise de l'évolution des diverses réactions de détérioration susceptibles d'altérer les qualités hygiéniques, organoleptiques, fonctionnelles et nutritionnelles des ali-

ments. Les divers agents et les mécanismes de détérioration des aliments sont traités par ailleurs. Il s'agit essentiellement de l'action d'agents physiques (gel, chaleur, humidité...), de l'attaque d'insectes, de rongeurs ou d'autres animaux, des altérations microbiennes, de l'action d'enzymes (lipolyse et brunissement enzymatique...) ou encore de réactions purement chimiques (hydrolyses, oxydations, brunissement non enzymatique).

Les procédés de conservation des aliments s'appuient sur l'utilisation d'un ou plusieurs des facteurs suivants : températures élevées, températures basses, activité de l'eau, pH, potentiel d'oxydo-réduction, composés inhibiteurs spécifiques, fermentations et flores compétitives, radiations, couches barrières et emballages.

On peut ainsi décomposer les procédés de conservation des aliments selon les catégories suivantes :

- Les traitements unitaires « autonomes » (stérilisation, congélation, déshydratation) qui reposent essentiellement sur l'inhibition d'un facteur important des détériorations et qui conduisent à des produits stabilisés pendant un certain temps.

- Les traitements « modérés » qui, utilisés seuls n'autorisent qu'une prolongation de la durée d'entreposage (ex. pasteurisation, séchage partiel ou concentration, atmosphères contrôlées, acidification, addition de sucre ou de sel, fermentation...). Utilisés en association par deux ou trois, ces derniers traitements peuvent garantir une conservation à long terme. Citons à titre d'exemple l'acidification + la pasteurisation (légumes acidifiés pasteurisés), le séchage partiel + fermentation + additif antimicrobien + addition de sel (saucisson et diverses salaisons), la réfrigération + atmosphère modifiée (fruits et légumes), l'addition de sel, la fermentation, le séchage partiel et la réfrigération (fromages).

Dans tous les cas, la conservation de l'aliment est obtenue plus par la maîtrise de l'évolution des réactions de détérioration dans un sens favorable que par une inhibition totale de ces mêmes réactions.

Ces procédés se traduisent donc le plus souvent par une modification des caractéristiques organoleptiques et parfois nutritionnelles des aliments. Ainsi la « distance » organoleptique entre la viande et la viande conservée par salage, ou entre le lait et le lait « conservé » en fromage est-elle considérable.

Effets de la température

La conservation des aliments requiert leur stabilisation, quelquefois relative, vis-à-vis d'un certain nombre de phénomènes chimiques enzymatiques ou microbiologiques qui se traduisent à une température ambiante par des altérations souvent défavorables. La vitesse des réactions chimiques impliquées dans les réactions de détérioration augmentant avec la température, il est donc évident que tout abaissement de la température d'un produit alimentaire se traduira par une diminution de la vitesse de ces réactions et par voie de conséquence par une augmentation de sa durée de conservation. C'est ainsi que se sont développées des technologies telles que la réfrigération et la congélation.

L'abaissement de la température diminue aussi la vitesse des réactions biologiques généralement catalysées par des enzymes. De la sorte, l'abaissement de la température se traduit par une diminution de la vitesse de croissance des micro-organismes (voir le chapitre « Microbiologie alimentaire »), aucun d'entre eux n'étant capable de se développer à une température inférieure à $-10^{o}C$.

Les températures élevées accélérant les réactions chimiques, il devient possible dans ces conditions de modifier souvent irréversiblement certaines molécules à activité biologique et par voie de conséquence d'inhiber ou même de tuer les micro-organismes dangereux et/ou contaminants de nos aliments responsables de réactions de dégradation. C'est sur ce principe qu'ont été développés des traitements thermiques tels que pasteurisation et stérilisation.

1) La réfrigération

La réfrigération est un procédé de conservation très répandu aussi bien au niveau domestique qu'au niveau industriel, le froid étant le plus souvent généré par détente d'un fluide préalablement comprimé. Généralement, les températures utilisées sont comprises entre $-1^{o}C$ et $10^{o}C$. Dans ces conditions, un ralentissement des vitesses des réactions de dégradation est obtenu, ce qui permet, selon les produits, d'obtenir des durées de conservation qui vont de quelques jours à plusieurs semaines. Dans cette gamme de températures, seuls les micro-organismes cryophiles sont capables de se développer sur ou dans des produits susceptibles de leur fournir des nutriments. Parmi les bactéries dangereuses pour le consommateur, *Clostridium botulinum* type E, *Yersinia enterocolitica* et *Listeria monocytogenes* sont celles qui cultivent à la température la plus basse, température voisine de $2^{o}C$.

Certaines réfrigérations industrielles sont réalisées dans des atmosphères parfaitement contrôlées afin d'assurer au produit une meilleure conservation. Ainsi, en présence de 88 % d'anhydride carbonique (CO_2) et de 12 % d'azote, la durée de conservation des œufs réfrigérés peut atteindre un an (procédé Everaert-Lescarde). Dans ce cas la présence de CO_2 empêche toute augmentation du pH de l'œuf, augmentation qui est le facteur le plus important de la non-conservation des œufs. Emballée sous vide, la viande et les poissons se conservent de 1 à 2 semaines à des températures comprises entre 0 et 2°C. La conservation à l'état réfrigéré des fruits et légumes permet de ralentir et parfois d'inhiber les phénomènes de maturation ; à l'échelle industrielle les taux de CO_2, d'oxygène et d'azote des atmosphères des entrepôts frigorifiques ainsi que l'humidité relative et la température sont parfaitement contrôlés. Les durées de conservation obtenues varient de quelques jours (fraises, framboises) à une dizaine de mois (agrumes, pommes, pommes de terre, etc.).

2) La congélation

Il s'agit d'un excellent procédé de conservation de longue durée pour la plupart de nos aliments. En effet, à −18°C, température de conservation la plus couramment utilisée, la vitesse des réactions de dégradation est très fortement réduite et la solidification de l'eau sous forme de cristaux de glace empêche tous transferts de matière par diffusion. De la sorte, les molécules susceptibles de réagir en provoquant des phénomènes défavorables sont figées. Néanmoins, à la température conventionnelle de −18°C, un aliment congelé n'est pas un milieu totalement immobilisé et, de ce fait, sa durée de vie (trois mois à deux ans selon les produits) est limitée par l'activité chimique et biochimique résiduelle.

Par contre, la cristallisation de l'eau entraîne des « lésions » dans certaines des structures de l'aliment. Il en résulte alors, au moment de la décongélation, des modifications défavorables de certaines des propriétés fonctionnelles et plus particulièrement de la texture et de la capacité de rétention d'eau.

a) Formation des cristaux de glace

Lorsqu'un aliment est amené de la température ambiante à des températures négatives, l'eau qu'il contient passe en dessous de 0°C par un état qualifié de surfusion. Il se forme ensuite des « embryons » ou « germes » de cristaux de glace dont le nombre est d'autant plus élevé que la vitesse d'abaissement de la température est grande (figure 2). Ces microcristaux augmentent ensuite de taille avec une vitesse qui est fonction de l'intensité du refroidissement. Si la vitesse de congélation est faible, le nombre des cristaux sera donc relativement peu élevé et leur

dimension sera, par voie de conséquence, importante ; les cristaux apparaissant dans ces conditions sont souvent de forme allongée. Par contre, ces cristaux seront sphériques, plus petits et plus nombreux dans un processus de congélation rapide. Dans les aliments structurés volumineux et/ou hétérogènes, le nombre et la forme des cristaux varieront en fonction de leur localisation. En pratique, une cristallisation fine est obtenue pour des aliments de petite taille ou par une congélation en milieu agité (cas des glaces et sorbets). Il faut signaler enfin que des modifications de taille et de forme de ces cristaux peuvent intervenir pendant la conservation à l'état congelé dès que la température est supérieure à −70°C. Les petits cristaux disparaissent en donnant naissance à des cristaux plus volumineux.

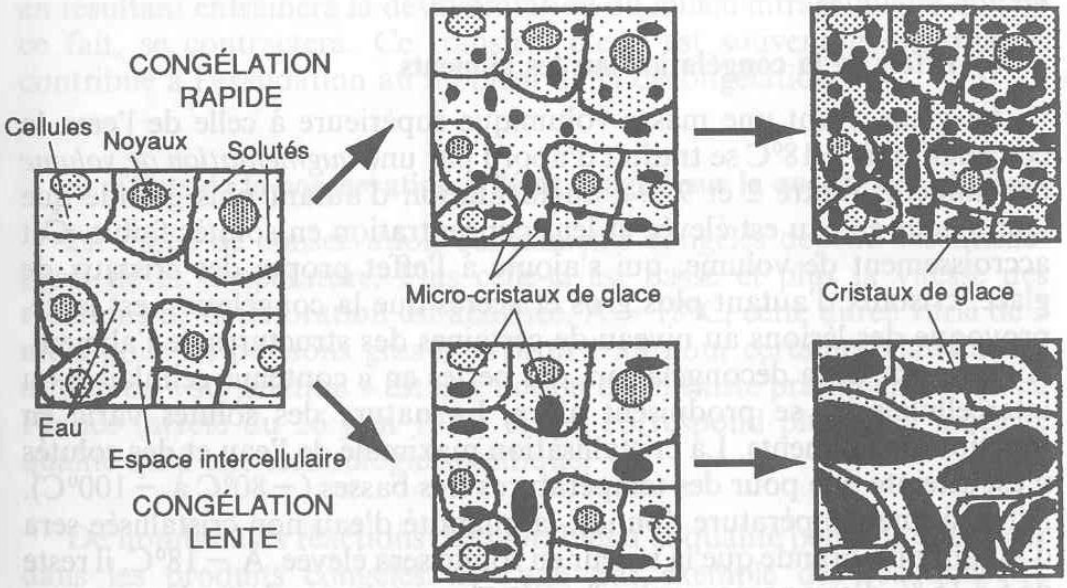


Figure 2

Représentation schématique de la formation microscopique de microcristaux puis de cristaux de glace au cours de la congélation.

La vitesse d'abaissement de la température est fonction de la nature du produit et surtout de l'écart de température entre le produit et le milieu réfrigérant. Elle est d'environ 1, 50, et 5 000 degrés par minute respectivement avec un congélateur domestique à −18°C, un tunnel de congélation à −40°C et un bain d'un solvant organique refroidi à des températures inférieures à −100°C.

La diminution de la température au cours de la congélation n'est pas régulière. L'apport de frigories se traduit par une première phase dans laquelle la température diminue proportionnellement à la quantité de frigories. Après une très légère augmentation liée au phénomène de surfusion, la température se stabilise à 0°C dans le cas de l'eau pure et diminue légèrement à des températures négatives dans le cas où l'eau contient des solutés (la loi de Raoult montre que le point de congélation diminue quand la concentration en soluté augmente). Cette phase dans laquelle l'apport de frigories n'induit que peu ou pas de baisse de la température correspond à la cristallisation qui est un phénomène exothermique (libération de calories). Quand la cristallisation est terminée, la température décroît à nouveau proportionnellement à l'apport de frigories. Avec de l'eau pure on admet que la cristallisation est quasi totale aux environs de −40°C. Le point eutectique est défini comme la température à laquelle l'eau et un soluté donné cristallisent simultanément.

b) Effets de la congélation sur les aliments

La glace ayant une masse volumique supérieure à celle de l'eau, la congélation à −18°C se traduit d'abord par une *augmentation de volume* des aliments (entre 2 et 9 %), augmentation d'autant plus grande que leur teneur en eau est élevée et leur concentration en solutés faible. Cet accroissement de volume, qui s'ajoute à l'effet propre des cristaux de glace, cristaux d'autant plus gros et acérés que la congélation est lente, provoque des lésions au niveau de certaines des structures de l'aliment. Au moment de la décongélation, des pertes en « contenus cellulaires ou intercellulaires » se produisent alors. La nature des solutés varie en fonction des aliments. La cristallisation maximale de l'eau et des solutés n'est atteinte que pour des températures très basses (−80°C à −100°C). Ainsi, à une température donnée, la quantité d'eau non cristallisée sera d'autant plus grande que la teneur en soluté sera élevée. A −18°C, il reste de 5 à 15 % d'eau non congelée dans la plupart des produits alimentaires, eau dont la concentration en solutés est considérable (figure 2). Cette concentration élevée en solutés de la phase aqueuse non congelée a deux principales conséquences :

1) la vitesse des réactions que sont susceptibles de donner ces solutés entre eux est augmentée par leur concentration mais diminuée par la température ; certaines sont défavorables à la qualité.

2) l'augmentation de la force ionique ($\mu = \frac{1}{2}\Sigma c_i z_i^2$), relation dans laquelle c est la concentration et z l'électrovalence) a des effets très nets sur certains composants et en particulier sur les protéines. En milieu fortement concentré en solutés, la solubilité des protéines diminue (effet de « salting out »). Leur conformation est modifiée plus ou moins réversiblement, ce qui se traduit surtout par des diminutions de leur

solubilité et de leur capacité de rétention d'eau. Ainsi, l'eau qui était retenue par les protéines natives ne le sera plus après leur dénaturation, ce qui contribuera à l'exsudation au moment de la décongélation. Au cours d'une congélation rapide, le temps de séjour des protéines en « milieu hypersalé » est moins important et les protéines sont moins dénaturées.

Les structures riches en eau comme les gels pectiques (fruits) ou les gels d'amidon sont déstabilisées par congélation.

Il faut signaler enfin que si la concentration intracellulaire des solutés dans un aliment donné est plus grande que celle du milieu intercellulaire, la formation des cristaux de glace sera plus rapide dans ce dernier milieu. Dans cet espace la concentration des solutés dans la phase aqueuse non congelée augmentera rapidement et la différence de pression osmotique en résultant entraînera la déshydratation du milieu intracellulaire qui, de ce fait, se contractera. Ce transfert d'eau est souvent irréversible et contribue à l'exsudation au moment de la décongélation.

c) Effets de la conservation à l'état congelé sur la qualité des aliments

La durée de conservation des aliments congelés dépend essentiellement de la température. Plus celle-ci est basse et plus la vitesse des réactions de détérioration est abaissée. A −18°C, cette durée varie de 2 mois pour les poissons gras à environ 1 an pour certaines viandes. La notion de « surgélation » est une notion qui n'existe pratiquement qu'en France (arrêté du 26 juin 1974) et qui correspond plus à un label de qualité qu'à une technologie spécifique.

De nombreuses réactions défavorables à la qualité peuvent intervenir dans les produits congelés. Il s'agit par exemple des réactions du brunissement des fruits et légumes, qui sont catalysées par des enzymes. C'est pourquoi il est recommandé de blanchir les légumes avant de les congeler, le blanchiment inactivant ces enzymes. Les réactions d'oxydation des lipides conduisant au rancissement limitent la conservation d'aliments comme les poissons. Dans ce cas, un emballage imperméable à l'oxygène pourra ralentir ces phénomènes. Certains pigments végétaux sont détruits ; la décoloration qui en résulte est liée à la destruction des chlorophylles, xanthophylles, carotènoïdes ou encore des anthocyanes.

Les variations de température sont à éviter au cours de l'entreposage d'aliments à l'état congelé car elles engendrent une recristallisation suivie de nombreuses réactions défavorables, notamment la déshydratation en surface qui se traduit parfois par la formation de taches.

d) Principales technologies de congélation

De nombreuses technologies de congélation existent actuellement. La plus classique consiste à placer le produit alimentaire dans une enceinte close au sein de laquelle l'air est refroidi à des températures égales ou inférieures à −20°C. Dans ce cas la vitesse de congélation n'est jamais très grande. Par contre, la congélation en tunnel dans lequel on fait circuler de l'air froid (−20°C à −50°C) à des vitesses de plusieurs mètres par seconde est rapide (figure 3). Dans les congélateurs à lit fluidisé, la denrée alimentaire est mise en suspension par un flux régulé d'air froid (figure 3).

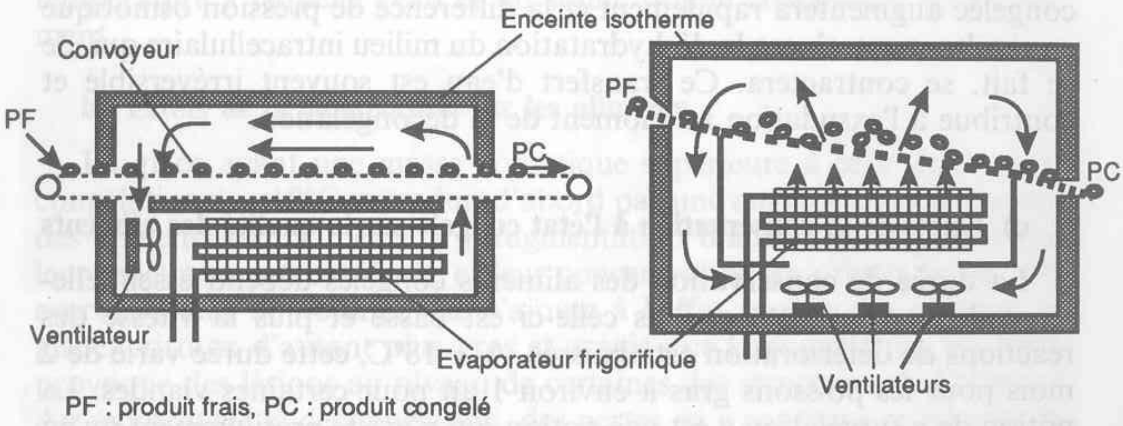


Figure 3

Schémas de congélateurs industriels de type tunnel et à lit fluidisé.
(PF = produit frais, PC = produit congelé).

Il existe des congélateurs à plaques ou à tambour dans lesquels la congélation est obtenue au contact de plateaux ou de supports métalliques refroidis par des liquides réfrigérants (ammoniac, fréons, etc.). Certains produits sont congelés par immersion directe dans un liquide froid (saumure pour le poisson, glycérol, solutions de saccharose, azote liquide, etc.) ou par pulvérisation d'un gaz (la température d'ébullition de l'azote liquide, à pression atmosphérique, est de −196°C, celle de l'anhydride carbonique de −80°C). Avec l'azote liquide, il faut 1 kg d'azote pour congeler 1 kg de denrée alimentaire, ce qui rend la technologie onéreuse.

e) La décongélation

Dans la plupart des cas, il est recommandé de procéder à une décongélation rapide. Les viandes ou les poissons peuvent être ainsi soumis directement à un chauffage correspondant aux conditions de cuisson et les légumes immergés dans de l'eau bouillante. Une décongélation plus lente est réalisable dans des enceintes réfrigérées ou par immersion dans de l'eau à 10 ou 15°C. Les aliments qui sont naturellement consommés crus (fruits) ne peuvent être décongelés qu'à des températures voisines ou légèrement inférieures à la température ambiante.

La décongélation par micro-ondes est applicable à la plupart des produits congelés. Dans le cas de grosses pièces de viande, la décongélation par des micro-ondes de fréquence égale à 2 450 MHz (autorisée en France) se traduit, du fait de leur faible pénétration (5 cm environ), par des échauffements de surface. Pour éviter ce phénomène, il est possible d'apporter des frigories à ce niveau en faisant circuler de l'air froid. Par contre, les micro-ondes à 915 MHz (autorisées aux Etats-Unis) pénètrent jusqu'à 50 cm et permettent, sans avoir recours à un refroidissement de surface, de réaliser directement la décongélation.

3) Le blanchiment

Il s'agit d'un traitement thermique réalisé à des températures comprises entre 65 et 100°C dont la durée ne dépasse que rarement 5 minutes. Il peut être effectué directement par immersion dans de l'eau chaude ou par la vapeur ou encore par des micro-ondes. Généralement pratiqué sur des aliments destinés à être conservés à l'état congelé, stérilisé ou deshydraté, son but principal est d'*inactiver des enzymes* dont l'activité pourrait engendrer des réactions défavorables. Ainsi des enzymes telles que les peroxydases, lipoxygénases, lipases, protéases, polyphénoloxydases, amylases, chlorophyllases peuvent provoquer dans les produits alimentaires dans lesquels elles se trouvent des modifications de texture, de goût, d'odeur et de couleur qui affectent les qualités organoleptiques. D'autres enzymes peuvent contribuer à une diminution des qualités nutritionnelles du produit (oxydases et hydrolases de certaines vitamines par exemple).

Cette opération permet aussi d'*attendrir* certains aliments (haricots verts) ou d'en *raffermir* d'autres après addition de calcium dans l'eau (tomates, pommes). Enfin, le blanchiment contribue à modifier les structures des parois cellulaires, ce qui favorise par exemple le transfert d'eau au moment de la déshydratation. Dans ce dernier cas, l'addition de sulfite au bain de blanchiment permet par la suite de minimiser les réactions de brunissement non enzymatique.

Un traitement de blanchiment est jugé satisfaisant quand il conduit à une importante réduction d'activités enzymatiques résiduelles telles que les activités peroxydasiques et catalasiques.

4) La pasteurisation et la stérilisation, aspects théoriques

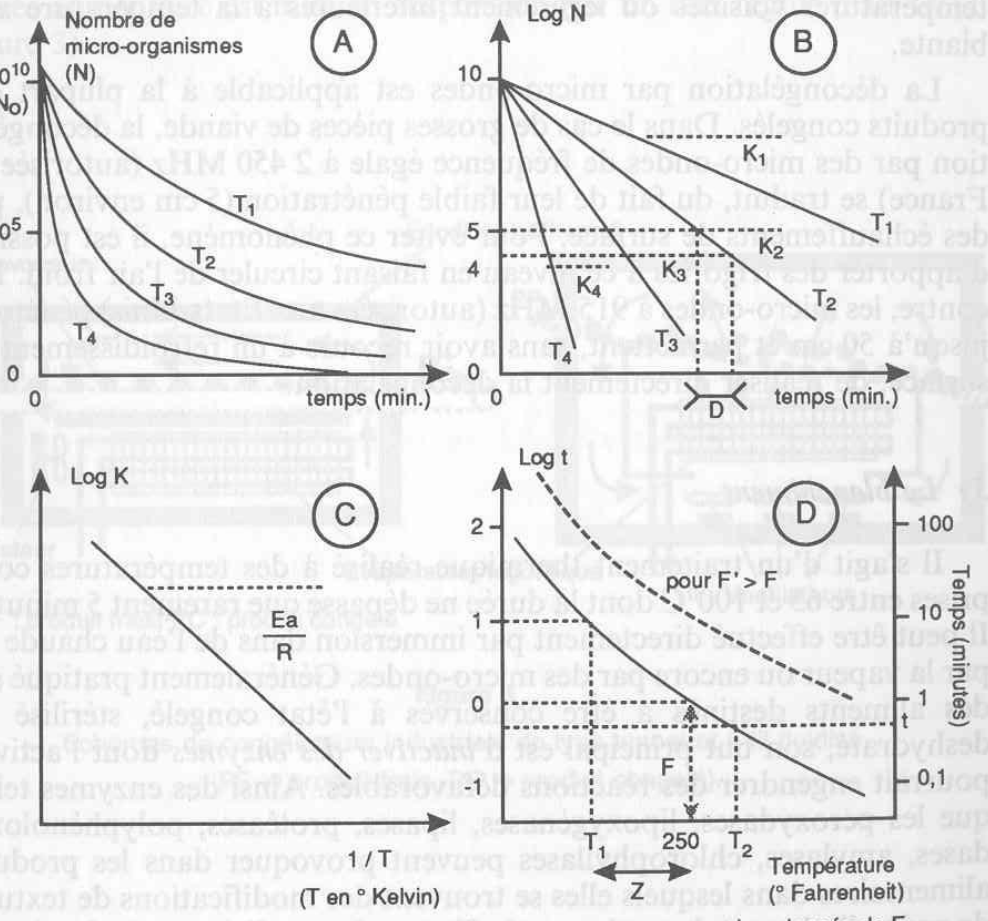


Figure 4

Analyses graphiques de la destruction des micro-organismes par la chaleur.

A – Variations du nombre de micro-organismes en fonction du temps à 4 températures ($T_1 > T_2 > T_3 > T_4$), N_0 est la charge initiale.

B – Variations du logarithme du nombre de micro-organismes en fonction du temps.

C – Variations de la constante de vitesse en fonction de l'inverse de la température absolue E_a : énergie d'activation ; R : constante des gaz parfaits).

D – Variations du logarithme du temps en fonction de la température exprimée en degrés Fahrenheit pour une valeur donnée de F
pour une valeur F' > F.

Le but principal de ces traitements thermiques est de stabiliser, du point de vue microbiologique, les produits alimentaires. Les phénomènes de destruction des micro-organismes auxquels ils conduisent sont décrits avec beaucoup de détails dans le chapitre « Microbiologie alimentaire ».

Pour définir certains des paramètres utilisés au cours de la pasteurisation ou de la stérilisation industrielles, nous avons rassemblé sur la figure 4 l'ensemble des phénomènes liés à ces opérations. Ainsi, quand un milieu contenant N_0 micro-organismes d'une espèce donnée est soumis à un traitement thermique, leur destruction suit une loi du type $N = N_0 e^{-kt}$ (N est le nombre de germes encore vivants au temps t, k est la constante de vitesse). Les variations de N en fonction du temps pour des températures différentes ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$) sont représentées sur la Figure 4 A. Si on prend le logarithme de N, la loi de destruction peut s'écrire $\text{Log } N = -k.t + \text{Log } N_0$; les variations de N en fonction du temps sont linéaires et de pente k (Figure 4 B). L'influence de la température sur la constante de vitesse est régie par la loi d'Arrhénius : $k = A.e^{\frac{-E_a}{RT}}$ (A est une constante, E_a l'énergie d'activation de la destruction, T la température absolue et R la constante des gaz parfaits). Si on prend le logarithme de k, on obtient l'équation suivante : $\text{Log } k = -E_a / RT + \text{Log } A$; les variations du Log K en fonction de 1/T sont linéaires et de pente E_a / R (Figure 4 C).

Si l'on représente maintenant, pour une même valeur du niveau de destruction N_0/N, les variations du logarithme du temps en fonction de la température, on obtient une courbe, qui dans un petit intervalle de température peut être considérée comme une droite (Figure 4 D). Pour une autre valeur choisie du niveau de destruction N_0/N on obtient une courbe sensiblement parallèle.

A partir de ces représentations, il est possible de définir 3 paramètres fondamentaux utilisés dans la maitrîse de la pasteurisation ou de la stérilisation :

1) *le temps de réduction décimale D* avec $D = -1/k$ (Figure 4 B) qui correspond, pour un micro-organisme et une température donnés, au temps de traitement permettant de réduire de 90 % le nombre de micro-organismes. Quelques valeurs de D sont indiquées dans le Tableau 1.

2) *la valeur stérilisatrice F* qui est la durée du traitement nécessaire pour obtenir, à 121°C (250 °F), un niveau de réduction N_0/N choisi. La valeur pasteurisatrice est la durée nécessaire pour obtenir, à 60°C, un niveau de réduction donné de micro-organismes sous forme végétative.

Tableau 1

Valeurs du temps de réduction décimale D et du coefficient de température Z pour quelques micro-organismes à 60 et 121°C.

	Forme*	T° (°C)	D (min)	Z (°F)
Escherichia coli	FV	60	1,25	10
Staphylococcus aureus	FV	60	5	10
Mycobacterium tuberculosis	FV	60	15	13
Salmonella spp.	FV	60	0,4-2,5	7,5-16
Streptococcus faecalis	FV	60	15	12
Clostridium botulinum	S	121	0,2	18
Clostridium sporogenes	S	121	1,5	16
Bacillus coagulans	S	121	0,05	18
Bacillus stearothermophilus	S	121	5	18

* S : spore, FV : forme végétative

3) *la valeur Z* qui est l'écart de température exprimé en degré Fahrenheit (°F) permettant de réduire de 90 % la durée du traitement pour obtenir un niveau de destruction donné (entre T_1 et 250 °F : figure 4 D).

Pour des valeurs différentes du niveau de réduction, les courbes obtenues sont sensiblement parallèles (figure 4 C).

A partir de la Figure 4 D, il est possible d'établir la relation :

$$\frac{1}{z} = \frac{\log F - \log t}{T_2 - 250} \qquad \log \frac{F}{t} = \frac{T_2 - 250}{z}$$

ou encore : $F = t.10^{\frac{T_2 - 250}{z}}$

Quand un produit alimentaire conditionné en boîte, en bocal ou en bouteille est soumis à un traitement thermique, sa température n'atteint pas instantanément la température du milieu chauffant. Le transfert de chaleur entre le milieu chauffant et l'aliment sera rapide s'il se fait par convection (produits liquides peu visqueux ; Figure 5 A_1), lent s'il se fait par conduction (viandes, poissons ; Figure 5 A_3) et intermédiaire dans le cas de produits solides dispersés dans une phase aqueuse (plats en sauce, petits pois, lentilles, etc. ; Figure 5 A_2).

La mesure de l'évolution de la température dans une boîte au cours de son chauffage est réalisable par des thermocouples que l'on introduit au point (point critique) de la boîte qui s'échauffe le plus lentement (à cœur dans le cas d'un aliment qui s'échauffe par conduction), l'étanchéité étant assurée par des joints de type presse-étoupe.

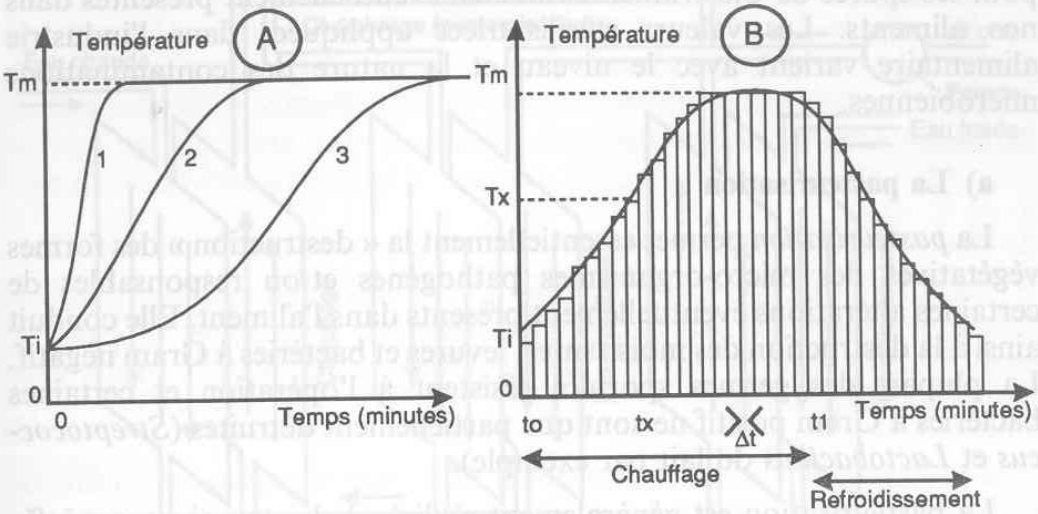


Figure 5

Courbes de pénétration (et de dissipation) de chaleur dans un produit alimentaire en boîte ou en bocal au cours d'un traitement thermique (pasteurisation ou stérilisation).
A – Pénétrations de chaleur par convection (1), par conduction (3) et par conduction et convection simultanées (2).
B – Mode de calcul de la valeur stérilisatrice.
(T_i : température initiale du produit, T_m : température du milieu chauffant, T_x : température du produit au temps t_x, t_o : début du chauffage, Δt : intervalle de temps entre deux mesures, t_1 : début du refroidissement.)

Il apparaît donc que pour calculer une valeur stérilisatrice ou pasteurisatrice, il faut tenir compte au temps t_x correspondant à la température T_x de la contribution du couple $t_x - T_x$. Dans ces conditions, et en toute rigueur il faut alors calculer l'intégrale :

$$F = \int_{t_0}^{t_1} 10^{\frac{T_x - 250}{z}} .dt$$

Dans la pratique, on « découpe » la courbe de pénétration de chaleur en des Δt de l'ordre d'une dizaine de secondes (Figure 4B). On calcule alors à t_o puis à $t_o + \Delta t$ puis $t_o + 2\,\Delta t$, etc. les valeurs correspondantes de F. La valeur stérilisatrice (ou pasteurisatrice) correspondante au traitement est obtenue par la somme de ces valeurs. Il faut signaler que certains produits se refroidissent lentement, et il est alors nécessaire de tenir compte, pour le calcul, de la contribution au traitement thermique de cette phase.

Une valeur stérilisatrice d'environ 3 permet d'assurer une réduction pour les spores de *Clostridium botulinum* éventuellement présentes dans nos aliments. Les valeurs stérilisatrices appliquées dans l'industrie alimentaire varient avec le niveau et la nature des contaminations microbiennes.

a) La pasteurisation

La *pasteurisation* permet essentiellement la « destruction » des formes végétatives des micro-organismes pathogènes et/ou responsables de certaines altérations éventuellement présents dans l'aliment. Elle conduit ainsi à la destruction des moisissures, levures et bactéries à Gram négatif. La plupart des germes sporulés résistent à l'opération et certaines bactéries à Gram positif ne sont que partiellement détruites (*Streptococcus* et *Lactobacillus* du lait par exemple).

La pasteurisation est généralement réalisée à des températures inférieures à 100°C et pratiquée sur des produits relativement sensibles à la chaleur (jambon, jus de fruits, lait, beurre, foie gras, etc.). Certains micro-organismes ne sont pas détruits dans ces conditions, ce qui fait classer les produits pasteurisés, sauf les aliments acides, dans la catégorie des *semi-conserves,* leur conservation étant assurée par réfrigération ou par congélation. Les couples temps-température permettant de pasteuriser les aliments varient entre 30 min. à 65°C (lait, boissons fruitées, crèmes glacées) et 1 h à 90°C (aliments à moyenne ou faible teneur en eau). Comme cela a été précisé dans le chapitre « Microbiologie alimentaire », il existe des couples temps-température qui aboutissent, quant à leurs effets sur les micro-organismes, aux mêmes résultats (par exemple, les couples 30 min. − 65°C et 15 sec. − 72°C).

Du point de vue technologique, la pasteurisation peut être effectuée soit sur des produits préalablement emballés (bouteilles en verre, boîtes de conserve en fer blanc ou en aluminium, emballages plastiques thermostables) soit sur des produits en « vrac » souvent liquides. Par ailleurs, elle peut être réalisée en discontinu ou en continu. Les calories nécessaires au chauffage sont apportées soit par l'eau, soit par la vapeur, soit produites par micro-ondes.

A titre d'exemple, le pasteurisateur à plaques généralement utilisé avec des liquides (lait, jus de fruits, etc.) fonctionne sur le principe suivant : le produit est envoyé, au moyen d'une pompe, dans une section de préchauffage. A ce niveau, il circule entre deux plaques à co-courant du lait qui vient d'être pasteurisé ce qui permet son préchauffage et donc une économie d'énergie. Il pénètre alors dans une section de chauffage où il circule à contre-courant d'eau chaude dont la température est ajustée pour permettre au lait d'atteindre la température de pasteurisa-

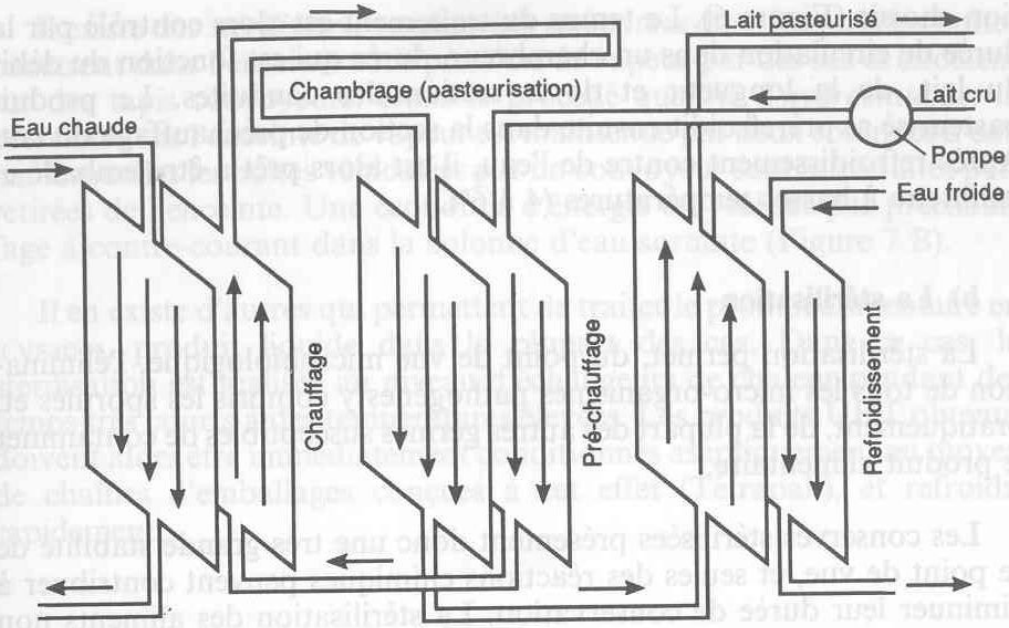


Figure 6

Schéma d'un pasteurisateur en continu à plaques.

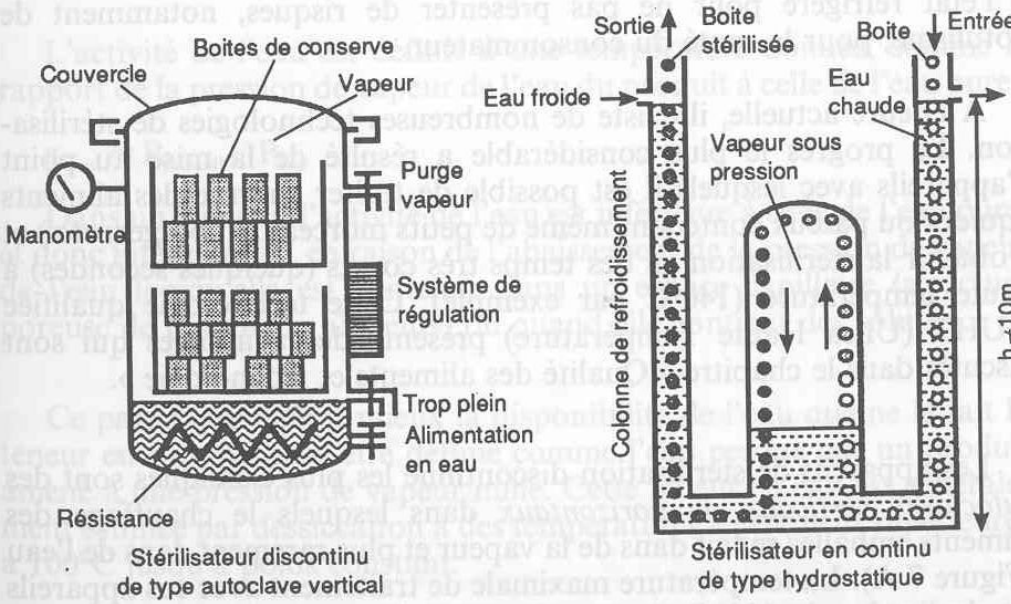


Figure 7

Schémas de stérilisateurs.

A – Stérilisateur discontinu de type autoclave vertical.
B – Stérilisateur en continu de type hydrostatique.

tion choisie (Figure 6). Le temps du traitement est alors contrôlé par la durée de circulation dans un chambreur, durée qui est fonction du débit du lait, de la longueur et de la section des conduites. Le produit pasteurisé se prérefroidit ensuite dans la section de préchauffage du lait. Après refroidissement contre de l'eau, il est alors prêt à être emballé et maintenu à basses températures (4 à 6°C).

b) La stérilisation

La stérilisation permet, du point de vue microbiologique, l'élimination de tous les micro-organismes pathogènes y compris les sporulés et, pratiquement, de la plupart des autres germes susceptibles de contaminer le produit alimentaire.

Les conserves stérilisées présentent donc une très grande stabilité de ce point de vue, et seules des réactions chimiques peuvent contribuer à diminuer leur durée de conservation. La stérilisation des aliments non acides, de pH supérieur ou égal à 4,5, ne peut être obtenue que par des traitements à des températures supérieures à 100°C, ce qui nécessite l'emploi d'autoclaves fonctionnant à des pressions supérieures à la pression atmosphérique. C'est pour cette raison que les « conserves ménagères » doivent être considérées, à moins d'avoir été obtenues dans de véritables autoclaves, comme des semi-conserves et donc conservées à l'état réfrigéré pour ne pas présenter de risques, notamment de botulisme, pour la santé du consommateur.

A l'heure actuelle, il existe de nombreuses technologies de stérilisation. Le progrès le plus considérable a résulté de la mise au point d'appareils avec lesquels il est possible de traiter en vrac des aliments liquides ou pâteux contenant même de petits morceaux (potages, etc.) et d'obtenir la stérilisation en des temps très courts (quelques secondes) à haute température (140°C par exemple). Cette technologie qualifiée d'UHT (Ultra Haute Température) présente des avantages qui sont discutés dans le chapitre « Qualité des aliments et technologie ».

Les appareils de stérilisation discontinue les plus classiques sont des *autoclaves verticaux ou horizontaux* dans lesquels le chauffage des aliments emballés se fait dans de la vapeur et plus rarement dans de l'eau (Figure 7 A). La température maximale de traitement avec ces appareils est de l'ordre de 130°C. Les paniers métalliques contenant les boîtes peuvent être animés d'un mouvement de rotation pour agiter le contenu des boîtes et pour homogénéiser le chauffage. L'air doit toujours être éliminé (purge vapeur, Figure 7 A) de l'enceinte pour que la pression de vapeur atteinte corresponde à la température.

Il existe des *stérilisateurs industriels en continu* dans lesquels les boîtes pénètrent dans l'enceinte sous pression de vapeur par des sas et circulent sur des tapis convoyeurs. Dans le procédé qualifié d'*hydrostatique,* la pression dans l'enceinte de vapeur est maintenue par deux colonnes d'eau par lesquelles les boîtes véhiculées par un convoyeur sont introduites puis retirées de l'enceinte. Une économie d'énergie est réalisée par préchauffage à contre-courant dans la colonne d'eau sortante (Figure 7 B).

Il en existe d'autres qui permettent de traiter le produit alimentaire en « vrac », produit liquide dans la plupart des cas. Dans ce cas, la stérilisation est réalisée au niveau d'échangeurs de chaleur pendant des temps très courts à des températures élevées. Les produits UHT obtenus doivent alors être immédiatement conditionnés aseptiquement au moyen de chaînes d'emballages conçues à cet effet (Tétrapak), et refroidis rapidement.

Diminution de l'activité de l'eau

1) Notion d'activité de l'eau (a_{eau})

L'activité de l'eau est définie à une température donnée, comme le rapport de la pression de vapeur de l'eau du produit à celle de l'eau pure :

$$a_{eau} = P_{produit} / P_{eau}$$

Dans un aliment, l'activité de l'eau est inférieure à celle de l'eau pure, et donc inférieure à 1 en raison de l'abaissement de la pression de vapeur de l'eau lorsqu'elle est contenue dans un espace capillaire (structure poreuse de nombreux aliments) ou quand elle contient des solutés.

Ce paramètre définit mieux la disponibilité de l'eau que ne le fait la teneur en eau qui peut être définie comme l'eau perdue par un produit amené à une pression de vapeur nulle. Cette teneur en eau est généralement estimée par dessiccation à des températures légèrement supérieures à 100°C jusqu'à poids constant.

L'eau est nécessaire à la vie et à la croissance de micro-organismes et permet certaines réactions chimiques ou biochimiques. La vitesse de la plupart des réactions de détérioration des aliments et de la croissance des micro-organismes dépend donc de la « disponibilité » physico-chimique de l'eau.

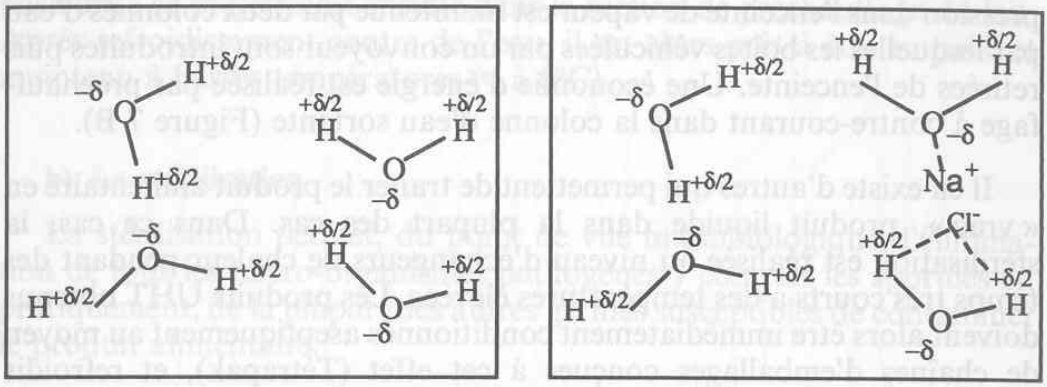


Figure 8

Représentation très schématique des notions de teneur en eau et d'activité de l'eau.

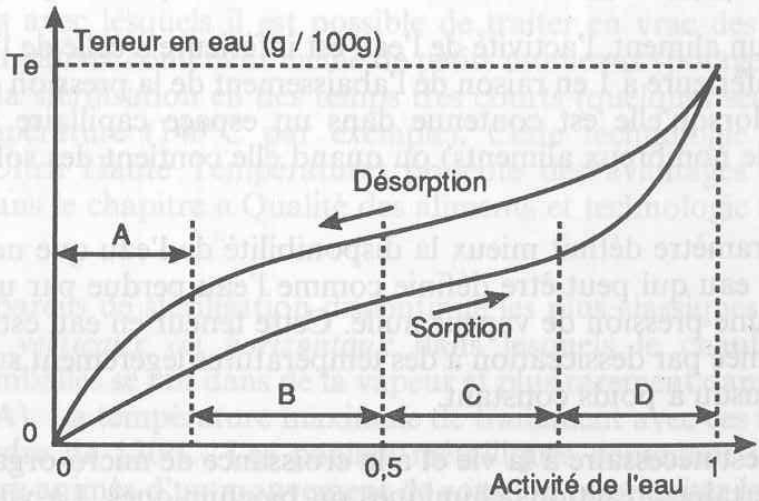


Figure 9

Courbes de sorption/désorption d'un aliment à une température donnée.

La Figure 8 est une représentation très schématique d'un milieu imaginaire qui permet de mieux appréhender la différence existant entre teneur et activité de l'eau. Si on suppose que la limite des carrés dessinés correspond à un volume donné contenant 4 molécules d'eau, il apparaît que A et B possèdent la même teneur en eau. Toutes les molécules d'eau étant libres, donc disponibles en A, l'activité de l'eau est égale à 1. En raison de l'électronégativité de l'atome d'oxygène, la molécule d'eau porte des charges électriques partielles qui sont notées $-\delta$ pour O et $+\delta/2$ pour H. Le « volume » B contenant une molécule ionique de chlorure de sodium, il se produit des liaisons ioniques entre Na^+ et $O^-\delta$ et entre Cl^- et $H^+\delta/2$. De ce fait, 2 molécules d'eau sont immobilisées par ces ions et l'activité de l'eau résulte de la présence des 2 molécules d'eau encore « libres » ; elle sera égale à 0,5.

Les principales propriétés liées à la notion d'activité de l'eau sont les suivantes :

1) La relation entre l'humidité relative de l'atmosphère au-dessus d'un aliment et son a_{eau} est la suivante :

$$HR\ \% = a_{eau} \times 100$$

Ainsi, un produit d'a_{eau} donnée placé dans une « volumineuse » atmosphère d'humidité relative élevée s'hydratera et inversement. Au contraire, pour un petit volume d'air en équilibre avec le produit, c'est le produit qui imposera l'humidité relative, et cette valeur d'humidité relative donnera une bonne estimation de l'activité de l'eau du produit.

2) Plus un produit alimentaire contient de solutés qui donnent avec l'eau des liaisons ioniques (sels) ou hydrogène (glucides) et plus son a_{eau} est faible. La valeur de $P_{produit}$ est donnée, dans le cas de solutions diluées, par la loi de Raoult : $P_{produit} = X . P_{eau}$ (X est la fraction molaire c'est-à-dire le nombre de moles de soluté / nombre total de moles du milieu). Plus un produit contient de solutés et plus son a_{eau} est faible (tableau 2). En pratique, la plupart des solutés abaissent l'activité de l'eau plus que ne le laisse prévoir la loi de Raoult.

3) La relation graphique d'équilibre reliant la teneur en eau et l'a_{eau} est qualifiée d'isotherme de sorption-désorption (Figure 9). Pour une même a_{eau}, la teneur en eau est plus élevée si l'équilibre est atteint par désorption (déshydratation progressive) qu'en sorption (hydratation progressive) ; l'écart peut atteindre 5 %.

Des modèles ont été proposés pour interpréter ces phénomènes ; celui de Brunauer, Emmet, Teller (isotherme BET) est le plus connu.

Tableau 2

Valeurs de l'activité de l'eau à 25°C pour un certain nombre de produits
(ou par mélange de x grammes de soluté à 100 ml d'eau).

	a_{eau}	g soluté dans 100 ml d'eau
Eau pure à 20°C	1	
Eau à 0°C	1	
Glace à −20°C	0,82	
Glace à −40°C	0,68	
Saccharose	0,95	80
	0,90	140
	0,85	205
Chlorure de sodium	0,90	30
	0,80	51
Solutions saturées de		
$MgCl_2$	0,33	
KI	0,67	
NaCl	0,75	
$BaCl_2$	0,90	
Légumes, fruits	0,97	
Œufs, viande	0,96	
Pain, fromages, confitures	0,82-0,94	
Fruits séchés	0,75	
Biscuits secs	0,60	

La partie A de ces courbes correspond à une eau *fortement liée* (couche monomoléculaire fixée sur les groupements polaires de certains composés, eau de cristallisation). Elle correspond à des intervalles de teneur en eau et d'a_{eau} respectivement compris entre 0 et 8 g (pour 100 g de poids sec) et entre 0 et 0,2.

La partie B correspond à de l'*eau liée* généralement par des liaisons faibles (liaisons hydrogène) à des composants de l'aliment. Elle représente de 12 à 35 g pour 100 g de poids sec. L'eau liée et l'eau fortement liée sont difficilement congelables.

La section C caractérise l'*eau faiblement liée* et représente de 25 à 40 g pour 100 g de poids sec.

La section D caractérise l'*eau libre* (eau des espaces intra ou intercellulaires).

Ces isothermes permettent de prévoir le comportement de l'aliment au cours de l'entreposage ou de la déshydratation, mais aussi de calculer les isothermes à d'autres températures.

4) La stabilité potentielle des denrées alimentaires est fonction de leur a_{eau} (figure 10). Ainsi les vitesses d'oxydation des lipides sont faibles

pour 0,15 < a_{eau} < 0,5 et élevées à faibles a_{eau} et aux environs d'a_{eau} 0,8. La vitesse de la plupart des réactions enzymatiques diminue quand l'a_{eau} diminue, la vitesse de brunissement non enzymatique passe par un maximum pour une a_{eau} voisine de 0,7, puis diminue ensuite avec l'a_{eau}. L'action de l'eau sur les micro-organismes est discutée dans le chapitre « Microbiologie alimentaire ».

Il apparaît donc qu'une stabilisation d'une denrée alimentaire peut être obtenue par ajustement de son activité de l'eau à des valeurs pour lesquelles certaines réactions de détérioration seront minimisées voire annulées. Pour atteindre ce but, il existe deux principales approches. La première consiste à déshydrater l'aliment (séchage) par des méthodes physiques ou chimiques, la deuxième consiste à ajouter des solutés dans le produit (sel, sucre, etc.) ou à concentrer le produit.

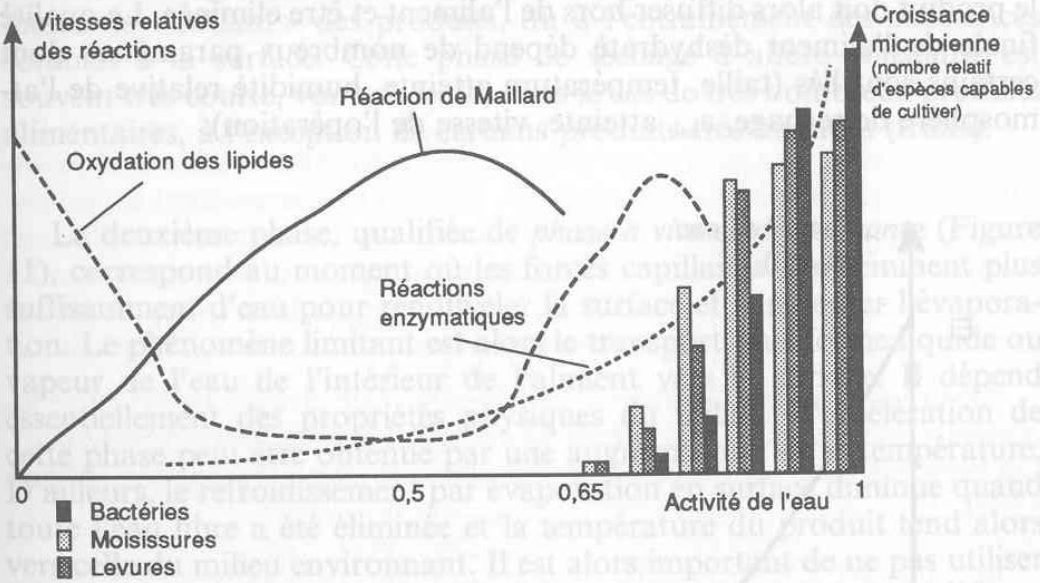


Figure 10

Variations des vitesses relatives de quelques réactions de détérioriations de nos aliments et du nombre relatif d'espèces de micro-organismes capables de cultiver en fonction de l'activité de l'eau.

2) *Le séchage*

Il s'agit d'une des plus anciennes méthodes de conservation des denrées alimentaires. D'abord pratiqué au soleil et en plein air, puis dans des enceintes chauffées au feu de bois, il permet de conserver fruits, viandes, poissons et grains beaucoup plus longtemps que s'ils étaient restés en leur état hydraté initial.

Actuellement, la déshydratation apporte d'autres avantages parmi lesquels on peut citer la commodité d'utilisation.

Au cours du séchage thermique d'un produit alimentaire, la presque totalité de l'eau est éliminée par vaporisation ou sublimation. Parmi les produits actuels et d'usage courant issus de cette technologie, le lait et le café en poudre, les pommes de terre en flocons, certains fruits et légumes sont à signaler.

a) Principe du séchage thermique

Du point de vue théorique, les phénomènes mis en jeu sont complexes. Très schématiquement, il faut, pour réaliser le séchage, éliminer sous forme de vapeur l'eau contenue dans le produit. Pour cela, il faut fournir de la chaleur au système. Il est possible d'abaisser la température de vaporisation en diminuant la pression (vide). La vapeur formée dans le produit doit alors diffuser hors de l'aliment et être éliminée. La qualité finale de l'aliment déshydraté dépend de nombreux paramètres dont certains sont liés (taille, température atteinte, humidité relative de l'atmosphère de séchage, a_{eau} atteinte, vitesse de l'opération).

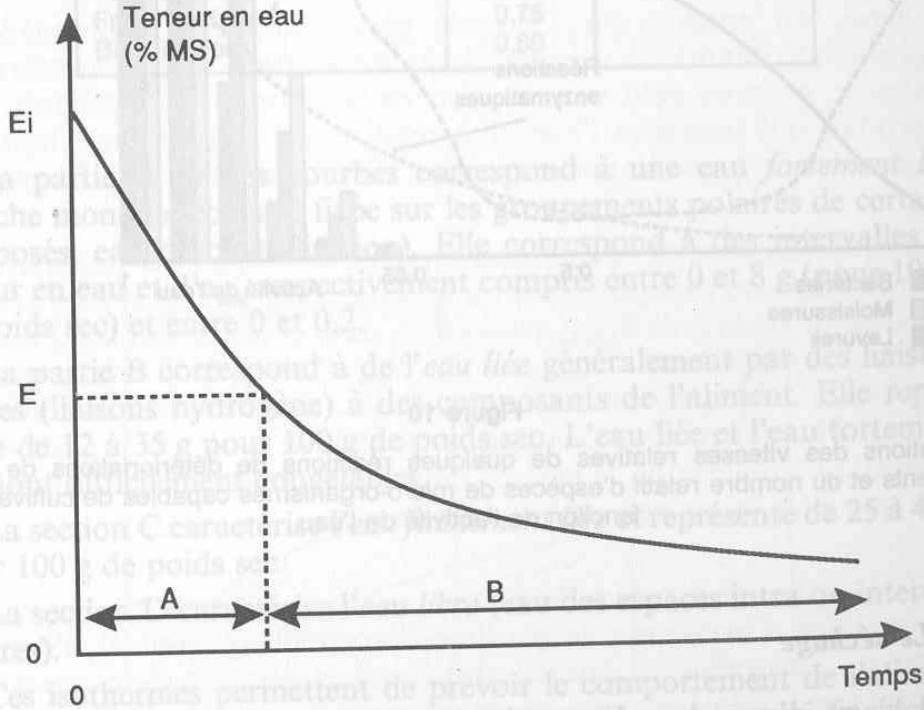


Figure 11

Variations de la teneur en eau d'un produit alimentaire au cours de son séchage. (Ei : teneur initiale en eau, A : phase à allure constante, B : 2e phase à allure décroissante).

Au cours du séchage d'un produit, il apparaît généralement deux phases. La première qualifiée de *phase à vitesse constante* correspond à l'évaporation de l'eau à la surface qui est constamment renouvelée par transport interne et se traduit par une variation linéaire de la teneur en eau en fonction du temps (Figure 11). La surface du produit se trouve, pendant cette phase, à une température (température du thermomètre humide) constante, très inférieure à celle de l'air du fait de la vaporisation qui consomme de l'énergie (chaleur latente de vaporisation). Par exemple, avec un air sec aux environs de 200°C, la température de surface du produit sera inférieure à 50°C. On peut accroître la vitesse de cette phase en diminuant la couche limite thermique et massique, c'est-à-dire en augmentant la vitesse de l'air de séchage, sa température, ou en diminuant son humidité. Cependant, une vitesse trop grande risque d'induire, pour certaines denrées, un croûtage de surface (viandes, poissons). Dans certains cas, légumes notamment, ce croûtage peut être recherché afin de limiter le « collant » des produits, dû à l'entraînement des substances solubles à la surface. Cette phase de séchage à allure constante est souvent très courte, voire absente, dans le cas de très nombreux produits alimentaires, à l'exception de certains produits très humides (fruits).

La deuxième phase, qualifiée de *phase à vitesse décroissante* (Figure 11), correspond au moment où les forces capillaires n'acheminent plus suffisamment d'eau pour renouveler la surface et compenser l'évaporation. Le phénomène limitant est alors le transport sous forme liquide ou vapeur de l'eau de l'intérieur de l'aliment vers la surface. Il dépend essentiellement des propriétés physiques du milieu. L'accélération de cette phase peut être obtenue par une augmentation de la température. D'ailleurs, le refroidissement par évaporation en surface diminue quand toute l'eau libre a été éliminée et la température du produit tend alors vers celle du milieu environnant. Il est alors important de ne pas utiliser des airs trop chauds qui risqueraient de provoquer des réactions défavorables.

b) Qualité des produits déshydratés

La diminution de volume liée à la déshydratation provoque des déformations et/ou affaissements qui sont moins intenses quand la vitesse initiale de séchage est élevée. Par ailleurs, des réactions de brunissement non enzymatiques peuvent se produire à température élevée si l'activité de l'eau transitoire correspond au maximum de vitesse de ces réactions. Généralement, ce procédé de conservation s'accompagne de la perte partielle de certains arômes, d'une diminution de la capacité de rétention d'eau par dénaturation des protéines, parfois d'une diminution de solubilité et, avec certaines technologies, d'une destruction

partielle de certaines vitamines (A, C) et pigments. La déshydratation, bien adaptée à certains produits, convient moins bien à d'autres.

c) Technologies de séchage

Il existe actuellement de nombreux types d'appareils de séchage dans l'industrie alimentaire ; ils peuvent être classés en fonction du milieu déshydratant utilisé.

1) Séchage par de l'air chaud

Le séchage par exposition au soleil en milieu aéré en est l'exemple le plus ancien. De nos jours, de nombreux modèles de *sécheurs solaires* ont été conçus ; ils permettent de « capter » l'énergie calorifique du soleil et par un jeu judicieux de circulation d'air, d'éliminer l'eau du produit.

Les *fours à air chaud* (à gaz ou électrique), ventilés ou non, permettent le séchage de produits solides (comme les fourrages), ou de certains fruits (Figure 12 A).

Dans les *tunnels de séchage* (Figure 12 C), l'air chaud circule à des vitesses de plusieurs mètres par seconde et les produits solides sont placés sur des supports métalliques perforés. Des vannes permettent la circulation de l'air avec ou sans recyclage. Il existe des tunnels industriels dans lesquels les denrées à traiter se déplacent sur des chariots ou des bandes transporteuses. Le séchage se produit au cours de leur temps de séjour dans le système. Des sas permettent l'entrée et la sortie des chariots.

Dans les *sécheurs à plateaux métalliques,* l'air chaud circule entre les plateaux qui peuvent, dans certains systèmes être chauffés directement. Un recyclage de l'air est également possible avec un tel système (Figure 12 B).

Il existe des *sécheurs à lit fluidisé* dont le principe est le même que celui des congélateurs à lit fluidisé, l'échangeur de froid étant remplacé par des résistances chauffantes (voir Figure 3).

Le *séchage par atomisation* permet de sécher les produits liquides en continu (Figure 12 E). Dans cette technologie, l'aliment liquide est envoyé au moyen d'une pompe dans une buse ou dans une turbine dont la vitesse de rotation est de l'ordre de 20 000 tours par minute. A ce niveau il est pulvérisé en fines gouttelettes qui sont alors soumises à un flux puissant d'air chaud (entre 150 et 190°C). Du fait de leur petite taille et donc de leur surface d'échange importante, l'évaporation de l'eau de ces gouttelettes est très rapide (quelques secondes) et le produit ne s'échauffe pas beaucoup (entre 40 et 60°C). Le produit séché est alors récupéré au moyen d'un séparateur cyclone. Dans certaines industries la hauteur de ces tours atteint parfois plus de 50 m. Dans certains systèmes

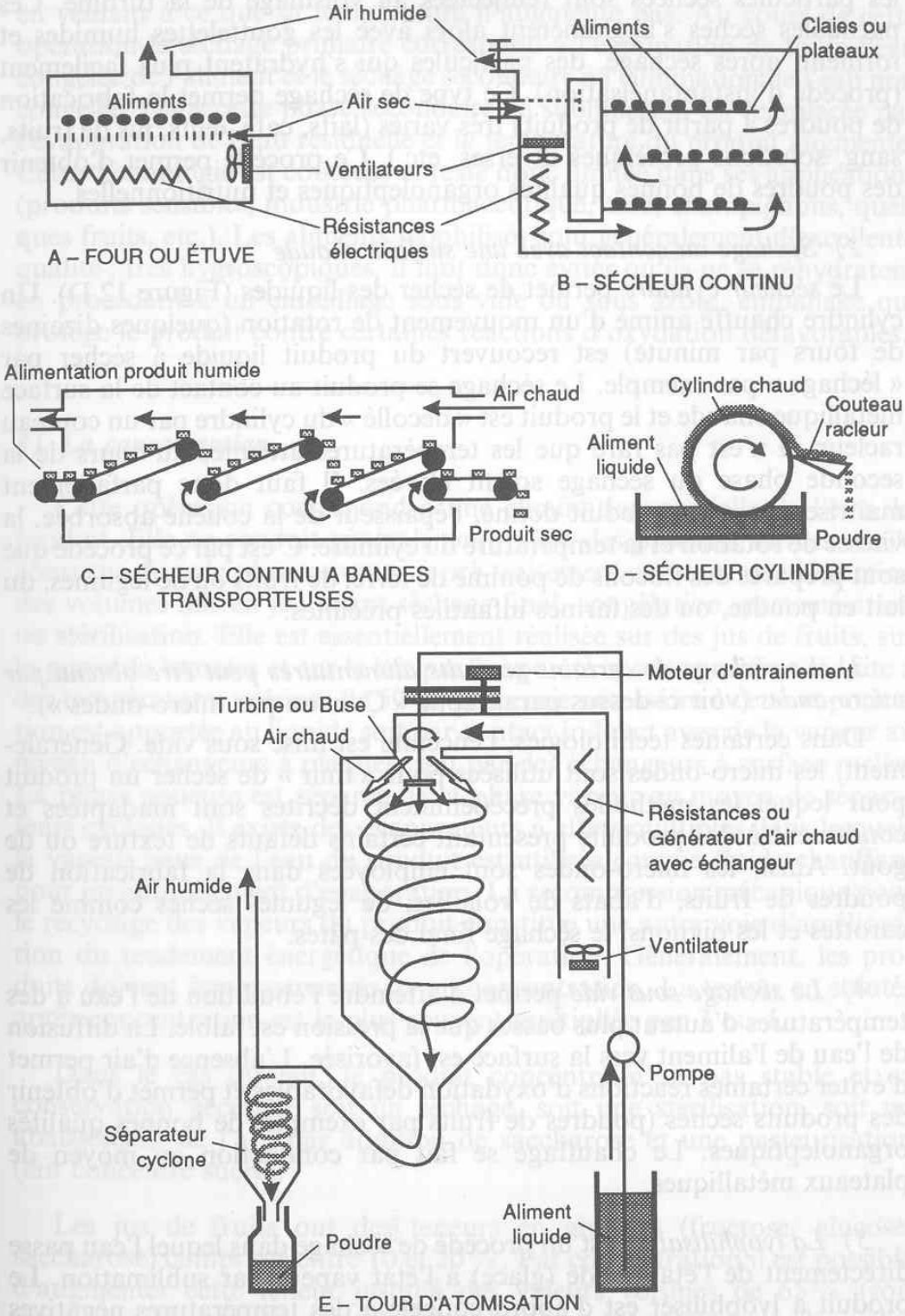


Figure 12

Schémas de quelques sécheurs industriels.

La concentration des jus est réalisable par congélation (cryoconcentration) ; en effet, une congélation lente aboutit à la formation de gros cristaux de glace qu'il est alors possible d'éliminer par pressage ou centrifugation. La glace étant constituée d'eau pure, il se produit donc une concentration du jus dont le degré Brix peut atteindre 65°. Dans ces conditions les composés aromatiques volatils sont retenus dans le concentré.

La concentration par ultrafiltration permet de retenir dans le rétentat les molécules de masse molaire élevée, les solutés de faible masse molaire se retrouvant dans le perméat. Il s'agit donc d'abord d'un procédé de fractionnement.

4) La déshydratation osmotique

Dans ce procédé, le produit solide est immergé dans une solution de pression osmotique élevée. Le plus souvent, il s'agit de solutions de saccharose ou de mélanges de sucres dont la concentration peut atteindre 75° Brix (75 %). En raison de la différence très importante de pression osmotique, il se produit un transfert d'eau du produit vers le milieu sucré et un transfert inverse de sucre. Ce mode de déshydratation est surtout utilisé pour des fruits et selon la quantité de sucre qui pénètre, les produits obtenus sont qualifiés de confits.

L'intensité de ces transferts peut être maîtrisée en agissant sur le temps, la température, le degré Brix, la taille des échantillons et sur la nature du soluté présent dans le bain. Avec des composés dont la masse molaire est plus élevée que celle du saccharose (maltotriose, etc.) la diffusion de l'eau hors du produit se fait bien tandis que la pénétration de soluté est minime.

L'immersion de denrées alimentaires dans un milieu très salé (saumure) se traduit par une déshydratation et une pénétration de sel.

5) Addition de solutés

L'abaissement de l'activité de l'eau des produits alimentaires par addition de soluté (chlorure de sodium ou saccharose dans la plupart des cas) permet une stabilisation vis-à-vis des micro-organismes d'autant plus grande que leur teneur finale en soluté sera élevée. Les denrées obtenues subissent de grandes modifications de certaines de leurs propriétés organoleptiques et plus particulièrement du goût. Les salaisons de viandes ou poissons, les pâtes de fruits et les confitures sont les types mêmes d'aliments conservés par addition de solutés (voir chapitres correspondants).

Le saumurage est un procédé de conservation dans lequel l'aliment est immergé dans une solution saline concentrée (18 à 20 %). Pour certains produits solides, cette opération est réalisée au moins partiellement par injection dans la masse.

Tableau 3

Valeurs du pH pour quelques produits alimentaires.

Aliment	pH	Aliment	pH
bœuf	5,1-6,2	choux de Bruxelles	6,3
canard	6,0-6,1	concombre	2,6-3,8
crabe	7,0-7,1	épinard	4,8-6,0
crevette	6,8-7,0	haricot	4,8-5,5
huître	4,8-6,3	haricot vert	4,9-5,5
jambon	5,9-6,1	laitue	6,0-6,2
maquereau	5,9-6,2	maïs	6,1-7,0
morue	6,0-6,2	navet	5,2-5,5
poissons (en général)	6,6-6,8	oignon	5,3-5,8
poissons blancs	5,5	olive	3,6-3,8
poulet	6,2-6,4	olive mûre	5,9-7,3
sardine	5,7-6,6	persil	5,7-6,0
saucisse (Francfort)	6,2	piment	4,3-4,9
saumon	6,1-6,5	pois	5,6-6,5
veau	6,0-6,2l	pomme de terre	5,4-5,9
		tomate	4,2-4,5
beurre	6,1-6,4		
crème	6,5	airelle	2,3-2,5
fromages	4,5-5,9	ananas	3,5-4,1
lait de vache	6,5-6,8	banane	4,5-4,7
parmesan	5,2	cassis	3,0-3,4
Roquefort	4,7	cerise	3,4-3,6
		citron	2,2-2,6
hachis	5,5-6,2	datte	6,2-6,4
porc + haricots	5,1-5,8		
soupe de champignon	6,3-6,7	figue	4,6-5,0
soupe de haricots	5,1-5,8	melon	5,2-5,6
soupe de poulet	5,5-6,5	mûre	3,0-4,2
soupe de viande	6,0-6,2	myrtille	3,2-3,6
		orange	3,0-4,3
asperge	5,0-6,1	pamplemousse	3,2-3,4
betterave	4,2-5,8	pêche	3,4-4,2
carotte	4,9-5,6	poire	3,8-4,6
céleri	5,7-6,0	pomme	2,9-3,5
champignon	6,0-6,5	prune	2,8-3,0
choux	5,4-6,0	raisin	3,5-4,5

Au cours de ces dernières années, de nouveaux aliments qualifiés d'*aliments à humidité intermédiaire* (AHI) ont été conçus. Il s'agit d'aliments solides ou pâteux dans lesquels l'a_{eau} est ajustée à une valeur très légèrement inférieure à 0,84. A cette valeur de l'a_{eau} aucune bactérie pathogène ne pouvant cultiver, la qualité hygiénique de ces AHI sera toujours satisfaisante si une association avec un traitement complémentaire d'acidification, de pasteurisation, de réfrigération et/ou d'emballage en absence d'oxygène est pratiquée.

Ces produits peuvent permettre la croissance de levures, moisissures et de quelques bactéries osmophiles. Leur emballage en absence d'oxygène (sous vide ou sous azote) réduira aux seuls germes anaérobies cette possibilité. De plus, s'ils sont conservés aux environs de 4-6°C, leur durée de conservation sera importante, même après ouverture de l'emballage. En général, ces AHI ne nécessitent pas de traitements thermiques, ce qui permet d'éviter leurs éventuels effets défavorables. Les solutés introduits dans ces AHI sont variés (glycérol, sel, saccharose, sorbitol, glucose, acides aminés, etc.) et souvent utilisés simultanément, les qualités organoleptiques n'étant pas trop modifiées dans ces conditions.

Effets du pH

L'addition d'acides organiques (acides acétique, citrique, lactique) à une denrée alimentaire se traduit par une diminution de son pH dont l'effet sur la croissance des micro-organismes est analysée dans le chapitre « Microbiologie alimentaire ». Le pH de certains produits alimentaires et indiqué dans le Tableau 3.

Il est bon de rappeler ici que par rapport à ce paramètre, nos aliments sont classés en deux groupes : ceux dont le pH est inférieur à 4,5 et ceux dont le pH est supérieur à 4,5 dans lesquels les risques microbiologiques sont beaucoup plus grands (risques de croissance de *Clostridium botulinum*).

Effets du potentiel d'oxydo-réduction

Le potentiel d'oxydo-réduction d'un aliment s'exprime en volts et est donné par la formule de Nernst :

$$E = E_0 + (RT/nf) \cdot \log [ox] / [réd]$$

avec R : constante, T : température absolue, n : nombre d'électrons

échangés, f : Faraday, [ox] et [réd] : concentrations respectives en oxydants et réducteurs.

Il est bon de rappeler ici qu'un oxydant est une molécule capable de capter des électrons et un réducteur une molécule capable d'en donner.

Dans nos aliments ce potentiel varie essentiellement en fonction de la teneur en oxygène et de la concentration en substances réductrices (acide ascorbique, glucose, cystéine, polyphénols, etc.). Un milieu alimentaire dans lequel la quantité d'oxygène est importante a, généralement, une valeur positive de ce potentiel (par exemple + 500 mV).

Pour améliorer la conservation des denrées alimentaires, il est souvent nécessaire d'abaisser le potentiel d'oxydo-réduction. Ainsi, l'élimination plus ou moins importante de l'oxygène diminue la vitesse de toutes les réactions d'oxydation dans lesquelles il est impliqué (oxydation des lipides, destruction de vitamines, de pigments, etc.) et permet d'inhiber la croissance des micro-organismes aérobies stricts. Cette diminution du potentiel d'oxydo-réduction peut s'effectuer par mise sous vide ou sous gaz inerte, mais aussi par addition d'anti-oxydants qui, pour la plupart, sont des substances réductrices (voir le chapitre « Additifs alimentaires »).

L'irradiation

L'irradiation X ou γ est utilisée depuis plus de 25 ans pour stériliser du matériel médico-chirurgical ou des emballages et matières premières employées dans les industries pharmaceutiques ou en cosmétologie. Ses premières applications importantes en industries agro-alimentaires remontent aux années 1980.

1) Les rayonnements ionisants

Il s'agit de rayonnements électromagnétiques, de même nature que les rayonnements infra-rouges ou visibles, dont l'énergie est suffisamment élevée pour éliminer des électrons des couches périphériques des atomes et molécules, ce qui conduit à la formation d'ions (d'où le terme ionisation). Cette énergie proportionnelle à la fréquence du rayonnement ou inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la radiation est donnée par la relation :

$w = h\nu = hc / \lambda$ dans laquelle h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide, ν la fréquence et λ la longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde sera petite et plus l'énergie mise en jeu sera élevée. Les longueurs d'onde de radiations électromagnétiques sont indiquées ci-dessous :

– infra-rouge	>	800 nm
– visible		400 - 800 nm
– ultra-violet		10 - 400 nm
– rayons X		0,1 - 10 nm
– rayons γ		0,1 - 0,001 nm
– rayons cosmiques	<	0,001 nm

En raison de leur énergie relativement faible, les rayonnements ultra-violets ne sont que faiblement ionisants. Par contre, les rayons X et surtout γ, d'énergie élevée, sont qualifiés de rayonnements *ionisants.* Cependant, leur énergie ne leur permet pas d'atteindre le noyau des atomes : ces rayonnements ne sont pas *activants.*

L'*irradiation* est un terme générique très vague qui couvre la gamme des longueurs d'onde allant de l'infra-rouge aux rayons cosmiques. L'*irradiation ionisante* résulte donc de l'utilisation de rayonnements UV mais surtout X et γ et n'a rien de commun avec la *radioactivité.* En effet, la radioactivité résulte d'une instabilité des noyaux de certains éléments qui émettent spontanément des photons (radiations électromagnétiques) et/ou des particules (électrons, neutrons, particules α, etc.). La *contamination radioactive* résulte d'un dépôt d'isotopes radioactifs sous forme de poussière ou de liquide sur un produit non radioactif.

Une des propriétés les plus intéressantes des rayonnements X et γ est que leur application à un produit donné ne provoque qu'une très légère élévation de température.

2) *Les unités*

– L'*activité* ou *puissance* des sources de rayonnements s'exprime en Curie (Ci). Le *Curie* est le nombre de désintégrations qui se produit par seconde dans 1 g de radium, soit environ $3{,}7.10^{10}$ désintégrations par seconde. L'énergie des radiations émises dépend de la source ; ainsi, 1 Ci de ^{60}Co correspond à 15 mW, ce qui permet de traiter environ 10 kg de produits agro-alimentaires. Le Becquerel (Bq) est l'unité officielle d'activité et correspond à 1 désintégration par seconde.

Dans le cas où l'ionisation est obtenue par des particules accélérées à très grandes vitesses, la puissance est exprimée en kW.

– Les doses s'expriment en Gray (Gy) et correspondent à une énergie par unité de poids (1 Gy = 1 J/kg). La dose à appliquer dépend du but recherché (tableau 4).

– Le débit de dose correspond à la vitesse avec laquelle on délivre la dose ; il s'exprime en Gray par unité de temps.

Tableau 4

Doses d'irradiation à appliquer en fonction de l'effet recherché.

Traitement recherché	Doses en kGy
Inhibition de la germination des bulbes et tubercules	0,04 - 0,1
Inhibition de la reproduction des insectes	0,03 -,0,2
Mort des insectes (désinsectisation)	1 - 3
Radicidation*	1 - 4
Radurisation**	1 - 6
Radappertisation***	15 - 50
Inactivation des virus	20
Inactivation d'enzymes	60

* La radicidation correspond à l'élimination des germes pathogènes.
** La radurisation correspond à l'élimination des micro-organismes responsables de réactions de détériorations.
*** La radappertisation correspond à une stérilisation.

3) Les générateurs

Les sources de radiations ionisantes utilisées actuellement sont :

– des *isotopes* comme le cobalt 60 (^{60}Co) ou le césium 137 (^{137}Cs) qui sont des émetteurs γ. Le ^{60}Co est, en l'état actuel de la technologie, le plus utilisé ; il est fabriqué en 5 à 10 mois dans des réacteurs à partir de ^{59}Co. Le ^{60}Co est radioactif et émet un rayonnement β^- peu énergétique (rayonnement d'électrons) et deux rayonnements γ très énergétiques d'environ 1,25 MeV (méga électron volt ; 1 kWh $= 2{,}25.10^{19}$ MeV) qui ne perdent qu'environ 1,6 % de leur énergie dans la traversée de 40 cm d'eau. La *période* du ^{60}Co est d'environ 5 ans, c'est-à-dire qu'il perd en 5 ans la moitié de son activité. Pratiquement, cela signifie que les sources de ^{60}Co seront utilisables une dizaine d'années ; ensuite elles seront éliminées avec les déchets des centrales nucléaires qui sont vitrifiés et stockés. Le ^{60}Co pur a une activité de 1 150 Ci/g ; celui utilisé dans l'industrie est mélangé avec du cobalt ordinaire non radioactif et possède une activité de 30 à 100 Ci/g. Il est usiné en plaquettes ou pastilles qui sont conditionnées dans des doubles enveloppes étanches souvent sous forme de barreaux. Ces sources sont disposées sur des râteliers et forment le générateur-émetteur de rayonnement de l'irradiateur.

5) *Actions sur les micro-organismes*

Les effets des radiations sur les micro-organismes sont fonction de la dose (intensité-temps) de radiations absorbées et sont, dans leur interprétation, à rapprocher des effets de la chaleur (température-temps) décrits plus haut. La cinétique de destruction suit une loi comparable à celle énoncée avec la température. Les doses de réduction décimales en kGy permettant de réduire de 90 % le nombre de germes vivants sont indiquées, pour certains micro-organismes, dans le Tableau 5 et la terminologie liée aux effets recherchés est indiquée dans le Tableau 4.

Tableau 5

Doses de réduction décimale de quelques micro-organismes
(en kGy)

Micro-organisme	Dose
Pseudomonas aeruginosa	0,1
Lactobacillus	0,1-0,2
Escherichia coli	0,15-0,3
Shigella spp	0,25-0,4
Salmonella spp	0,5-1
Streptococcus faecalis	0,75-1
Moraxella	0,8-1,3

Micro-organisme	Dose
Staphylococcus aureus	0,8-1,9
Clostridium botulinum E	1,2-3
spores de *Cl. botulinum*	3,5-5
Micrococcus radiodurans	5-8
Levures	0,8-1,2
Moisissures	0,4-1,3
Poliovirus	14

Aux doses habituelles utilisées pour traiter les produits carnés et de nombreux produits végétaux (2 à 4 kGy) une réduction correspondant à environ 12 D est obtenue pour la plupart des germes pathogènes, ce qui permet un bon assainissement. Par contre, le nombre de spores de *Clostridium botulinum* et des cellules de *Staphylococcus* et *Moraxella* sera insuffisamment réduit et de ce fait les produits seront potentiellement dangereux. La destruction de ces micro-organismes requiert des doses 10 fois plus importantes, soit d'environ de 20 à 50 kGy. Dans ce cas, les altérations apportées à l'aliment sont importantes.

6) *Technologies*

La protection des personnels assurant le fonctionnement des irradiateurs est principalement assurée par des enceintes à parois épaisses et absorbantes des rayonnements (ciment, plomb). La chambre d'irradiation est isolée par des sas et ne doit rester accessible qu'aux produits.

Il existe divers types d'irradiateurs γ qui diffèrent les uns des autres essentiellement par le mode de présentation à la source émettrice (balancelles, palettes, en vrac sur des convoyeurs). L'aliment emballé ou non est véhiculé par des balancelles ou des palettes jusqu'à la chambre d'irradia-

tion contenant la source (voir la Figure 13). Au cours de son passage à proximité de la source, il reçoit une dose qui est fonction de la puissance, de la distance et du temps d'irradiation. Pour éviter que l'irradiation ne se fasse que par un des côtés de la denrée il est procédé à un retournement à la fin du premier passage.

Les irradiateurs γ permettent le traitement de quantités d'aliments importantes (palettes de plusieurs m^3) mais nécessitent des temps de passage relativement importants. Ils sont surtout utilisés pour l'ionisation des fruits et légumes.

Les irradiateurs à faisceaux d'électrons accélérés sont particulièrement bien adaptés au traitement d'aliments présentant une faible épaisseur (5 à 10 cm). Ils autorisent des temps de passage très courts. Ces appareils, qui évitent la manipulation de matériaux radioactifs et qui permettent un meilleur contrôle de l'homogénéité et de la régularité du traitement, sont vraisemblablement appelés à se développer. Ils sont actuellement utilisés pour le traitement de plaques de viandes de volailles congelées, obtenues après séparation mécanique des os, des coffres et des cous.

Les possibilités d'irradiation de nos aliments varient énormément en fonction des pays. En France, cette technologie de conservation est autorisée par exemple sur les pommes de terre, oignons, échalotes et ails à des doses comprises entre 0,075 et 0,15 kGy pour empêcher la germina-

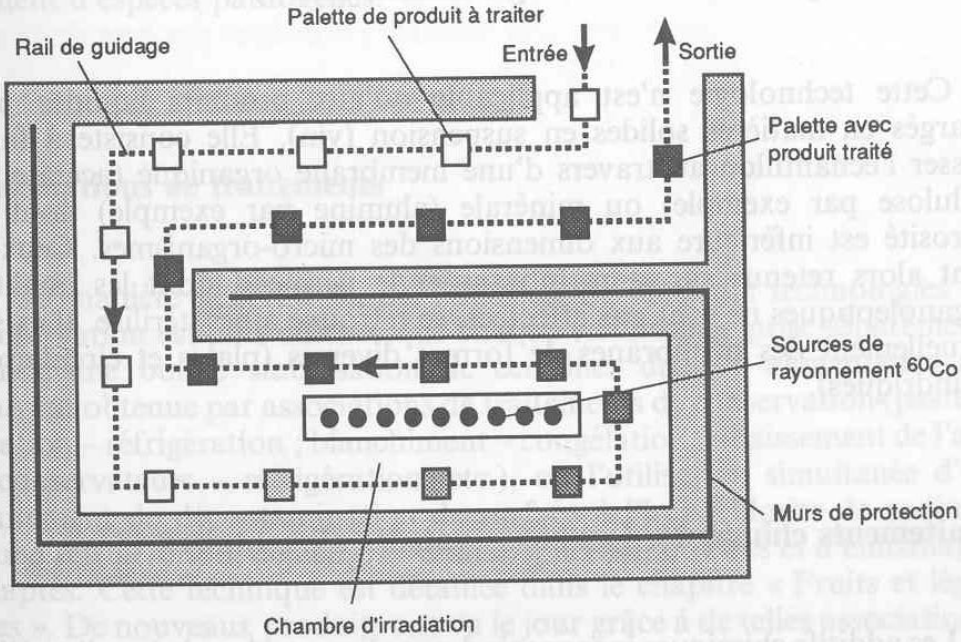


Figure 13
Schéma d'un ionisateur industriel à cobalt 60 (^{60}Co).

tion, pour la radurisation des épices, des légumes déshydratés ou des mélanges de céréales à des doses inférieures à 11 kGy ou par la radicidation (« destruction » des salmonelles) d'aliments congelés, telle que la viande de volaille séparée mécaniquement à des doses inférieures à 10 kGy.

Le principal avantage apporté par cette technologie de conservation réside dans le fait que la température ne varie pas au cours du traitement : il s'agit d'un procédé « à froid ».

Toutes les nombreuses études nutritionnelles et toxicologiques qui ont été réalisées à ce jour n'ont pas permis de mettre en évidence d'effets défavorables aux doses utilisées.

En 1980, un comité d'experts de la FAO (Food and Agricultural Organization) et de l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) a pu conclure que les tests toxicologiques n'étaient plus nécessaires pour prouver l'innocuité des traitements d'ionisation jusqu'à des doses globales de 10 kGy. Cette conclusion a été intégralement ou en partie reprise par des pays comme la France, le Canada ou les Etats-Unis qui ont modifié en conséquence leurs procédures d'autorisation.

La filtration stérilisante
(voir le chapitre « Microbiologie alimentaire »)

Cette technologie n'est applicable qu'aux produits liquides peu chargés en matières solides en suspension (vin). Elle consiste à faire passer l'échantillon au travers d'une membrane organique (acétate de cellulose par exemple) ou minérale (alumine par exemple) dont la porosité est inférieure aux dimensions des micro-organismes. Ceux-ci sont alors retenus sur la membrane et le perméat, dont les qualités organoleptiques ne sont pas affectées, se retrouve ainsi stérilisé. Il existe actuellement des membranes de formes diverses (plates et circulaires, cylindriques).

Traitements chimiques. Les conservateurs alimentaires

Les additifs chimiques incorporés à nos aliments dans le but d'améliorer leur conservation sont relativement peu nombreux. Ils sont généralement spécifiques d'une réaction de détérioration donnée. Il s'agit surtout

d'agents antimicrobiens (par exemple l'acide sorbique et ses sels, les nitrites, l'éthanol et certains gaz comme l'anhydride sulfureux). La description détaillée de leurs propriétés et de leurs effets toxiques éventuels est un des thèmes du chapitre « Toxicologie ».

Stabilisation par voie microbiologique
(voir le chapitre « Microbiologie alimentaire »)

La conservation de certains aliments peut être obtenue par voie microbiologique. Ainsi, les produits fermentés (vin, bière, cidre, yaourt, fromages divers, saucissons, choucroute, etc.) possèdent des teneurs en éthanol ou/et en acides parfois suffisantes pour assurer, du point de vue hygiénique tout au moins, une bonne conservation.

L'association de la fermentation avec d'autres mesures telles que l'abaissement de l'a_{eau} ou la réfrigération est généralement pratiquée.

La présence des micro-organismes « utiles » en nombre très élevé est un facteur limitant dans la croissance d'autres espèces et plus particulièrement d'espèces pathogènes.

Associations de traitements

De manière générale, la combinaison de plusieurs technologies de conservation est plus efficace que chaque technologie prise séparément. Ainsi, une bonne stabilisation de certaines denrées alimentaires est souvent obtenue par associations de traitements de conservation (pasteurisation – réfrigération ; blanchiment – congélation ; abaissement de l'a_{eau} – conservateurs – réfrigération, etc.), ou l'utilisation simultanée d'un traitement de décontamination de surface à l'hypochlorite de sodium, d'une réfrigération, de l'emploi d'atmosphères modifiées et d'emballages adaptés. Cette technique est détaillée dans le chapitre « Fruits et légumes ». De nouveaux produits ont vu le jour grâce à de telles associations. Par exemple les produits de 4e gamme (carottes, salades, fruits, etc.) ont pu être proposés au consommateur grâce à cette utilisation simultanée de moyens de conservation.

Les emballages
(voir le chapitre « Récipients et emballages »)

Les emballages permettent de supprimer, ralentir ou contrôler les transferts de matières (eau, gaz, solutés) entre l'aliment et son environnement ou, dans certains produits, entre deux compartiments différents (emballages comestibles). En outre, ils permettent d'éviter toute contamination ou souillure de l'aliment. Ils constituent ainsi un moyen de conservation fondamental de nos denrées alimentaires et leurs nature, propriétés et technologies font l'objet d'un chapitre de cet ouvrage (voir chapitre « Emballages »).

CONCLUSION

Au travers des différents thèmes abordés, il apparaît clairement que les traitements de cuisson et de conservation auxquels sont soumis nos aliments sont extrêmement variés et nombreux. Si les méthodes traditionnelles de cuisson restent prédominantes, il n'en reste pas moins vrai que des technologies récentes permettent d'obtenir des produits nouveaux et souvent une amélioration de la qualité. Par ailleurs ces nouvelles technologies diminuent souvent la durée de préparation et permettent ainsi aux cuisinier(e)s de préparer certains plats dans des laps de temps « minutés » par notre mode de vie.

On assiste, au sein même de chaque grande technique de conservation des aliments (déshydratation, congélation, appertisation, etc.) à une évolution vers des présentations et des préparations de plus en plus commodes. De la même façon, de nombreux produits nouveaux font appel à des associations de traitements « ménagés » pour obtenir des produits de qualité conservant une connotation de fraîcheur ou de naturel, tout en répondant à l'attente du consommateur et aux rigueurs des circuits de distribution et de contrôle.

QUELQUES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cheftel H., Thomas G., *Principes et méthodes pour l'établissement des barêmes de stérilisation des conserves alimentaires,* Gauthier-Villars, Paris, 1963.
- Cheftel J.C., Cheftel H., Besançon P., *Introduction à la biochimie et à la technologie alimentaire,* Volume 2, Technique et Documentation/ Lavoisier, Paris, 1977.
- *Nouvelles technologies de fabrication et de conditionnement,* Journées d'études, Centre National de Formation, Documentation et Coopération Internationale, Montpellier, 1988.
- « Microwave Food Processing, an industrial overview », *Food Technol.,* June 1986.
- Staron T. et al., « Le traitement des produits biologiques alimentaires par les micro-ondes », *Ind. Alim. Agric.,* 1980, 12.
- Meisel N., « Micro-ondes dans les industries agroalimentaires », *Ind. Alim. Agric.,* 1984, vol. 101, 4.
- *Food Chemistry,* 2d edition, O.R. Fennema Editor, M. Dekker Inc., New York and Basel, 1985.
- *Properties of water in Foods,* D. Simatos and J.L. Multon Editors, Nato Asi series, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1985.
- Tressler D.K., Van Arsdel W.B., Copley M.J. Editors, *The Freezing Preservation of Foods,* 4 volumes, Avi, Westport, 1968.
- *Food Irradiation,* Urbain W.M. Editor, Academic Press, London, 1986.
- *Microwaves in the Food Processing Industry,* Decareau R.V., Hudgett R.E., Academic Press, London, 1985.
- *Parat Dictionary of Food and Nutrition,* Adrian J. Editor, Ellis Horwood series in Food Science an Technology, 1988.
- *Food Processing Technology,* Fellows P. Editor, Ellis Horwood series in Food Science and Technology, 1988.
- *Frying of Food. Principles, Changes, New Approaches,* Varela G., Benser A.E., Morton I.D. Editors, Ellis Horwood series in Food Science and Technology, 1988.
- *Concentration and Drying of Foods,* Mac Carthy Editor, Elsevier, Oxford, 1986.
- *Food Packaging and Preservation. Theory and Practice,* Mathlouthi M. Editor, Elsevier, Oxford 1986.
- *Extrusion Technology for the Food Industry,* O' Connor C. Editor, Elsevier, Oxford, 1987.

– *Food Preservation by Moisture Control,* Seow C.C., Teng T.T., Quah C.H. Editors, Elsevier, Oxford, 1988.

– *Developements in Food Preservation,* Thorne S. Editor, Vol. 1, 2, 3, 4, Elsevier, Oxford, 1981 à 1987.

– *Mechanisms of Action of Food Preservation Procedures,* Gould G.W. Editor, Elsevier Applied Science, London, 1989.

2

QUALITÉ DE NOS ALIMENTS ET TECHNOLOGIE

Jean-Louis CUQ

Dans la plupart des cas, les opérations culinaires domestiques ou les traitements technologiques industriels appliqués aux produits alimentaires se traduisent par des effets favorables sur la qualité, qu'il s'agisse de la valeur alimentaire ou de la qualité hygiénique. Actuellement, la plupart des denrées alimentaires consommées en France ont subi un traitement technologique, traitement qui consiste souvent à soumettre la denrée à l'action de la chaleur. En effet, les traitements thermiques comme la cuisson, le blanchiment, la pasteurisation ou encore la stérilisation, sont couramment utilisés avec, comme sources primaires de chaleur, la combustion, l'électricité ou les micro-ondes. Bien que leur finalité soit spécifique, de tels traitements conduisent généralement à des modifications favorables des qualités organoleptiques et plus particulièrement au niveau des arômes, du goût, mais aussi de la couleur et de la texture. Certains de ces traitements permettent de détruire des micro-organismes dangereux, d'inactiver certains composés toxiques ou encore d'inhiber des enzymes capables de provoquer des réactions défavorables, en particulier sur la couleur ou le goût.

En dehors des traitements thermiques, il existe à l'heure actuelle un très grand nombre de traitements susceptibles d'être appliqués à nos aliments. Ainsi les produits que nous consommons ou que nous serons amenés à consommer dans le futur correspondent de moins en moins à des matières premières d'origine végétale ou animale en l'état, mais à des produits résultant de l'association plus ou moins judicieuse de composants isolés ou extraits de ces mêmes matières premières. Les technologies mises en jeu permettent d'obtenir une très grande variété d'aliments de

bonne qualité hygiénique, nutritionnelle et organoleptique ; par ailleurs, ces aliments ne nécessitent souvent que peu ou pas de préparation avant consommation.

Malheureusement, il n'est pas rare que certains de ces traitements domestiques ou industriels affectent d'une façon plus ou moins importante la qualité initiale du produit. L'étude de ces modifications peut être envisagée soit en fonction du type de traitement appliqué, soit en fonction du type d'aliment, soit enfin en fonction des grandes catégories de nutriments qui entrent dans la composition de nos aliments. C'est cette dernière approche qui est adoptée ici. Ainsi, les effets des traitements appliqués à nos produits alimentaires seront décrits au niveau des glucides, protides, lipides, sels minéraux et vitamines qu'ils renferment ; le tableau 1 résume ces effets. Leurs incidences quantitatives et qualitatives seront précisées, en particulier sur les plans nutritionnel, toxicologique ou même commercial.

Tableau 1

Incidences nutritionnelles et organoleptiques de quelques traitements de produits alimentaires.

Traitement	Composant alimentaire						
	Glucides			Protides	Lipides	Sels minéraux	Vitamines
	fibres	amidons	oses diholosides				
congélation (−18 °C)	−	+	−	−	+(d)	−	−(D)
réfrigération (5 °C)	−	−	−	−	+(d)	−	−(D)
entreposage (air-20 °C)	−	−	−	−(D)	+(d,D)	−	+(D)
lavage à l'eau (20 °C)	−	−	+	−(+)	−	+(D)	(D)
blanchiment (eau, 70 °C)	−(f)	+(F)	+	F	−	+(D)	D
cuisson sous vide (70 °C)	−(f)	Ff	−	Ff	−	+(D)	+(D)
cuisson (eau, 100 °C)	−(f)	Ff	+	Ff	−	+(D)	D
micro-ondes	−(f)	Ff	+	Ff	−	+	(D)
cuisson (vapeur, 107 °C)	−(f)	Ff	−	Ff	−	−	+(D)
pasteurisation (80 °C)	−	Ff	−	Ff	−	−	+
atomisation (80 °C)	−	+	−	+	−(d)	−	+(D)
stérilisation (120-140 °C)	+(f)	F(d,f)	+	+(D)	+	+(D)	(D)
séchage rouleau (130 °C)	+	F(d,f)	+(d,f)	D	+	−	D
cuisson-extrusion (200 °C)	+	F(d,f)	+(f)	D	+(D)	−	D
friture (200 °C et plus)	+	Ff	+(f)	D	Dd	−	D
grillade (300 °C et plus)	+	+(D,d)	+(f)	D	D	−	D

−: pas d'effet.
+: effet sans incidence importante sur les qualités nutritionnelles et organoleptiques.
d ou f : effets défavorables ou favorables sur les propriétés organoleptiques.
D ou F : effets défavorables ou favorables sur la qualité nutritionnelle.
( ) : parfois.

INCIDENCES DES TRAITEMENTS DOMESTIQUES OU INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DES GLUCIDES

Les glucides sont des composants abondants et souvent majoritaires de bon nombre de produits alimentaires. Ils sont essentiellement représentés par des polymères comme les amidons ou la cellulose, des dimères comme le saccharose ou le lactose, et par des monomères comme le glucose ou le fructose. Dans leur grande majorité, les traitements culinaires domestiques ou industriels ne se traduisent pas par des modifications importantes de leur disponibilité.

Les amidons à l'état natif sont des sphérocristaux pratiquement insolubles dans l'eau froide. Leur traitement par la chaleur en milieu humide conduit à leur gélatinisation. Ce phénomène correspond à une absorption d'eau par les groupements hydroxyles des chaînes d'amylose et d'amylopectine qui sont les polymères respectivement linéaires et branchés contenus dans l'amidon. Au cours de cette gélatinisation, les granules d'amidon peuvent voir leur volume multiplié par 20 ou 30, tandis que la viscosité de la solution augmente de façon significative ; c'est en raison de cette propriété que les amidons sont utilisés comme agents épaississants ou encore comme agents de remplissage. Du point de vue nutritionnel, la gélatinisation des amidons se traduit généralement par une augmentation de leur digestibilité. Les amidons prégélatinisés par cuisson-extrusion ou par cuisson sur rouleau utilisés pour leur capacité de gonflement à froid présentent une bonne digestibilité. Par contre, les amidons modifiés par voie chimique, tels que les amidons réticulés ou les amidons au niveau desquels certains groupements hydroxyles ont été substitués par des groupements hydrophiles du type acétyle ou phosphate, ont une digestibilité réduite. Cette diminution n'a généralement aucune incidence sur la qualité nutritionnelle de l'aliment en raison des faibles quantités en amidon modifié incorporées au produit, ces amidons n'étant utilisés que pour leurs propriétés fonctionnelles. Il faut signaler enfin que des traitements thermiques réalisés à des températures élevées se traduisent par des hydrolyses plus ou moins importantes (dextrinisation, formation de petits polymères et de monomères).

Les celluloses et autres composants des fibres alimentaires (hémicelluloses, lignines, pentosanes) ne sont que très peu affectés par les traitements culinaires domestiques ou industriels. Il s'agit de polymères qui restent insolubles dans nos aliments, qui ne sont pas hydrolysables au cours de la digestion (sauf chez les ruminants) mais qui jouent un rôle physiologique important en favorisant le transit intestinal. L'élimination mécanique de ces composés, comme par exemple le blutage des céréales,

peut se traduire par une augmentation de la digestibilité des autres nutriments et plus particulièrement des protéines.

Parmi *les diholosides,* le saccharose est de loin celui qui est le plus consommé. Non réducteur, ce composé n'est que très peu affecté par les traitements technologiques. En présence d'eau et sous l'effet de la chaleur, il donne une réaction de caramélisation. Cette réaction complexe se traduit par la formation de très nombreux dérivés dont certains confèrent au produit son arôme et son goût (aldéhydes, cétones, alcools) et d'autres sa couleur (pigments de type mélanoïdines).

Ces diholosides sont parfois soumis à une hydrolyse par voie enzymatique. Ainsi l'hydrolyse du lactose contenu dans le lait et les produits laitiers permet aux individus présentant une intolérance au lactose de consommer ces types d'aliments.

Les oses contenus dans nos produits alimentaires sont essentiellement représentés par le glucose et le fructose. Ces monomères peuvent être naturellement présents dans l'aliment (fruit, etc.) ou ajoutés à celui-ci. Dans ce cas, le glucose peut provenir par exemple de l'hydrolyse de l'amidon. Les glucides réducteurs sont susceptibles de réagir avec certains groupements aminés des protéines au cours de traitements thermiques ou de l'entreposage : c'est la réaction de Maillard qui a des conséquences nutritionnelles défavorables pour les protéines.

Il est bon de signaler enfin qu'au cours de l'entreposage des fruits et des légumes, il peut se produire des transformations polymère-monomère, transformations affectant essentiellement le goût et la texture. La respiration cellulaire ne conduit qu'à des pertes peu importantes en calories d'origine glucidique.

INCIDENCES DES TRAITEMENTS DOMESTIQUES OU INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DES PROTIDES

La plupart des traitements n'abaissent que peu ou pas la valeur nutritionnelle des protéines, certains ont même des effets favorables. Leurs principaux effets sur les protéines sont indiqués dans le tableau 2. Cependant des modifications défavorables apparaissent parfois. Elles affectent, dans la plus grande majorité des cas, la structure primaire des protéines et se traduisent par une diminution des teneurs en acides aminés indispensables ou par la formation de substances antinutritionnelles ou toxiques. Le plus souvent leurs incidences sont négligeables même lorsqu'elles interviennent sur un résidu d'acide aminé indispensa-

Tableau 2

Modifications des protéines alimentaires au cours de traitements culinaires domestiques ou industriels.

EFFETS DE LA CHALEUR

• *Jusqu'à 100 °C* (blanchiment, pasteurisation, cuisson à l'eau, micro-ondes, cuisson sous vide, atomisation) : *dénaturation des protéines*
– diminution du pouvoir toxique de facteurs antinutritionnels et de nombreuses toxines
– inactivation d'enzymes (lipases, protéases, polyphénoloxydases, etc.)
– amélioration de la digestibilité et de l'appétabilité

• *Entre 100 et 140 °C* (stérilisation)
– réaction de Maillard en présence de glucides réducteurs : brunissement non enzymatique avec baisse de disponibilité de la lysine
– formation de ponts covalents intra ou intermoléculaires : baisse de digestibilité
– destruction d'acides aminés (cystéine donnant des composés aromatiques)

• *Au-dessus de 140 °C* (friture, cuisson au four, grillage, cuisson-extrusion)
– réaction de Maillard
– destruction d'acides aminés (cystéine, tryptophane, glutamine, etc.) pouvant conduire à la formation de dérivés toxiques
– isomérisation de résidus d'acides aminés (L → D) : baisse de valeur nutritionnelle
– formation de ponts covalents intra ou intermoléculaires de nature isopeptidique (γ-glutamyl-ε-N-lysine) ou de type lysinoalanine : baisse de digestibilité.

EFFETS DES TRAITEMENTS ALCALINS
(extraction de protéines végétales, fabrication de caséinates, filage des protéines, etc.)
– augmentation de la solubilité des protéines
– destruction et isomérisation de résidus d'acides aminés : baisse de valeur nutritionnelle
– formation de ponts covalents du type lysinoalanine : diminution de la digestibilité, risque de toxicité.

EFFETS DES TRAITEMENTS OXYDANTS
(eau oxygénée, peroxydes lipidiques, eau de Javel, séchage à l'air, etc.)
– décoloration
– oxydation de résidus d'acides aminés (méthionine, cystéine/cystine, tryptophane) : parmi les dérivés d'oxydation certains n'ont pas de valeur nutritionnelle et certains sont toxiques.

EFFETS DES INTERACTIONS PROTÉINES - CONTAMINANT, ADDITIF OU AUTRES COMPOSANTS ALIMENTAIRES
– réaction avec les lipides ou leurs dérivés d'oxydation : baisse de valeur nutritionnelle
– réaction de Maillard en présence de glucides réducteurs (perte de lysine)
– réaction avec les polyphénols des végétaux (baisse de digestibilité, perte de lysine)
– réaction avec certains composés d'arômes (modification de la flaveur et du goût)
– réaction avec les nitrites (certains dérivés nitrosés d'acides aminés sont cancérigènes)
– réaction avec les sulfites (formation de dérivés S-sulfonés)
– réaction avec des solvants halogénés (formation de dérivés toxiques)
– réaction avec des agents acylants : protection contre la réaction de Maillard, amélioration de certaines propriétés fonctionnelles, fixation covalente d'acides aminés indispensables (Met)
– réaction avec des aldéhydes (formol) : tannage des aliments pour les ruminants, baisse de digestibilité et perte en lysine pour les monogastriques.

ble, si celui-ci ne constitue pas le facteur limitant ou encore si la protéine qui les a subies ne contribue que faiblement à l'apport protéique du régime. Ces modifications peuvent, par contre, être très préjudiciables pour certaines catégories de consommateurs tels que les enfants en bas âge, les personnes âgées, les populations sous-alimentées dont l'alimentation ne repose que sur un nombre limité de produits comme le lait, certaines céréales ou légumineuses.

Les modifications que sont susceptibles de subir les protéines au cours des traitements technologiques alimentaires peuvent être classées en quatre groupes en fonction du type de réaction chimique mis en jeu : dénaturation, modifications des résidus d'acides aminés, interactions protéines-protéines, interactions protéines-substances non protéiques.

Dénaturation des protéines

La plupart des molécules protéiques ne conservent leur activité biologique ou leur capacité fonctionnelle qu'à l'intérieur d'étroites limites de pH et de température en particulier. Les traitements thermiques ou les variations de pH provoquent des modifications dont l'effet le plus visible sur les protéines globulaires est une diminution de la solubilité. Cette dénaturation des protéines correspond à une ou à des modifications de conformation (forme dans l'espace). Aucune liaison covalente de la chaîne peptidique n'est rompue et la structure primaire (ordre d'enchaînement des acides aminés) n'est pas affectée. La dénaturation provoque généralement la perte de propriétés biologiques telles qu'activités enzymatique ou toxique. Du point de vue nutritionnel, les modifications conformationnelles des protéines présentes dans nos aliments ont en général des effets favorables. Il faut signaler que les changements de structure des protéines présentes dans nos aliments se traduisent souvent par des modifications importantes des propriétés rhéologiques par formation de précipités, de pâtes ou de gels.

• Inactivation des enzymes

Des traitements par la chaleur comme le blanchiment, la cuisson domestique, ou le chauffage micro-ondes réalisés en présence d'eau permettent de préserver ou d'améliorer les qualités organoleptiques des aliments. Ainsi, l'inactivation par la chaleur des lipases, lipoxygénases, protéases, polyphénoloxydases, des enzymes de la glycolyse, évite la formation de dérivés aux qualités organoleptiques souvent défavorables. Par ailleurs, certains de ces dérivés sont capables de réagir avec les

protéines et de modifier leur valeur nutritionnelle. De plus, ces traitements empêchent la formation de substances toxiques en inactivant des enzymes : la dénaturation thermique de la myrosinase présente dans les farines de colza évite la formation, à partir de thioglucosides, de produits toxiques tels que la goitrine.

• **Inactivation de protéines antinutritionnelles ou toxiques**

Les traitements dénaturants permettent généralement l'inactivation de substances toxiques ou antinutritionnelles de nature protéique. La plupart des toxines protéiques produites par des micro-organismes contaminants de nos aliments sont inactivées par la chaleur. Les graines de certaines légumineuses (pois, haricot, fève), de quelques oléagineux (soja, arachide) et certaines plantes vertes (luzerne) contiennent des inhibiteurs protéiques qui, en se combinant de façon quasi irréversible avec des protéases *in vivo,* inhibent nettement les phénomènes de digestion et par voie de conséquence diminuent la valeur nutritionnelle des protéines ingérées. Des inhibiteurs de la trypsine et de la chymotrypsine ont ainsi été identifiés ; ils provoquent une augmentation de l'activité sécrétrice du pancréas qui s'hypertrophie ; la réduction de croissance liée à leur ingestion résulte en partie d'une perte en acides aminés indispensables (méthionine et cystéine surtout) avec le complexe protéine-inhibiteur, complexe qui n'est pas digéré.

Les phytohémagglutinines (ou lectines) présentes chez les oléagineux et les légumineuses constituent un second groupe de protéines responsables d'effets antinutritionnels ou toxiques. Ces molécules forment des complexes avec les parties osidiques de nombreux produits naturels et sont partiellement responsables de la faible valeur nutritionnelle des protéines végétales natives. Ces substances agiraient à la surface des entérocytes en se complexant avec des polyosides membranaires et perturberaient, entre autres, les activités transférasiques.

Les traitements par la chaleur réalisés en présence d'eau (cuisson, pasteurisation, stérilisation) conduisent à une dénaturation de ces facteurs antinutritionnels et permettent d'augmenter très nettement la valeur nutritionnelle de nombreuses préparations protéiques d'origine végétale. Ainsi, une cuisson par la vapeur à pression atmosphérique d'une farine de soja permet d'améliorer le coefficient d'efficacité protéique de 1,2 à 2,9 (chez le rat) par dénaturation des inhibiteurs de nature protéique. Les micro-ondes peuvent avoir, toutes conditions étant égales par ailleurs (aliment, protéine, température atteinte, durée), des effets dénaturants différents de ceux obtenus par les autres méthodes de chauffage. Ceci résulte du fait que les micro-ondes conduisent à l'agitation de toutes les molécules dipolaires du produit représentées essentiel-

lement par les molécules d'eau. Or certaines molécules d'eau fortement liées aux protéines ne contribuant pas à l'échauffement par convexion (eau de constitution, eau de la couche monomoléculaire) peuvent, en s'agitant sous l'effet des micro-ondes, contribuer à une dénaturation différente et souvent plus rapide des protéines que celle observée par les autres méthodes de chauffage.

La déshydratation complète des aliments, même par des méthodes douces comme la lyophilisation, peut parfois induire une dénaturation. Cependant, il est bien connu que les protéines et les micro-organismes à l'état sec sont plus résistants à la dénaturation thermique.

Le froid (réfrigération mais surtout congélation) modifie la conformation des protéines. Des enzymes sont inactivées à 0°C tandis que d'autres (lipases, oxydases) restent actives aux températures atteintes lors de la congélation (−18 à −25°C par exemple).

Certains composés chimiques (l'éthanol, certains sels minéraux tels que calcium et magnésium, les acides et les bases) ou le passage d'une solution aqueuse à une interface eau/air (mousse) ou eau-huile (émulsion) peuvent provoquer des changements de structure parfois irréversibles des protéines.

Il faut signaler enfin que certaines protéines comme le collagène, l'ovalbumine, les glycinines du soja voient leur digestibilité très nettement augmentée après un traitement thermique modéré. Leur dénaturation provoque le démasquage de résidus d'acides aminés, ce qui facilite l'attaque protéolytique *in vivo*.

Modifications chimiques des résidus d'acides aminés

Ces modifications des protéines peuvent résulter de traitements technologiques divers.

Les traitements ou les « systèmes » oxydants rencontrés en technologie alimentaire sont nombreux. Parmi eux, on peut citer le séchage à l'air chaud, le contact avec des lipides ou des polyphénols en voie d'oxydation, l'irradiation γ, la photo-oxydation et les opérations de stérilisation, décoloration ou détoxification par le peroxyde, l'hydrogène (eau oxygénée) ou l'hypochlorite de sodium (eau de Javel). Ce sont les acides aminés soufrés (cystéine, méthionine) qui sont les plus facilement oxydables. La cystéine donne dans ces conditions de nombreux dérivés dont certains comme l'acide cystéique ou l'acide cystéine sulfinique n'ont pas de valeur nutritionnelle. Les résidus de *méthionine* ($R\text{-}S\text{-}CH_3$) sont facilement

oxydables en résidus de sulfoxyde correspondants (R-SO-CH_3) ; ce n'est que dans des conditions oxydantes sévères que l'oxydation des résidus de méthionine se fait jusqu'au stade de sulfone (R-SO_2-CH_3). Ce dernier dérivé ne possède plus de « potentialité » biologique et présente même une certaine toxicité. Par contre, l'ingestion d'une protéine (caséine) dans laquelle tous les résidus de méthionine sont oxydés sous forme de sulfoxyde ne se traduit que par une très légère diminution du coefficient d'efficacité protéique (CEP) et de l'utilisation protéique nette (UPN). Ces résultats montrent que les résidus de méthionine sulfoxyde sont libérés au cours de l'hydrolyse *in vivo* de la protéine, absorbés et réduits en méthionine. Cette réduction enzymatique est effectuée dans le rein et dans le foie avec une vitesse faible si bien que des quantités importantes de méthionine sulfoxyde « en attente de réduction » sont retrouvées au niveau de tissus comme le sang et le muscle. Les résidus de *tyrosine* et l'*histidine* sont, quant à eux, partiellement détruits au cours d'une photo-oxydation en présence d'oxygène et d'agent sensibilisateur comme la riboflavine. Enfin, il faut signaler que les résidus de *tryptophane* sont eux aussi sensibles à l'oxydation mais beaucoup moins que les résidus de méthionine. Parmi les nombreux dérivés qui se forment il semble que la plupart ne possèdent pas de potentialité tryptophane.

Les traitements thermiques réalisés sur les protéines alimentaires en absence de toute autre substance se traduisent, selon leur intensité, par des réactions de désulfuration, de désamination, d'isomérisation, par des destructions d'acides aminés et/ou par la formation de dérivés toxiques.

Ainsi les *traitements thermiques* du type stérilisation réalisés à des températures voisines de 115°C provoquent la destruction des résidus de cystéine et de cystine avec formation de sulfure d'hydrogène, de diméthylsulfure, de diméthyldisulfure et d'acide cystéique. Certains de ces composés et d'autres dérivés volatils sont à l'origine des modifications d'arôme et de goût observées au cours du traitement thermique de produits comme les viandes, les muscles de poisson ou encore le lait. La désamination des résidus d'asparagine et de glutamine intervient à partir de 80°C. Ces réactions se traduisent par l'apparition de groupements carboxyliques, ce qui abaisse le pHi et modifie les propriétés fonctionnelles. De plus, cette désamination est souvent suivie par la formation de liaisons covalentes entre résidus d'acides aminés comme cela est décrit plus loin.

Les traitements thermiques réalisés à des températures supérieures à 200°C (friture, cuisson-extrusion, grillage) et les traitements réalisés en milieu alcalin (solubilisation de protéines avant leur filage par exemple)

provoquent d'une part des destructions de résidus d'acides aminés (arginine, thréonine, sérine, cystéine, isoleucine) et d'autre part une isomérisation des résidus L en résidus D. Les acides aminés sous forme D n'ont en général aucune valeur nutritionnelle pour l'homme ; de plus, leur formation dans les protéines entraîne une baisse de digestibilité, certaines protéases ne reconnaissant que les résidus d'acides aminés sous forme L comme site d'hydrolyse.

Enfin, il faut signaler que les traitements thermiques réalisés à des températures très élevées, températures atteintes par exemple au cours du grillage au feu de viandes ou poissons, conduisent à la formation de composés fortement mutagènes. Ainsi, 100 g de sardines grillées donnent 4 g de chair et peau grillées produisant une mutagénèse chez une bactérie (*Salmonella typhimurium,* Test d'Ames) équivalente à 350 µg de benzopyrène. Or la quantité présente de ce composé n'est que de 0,025 µg. Il a été récemment montré que les composés responsables de cet effet mutagène se formaient par pyrolyse d'acides aminés et en particulier de la lysine, de l'arginine, de la sérine, de la thréonine, des acides glutamique et aspartique et de l'histidine. Il s'avère cependant que ce sont certains des dérivés obtenus à partir du tryptophane libre ou protéique, qualifiés de γ-carbolines, qui sont les plus puissants mutagènes connus actuellement. Bien qu'il existe une corrélation fortement positive entre pouvoir mutagène et potentialité cancérigène, les incidences de ces composés sur notre santé sont vraisemblablement limitées en raison d'une consommation relativement modérée de ce type d'aliment. La vigilance s'impose cependant dans ce domaine (voir aussi le chapitre « Toxicologie, Pollution »).

Interactions protéines-protéines

Certaines protéines alimentaires à l'état natif ne sont que partiellement digestibles, surtout en raison de la présence de ponts naturels entre chaînes polypeptidiques. Les exemples les mieux connus sont ceux du collagène, de la kératine et de l'élastine.

Le collagène présent dans le tissu conjonctif est une des protéines d'origine animale les plus abondantes. Il existe au sein de cette protéine de nombreux ponts (desmosine, γ-glutamyl-ε-N-lysine, esters, ponts disulfure, liaisons hydrogène). Le chauffage dans l'eau permet de rompre certaines de ces liaisons et il se forme un réseau hydraté solide à température ambiante : la gélatine.

La kératine contient de très nombreux ponts disulfure dont la réduction conduit à une amélioration de la digestibilité. L'élastine n'est pas hydrolysable par la plupart des protéases de mammifères.

Les traitements thermiques réalisés à des températures supérieures à 120°C provoquent dans les protéines la formation de ponts covalents isopeptidiques intra ou intermoléculaires le plus souvent à partir de résidus de lysine et de glutamine ; ainsi le pont γ-glutamyl-ε-N-lysyl formé dans ces conditions n'est que partiellement hydrolysable *in vivo*. Sa formation se traduit par une très nette diminution de la digestibilité de la protéine et une baisse de la disponibilité de la plupart des acides aminés.

Les traitements des protéines en milieu alcalin et à chaud (pH > 8) ou à des températures élevées se traduisent par des hydrolyses partielles, l'isomérisation des résidus d'acides aminés et par la formation de ponts covalents intra ou intermoléculaires essentiellement du type lysinoalanine ou lanthionine. En milieu alcalin, les résidus de cystine ou de phosphosérine sont d'abord transformés en résidus de déhydroalanine. Ces derniers sont très réactifs et sont capables de se condenser avec les groupements ε-aminé des résidus de lysine ou thiol des résidus de cystéine pour former respectivement de la lysinoalanine ou de la lanthionine. Ces deux composés constituent alors des ponts covalents intra ou intermoléculaires et contribuent à une diminution très nette de la digestibilité de la protéine ; les résidus de lysine impliqués dans la liaison ne sont plus utilisables. De plus, il a été montré, chez le rat, que l'ingestion de lysinoalanine libre provoque des lésions rénales. Chez l'homme de tels effets n'ont pas été démontrés ; par ailleurs, en raison de sa faible digestibilité, seule une très faible proportion de lysinoalanine présente dans les protéines est absorbée, la plus grande partie étant éliminée dans les fèces. Il faut enfin signaler que la lysinoalanine ne se trouve en quantité importante que dans les produits riches en protéines et soumis à un traitement alcalin et à chaud. Or, ces traitements ne sont utilisés qu'exceptionnellement dans la préparation de nos aliments : solubilisation des protéines d'origine végétale en vue de leur filage, détoxification par l'ammoniac des tourteaux d'arachide contaminés par l'aflatoxine, cuisson du maïs ou des pois chiches dans de l'eau additionnée de bicarbonate de sodium, fabrication de farine de viande ou de poisson.

Interactions protéines-substances non protéiques

En raison de la composition très variée de nos aliments, ces interactions sont nombreuses et très fréquentes.

Les réactions de brunissement non enzymatique ou réaction de Maillard se manifestent au cours de traitements technologiques ou de l'entreposage d'aliments qui contiennent des glucides réducteurs (ou des composés carbonylés comme l'acide ascorbique ou certains des produits d'oxydation des lipides) et des protéines. Il s'agit de modifications qui sont encore très étudiées et qui interviennent dans de nombreux aliments. La chaleur accélérant la vitesse de ces réactions, ces phénomènes apparaissent ainsi très nettement au cours de la cuisson et de la stérilisation et plus particulièrement dans des produits à teneur intermédiaire en eau. Ces réactions apparaissent notamment pendant la cuisson du pain, des biscottes, des biscuits, des céréales pour le petit déjeuner, pendant les opérations de stérilisation ou de déshydratation sur cylindre (lait), au cours de la friture des pommes de terre ou encore de l'entreposage de longue durée à température ambiante. Dans les produits laitiers, la réaction intervient entre la lactose et surtout les groupements εNH_2 des résidus de lysine des protéines. Cette réaction de Maillard est amplifiée dans les laits au sein desquels le lactose a été hydrolysé, le glucose étant plus réactif que le lactose. Schématiquement trois étapes peuvent être décrites. Au cours de la première, une condensation se produit entre un groupement aminé (εNH_2 de la lysine, αNH_2 terminal) et la fonction carbonylé d'un glucide réducteur ; il se forme une base de Schiff instable qui s'isomérise selon la nature du glucide en aldosylamine ou cétosylamine. Par réarrangement d'Amadori ou de Heyns il se forme respectivement des cétosamines ou des aldosamines, produits peu colorés.

$$\begin{matrix}\text{aldose}\\ \text{ou}\\ \text{cétose}\end{matrix} + \text{protéine} \rightleftharpoons \text{carbolynamines} \underset{-H_2O}{\rightleftharpoons} \begin{matrix}\text{bases}\\ \text{de}\\ \text{Schiff}\end{matrix} \rightleftharpoons \begin{matrix}\text{aldosylamine}\\ \text{ou}\\ \text{cétosylamine}\end{matrix} \rightarrow \begin{matrix}\text{cétosamine}\\ \text{ou}\\ \text{aldosamine}\end{matrix}$$

Dans la deuxième étape de cette réaction complexe, les produits d'Amadori ou de Heyns évoluent en composés carbonylés et polycarbonylés ou prémélanoïdines (réductones, cétones, aldéhydes). Ces composés donnent en présence d'amines la réaction de Strecker qui conduit à la formation de nouveaux composés carbonylés, d'anhydride carbonique et d'ammoniac. Les nombreux dérivés qui se forment au cours de cette étape sont à l'origine des modifications de goût et d'arômes observées dans cette réaction.

Au cours de la troisième étape les prémélanoïdines se polymérisent pour donner des pigments bruns de nature très complexe : les mélanoïdines.

Les incidences nutritionnelles de la réaction de Maillard sont encore très étudiées. Des pertes de disponibilité de la lysine sont toujours observées. Par ailleurs les produits d'Amadori ont des effets antinutri-

tionnels encore mal connus ; ils inhiberaient l'absorption intestinale de certains acides aminés indispensables. La formation de ponts covalents intra ou intermoléculaires dans les prémélanoïdines est à l'origine d'une diminution de la digestibilité de la partie protéique de la molécule. Cependant il a été montré que les prémélanoïdines augmentent l'appétence des produits et que les composés carbonylés modifient souvent favorablement les qualités organoleptiques. Quant aux mélanoïdines, elles sont insolubles et aucun effet lié à leur présence à faible concentration n'a été rapporté. Il a été récemment montré que des réactions de Maillard entre acides aminés et glucose, suivies de réactions de condensation avec la créatinine, engendraient la formation de dérivés comme les IQ (imidazoquinoline) ou Me IQ (méthylimidazoquinoline) dont le pouvoir mutagène est parmi les plus élevés connus à ce jour.

Il existe d'autres composants ou additifs alimentaires susceptibles de réagir avec les protéines. Ainsi des interactions protéines-polyphénols peuvent se produire dans de nombreux aliments d'origine végétale (fruits, feuilles, graines d'oléagineux comme le tournesol). L'oxydation par voie enzymatique (brunissement enzymatique) ou en milieu alcalin des polyphénols entraîne des modifications souvent défavorables de couleur et dans certaines conditions de la valeur nutritionnelle des protéines. Les quinones résultant de l'oxydation des polyphénols forment des liens covalents avec les résidus de lysine. Du point de vue nutritionnel, cette interaction a pour conséquences une diminution de disponibilité de la lysine et une baisse de digestibilité des protéines.

Les interactions protéines-lipides sont multiples et complexes. Elles peuvent par exemple se produire dans le poisson congelé, les tourteaux ou farines d'oléagineux ou au cours d'opérations technologiques visant à extraire les protéines d'un produit contenant des lipides (feuilles). Des interactions hydrophobes jouent un rôle important, mais c'est surtout la formation de ponts covalents qui contribue le plus à modifier la valeur nutritionnelle des protéines en présence de lipides. Des réactions de type radicalaire conduisent à la formation de polymères de protéines avec ou sans incorporation de lipides et à des pertes en méthionine, lysine, tyrosine et cystéine. Par ailleurs, certains dérivés d'oxydation des lipides insaturés comme le malonaldéhyde peuvent réagir avec les amines primaires (αNH_2 terminal, εNH_2 des résidus de lysine) avec formation de ponts covalents intra ou intermoléculaires, le mécanisme réactionnel étant à rapprocher de celui de la première étape de la réaction de Maillard. Il en résulte une diminution de la disponibilité de la lysine et une baisse de digestibilité de la protéine. Par ailleurs, les détériorations des qualités organoleptiques de l'aliment dans lequel ces réactions ont eu lieu sont telles que le plus souvent cet aliment est inconsommable.

Il existe d'autres interactions entre les protéines et les substances non protéiques de nos aliments. Les protéines peuvent ainsi jouer un rôle important dans les rétentions d'arômes, les fixations de colorants ou d'aldéhydes, et donner des réactions avec les nitrites, les sulfites ou certains dérivés chlorés. Ces interactions se traduisent en général par des pertes minimes de qualité nutritionnelle ; cependant la formation de dérivés toxiques a été décrite (nitrosamines, dichlorovinylcystéine, méthionine sulfoximine).

INCIDENCES DES TRAITEMENTS DOMESTIQUES OU INDUSTRIELS SUR LA QUALITÉ DES LIPIDES

Les lipides peuvent subir au cours des traitements technologiques, des préparations culinaires ou de l'entreposage, de nombreuses modifications chimiques qui affectent leur valeur nutritionnelle (tableau 3). Pour l'essentiel, ces modifications se produisent sur les doubles liaisons d'acides gras insaturés et provoquent ainsi des pertes d'acides gras indispensables.

L'hydrolyse des liaisons esters des lipides *(lipolyse)* peut se produire sous l'effet de la chaleur en milieu humide ou sous l'action de lipases. La libération d'acides gras à chaîne courte est à l'origine de l'apparition d'une flaveur rance (lait cru), flaveur provoquée par les lipases microbiennes dans certains fromages. Il est bon de rappeler ici que les graisses animales « natives », par opposition aux lipides d'origine végétale, ne contiennent pas d'acides gras libres. Ce phénomène de lipolyse est le phénomène le plus important observé au cours de la friture, essentiellement en raison de l'eau apportée par l'aliment à frire et par la température élevée à laquelle l'huile est maintenue. Cette lipolyse diminue le point de fumée et la tension superficielle et la qualité des aliments frits décroît. Par ailleurs, les acides gras libres s'oxydent plus facilement que ceux liés au glycérol par liaison ester.

Les phénomènes d'auto-oxydation *(rancissement)* des lipides insaturés apparaissent au cours de l'entreposage en présence d'air ou d'oxygène et constituent un des principaux facteurs de dégradation de nos aliments. Ces phénomènes ont une grande importance car ils provoquent l'apparition, dans les huiles et les produits contenant des graisses ou ces mêmes huiles, de flaveurs et odeurs variées et défavorables qui rendent alors les aliments inacceptables ou réduisent nettement leur durée de vie. De plus, et bien que les modifications organoleptiques soient prépondérantes, une diminution de la qualité nutritionnelle peut être observée, certains

Tableau 3

Modifications des lipides au cours de traitements culinaires domestiques ou industriels.

Traitement	Modification chimique majeure	Principaux produits formés	Toxicité (rat)	Effets nutritionnels
Entreposage réfrigération congélation	Oxydation	Peroxydes Acides gras hydroxylés Monomères cycliques aromatiques Dimères et polymères polaires Composés hydrocarbonés	+ + ++ + +++	Appétence et croissance diminuées Hypertrophie du foie et des reins Accumulation de peroxydes dans le tissu adipeux
Chauffage à l'abri de l'air à plus de 200°C	Décomposition lipolyse	Esters cycliques Composés volatils et polymères	+++++	Le chauffage à 250°C pendant plus de 10 h d'une huile insaturée ajoutée au régime au taux de 20 % conduit à une mortalité élevée chez le rat. L'absorption intestinale des polymères est faible.
Chauffage à l'air (friture, grillade)	Oxydation décomposition lipolyse	Triglycérides oxydés, Esters, Monomères cycliques aromatiques Polymères hydroxylés Composés hydrocarbonés Composés volatils	+++	Appétence et croissance diminuées Hypertrophie du foie L'ingestion d'une huile de colza ayant subi 10 fritures à 182°C n'a pas d'effets biochimiques ou histologiques néfastes. Pertes d'acides gras indispensables
Hydrogénation	Isomérisation	Isomères conjugués Isomères trans	+	Pertes d'acides gras indispensables Accumulation au niveau du tissu cardiaque
Irradiation	Radiolyse	Nombreux composés		Modifications de l'odeur et du goût

produits d'oxydation étant même potentiellement toxiques. Il est bon de noter ici que l'obtention d'arômes dans certains fromages ou aliments frits résulte entre autres d'un certain niveau d'oxydation des lipides. Les réactions chimiques intervenant au cours de l'auto-oxydation des lipides sont très nombreuses et complexes ; de type radicalaire, elles conduisent en trois phases principales (initiation, propagation, fin) à la formation de peroxydes, de composés volatils (alcools, aldéhydes, acides, etc.) et de composés carbonés hydrogénés. Il existe de nombreux moyens analytiques permettant d'évaluer le niveau d'oxydation des lipides parmi lesquels on peut signaler l'indice de peroxyde, le test à l'acide thiobarbiturique, l'indice d'iode et certains tests d'évaluation organoleptique.

La vitesse de cette auto-oxydation des lipides dans nos aliments est influencée par la composition en acides gras, le nombre, la position et la géométrie des doubles liaisons. Cette vitesse est de 20 et 10 fois plus importante respectivement pour les acides linolénique et linoléique que pour l'acide oléique. Les isomères cis s'oxydent plus vite que les isomères trans et les doubles liaisons conjuguées plus vite que celles qui ne le sont pas. Par ailleurs les acides gras s'oxydent plus vite sous forme libre que sous forme estérifiée. La chaleur, la surface de contact entre l'air et le lipide, certains éléments pro-oxydants (cuivre, fer, nickel, manganèse), certaines radiations électromagnétiques (visible, UV, γ) sont des activateurs effectifs de ce type d'oxydation.

Un ralentissement de cette auto-oxydation peut être obtenu par addition d'antioxydants (tocophérol, propyl gallate, butyl hydroxyanisole, butyl hydroxytoluène, tert-butyl hydroquinone), le mécanisme de protection étant fonction de la nature même de l'antioxydant.

Une *décomposition thermique* des lipides est généralement observée au cours d'un chauffage prolongé à des températures supérieures à 200°C. Il se forme de très nombreux composés (acides, acroléine, cétones, alcanes à longue chaîne, lactones, monomères cycliques ou non, aromatiques ou non, esters, etc.). Cette décomposition diminue la qualité nutritionnelle par destruction d'acides gras indispensables et du fait de la formation de composés toxiques. L'ingestion de lipides surchauffés se traduit, chez l'animal, par un ralentissement de la croissance, des hypertrophies d'organes et éventuellement des effets cancérigènes liés à l'ingestion de dérivés cycliques aromatiques (tableau 3). Ces phénomènes sont susceptibles de se produire au cours de la friture mais ne représentent pas un réel danger pour le consommateur ; en effet, les modifications physico-chimiques intervenant au cours d'une friture excessive (température supérieure à 200°C, durée importante) rendent l'huile pratiquement inutilisable en raison de sa couleur mais surtout de son odeur et de sa

viscosité. Par ailleurs, l'ingestion de l'huile de friture reste limitée, les aliments frits n'en absorbant qu'entre 4 et 40 % (environ 13 % pour les pommes de terre frites et 40 % pour les chips). Quand un aliment est soumis à une friture il se produit les phénomènes suivants :

– l'eau du produit est libérée dans l'huile chaude et distille en entraînant certains produits volatils résultant de l'oxydation de l'huile,

– des composés volatils apparaissent dans le produit (composés soufrés, pyrazines),

– l'aliment absorbe de l'huile et libère ses propres lipides (poulet),

– la présence de l'aliment conduit à une accélération de la coloration brunâtre de l'huile.

En pratique, les risques liés à la consommation de fritures industrielles ou domestiques seront minimes à condition d'une part d'utiliser des huiles à faible teneur en acides gras polyinsaturés, en acide linolénique en particulier, et d'autre part que la température et la durée du traitement ne soient pas trop importantes.

L'irradiation γ se traduit par des phénomènes de radiolyse au cours desquels de nombreux composés apparaissent (alcanes, alcènes, alcynes, aldéhydes, cétones, acides, lactones, etc.). Les réactions qui interviennent résultent de la formation de radicaux libres sous l'effet des radiations. Bien que les mécanismes impliqués soient différents, bon nombre de composés produits dans ces conditions sont similaires à ceux formés par traitement thermique. Ce traitement conduit à une destruction partielle des vitamines liposolubles et du tocophérol.

D'autres traitements technologiques industriels peuvent avoir des incidences plus ou moins importantes sur la qualité des lipides. *L'extraction* n'a en général aucun effet défavorable sur la qualité nutritionnelle d'une huile ou d'une graisse à condition que le solvant ait été parfaitement éliminé du produit. *L'hydrogénation* provoque la formation d'isomères trans (les naturels sont sous forme cis) ou d'isomères conjugués et une diminution des teneurs en acides gras indispensables ; ses effets sont bénéfiques si elle est sélective et partielle car elle permet alors de réduire la teneur en acides gras polyinsaturés sans valeur nutritionnelle et souvent toxiques. Ainsi l'hydrogénation de l'acide linolénique conduit aux acides linoléique (cis) et isolinoléique (trans) puis aux acides oléique (cis) et isooléique ou élaïdique (trans) et enfin à l'acide stéarique. Il est bon de signaler enfin que les isomères trans peuvent représenter jusqu'à 40 % de la totalité des acides gras de certaines margarines.

Par ailleurs, il est reconnu que ces isomères trans des acides linoléique et arachidonique n'ont plus l'activité acide gras essentiel ; les isomères

trans sont généralement utilisés comme source d'énergie. Cependant, au niveau du tissu cardiaque, l'acide oléique cis est utilisé comme source d'énergie plus efficacement que son isomère trans (acide élaïdique), dont l'accumulation pourrait alors être une des causes de certaines maladies cardiovasculaires.

L'interestérification correspond à l'échange de groupes acyls entre un ester et un acide (acidolyse), un ester et un alcool (alcoolyse) ou un ester et un ester (transestérification). C'est cette dernière réaction qui est pratiquée industriellement en présence de catalyseur (méthoxyde de sodium, 50°C, 30 minutes). Une des principales applications de cette réaction est l'obtention de shortenings à activité crémante à partir du saindoux. Ce procédé augmente la proportion de triglycérides à acides gras saturés en position β ce qui favorise leur absorption.

En conclusion, il apparaît que seuls les traitements technologiques réalisés à température élevée (friture, grillage) et pendant des durées importantes sont susceptibles de soulever quelques inquiétudes en raison de la formation de composés toxiques. Généralement, les risques liés à la consommation d'aliments frits seront très faibles si les huiles utilisées possèdent de faibles teneurs en acides polyinsaturés (acide linolénique par exemple) et si les conditions opératoires (température et nombre de cycles d'utilisation de l'huile) ne sont pas sévères. Par ailleurs, les altérations des qualités organoleptiques liées aux transformations des lipides sont telles que les produits susceptibles d'être dangereux présents dans ces produits inappétents ne sont pas ingérés.

INCIDENCES DES TRAITEMENTS DOMESTIQUES OU INDUSTRIELS SUR LES VITAMINES

Il faut tout d'abord signaler que parmi toutes les vitamines susceptibles d'être présentes dans nos aliments, la vitamine C et la vitamine B_1 sont les plus sensibles aux différents traitements. Les effets des traitements domestiques ou industriels sont résumés dans le tableau 4.

Rappelons que la teneur en vitamine d'un même produit peut être très variable. Ainsi, la teneur en vitamine C d'une tomate verte d'environ 60 g est de 8 mg % ; cette teneur passe à 10 mg % pour une tomate vert-jaune de 100 g, puis à 20 mg % pour une tomate jaune-rouge de 150 g pour retomber ensuite à 10 mg % dans la tomate mûre et rouge de 170 g.

Tableau 4

Modifications des vitamines au cours de traitements culinaires domestiques ou industriels.

	Vitamines hydrosolubles									Vitamines liposolubles		
Traitement	Vit C	Vit B1	Vit B2	Vit B5	Vit B6	Vit B12	niacine	folate	biotine	Vit A	Vit D	Vit E
Post-mortem ou après récolte	D						D					
Epluchage, parage	PP						PP					
Broyage, meunerie*		PPP	PP	P	PPP	PP	PPP	PP			P	
Lavage	P	p	p	p	p	p	p	P				
Traitement thermique dans l'eau**	PP,D	P,D	P,d	P,d	P,d	P	P,F	p,d,F		D		
Cuisson vapeur	p,d	p,d	p,d	p,d	p,d	p	P,f	p,d,F		D		
Réaction de Maillard	DD											
Oxydation***	D							d	d	D	D	D
Sulfites	F	D				d		d				
Nitrites	d(pH4)	D						d		d		
Oxyde d'éthylène		D										
Traitement alcalin	d	D	d	d	D	d		d	d			
Séchage à l'air	d				d					D	d	
Lumière			D		D	d			d		D	
Irradiation	D	d	d			d				D	d	D
Cystéine					D	F						
Composés carboxylés		d		d	d							

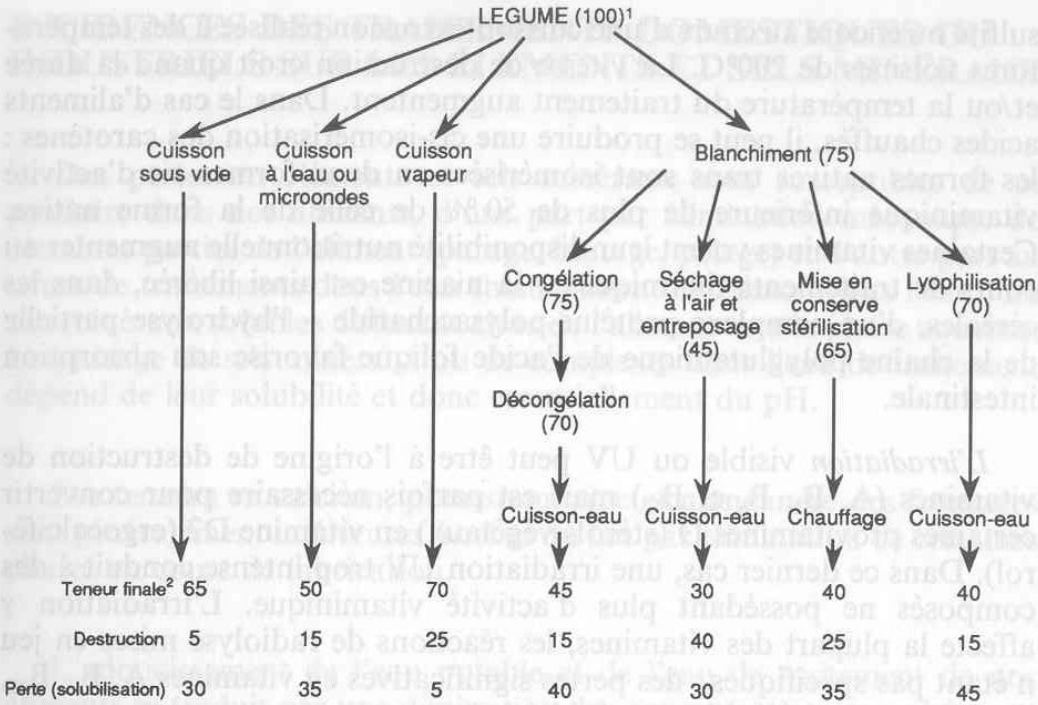
* avec élimination du germe, blutage
** les effets défavorables des traitements thermiques augmentent surtout avec la température
*** peroxydes lipidiques, eau oxygénée, etc.
P : perte importante ou minime (p) par élimination mécanique ou diffusion le plus souvent dans l'eau
D : destruction importante ou minime (d)
F : effet favorable par génération d'une forme active

Enfin, il est bon de savoir que des dégradations, souvent catalysées par des enzymes, peuvent se produire spontanément *après récolte ou post-mortem.* Ainsi, par exemple, des différences très importantes existent dans la teneur en vitamine C de fruits ou de légumes selon qu'ils viennent d'être récoltés ou qu'ils ont subi un entreposage et un transport de longues durées. Le blanchiment, bien que présentant des inconvénients qui seront analysés plus loin, contribue par ailleurs à la stabilisation de vitamines par inactivation d'enzymes (oxydases, peroxydases) catalysant directement ou non la destruction de vitamines.

Certains *traitements mécaniques* ont des effets défavorables par élimination de parties riches en vitamines. Ainsi le parage ou l'épluchage pratiqué avec les fruits et les légumes conduit à des pertes en vitamines avec la « peau » ou les parties éliminées (la teneur en vitamine C est plus élevée dans la peau des pommes que dans le reste du fruit ; il en est de même pour le cœur de l'ananas qui est généralement éliminé ; chez la carotte, la pomme de terre, la betterave ou encore l'oignon, c'est dans les couches épidermiques généralement éliminées que la teneur en niacine est la plus élevée. Le parage des épinards, des asperges, des haricots verts se traduit par des éliminations de portions qui renferment des quantités non négligeables de nutriments). La fabrication de farines à partir de graines de céréales (meunerie) se traduit par des réductions importantes en nutriments, réductions dont l'importance est fonction de l'efficacité avec laquelle l'endosperme est séparé du reste de la graine (son et germe). Cette réduction dépasse 80 % pour la thiamine, la biotine, la vitamine B_6 et l'acide nicotinique et est voisine de 50 % avec la vitamine E, l'acide pantothénique, la riboflavine et l'acide folique. Pour compenser ces « pertes » certains pays autorisent l'enrichissement des farines en thiamine, niacine, riboflavine et aussi en fer.

Si certains traitements chimiques sont associés à des traitements mécaniques (pelage en milieu sodique) les pertes observées sont généralement amplifiées.

Une des principales causes de pertes de *vitamines hydrosolubles* résulte de leur *diffusion du tissu qui les contient vers un milieu aqueux.* Ceci se produit au cours d'opérations comme le lavage, certains types de convoyage, le blanchiment, le refroidissement ou au cours des traitements par la chaleur réalisés en milieu aqueux. Il est possible de diminuer ces pertes en réduisant le volume d'eau utilisé, en faisant en sorte que la surface d'échange aliment/eau soit petite (éviter les fragmentations), en récupérant, quand cela s'avère possible, les eaux de « cuisson », ou enfin en utilisant la vapeur pour procéder au blanchiment ou à la cuisson. Les pertes estimées en vitamine C au cours de traitements appliqués à un aliment de type légume (Figure 1) montrent toute l'importance de ces phénomènes de diffusion.



1 Teneur initiale, base 100
2 Teneur finale exprimée en % de la teneur initiale
( ) Teneur initiale

Figure 1

Evolution de la teneur en vitamine C d'un aliment type légume au cours de traitements culinaires domestiques ou industriels.

Quelques vitamines peuvent être détruites par oxydation (vitamine A, B_1, C, E, acide folique, biotine). Le séchage à l'air chaud, l'entreposage de longue durée à l'état déshydraté ou congelé, le contact avec des lipides en voie d'oxydation, les traitements par l'eau oxygénée (utilisés pour obtenir la stérilité d'emballages du type Tétrapak), sont ainsi parfois nuisibles. Dans le cas de la vitamine C, cette réaction a été très étudiée ; elle se produit en milieu neutre ou alcalin en présence d'oxygène et est catalysée par des traces de métaux (cuivre) ou par la lumière ou encore par une ascorbate oxydase.

De nombreuses vitamines perdent leur activité sous l'effet de traitements thermiques (cuisson, stérilisation, cuisson-extrusion, etc.). Les plus thermosensibles sont la vitamine C et la thiamine, en particulier dans les aliments dont le pH est supérieur à 4,5-5. Les vitamines B_6 et B_{12} sont aussi thermosensibles ; leur destruction dépasse 80 % dans le lait stérilisé en bouteille à 120°C pendant 15 minutes mais devient négligeable dans le lait stérilisé UHT. Dans la plupart des aliments « chauffés » cette destruction n'affecte qu'environ 20 % de la thiamine initiale et ne dépasse 50 % que dans le cas d'une cuisson en milieu alcalin, en milieu

sulfité ou encore au cours d'une cuisson-extrusion réalisée à des températures voisines de 200°C. La vitesse de destruction croît quand la durée et/ou la température du traitement augmentent. Dans le cas d'aliments acides chauffés, il peut se produire une cis-isomérisation des carotènes : les formes natives trans sont isomérisées en deux formes cis d'activité vitaminique inférieure de plus de 50 % de celle de la forme native. Certaines vitamines voient leur disponibilité nutritionnelle augmenter au cours de traitements thermiques – la niacine est ainsi libérée, dans les céréales, d'un complexe protéine-polysaccharide – l'hydrolyse partielle de la chaîne polyglutamique de l'acide folique favorise son absorption intestinale.

L'irradiation visible ou UV peut être à l'origine de destruction de vitamines (A, B_2, B_6 et B_{12}) mais est parfois nécessaire pour convertir certaines provitamines D (stérols végétaux) en vitamine D2 (ergocalciférol). Dans ce dernier cas, une irradiation UV trop intense conduit à des composés ne possédant plus d'activité vitaminique. L'irradiation γ affecte la plupart des vitamines, les réactions de radiolyse mises en jeu n'étant pas spécifiques ; des pertes significatives en vitamines A, B_1, B_{12}, C et E ont ainsi été mises en évidence.

L'entreposage des aliments déshydratés ou appertisés à température ambiante et même l'entreposage à l'état congelé se traduisent par une lente dégradation de certaines vitamines (vitamines A, B_1, B_6, C, E).

Certains *additifs* ou *composants alimentaires* ont des effets défavorables sur certaines vitamines. Les anthocyanes, présents dans de nombreux fruits, favorisent la dégradation de la vitamine C. Les sulfites, utilisés comme inhibiteurs des brunissements enzymatique et non-enzymatique des fruits et légumes, protègent la vitamine C par leur pouvoir réducteur mais conduisent à la destruction de la vitamine B_1 par leur pouvoir nucléophile. Les nitrites réagissent rapidement avec la vitamine C et peuvent également conduire à la destruction des carotènes provitamines, de la vitamine B_1 et de l'acide folique. L'oxyde d'éthylène, agent de stérilisation des épices, peut inactiver la thiamine par alkylation. Les traitements alcalins peuvent largement contribuer à la destruction de certaines vitamines (vitamines B_1, B_5, C). En présence de protéines, une réaction de Maillard peut se produire avec la vitamine C. Par ailleurs, certains des composés carbonylés réactifs apparaissant au cours de la « classique » réaction de Maillard, peuvent réagir avec les vitamines B_1, B_5 et B_6 et les inactiver. Il en est de même avec certains composés carbonylés apparaissant au cours de l'oxydation des lipides.

Il faut enfin noter que la teneur en vitamines des aliments peut augmenter au cours de leur fermentation, notamment en vitamines du groupe B (produits laitiers fermentés, pain, etc.).

INCIDENCES DES TRAITEMENTS DOMESTIQUES OU INDUSTRIELS SUR LES ÉLÉMENTS ET SELS MINÉRAUX

Des pertes en éléments et sels minéraux sont susceptibles de se produire dans nos aliments, d'une part par élimination mécanique de certaines parties de l'aliment (parage, blutage, pelage) et d'autre part au cours de traitements dans l'eau (blanchiment et cuisson dans l'eau), les sels minéraux solubles diffusant alors de l'aliment vers la phase aqueuse. Le passage de sels minéraux ou de complexes dans l'eau de traitement dépend de leur solubilité et donc essentiellement du pH.

Les teneurs en calcium, potassium, zinc et manganèse des fromages sont généralement inférieures à celles du lait par élimination de certaines phases en cours de fabrication.

L'adoucissement de l'eau potable et de l'eau de traitement de nos aliments se traduit par une diminution des concentrations en calcium et magnésium et selon la technologie utilisée par un enrichissement en sodium.

Les traitements thermiques en milieux aqueux conduisent à des pertes en éléments minéraux qui sont souvent très importantes. Les pertes liées au blanchiment des légumes dans l'eau sont variables et atteignent dans le cas de l'épinard 35 % pour le phosphore et le magnésium, 45 % pour le sodium, 55 % pour le potassium et 70 % pour le nitrate. La perte de nitrate doit être considérée comme favorable aussi bien en ce qui concerne les problèmes de nutrition qu'en raison de l'effet défavorable qu'exercent ces sels sur la corrosion des boîtes de conserve. La cuisson dans l'eau aboutit à des effets comparables à ceux du blanchiment. Par exemple, les pertes en minéraux résultant de la cuisson de haricots sont d'environ 50 % pour le calcium, le fer, le zinc, d'environ 60 % pour le cuivre et le manganèse et atteignent environ 65 % pour le magnésium, le phosphore et le potassium. Au cours de la fabrication de conserves, les éléments et minéraux hydrosolubles passent en quantité importante dans le liquide de couverture. La cuisson du poisson dans l'eau aboutit à l'extraction d'une grande proportion de l'iode.

Une amélioration de la disponibilité nutritionnelle du fer est obtenue par autoclavage dans les concentrés protéiques de soja ; celle du zinc présent sous forme de phytate est améliorée par cuisson au four au cours de la panification.

Un gain en certains éléments ou sels minéraux est observé dans certaines situations : la cuisson dans une eau dure entraîne un enrichissement en calcium, le contact avec certains appareils un gain en fer, cuivre, zinc, manganèse, chrome, nickel et le contact avec les boîtes et autres récipients utilisés pour les conserves une augmentation des teneurs en étain, fer, aluminium, plomb, cuivre, zinc. Une élévation de la teneur en sodium d'un aliment est toujours observée en cas de pelage par la soude, de salage et de saumurage. Généralement, ces gains sont défavorables pour la saveur, la couleur et parfois même la consistance tandis que leurs effets nutritionnels sont relativement minimes.

Dans quelques cas précis, cet enrichissement est intentionnel : addition d'iode au chlorure de sodium, fluoration des eaux de boisson, adjonction de calcium, fer, zinc et magnésium à des aliments divers tels que farine, aliments infantiles, aliments de remplacement, etc. Il est important de s'assurer après cette opération de la bonne disponibilité nutritionnelle des composés ajoutés. Dans le cas du fer, les sels ferreux qui sont les plus disponibles pour l'individu sont malheureusement d'excellents catalyseurs de réactions de détérioration.

CONCLUSION ET SIGNIFICATION DE CES MODIFICATIONS

A l'exception de quelques risques rares d'effets toxiques ou antinutritionnels, de très nombreux facteurs sont à considérer pour estimer les incidences nutritionnelles réelles de l'ensemble des modifications qui viennent d'être décrites dans les précédents chapitres. Ainsi il est évident que ces destructions ou pertes n'auront une importance réelle que si le régime n'apporte pas quotidiennement une quantité suffisante du nutriment en cause. Dans les pays industrialisés les carences majeures en un ou en plusieurs nutriments sont exceptionnelles, mais il est fréquent d'observer des déficiences modérées, ou simplement des apports sous-optimaux. Par contre, dans de nombreux pays en voie de développement, des carences importantes en calories, en protéines, en vitamines (A, B1, B2, B6, C, D, acide folique, niacine) et en éléments (calcium, chrome, fer, fluor, iode, magnésium, manganèse et zinc) existent. Ces carences résultent surtout d'une sous-alimentation et d'une consommation d'aliments très peu variés.

Il n'en reste pas moins vrai qu'une très grande attention doit être apportée à la qualité nutritionnelle de nos aliments et qu'il est nécessaire de s'assurer que les traitements technologiques de plus en plus nombreux auxquels sont ou seront soumis nos aliments n'ont pas d'effets défavorables ou toxiques.

OPTIMISATION DE LA QUALITÉ NUTRITIONNELLE DES ALIMENTS

Pour tendre vers une qualité nutritionnelle optimale de nos aliments, il est d'abord nécessaire de disposer d'une banque de données la plus complète possible et très facile d'accès. Cette banque de données devrait permettre à tout un chacun (technologue, nutritionniste, industriel, ménagère, etc.) d'accéder à des connaissances aussi variées que teneurs en nutriments des aliments ou effets de certains traitements sur ces mêmes nutriments ou encore disponibilité nutritionnelle.

Dans les chapitres précédents, il a été montré que les traitements technologiques appliqués à nos aliments pouvaient avoir des effets défavorables. Il appartient donc à l'industriel fabriquant de s'assurer que ces pertes sont minimales. Pour ce faire, plusieurs approches dépendant du type d'aliment et du procédé sont possibles.

Traitement UHT (Ultra Haute Température)

Un des plus récents développements en technologie alimentaire est le traitement UHT associé à l'emballage aseptique. Le but de la plupart des traitements thermiques industriels (pasteurisation, stérilisation) est de réduire la population microbienne dans le produit pour lui conférer une qualité hygiénique parfaite et une bonne durée de vie.

Bien qu'atteignant une même qualité hygiénique (destruction identique de micro-organismes) le traitement UHT préserve mieux les nutriments et les qualités organoleptiques que la plupart des autres traitements de stérilisation. Ce phénomène résulte de la valeur élevée de l'énergie d'activation de la destruction des micro-organismes par rapport à celle de la dégradation des vitamines par exemple.

L'interprétation physico-chimique en est la suivante :

La destruction des micro-organismes et celle des vitamines suit une cinétique de premier ordre du type : $dN/dt = -kN$, ce qui signifie que la variation du nombre de micro-organismes (dN) en fonction du temps (dt) est proportionnelle au nombre de micro-organismes (N) du milieu, la constante de proportionnalité (k) étant la constante de vitesse. Pour les vitamines la loi est : $dC/dt = -k_1C$, C étant la concentration de la vitamine. Ces équations peuvent se résoudre et s'écrire respectivement :

$\text{Log } N = -kt + \text{Log } N_0$ et $\text{Log } C = -k_1t + \text{Log } C_0$ (1).

N_0 et C_0 sont respectivement les nombres de micro-organismes et la concentration en vitamines dans le produit initial avant traitement.

Les constantes de vitesse k et k_1 sont liées à la température par la loi d'Arrhénius :

$\text{Log } k = -E_a/RT + \text{Log } A$ et $\text{Log } k_1 = -E_a1/RT + \text{Log } A_1$ (2).

Dans cette loi E_a et E_a1 représentent les énergies d'activation respectivement des réactions de destruction des micro-organismes et des vitamines, R est la constante des gaz parfaits, T la température absolue, A et A_1 des constantes de fréquence de collision (constantes faibles dans les réactions de destruction de vitamines ou de micro-organismes). Certaines énergies d'activation sont indiquées ci-dessous :

Tableau 5

Traitement ou composé	Energie d'activation (kJ mole^{-1})
Coefficient de diffusion (eau)	8 à 40
séchage, cristallisation	15 à 60
vitamines	50 à 120
flaveur, texture, couleur	45 à 125
inactivation d'enzymes	60 à 420
inactivation de spores	200 à 320

Lorsqu'un traitement thermique antimicrobien est appliqué à un produit alimentaire, son but est de réduire approximativement de 10^{10} à 1 la population bactérienne supposée présente (spores dans le cas d'une stérilisation ; voir chapitre « Microbiologie alimentaire »). A partir de l'équation (1), on obtient :

$t = \text{Log } (N_0/N) \cdot 1/k$

t étant le temps de traitement calculé pour obtenir cet effet sur les spores, ce même temps de traitement sera bien sûr appliqué aux vitamines présentes dans le produit alimentaire ; dans ce cas on peut écrire à partir de l'équation (1) :

$t = \text{Log } (C_0/C) \cdot 1/k_1 = \text{Log } (N_0/N) \cdot 1/k$

Comme l'énergie d'activation de la réaction de destruction des spores est supérieure à celle de la destruction des vitamines, la constante de

vitesse k augmente plus vite que k_1 quand la température augmente. En conséquence, il apparaît qu'il existe une température pour laquelle le niveau de stérilisation choisi peut être atteint tandis que dans les mêmes conditions (temps – température) la perte en vitamine sera minime. Un exemple avec comme spores celles de *Bacillus stearothermophilus* (E_a = 300 KJ/mole) et comme vitamine la thiamine (E_a1 = 90 KJ/mole) est indiqué dans le tableau ci-dessous pour une valeur de N_0/N égale à 10^{10} :

Tableau 6

Température (°C)	Temps pour obtenir $N/N_0 = 10^{10}$ (min)	Perte en thiamine (%)
100	530	99,99
110	50	75
120	5	7
130	0,5	2
140	0,07	1

L'analyse de ces résultats montre bien qu'un traitement réalisé à température élevée pendant quelques secondes (140°C, 4 secondes) permet d'obtenir un produit d'excellentes qualités à la fois hygiénique et nutritionnelle. Ces traitements qualifiés de traitements UHT (Ultra Haute Température) ou encore HTST (High Temperature Short Time) sont appliqués à des produits liquides relativement fluides ; ils sont dans la plupart des cas associés à un remplissage aseptique. Il est bon de signaler que certaines enzymes sont actives après de tels traitements, ce qui limite alors la durée de vie du produit. Ces technologies qui permettent également d'optimiser les qualités organoleptiques, peuvent nécessiter des entreposages contrôlés (par exemple aux environs de 5°C) pour conserver au produit ses qualités.

Pour les aliments solides s'échauffant par conduction et soumis à une UHT, des modifications défavorables de couleur et de texture apparaissent souvent dans le produit au niveau de la zone de contact avec l'emballage. L'optimisation de la qualité nutritionnelle de ces aliments est complexe et de nombreux paramètres sont à considérer pour y parvenir. Actuellement, seule la stratégie des contrôles réalisée pour chaque produit permet d'optimiser les qualités hygiénique, organoleptique et nutritionnelle. La limite de température à ne pas dépasser pour certains produits alimentaires se situe aux environs de 130°C. Par exemple pour des carottes en sauce (morceaux d'environ 1 à 2 cm) la température maximale du traitement ne doit pas dépasser 132°C. Cette limite permet d'éviter un ramollissement trop important en surface et la présence d'enzymes actives au cœur du produit.

La texture, l'aspect et la flaveur sont des caractéristiques très importantes des produits alimentaires du fait de leur facile évaluation par le consommateur. Alors que les effets des traitements culinaires domestiques ou industriels sur les qualités microbiologique et nutritionnelle sont relativement faciles à quantifier, leurs effets sur la couleur, la flaveur ou la texture restent encore difficiles à étudier. Bien que des énergies d'activation de modification de texture (viande de bœuf : E_a compris entre 100 et 500 kJ/mole ; pois : E_a voisin de 90 kJ/mole ; gélatinisation de l'amidon : E_a voisin de 70 kJ/mole) soient connues, l'analyse cinétique des modifications des qualités organoleptiques n'est pas aisée. En effet, les modèles utilisés dans des conditions isothermes ne sont généralement pas applicables dans des conditions non isothermes et seule l'analyse ou la comparaison à d'autres produits permet d'améliorer la qualité.

Par ailleurs, il s'avère souvent que les traitements industriels (appertisation) provoquent moins de pertes en nutriments que les traitements domestiques correspondants en raison des contrôles auxquels ils sont soumis (température, durée, taux d'oxygène, etc.).

Pour la cuisson sous vide, voir le chapitre « Conservation et cuisson des aliments ».

Prédiction des pertes en nutriments ou de modifications au cours de l'entreposage

Il s'agit là d'une autre approche pour optimiser la qualité de nos aliments. Pouvoir prédire ces pertes ou modifications permet au fabricant d'indiquer par exemple la teneur minimale d'un nutriment quelconque à la date de péremption. Pour atteindre cet objectif, il faut d'abord connaître la composition initiale, le devenir temps-température du produit dans les divers circuits de distribution suivis, les propriétés de l'emballage (perméabilité à l'oxygène, à la lumière et à la vapeur d'eau) et enfin d'autres paramètres comme par exemple l'humidité relative, la pression partielle en oxygène ou encore l'illumination.

Pour des produits simples, cette prédiction est relativement facile à faire. Ainsi l'évolution de la teneur en vitamine C d'un jus de fruit (en emballage du type Tétrapak) au cours de l'entreposage peut être prédite. Dans ce cas, la perte en vitamine résulte de deux réactions différentes : la première, rapide, consiste en une oxydation en présence d'oxygène et la deuxième, lente, se produit en anaérobiose et possède une énergie d'activation élevée. Ainsi la perte en vitamine C résultant de la consom-

mation de l'oxygène présent est faible tandis que la réaction se poursuit de façon significative à des températures voisines de 30°C. L'analyse mathématique des phénomènes mis en jeu est réalisable et permet alors au fabricant d'annoncer la teneur résiduelle à un moment donné.

Pour les produits plus complexes non homogènes, et pour des nutriments de structures variées, les prédictions sont de nos jours très difficiles à réaliser. Une des solutions permettant de minimiser les pertes en cours d'entreposage est de réduire et de mieux contrôler la distribution commerciale. Par ailleurs, l'importance sans cesse croissante de la restauration collective devrait aboutir très rapidement à l'amélioration de la qualité par des modifications des technologies utilisées. Par exemple l'utilisation de fours à micro-ondes permettant un réchauffage pratiquement instantané éviterait d'avoir à garder chauds des aliments pendant des heures avant de les consommer.

En conclusion générale, il apparaît que de légères pertes de valeur nutritionnelle peuvent être acceptées dans nos aliments si ceux-ci sont plus facilement disponibles ou si le rapport qualité/prix s'en trouve très nettement augmenté. Par contre la qualité hygiénique, portant essentiellement sur les plans microbiologiques et toxicologiques, se doit impérativement de tendre vers la norme zéro défaut. Enfin, il faut remarquer que la durée limite de commercialisation ou de conservation (DLC) de la plupart de nos aliments a augmenté de façon significative au cours de ces dernières décennies, par association de nombreuses technologies, et que cette augmentation ne s'est pas produite au détriment de composantes nécessaires de la qualité.

QUELQUES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen J.C., Hamilton R.J. editors, *Rancidity in Foods,* Elsevier Applied Science, London, 1989.
- Birch G.G., Lindley M.G. editors, *Interaction of Food Components,* Elsevier, Oxford, England, 1986.
- Birch G.G., Parker K.J. editors, *Food and Health,* Elsevier, Oxford, 1980.
- Cheftel J.C., Cheftel H., Besançon P., *Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments,* Volumes 1 et 2, Technique et Documentation/Lavoisier, Paris, 1977.
- Cheftel J.C., « Chemical and Nutritional Modifications of Food proteins due to processing and storage », in *Food Proteins,* Whitaker

J.R., Tannenbaum S.R. editors, p. 401-445, Avi Publishing CoWestport C.T., 1977.
- Cheftel J.C., Cuq J.L., Lorient D., *Protéines alimentaires,* Technique et Documentation/Lavoisier, Paris, 1985.
- Chichester C.O., Schweigert B.S., *Advances in Food Research,* Vol. 31 et 32, Academic Press, London, 1988.
- Downey W.K. editor, *Food Quality and Nutrition,* Elsevier, Oxford, 1978.
- Fennema O.R. editor, *Food Chemistry,* Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 1985.
- Finot P.A., « Influence of processing on the nutritional value of proteins », in *Plant Proteins for Human Food,* Bodwell C.E., Petit L. editors, 235-247, Kluwer Academic Publishers Group, The Hague, 1981.
- Friedman M. editor, *Protein Nutritional Quality of Foods and Feeds,* Vol. 1, Plenum Press, New York and London, 1978.
- Fujimaki M., Namiki M., Kato H. editors, *Amino-carbonyl reactions in food and biological systems,* Elsevier, 1986.
- Hoyem T., Kvale O. editors, *Physical, Chemical and Biological Charges in Food caused by thermal processing,* Elsevier, 1977.
- Mauron J., « Le comportement chimique des protéines lors de la préparation des aliments et ses incidences biologiques », *J. Internat. Vitaminol.,* 1970, 40, 209-227.
- Priestley R.J. editor, *Effects of heating on foodstuffs,* Elsevier, Oxford, 1979.
- Rechcigl M. editor, *CRC Handbook of Nutritive Value of processed Food,* CRC Press Inc., NW Boca Raton, 1982.
- Synge RLM, « Damage to nutritional value of plant proteins by chemical reaction during storage and processing », *Qual. Plant.,* 1976, 26, 9-27.
- Waller G.R., Feather M.S. editors, *The Maillard Reaction in Foods and Nutrition,* ACS Symposium Series 215, American Chemical Society, Washington D.C., 1983.
- Zeuthen P., Cheftel J.C., Eriksson C., Jul M., Leniger H., Linko P., Varela G., Vos G., *Thermal Processing and Quality of Foods,* Proceedings of the final seminar of the Cost 91 programme, Elsevier, Oxford, 1984.

Douzième partie

MICROBIOLOGIE ALIMENTAIRE

Jean-Louis CUQ, Joseph GUIRAUD, Jean-Marie NAVARRO

MICROBIOLOGIE ALIMENTAIRE

INTRODUCTION

Les micro-organismes jouent un rôle fondamental dans la nature, participant aux cycles des éléments chimiques et entretenant des relations nombreuses et variées avec les autres êtres vivants. Certaines de ces relations s'effectuent au niveau du tube digestif et ont une incidence directe sur les processus de nutrition. La matière alimentaire brute est également le siège de développements et d'activités microbiennes diverses. Au cours des traitements et transformations technologiques, l'homme s'efforce de maîtriser et de contrôler ces activités et parfois de les utiliser. La présence des micro-organismes au sein d'un aliment peut enfin avoir une incidence sur sa qualité sanitaire. Dans les pages qui suivent, nous étudierons successivement les caractéristiques générales des micro-organismes intervenant en nutrition et en industrie alimentaire, leur métabolisme, la cinétique de leur action et la façon de la contrôler, leur rôle dans le cadre de l'alimentation et enfin les méthodes de la microbiologie alimentaire.

LES MICRO-ORGANISMES

Les micro-organismes ou êtres vivants microscopiques peuvent être classés en 5 groupes majeurs : les virus dépourvus de structure cellulaire, les bactéries, les algues, les champignons et les protozoaires qui sont des organismes à structure cellulaire. Les bactéries (et certaines algues :

cyanophycées) sont des organismes unicellulaires de type primitif (cellule procaryote) alors que les autres organismes cellulaires ont des cellules de structure comparable à celles des animaux et végétaux (cellule eucaryote). Les bactéries et les champignons (levures et moisissures) ont une place prépondérante en microbiologie alimentaire ; cependant des espèces appartenant aux autres groupes peuvent jouer un rôle non négligeable.

Les bactéries

1) Morphologie et structure

Les bactéries sont des êtres unicellulaires. La cellule bactérienne présente différentes formes dont les plus courantes sont le coque et le bacille. Ses dimensions varient de 0,2 à une dizaine de micromètres. La cellule bactérienne est limitée par une membrane cytoplasmique et par une enveloppe de structure variable selon les espèces. La nature chimique de l'enveloppe et en particulier sa teneur en lipides permet de classer les bactéries en deux grands groupes (Gram + et Gram −) à l'aide d'une technique de coloration simple.

La partie essentielle de l'enveloppe est la paroi dont la structure de base est un peptidoglycane ou muréine. Cette paroi, généralement perméable aux petites molécules, confère à la cellule sa forme et sa rigidité. Elle possède des propriétés antigéniques et contient des sites récepteurs pour certains virus (bactériophages) ; de plus, elle protège la cellule de la pression osmotique.

Outre la paroi, l'enveloppe cellulaire comporte chez certaines espèces une membrane externe riche en protéines, lipides et polysaccharides. Cette membrane est imperméable à de grosses molécules et limite un espace périplasmique ; elle est dotée de propriétés antigéniques, peut avoir un rôle en pathologie humaine (endotoxine de *Salmonella*). Certaines espèces possèdent une capsule de composition chimique variable mais souvent constituée de polysaccharides ; cette capsule peut conférer au germe son pouvoir pathogène en facilitant sa fixation (glycocalyx) ou en le protégeant contre la phagocytose.

La membrane cytoplasmique, véritable barrière de perméabilité de la cellule limite un cytoplasme dépourvu de vacuoles et de mitochondries. Les enzymes du métabolisme énergétique sont localisées sur cette membrane. Il n'existe pas de noyau et l'appareil nucléaire se limite à un chromosome circulaire ou génophore situé dans le cytoplasme. Ce dernier contient des inclusions diverses mais pas de vacuoles. Les cellules

bactériennes peuvent avoir une mobilité active grâce à l'existence d'un système ciliaire (un ou plusieurs cils à position polaire ou périphérique). Dans des conditions défavorables il apparaît pour certaines espèces une spore thermorésistante, forme de vie latente dont la persistance peut être très longue. La spore bactérienne présente un cytoplasme condensé autour du génophore et des enveloppes protectrices multiples.

2) Physiologie

Il est difficile de donner des notions générales sur la physiologie des bactéries tant est grande la diversité des types trophiques et respiratoires et d'une manière plus générale des types physiologiques. Les bactéries intéressant la microbiologie alimentaire sont hétérotrophes, c'est-à-dire qu'elles nécessitent la présence d'un substrat organique. Certaines espèces sont saprophytes, vivant librement dans la nature, d'autres sont des commensales de l'homme et des animaux, d'autres enfin sont des parasites ou possèdent un pouvoir pathogène ou toxinogène. Selon les espèces les bactéries sont aérobies ou anaérobies et ceci de manière stricte ou facultative ; elles peuvent posséder un métabolisme respiratoire ou fermentaire ; les conditions de leur développement sont très variées : vis-à-vis de la température, du pH, de la teneur en eau... (voir plus loin : « Les besoins nutritifs et les conditions de vie »).

3) Reproduction

Les bactéries se divisent par scissiparité. Cette reproduction végétative se fait par un processus simple et peut être très rapide lorsque les conditions de milieu sont favorables. La reproduction sexuée n'existe pas chez les bactéries, mais il existe des phénomènes parasexuels : conjugaison, transformation, transduction... qui jouent un rôle voisin.

4) Principaux groupes impliqués en microbiologie alimentaire

Les groupes bactériens les plus importants en microbiologie alimentaire sont :

- **Les entérobactéries**

Il s'agit d'une famille dont de nombreuses espèces sont des hôtes normaux (commensaux) de l'intestin de l'homme et des animaux. Ces bactéries Gram- très répandues dans la nature sont souvent des contaminants alimentaires (contamination fécale) ; elles sont capables de dégra-

dations importantes et certaines sont pathogènes *(Salmonella, Shigella)*. L'espèce type est *Escherichia coli*.

- **Les bacilles Gram − saprophytes aérobies**

Ce vaste groupe contient des familles variées : le genre *Pseudomonas* peut être choisi comme genre type. Ces bactéries sont très répandues dans la nature et en particulier dans le monde végétal où elles peuvent se révéler phytopathogènes. Elles peuvent contaminer les produits alimentaires et les dégrader. Les bactéries acétiques agents de la fermentation du même nom peuvent être incluses dans ce groupe.

- **Les vibrions**

Le genre *Vibrio* (bacilles Gram − incurvés en virgule) regroupe des espèces saprophytes des eaux mais également des espèces pathogènes transmises par l'eau ou les produits en contact avec l'eau. Le genre *Campylobacter* peut être classé dans les vibrions.

- **Les *Brucella***

Ces petits bacilles Gram − sont des bactéries pathogènes transmises par la viande ou le lait.

- **Les bactéries sporulées**

Ce groupe, très répandu dans la nature et en particulier dans le sol est caractérisé par la thermorésistance de ses spores. Il s'agit de bacille Gram + dont certains sont aérobies *(Bacillus)* et d'autres anaérobies le plus souvent stricts *(Clostridium)*. Ce sont des agents de dégradation des aliments et certaines espèces sont toxinogènes.

- **Les bactéries lactiques**

Ce groupe inclut les agents des fermentations lactiques. Il s'agit de bacilles *(Lactobacillus)* ou de coques *(Leuconostoc, Pediococcus, Streptococcus)* Gram + à exigences nutritives parfois complexes qui contaminent des produits alimentaires riches et en particulier le lait. Agents de dégradations dans certaines circonstances, ce sont aussi des agents technologiques abondamment utilisés en industrie alimentaire. Certaines espèces de *Streptococcus* sont pathogènes.

- **Les coques Gram + non lactiques**

Il s'agit de bactéries commensales de la peau des animaux et surtout de l'homme qui sont des contaminants fréquents d'aliments (contamination par manipulation) pouvant entraîner des dégradations et parfois des problèmes sanitaires *(Micrococcus, Staphylococcus)*.

• **Les « actinobactéries » Gram+**

Ce vaste ensemble regroupe des familles variées de bactéries présentant souvent des morphologies particulières et dont la plupart ont un métabolisme aérobie *(Brevibacterium, Corynebacterium, Microbacterium, Streptomyces...)*. Par leur écologie et leurs conséquences ils se rapprochent des Gram- saprophytes aérobies. Des pathogènes comme *Mycobacterium tuberculosis, Listeria, Erysipelothix...* peuvent être inclus dans cet ensemble.

Les levures et moisissures

1) Morphologie et structure

Les levures sont des champignons unicellulaires (au moins dans la plus grande partie de leur cycle biologique). Les cellules dont la taille se situe aux alentours de 10 micromètres sont sphériques, elliptiques ou apiculées. Les moisissures sont des champignons filamenteux dont le thalle ou mycélium est constitué de filaments ou hyphes pouvant se ramifier. Le mycélium peut être multicellulaire (ou septé) ou cénocytique (non septé). Les cellules peuvent contenir de un à plusieurs noyaux. Dans les deux cas, levure ou moisissure, la structure de la cellule est voisine de celle d'une cellule végétale.

La cellule est limitée par une paroi riche en cellulose ou en chitine selon les groupes et contenant en quantités variables divers autres polysaccharides, des substances pectiques, des protéines (certaines à activité enzymatique). Pour certaines espèces, il peut exister une capsule polysaccharidique. Le cytoplasme est limité par une membrane cytoplasmique qui est la barrière de perméabilité cellulaire. Il contient des ribosomes, des mitochondries, un réseau complexe de membranes internes, des vacuoles, des réserves. Le système nucléaire se compose d'un ou plusieurs noyaux de petite taille possédant plusieurs chromosomes difficiles à observer.

2) Physiologie

Levures et moisissures sont des micro-organismes hétérotrophes. Contrairement aux bactéries, on peut mentionner un certain nombre de caractères physiologiques généraux. Ce sont des organismes aérobies, en général acidophiles, mésophiles et souvent osmophiles, c'est-à-dire capables de se développer sur des milieux à faible activité d'eau et riches en

sucres. Riches en équipements enzymatiques lytiques, les moisissures sont des agents actifs de dégradation, mais ce sont parfois de bons agents technologiques très utilisés en industrie alimentaire. Le métabolisme est de type oxydatif (respiration) ou mixte. Lorsqu'il existe un métabolisme fermentaire, ce qui est fréquent chez les levures, il s'agit le plus souvent de la fermentation alcoolique (voir plus loin, « Le métabolisme microbien »).

3) Reproduction

Les levures et moisissures possèdent deux types de reproduction. La reproduction végétative fait intervenir une mitose. Chez la levure elle conduit à une division cellulaire par bourgeonnement, plus rarement par scissiparité. Chez les moisissures, elle peut se manifester par une croissance des hyphes avec ou sans division cellulaire (septation), par la dissémination de cellules issues d'un bourgeonnement ou d'une scissiparité (thallospores) ou enfin par la production d'un appareil fructifère libérant des cellules disséminatrices (conidiospores ou sporangiospores). La reproduction sexuée n'existe que pour certaines espèces : elle fait intervenir la fécondation et la méiose. Elle conduit à la formation de cellules de dissémination qui peuvent être des zygotes (zygospore des mucorales) ou les produits de la méiose (ascosphores des levures). Les différentes spores végétatives et sexuelles peuvent se comporter comme des formes de résistance mais cette résistance est moindre que celle des spores bactériennes.

4) Grands groupes impliqués en microbiologie alimentaire

Parmi les moisissures, il faut mentionner :

- **Les mucorales**

Ces moisissures sont des saprophytes et souvent des parasites des végétaux. Elles peuvent contaminer de nombreux produits alimentaires. Elles ont généralement une bonne activité amylolytique qui les fait utiliser industriellement dans ce but *(Mucor, Rhizopus)*.

- **Les *Aspergillus* et les *Penicillium***

Ce sont des moisissures très répandues dans les produits végétaux, agents de contamination d'autant plus indésirables que certaines espèces ont un pouvoir toxinogène. D'autres espèces sont des agents technologiques précieux soit pour leur métabolisme fermentaire « aérobie » (pro-

duction d'acide citrique par exemple), soit pour leurs activités enzymatiques (en fromagerie par exemple).

• **Les autres moisissures saprophytes**

Les plus importantes appartiennent aux genres *Cladosporium, Fusarium, Geotrichum, Trichoderma.*

Parmi les levures il faut citer :

• **Les *Saccharomyces***

Il s'agit des levures typiques de la fermentation alcoolique utilisées dans de nombreuses industries.

• **Les autres agents de fermentation alcoolique**

On peut citer *Brettanomyces, Dekkera, Kluyveromyces.*

• **Les autres levures à intérêt industriel**

Certaines sont utilisées pour la production de biomasse (*Candida utilis* = « torula ») ; d'autres sont importantes pour le rôle joué dans les dégradations de produits alimentaires (diverses espèces de *Candida, Debaryomyces, Pichia, Rhodotorula, Trichosporon*).

Les autres Protistes

1) Protozoaires

Il s'agit d'organismes unicellulaires généralement mobiles, proches des animaux. Les cellules sont dépourvues de paroi et sont capables de réaliser la phagocytose. Ce sont des micro-organismes hétérotrophes et on rencontre parmi eux de nombreux parasites qui peuvent être transmis à l'homme par les aliments : *Entomobea* (amibe), *Toxoplasma.*

2) Algues

Ce vaste groupe d'organismes est proche des végétaux dont il possède entre autres la paroi cellulosique et le caractère autotrophe (photosynthétique). Le rôle en alimentation est marginal mais il faut indiquer que certaines algues peuvent être utilisées comme aliment ou comme source de produits utilisables en industrie alimentaire ou en microbiologie

(agar) ; d'autres sont toxiques et peuvent contaminer les produits de la mer : *Gonyaulax*.

Les virus

Certains virus sont des agents pathogènes transmissibles par les aliments. D'autres appelés bactériophages sont des virus bactériens capables de causer des dégâts au sein de populations bactériennes d'intérêt technologique.

1) Structure

Les virus sont des entités organisées sans structure cellulaire propre. Ils sont de très petite taille (ordre de grandeur le nanomètre) ce qui les rend invisibles au microscope optique ; leur étude morphologique nécessite l'utilisation de la microscopie électronique. Les éléments structuraux essentiels sont le génophore constitué d'un seul type d'acide nucléique et la structure de protection de nature protéique de ce matériel (capside). Il peut exister en outre dans certains cas une enveloppe plus complexe. Les principaux types morphologiques sont représentés par les virus à symétrie cubique, hélicoïdale ou mixte.

2) Reproduction

A cause de leur équipement incomplet, les virus ne peuvent se reproduire qu'à l'intérieur d'une cellule hôte dont ils détournent certaines fonctions à leur profit. Ceci se traduit par un parasitisme obligatoire. Un virus est incapable de croître et de se diviser. La reproduction s'effectue par synthèse au sein de l'hôte des éléments viraux puis assemblage en particule virale. Hors d'une cellule, un virus est une particule inerte.

LE MÉTABOLISME MICROBIEN

Les micro-organismes présentent une variété étonnante de types métaboliques. Pour leur vie (entretien ou maintenance), pour leur développement (croissance et multiplication), pour l'expression de leurs propriétés (mobilité, luminescence...), ils ont besoin d'énergie et d'élé-

ments nutritifs. Le catabolisme est l'ensemble des réactions qui permet la récupération d'énergie biologiquement utilisable et la production de métabolites de base à partir des nutriments. L'anabolisme est l'ensemble des réactions qui permettent les synthèses cellulaires à partir des métabolites de base et d'éléments du milieu. La plupart des modifications chimiques entraînées par le développement des micro-organismes dans un aliment sont liées à ces mécanismes.

Les besoins nutritifs et les conditions de vie

Pour qu'un micro-organisme vive ou se développe, il doit trouver dans le milieu tous les éléments nécessaires à ses synthèses. La presque totalité des micro-organismes intéressant l'alimentation sont hétérotrophes, c'est-à-dire qu'ils ont un besoin nutritif obligatoire d'une, et parfois de plusieurs, substances organiques servant de source d'énergie. Les éléments nécessaires sont C, O, H, N en quantité importante, P et S en quantité plus faible et enfin des oligo-éléments en quantité très faible (Ca, Co, Cu, K, Mg, Mn, Na, Fe, Zn...). La molécule organique énergétique apporte en même temps le carbone, l'hydrogène, souvent l'oxygène et parfois de l'azote. L'hydrogène et l'oxygène supplémentaires, l'azote, le phosphore et le soufre peuvent être tirés de molécules organiques ou minérales variées, chaque micro-organisme ayant ses exigences propres. Les oligo-éléments sont toujours utilisés sous forme de sels minéraux. Pour qu'un aliment permette le développement d'un micro-organisme, il doit donc contenir tous les éléments nécessaires à sa nutrition et de plus sous une forme utilisable par ce micro-organisme. Outre les exigences nutritives, le développement microbien est sous la dépendance de conditions physicochimiques dont la nature varie selon l'espèce.

• pH

Le comportement des micro-organismes par rapport au pH est variable. Le tableau 1 donne quelques exemples. On appelle acidophiles les micro-organismes dont le pH optimum se situe au-dessous de 5,5 mais, en industrie alimentaire, on a l'habitude de classer les micro-organismes entre ceux qui peuvent se développer en dessous du pH 4,5 et les autres. Le pH 4,5 permet de séparer les aliments en deux groupes par rapport à leur aptitude à permettre la croissance des principales bactéries pathogènes. En dessous de ce pH les risques sanitaires sont minimes car le développement ou l'activité néfaste de ces bactéries n'est pas possible, au-dessus ils sont importants, en particulier le risque lié à la présence de *Clostridium botulinum*.

(agar) ; d'autres sont toxiques et peuvent contaminer les produits de la mer : *Gonyaulax*.

Les virus

Certains virus sont des agents pathogènes transmissibles par les aliments. D'autres appelés bactériophages sont des virus bactériens capables de causer des dégâts au sein de populations bactériennes d'intérêt technologique.

1) Structure

Les virus sont des entités organisées sans structure cellulaire propre. Ils sont de très petite taille (ordre de grandeur le nanomètre) ce qui les rend invisibles au microscope optique ; leur étude morphologique nécessite l'utilisation de la microscopie électronique. Les éléments structuraux essentiels sont le génophore constitué d'un seul type d'acide nucléique et la structure de protection de nature protéique de ce matériel (capside). Il peut exister en outre dans certains cas une enveloppe plus complexe. Les principaux types morphologiques sont représentés par les virus à symétrie cubique, hélicoïdale ou mixte.

2) Reproduction

A cause de leur équipement incomplet, les virus ne peuvent se reproduire qu'à l'intérieur d'une cellule hôte dont ils détournent certaines fonctions à leur profit. Ceci se traduit par un parasitisme obligatoire. Un virus est incapable de croître et de se diviser. La reproduction s'effectue par synthèse au sein de l'hôte des éléments viraux puis assemblage en particule virale. Hors d'une cellule, un virus est une particule inerte.

LE MÉTABOLISME MICROBIEN

Les micro-organismes présentent une variété étonnante de types métaboliques. Pour leur vie (entretien ou maintenance), pour leur développement (croissance et multiplication), pour l'expression de leurs propriétés (mobilité, luminescence...), ils ont besoin d'énergie et d'élé-

ments nutritifs. Le catabolisme est l'ensemble des réactions qui permet la récupération d'énergie biologiquement utilisable et la production de métabolites de base à partir des nutriments. L'anabolisme est l'ensemble des réactions qui permettent les synthèses cellulaires à partir des métabolites de base et d'éléments du milieu. La plupart des modifications chimiques entraînées par le développement des micro-organismes dans un aliment sont liées à ces mécanismes.

Les besoins nutritifs et les conditions de vie

Pour qu'un micro-organisme vive ou se développe, il doit trouver dans le milieu tous les éléments nécessaires à ses synthèses. La presque totalité des micro-organismes intéressant l'alimentation sont hétérotrophes, c'est-à-dire qu'ils ont un besoin nutritif obligatoire d'une, et parfois de plusieurs, substances organiques servant de source d'énergie. Les éléments nécessaires sont C, O, H, N en quantité importante, P et S en quantité plus faible et enfin des oligo-éléments en quantité très faible (Ca, Co, Cu, K, Mg, Mn, Na, Fe, Zn...). La molécule organique énergétique apporte en même temps le carbone, l'hydrogène, souvent l'oxygène et parfois de l'azote. L'hydrogène et l'oxygène supplémentaires, l'azote, le phosphore et le soufre peuvent être tirés de molécules organiques ou minérales variées, chaque micro-organisme ayant ses exigences propres. Les oligo-éléments sont toujours utilisés sous forme de sels minéraux. Pour qu'un aliment permette le développement d'un micro-organisme, il doit donc contenir tous les éléments nécessaires à sa nutrition et de plus sous une forme utilisable par ce micro-organisme. Outre les exigences nutritives, le développement microbien est sous la dépendance de conditions physicochimiques dont la nature varie selon l'espèce.

• pH

Le comportement des micro-organismes par rapport au pH est variable. Le tableau 1 donne quelques exemples. On appelle acidophiles les micro-organismes dont le pH optimum se situe au-dessous de 5,5 mais, en industrie alimentaire, on a l'habitude de classer les micro-organismes entre ceux qui peuvent se développer en dessous du pH 4,5 et les autres. Le pH 4,5 permet de séparer les aliments en deux groupes par rapport à leur aptitude à permettre la croissance des principales bactéries pathogènes. En dessous de ce pH les risques sanitaires sont minimes car le développement ou l'activité néfaste de ces bactéries n'est pas possible, au-dessus ils sont importants, en particulier le risque lié à la présence de *Clostridium botulinum*.

• **rH (ou potentiel d'oxydoréduction)**

Ce facteur dépend de la nature des substances contenues dans le milieu (oxydants ou réducteurs) mais également de l'aération (aérobiose ou anaérobiose). Le comportement des espèces microbiennes vis-à-vis de ce paramètre est très variable.

Accessibilité des substrats

L'enveloppe cellulaire et plus particulièrement la membrane cytoplasmique constituent une barrière de perméabilité. Pour qu'un substrat puisse être métabolisé, il doit pénétrer dans la cellule ou être dégradé à l'extérieur en substances aptes à pénétrer. Ce dernier cas s'applique à de nombreuses macromolécules qui sont dégradées par l'intermédiaire d'enzymes excrétées par la cellule (ou exoenzymes). Ces enzymes hydrolytiques rejetées dans le milieu sont récupérables industriellement : certaines d'entre elles trouveront une application en industrie alimentaire (amylases, pectinases, protéases, lipases...). L'existence de ces enzymes explique aussi l'importance de certaines réactions de dégradation observées dans certains produits. La pénétration des substrats s'effectue par divers mécanismes : phagocytose ou mécanismes voisins pour de grosses molécules ou des particules (chez les eucaryotes sans paroi : protozoaires), diffusion pour l'eau, les gaz et quelques petites molécules (urée, glycérol), transport spécifique actif ou passif faisant intervenir les perméases pour la plupart des molécules organiques et minérales. Il faut noter que les mêmes mécanismes interviennent pour l'excrétion des produits du métabolisme dans le milieu.

Le métabolisme énergétique et ses conséquences

Le but du métabolisme énergétique est la genèse d'énergie biologiquement utilisable, sous forme d'ATP. L'énergie est générée à partir de réactions d'oxydation qui correspondent à des déshydrogénations. Ces déshydrogénations font intervenir des enzymes diverses qui « transmettent » ensuite l'« hydrogène » (ou plutôt les couples électron-proton) à des transporteurs organisés en chaînes plus ou moins longues et complexes. Une grande partie de l'ATP apparaît au cours de ce transport.

A l'issue du transport, l'élimination de l'« hydrogène » se fait par des mécanismes divers et les conséquences en sont multiples. L'intervention d'une hydrogénase entraîne la libération dans le milieu d'hydrogène

gazeux (chez les bactéries anaérobies). En présence d'oxygène comme accepteur et grâce à l'intervention d'une oxydase, il y a selon le cas formation d'eau ou de peroxyde d'hydrogène. Le premier cas correspond à la respiration aérobie « classique » : si cette seule possibilité existe le micro-organisme est aérobie strict. Dans le deuxième cas, le peroxyde d'hydrogène, produit toxique, doit être décomposé par la catalase. Les espèces réalisant cette production et qui ne possèdent pas la catalase sont tuées par l'oxygène et sont de type anaérobie strict. En présence d'un minéral oxydé servant d'accepteur et grâce à l'intervention d'une réductase, il y a formation d'eau et réduction de l'accepteur. C'est la « respiration anaérobie » dont le cas le plus intéressant en microbiologie alimentaire est celui de la réduction des nitrates en nitrites.

La respiration correspond donc à un ensemble de réactions produisant de l'énergie par « oxydation » d'un substrat carboné avec formation de CO_2 et d'hydrogène dont l'accepteur sera minéral le plus souvent (O, S, NO_3, etc.). Par contre, si l'accepteur est un composé organique, intermédiaire du métabolisme, l'intervention d'une déshydrogénase va entraîner sa réduction et l'accumulation dans le milieu du composé réduit. Cette accumulation a des conséquences fondamentales dans certains processus en industrie alimentaire : citons par exemple la formation d'acide lactique dans l'industrie fromagère. Ces processus sont appelés fermentations. Selon le cas elles pourront être aérobies ou anaérobies. Une fermentation correspond donc à un processus producteur d'énergie, dans lequel l'oxydation du substrat initial n'est pas totale ; le produit résiduel contient encore de l'énergie qui peut être utilisée par un autre micro-organisme (succession de flores).

Le catabolisme des glucides et des autres composés

1) Principales voies métaboliques du catabolisme des glucides

Comme nous l'avons vu plus haut, les polysaccharides sont dégradés par des hexo-enzymes (ou parfois des enzymes de l'enveloppe) et seules de petites molécules peuvent pénétrer. Si l'on considère le cas du glucose, il existe de nombreuses alternatives au niveau de son catabolisme. Dans le cas d'un métabolisme respiratoire, il y a dégradation complète en CO_2 et H_2O : ce processus très énergétique peut utiliser diverses voies selon les espèces (glycolyse + cycle de Krebs, voie de l'hexose monophosphate, voie d'Entner-Doudoroff). Dans le cas d'un métabolisme fermentaire, il y a formation de composés organiques divers qui s'accumulent comme autant de « déchets » du métabolisme et souvent de CO_2 et H_2.

Les principaux types de fermentation en microbiologie alimentaire sont : la fermentation alcoolique réalisée par de nombreuses levures, mais aussi par la bactérie *Zymomonas,* la fermentation lactique (homolactique ou hétérolactique) des bactéries de ce type mais aussi de certaines moisissures, les fermentations acide mixte et butylène glycolique des entérobactéries, les fermentations butyriques (et dérivées) des bactéries anaérobies, la fermentation propionique, les fermentations « aérobies » comme la fermentation gluconique ou les fermentations dérivées du cycle de Krebs (citrique, fumarique). Toutes les fermentations auront des conséquences par les substances qu'elles produisent et qui vont modifier le milieu.

2) Catabolisme des protéines

Le catabolisme des protéines passe d'abord par l'intervention des protéases. Les acides aminés qui en résultent subissent, soit une décarboxylation qui conduit à la libération dans le milieu d'amines pouvant être toxiques, soit une désamination qui les transforme en acides dont le métabolisme rejoint alors celui des glucides (par exemple au niveau du cycle de Krebs). Ce processus peut être aérobie (respiration), ou anaérobie. Une « fermentation putride » avec production d'amines et d'acides organiques (lactique, butyrique) peut alors en résulter.

3) Catabolisme des lipides

En raison de la faible quantité d'oxygène généralement contenue dans les lipides, leur catabolisme est généralement aérobie. Il y a oxydation et métabolisme respiratoire.

4) Catabolisme de composés divers

Les alcools et en particulier l'alcool éthylique peuvent être catabolisés par la voie respiratoire. Ils peuvent aussi être oxydés par un processus de « fermentation aérobie ». Le cas le plus connu est celui de la fermentation acétique.

L'anabolisme

L'anabolisme est l'ensemble des réactions de synthèse qui conduisent à la formation des molécules de base (hexoses, acides aminés...), puis des

macromolécules et enfin des structures cellulaires et des cellules elles-mêmes.

1) Production de biomasse

La manifestation finale de l'anabolisme est la croissance et la multiplication cellulaire c'est-à-dire la formation de biomasse. Cette formation est d'autant plus importante que le niveau d'énergie utilisable est élevé et que les besoins nutritionnels sont satisfaits. Les conditions optimales correspondent au métabolisme respiratoire. Le but de certaines industries alimentaires est cette production de biomasse (levains pour fermentation, levure de boulangerie, levure aliment et levure diététique).

2) Métabolites primaires issus de l'anabolisme

Au cours des synthèses liées à la croissance il peut y avoir formation d'un excès de métabolites et ceux-ci peuvent, dans certaines conditions, apparaître dans le milieu : acides aminés, vitamines... Ces productions ont évidemment un grand intérêt industriel. Des substances macromoléculaires peuvent également apparaître : enzymes, polysaccharides.

3) Métabolites secondaires

Il s'agit de métabolites dont la production n'est pas liée de manière significative à la croissance. Leur apparition peut être liée ou non à la lyse cellulaire. Parmi ces substances, certaines ont un intérêt industriel (antibiotiques, « hormones »...), d'autres un intérêt toxicologique (toxines), d'autres enfin jouent un rôle dans la modification de l'aliment (polysaccharides de type « capsulaire »).

RÔLE DES MICRO-ORGANISMES DANS LE CADRE DE L'ALIMENTATION ET DE L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Microbiologie du tube digestif

Les micro-organismes sont présents dans le tractus digestif de l'homme et des animaux. Un grand nombre d'entre eux est en relation

symbiotique avec l'hôte et participe au fonctionnement normal des processus digestifs. Cette flore est très abondante : elle représente en moyenne pour un homme 10^{14} cellules (alors qu'un homme est constitué de 10^{13} cellules !).

1) Homme

La cavité orale possède une flore complexe et hétérogène, malgré l'activité antimicrobienne de la salive. Les dents sont recouvertes d'un film constitué de bactéries incluses dans un environnement polysaccharidique : la plaque dentaire. Certains des micro-organismes impliqués jouent un rôle dans l'établissement des caries *(Streptococcus sanguis* et *Streptococcus mutans)*. Le tractus gastro-intestinal contient également une flore nombreuse dont la nature varie en fonction de l'organe.

Par son pH (≠ 2), l'estomac n'est pas une zone très favorable au développement microbien ; il constitue une barrière contre la pénétration des micro-organismes extérieurs. Le duodénum présente des conditions voisines de celles de l'estomac mais en passant à l'iléum, le pH croît progressivement et les conditions d'une activité microbienne s'améliorent. Dans le gros intestin, les bactéries sont présentes en quantités énormes (10^{10} à 10^{11} par gramme de contenu). Le caractère sélectif du milieu est essentiellement basé sur la présence de sels biliaires qui ont des propriétés antimicrobiennes ainsi que sur les conditions d'anaérobiose. En fin de compte, les bactéries représentent jusqu'à 1/3 du poids de la matière sèche fécale. La flore intestinale du nouveau-né nourri au sein est simple et presque exclusivement constituée de *Bifidobacterium (Lactobacillus bifidus)*. Avec le sevrage la qualité de la flore varie. Sa plus grande partie est constituée de bactéries anaérobies strictes Gram + *(Clostridium, Bacteroides)* ou Gram − *(Fusiformis)*. On rencontre un nombre plus limité de bactéries anaérobies facultatives comme *Streptococcus faecalis* et surtout *Escherichia coli.*

Le rôle de la flore intestinale est multiple. Chez le nouveau-né, les *Bifidobacterium* participent à la dégradation du lactose. Chez l'adulte les micro-organismes intestinaux participent à la dégradation de molécules difficilement assimilables et produisent des vitamines en partie utilisables par l'hôte (thiamine, riboflavine, pyridoxine, vitamines B_{12}, K...). En outre, la flore modifie les acides biliaires, génère des gaz (CO_2, CH_4, H_2) et favorise le transit intestinal. Enfin, elle assure une protection contre l'envahissement d'une flore exogène ; en effet, si la flore normale est détruite (par exemple, suite à l'utilisation d'antibiotiques) il peut y avoir développement d'un germe indésirable, développement aux conséquences sanitaires néfastes (levure comme *Candida albicans*).

2) Animaux

Le rôle de la flore du tractus digestif est aussi très important chez les animaux et en particulier chez les ruminants. En effet, dans le rumen de ces animaux s'effectue la dégradation de la cellulose et d'autres polysaccharides. Ces produits normalement non assimilables sont métabolisés par la flore microbienne qui les transforme en acides gras métabolisables. De plus, les cellules microbiennes constituent une source de protéines et de vitamines. Cette flore est essentiellement bactérienne (10^{10} à 10^{11} cellules par gramme de contenu) ; il s'agit de bactéries anaérobies cellulolytiques et amylolytiques appartenant aux genres *Bacteroides, Selenomonas, Butyrivibrio.* On rencontre également en moindre quantité des protozoaires ciliés anaérobies stricts qui jouent un rôle voisin et qui participent au contrôle de la population bactérienne.

Modifications d'origine microbienne des aliments : incidence sur la qualité marchande

Si quelques rares produits alimentaires sont naturellement stériles comme le contenu des œufs de poule par exemple, la plupart d'entre eux contiennent des micro-organismes. C'est ainsi que les légumes et les fruits sont porteurs de germes normalement présents dans le sol, l'air ou l'eau. De même, les viandes contiennent des germes initialement présents chez l'animal ou qui sont introduits au cours des différentes opérations liées à leur préparation. Certains de ces micro-organismes sont néfastes à la qualité de l'aliment aussi bien au niveau de sa fabrication que de sa conservation. D'autres sont, au contraire, indispensables car ils participent à l'élaboration du produit alimentaire. Enfin, il en existe un certain nombre dont la présence ou la prolifération dans l'aliment peuvent provoquer des troubles plus ou moins graves chez le consommateur.

La plupart des denrées alimentaires, qui sont des produits de plus en plus élaborés, peuvent permettre aux micro-organismes qu'elles contiennent de proliférer. Il peut en résulter de nombreuses modifications favorables ou non qui affectent l'odeur, la saveur, l'aspect, la couleur, la texture mais aussi la valeur alimentaire ou hygiénique. Il se produit souvent au cours de ces modifications des successions de flores, chacune étant responsable de transformations qui modifient l'aliment, ce qui permet à la suivante de se développer. Il existe des successions de flores « classiques ». Ainsi, la microbiologie du saucisson sec est comparable sur bien des points à celle de la fabrication du camembert avec des successions similaires : bactéries lactiques, levures, moisissures. C'est

principalement au travers de réactions enzymatiques que les micro-organismes agissent sur nos aliments et les modifications engendrées sont généralement perçues par nos sens.

Les principaux composants de nos aliments pouvant être classés dans les trois grands groupes que constituent les glucides, les protides et les lipides, il est possible d'envisager quelles seront les incidences majeures des modifications d'origine microbienne affectant chacun de ces groupes. Schématiquement, les glucides peuvent être répartis en deux grandes catégories : d'une part les polymères du type cellulose ou amidon et d'autre part les dimères (du type saccharose ou maltose) et les monomères (du type glucose ou fructose). Les modifications des polymères, correspondant le plus souvent à des réactions d'hydrolyse, se traduisent par des changements de structure ou de texture de l'aliment. Celles des dimères et des monomères sont généralement suivies, dans la plupart des processus fermentaires, de la formation de composés carbonylés (acides carboxyliques, alcools, cétones, aldéhydes) et conduisent à des flaveurs ou arômes nouveaux. Les modifications des protides, essentiellement représentées dans nos aliments par des protéines, affectent d'abord, au cours de phases d'hydrolyse, la texture. Les acides aminés libérés peuvent ensuite subir de nombreuses réactions se traduisant généralement par la formation de composés soufrés ou aminés d'odeurs très marquées et désagréables. Enfin, les phénomènes de lipolyse ou d'oxydation des lipides engendreront des altérations des qualités organoleptiques. Les principales altérations d'origine microbienne de divers produits alimentaires sont présentées dans le tableau 3.

1) Modifications des qualités organoleptiques

Deux situations extrêmes peuvent être décrites :

– Dans la première, une grande partie de l'aliment est transformée en un produit particulier (par exemple en éthanol ou en acide lactique). Il s'agit soit d'une altération qui est alors facilement reconnue, soit d'une transformation souhaitée.

– Dans la deuxième situation, fréquemment rencontrée, il y a production d'une flaveur particulière, flaveur qui représente dans ce cas le facteur critique de fabrication ou d'altération. De très nombreux composés organiques volatils ou non synthétisés par les micro-organismes sont susceptibles d'engendrer des modifications d'odeur et de saveur. Le seuil de détection varie avec la nature du produit. En raison de la remarquable qualité de notre perception olfactive les quantités détectées de certains composés sont inférieures à 10^{-9} g ; le seuil de détection de certains dérivés de la pipérazine atteint même 10^{-12} g.

Tableau 3

Dégradations d'origine microbienne des principaux types d'aliments

Aliment	Type de dégradation	Micro-organismes incriminés
Beurre et matières grasses	Colorations Goût, odeurs Rancissement	*Pseudomonas, Penicillium spp, Serratia marcescens* *Pseudomonas, Candida spp* *Pseudomonas fragi, fluorescens*
Bière	Dépôts Goûts divers Piqûre acétique Piqûre lactique Viscosité	Levures Coliformes, levures « sauvages », *Pediococcus cerevisiae, Zimomonas spp* *Gluconobacter* *Lactobacillus spp* *Lactobacillus brevis*
Charcuterie	Acidification Colorations Moisissure Viscosité	Bactéries lactiques *Leuconostoc, Pseudomonas spp* *Aspergillus, Penicillium spp* *Leuconostoc, Streptococcus spp* Levures
Conserves	Fermentation de type butyrique avec bombement « Flat sour » Noircissement Putréfaction	*Bacillus* gazogènes, *Clostridium butyricum, C. perfringens, C. thermosaccharolyticum* *Bacillus coagulans, B. stearothermophilus* *Clostridium nigrificans* *Clostridium putrefaciens, Cl. sporogenes*
Farine	Fermentation Moisissure	*Bacillus spp*, levures *Aspergillus, Penicillium spp*, mucorales
Fromages	Gonflement butyrique Goûts divers Viscosité	*Clostridium butyricum* Bactéries protéolytiques, *Bacillus polymyxa, Enterobacter aerogenes* *Alcaligenes, Pseudomonas spp*
Fruits	Anthracnose Moisissure Pourriture molle	*Colletotrichum lindemuthianum* *Alternaria, Aspergillus, Penicillium spp* *Botrytis cinerea* *Rhizopus nigricans*
Fruits secs	Fermentation alcoolique et goût de levure Moisissure	*Saccharomyces, Zygosaccharomyces spp* *Aspergillus glaucus*
Jus de fruits et sirops sucrés	Mauvais goût et fermentation alcoolique Piqûre acétique Piqûre lactique Troubles et dépôts Viscosité	*Byssochlamis, Rhizopus spp*, levures *Acetobacter, Gluconobacter spp* Bactéries lactiques diverses Levures *Leuconostoc spp*

Tableau 3

Dégradations d'origine microbienne des principaux types d'aliments (suite)

Aliment	Type de dégradation	Micro-organismes incriminés
Lait	Colorations et goûts div.	*Pseudomonas syncynea, P. fluorescens*
	Protéolyse	*Bacillus, Pseudomonas spp*
	Sûrissement et coagul.	*Streptococcus lactis* et autres bactéries lactiques
	Protéolyse avec gaz	Coliformes, *Clostridium spp*
	Viscosité	*Alcaligenes viscosus, Leuconostoc, Streptococcus spp*
Légumes	Anthracnose	*Colletotrichum lindemuthianum*
	Fermentation acide et viscosité	*Aspergillus, Fusarium, Trichoderma spp, Arthrobacter, Cellulomonas spp*
	Moisissure	*Botrytis cinerea, Alternaria, Aspergillus, Fusarium, Penicillium, Peronospora, Phytophtora, Rhizoctonia spp, Sclerotinia sclerotiorum*
	Pourriture molle bact.	*Erwinia carotovora, Xanthomonas spp*
	Pourriture molle fongique	*Rhizopus spp, Sclerotonia sclerotinium*
Œufs	Colorations diverses	*Proteus melanovogenes, Pseudomonas, Rhodotorula spp, Serratia marcescens*
	Moisissure	*Cladosporium, Penicillium, Sporotrichum spp*
Pain	Goût « crayeux »	*Endomycopsis fibuliger, Trichosporon spp*
	Moisissure	*Aspergillus niger* et autres *Aspergillus*, mucorales, *Penicillium spp*
	Viscosité	*Bacillus spp*
Poisson	Modifications de couleur	*Achromobacter, Flavobacterium, Pseudomonas spp*
	Putréfaction	Coliformes, *Clostridium, Pseudomonas spp*
Viande	Modification de couleur et odeur	Levures, *Leuconostoc, Pseudomonas, Rhodotorula spp*
	Moisissure	*Aspergillus, Penicillium spp*, mucorales, *Sporotrichum carnis, Thamnidium elegans*
	Putréfaction	*Clostridium* protéolytiques, coliformes, *Proteus spp*
	Sûrissement	*Bacillus cereus*, bactéries lactiques, coliformes, *Clostridium* butyriques
	Viscosité	*Bacillus, Pseudomonas spp*, bactéries lactiques
Vin	Goûts divers	*Lactobacillus, Pedicoccus spp*
	Piqûre acétique	*Acetobacter aceti, Gluconobacter oxydans*
	Piqûre lactique	*Lactobacillus fermenti, L. buchneri*
	« Tourne »	*Lactobacillus spp*
	Trouble et dépôt	Levures
	Viscosité	*Aureobasidium pullulans, Leuconostoc spp*
	Voile	*Candida mycoderma, Pichia membranefaciens*

Il existe, bien sûr, des états intermédiaires entre les deux situations. Par exemple dans diverses fabrications de vin ou de fromage, la conversion majeure d'un substrat respectivement en éthanol ou acide lactique est accompagnée de la production de composés secondaires en faibles quantités mais d'une grande importance pour la qualité finale. Ainsi des vins qui possèdent une même teneur en éthanol sont facilement différenciables entre eux par la nature des composés d'arômes ou de flaveurs qui constituent par exemple le bouquet.

Le développement de micro-organismes dans un produit alimentaire est, en raison de la sensibilité de notre système olfactif, généralement détecté en premier lieu par des modifications d'odeurs. Du fait de la très grande diversité de nos aliments et des micro-organismes, le développement de ces derniers s'accompagne précocement d'odeurs variées : fades, agréables et fruitées, fortes de type ammoniacal ou sulfureux, etc. L'analyse de ces odeurs, par chromatographie en phase gazeuse, a permis d'identifier de très nombreux composés. Il est même actuellement proposé d'identifier certains micro-organismes par l'analyse des composés volatils qu'ils produisent. Bien qu'il ne soit pas possible d'attribuer à chaque micro-organisme la genèse d'une odeur particulière, leur contribution peut être schématisée de la façon suivante :

– Les moisissures donnent généralement au produit sur lequel elles se développent une odeur de moisi caractéristique. Les causes de cette odeur sont complexes. Ses caractéristiques varient en fonction de la souche et du produit : sur les viandes non humides réfrigérées, les moisissures se développent avec production d'odeurs particulières de moisi, d'urine et de rance.

– Les bactéries peuvent être à l'origine d'odeurs diverses. Un développement microbien à la surface d'une viande se traduit par une odeur de relent, de linge humide lorsque l'entreposage est réalisé aux environs de 10°C et par l'apparition très rapide d'une odeur d'ammoniac et de sulfure d'hydrogène quand l'entreposage est réalisé à température ambiante. Dans ce dernier cas on parle alors de putréfaction, putréfaction qui est recherchée dans certains aliments comme les gibiers faisandés. Chez les poissons, la putréfaction des tissus est généralement génératrice d'odeurs ammoniacales : l'altération est rapide car la contamination initiale est souvent importante. La formation de triméthylamine, de mercaptan, de diméthylsulfure et de sulfure d'hydrogène contribue à l'odeur caractéristique produite. Pour certaines espèces cette putréfaction est précédée d'une fermentation aigre (par exemple chez le maquereau) ou de la genèse d'odeurs agréables et fruitées (par exemple d'odeurs de violette chez l'éperlan). Dans le cas des produits laitiers des odeurs très variables peuvent résulter du développement d'un type donné de micro-organisme. Des odeurs indésirables de rance ou liées à la

synthèse d'acide butyrique apparaissent au cours du développement de *Clostridium butyricum* ce qui perturbe la fabrication de certains fromages à pâte cuite, comme le gruyère ou l'emmenthal. Au cours de l'affinage ou d'un entreposage mal conduits ou de trop longue durée, il apparaît des composés aromatiques souvent jugés indésirables : il s'agit de fromages du type camembert à odeur marquée d'étable et d'ammoniac. Les *Pseudomonas* produisent sur certains milieux peu riches en matières organiques des parfums agréables se rapprochant de la fleur de tilleul ; dans la bière, le développement d'espèces appartenant aux genres *Achromobacter* ou *Flavobacterium* entraîne l'apparition d'odeurs de pomme ou de navet ; sur divers produits celui de *Bacillus subtilis* donne une odeur de « melon pourri » ; des bactéries comme *Streptomyces* sont capables de donner des odeurs de moisi y compris après une faible prolifération... Naturellement, de très nombreux autres exemples pourraient être cités.

La modification de goût la plus fréquente provient d'une acidification du produit à la suite de la prolifération de bactéries acidifiantes productrices d'acide lactique, plus rarement d'autres acides. Divers qualificatifs sont utilisés pour définir cette transformation : piqûre, aigrissement, sûrissement... Il faut noter que selon le produit cette modification n'est pas perçue comme néfaste : les fromages, le vinaigre, la choucroute sont des produits acides et appréciés en tant que tels. Cette situation se retrouve pour d'autres transformations. Ainsi *Leuconostoc citrovorum* et d'autres bactéries lactiques produisent du diacétyle ; cette production est favorable dans le beurre qui présente alors un goût agréable de noisette mais défavorable dans les jus d'agrumes qui prennent un goût marqué de margarine, et dans les bières. Des goûts variés peuvent être générés par la prolifération microbienne : rancissement par *Pseudomonas,* goût malté par certaines levures dans le lait, goût caramélisé par des levures ou par *Streptococcus lactis var maltigenes* également dans le lait, goût alcoolisé par les levures, goût douçâtre par production de mannitol par les levures dans le vin, goût crayeux dans le pain par développement des levures *Endomycopsis* ou *Trichosporon.* La modification peut résulter d'une réaction chimique permise par un produit bactérien : ainsi dans la bière les *Pedioccocus, Leuconostoc* ou *Lactobacillus* peuvent entraîner une amertume qui provient de la transformation de glycérol en acroléine, laquelle se combine avec les polyphénols. Signalons enfin que la production de gaz entraînera parfois un goût piquant ou pétillant.

Les composés responsables des odeurs et goût de nos aliments sont généralement synthétisés par les micro-organismes à partir des glucides, protides ou lipides alimentaires. Plus le nombre de micro-organismes présents sera élevé et plus rapidement apparaîtront les premières odeurs. Par ailleurs, en raison de la diversité des espèces microbiennes générale-

ment présentes, une espèce sera prédominante à un moment donné, ce qui se traduira par la génèse d'une odeur caractéristique. Arrivée au maximum de sa prolifération, elle laissera alors sa place à une autre qui sera à son tour suivie par d'autres et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de produits au sein desquels la matière organique aura été transformée en anhydride carbonique, eau, et autres composés comme dans le cas d'une minéralisation chimique. Le produit alimentaire après avoir subi différentes transformations souvent qualifiées dans leurs premières phases de putréfaction ou fermentation, devient alors inodore et ne contient pratiquement plus de matière organique.

2) Aspect et couleur

Les modifications de couleurs et d'aspect de nos aliments au cours de la prolifération de micro-organismes apparaissent dans la plupart des cas après les apparitions d'odeur. Il s'agit, dans une première phase, de petites zones qui peuvent présenter des caractéristiques très variables quant à leur forme (rondes, plates, bombées), leur aspect (opaque, mat, brillant) ou encore leur couleur (blanc, noir, jaune, rouge, violet, etc.). Ces zones constituées de bactéries, de levures et de sécrétions muqueuses, peuvent s'étendre et former un revêtement à la surface du produit alimentaire qui devient alors gluant, visqueux ou poisseux. Les fabricants de produits alimentaires qualifient cette phase de « poissage ». La prolifération de moisissures à la surface de l'aliment est caractérisée par l'apparition de zones colorées à évolution centrifuge. Les zones peuvent présenter des aspects divers depuis un feutrage délicat jusqu'à des taches plus ou moins régulières et rugueuses.

Les modifications de la couleur d'un aliment liées à la prolifération de micro-organismes peuvent résulter de plusieurs phénomènes. D'une part il est possible que le micro-organisme synthétise un ou plusieurs pigments. Toutes les couleurs sont envisageables depuis le blanc, le noir, en passant par le bleu, le vert, le jaune, le rouge, etc. Parmi les germes susceptibles de produire des pigments les genres *Micrococcus, Pseudomonas, Chromobacterium, Serratia, Bacillus, Flavobacterium, Rhodotorula,* sont les plus souvent rencontrés. D'autre part, des modifications de couleur de l'aliment peuvent résulter de la destruction ou de la transformation de pigments initialement présents. Ainsi la destruction du carotène présent dans un produit fera perdre à celui-ci sa couleur orangée ; de même la transformation de la myoglobine de la viande se traduira par l'apparition de composés colorés divers, les composés verts étant les plus souvent rencontrés. Il faut signaler que les altérations d'origine microbienne affectant des structures cellulaires permettent à des enzymes endogènes d'entrer en contact avec leur substrat. Des produits de

réactions colorés comme par exemple des quinones rouges résultent ainsi de l'oxydation de polyphénols par des polyphénoloxydases dans les fruits et végétaux altérés par des micro-organismes. Enfin, la coloration peut résulter d'une réaction chimique entre un produit microbien et un composé présent dans l'aliment. Le H_2S produit par diverses bactéries peut entraîner l'apparition de sulfures qui provoquent un noircissement.

3) Structure et texture

La structure et, par là même, la texture d'un produit alimentaire sont généralement liées à la présence de macromolécules le plus souvent de nature glucidique ou protéique. Ainsi, la structure et la texture des produits alimentaires d'origine végétale sont essentiellement liées à des structures cellulaires au sein desquelles les molécules de cellulose, d'hémicellulose et de pectine jouent un rôle déterminant. De même, la structure de certains produits alimentaires d'origine animale (viandes, poissons) repose sur des assemblages de molécules de protéines. Si des micro-organismes contaminant ces aliments sont capables d'excréter des hydrolases spécifiques de ces macromolécules glucidiques ou protidiques, il s'en suit une modification de la texture et les produits ont alors tendance à se ramollir. Ce ramollissement est d'autant plus grand que la charge microbienne est importante. Ces phénomènes d'hydrolyse sont recherchés quand ils produisent une amélioration de texture (protéolyse du faisandage) ou d'aspect (éclaircissement d'un jus de fruit trouble par des pectinases fongiques). Ils sont cependant souvent considérés comme défavorables (pertes de formes des viandes ou de certains fruits en conserve sous l'effet respectif de protéases ou de pectinases). Quand la prolifération d'un germe se produit dans la masse de l'aliment, les apparitions d'odeurs sont suivies par des modifications de la couleur, de la consistance, puis de la texture. Une production importante de gaz est à même d'induire la formation de bulles ou de fissures et par là même le gonflement du produit alimentaire (par exemple : gonflement butyrique des fromages). Notons également que la production de gaz peut altérer les emballages (bombement et même explosion de conserves). Par ailleurs, il existe des germes capables de synthétiser dans l'aliment, à partir d'oses ou de diholosides, des polymères qui modifieront d'une façon plus ou moins importante la viscosité. Par exemple, *Leuconostoc mesenteroïdes* synthétise à partir du saccharose un polymère : le dextrane. De la sorte, un sirop de sucre peut se transformer en un gel compact. L'épaississement, le « filage » dus aux polymères microbiens de certaines bactéries lactiques et *Bacillus* peuvent se produire dans le pain, le lait, la bière, les jus de fruits... Naturellement, la modification de la texture a des répercussions sur l'aspect.

4) *Valeur alimentaire*

La valeur alimentaire de nombreux produits est plus ou moins modifiée par la présence et la prolifération de micro-organismes. Dans le cas de produits obtenus par fermentation, la structure et les qualités organoleptiques résultent de processus microbiologiques qui sont de mieux en mieux contrôlés par l'homme. Les micro-organismes intervenant dans ce processus consomment des molécules à haute valeur énergétique et la valeur calorique des produits fermentés est donc généralement inférieure à celle du produit initial. Par contre, ces mêmes micro-organismes peuvent avoir un rôle favorable : ils peuvent synthétiser des molécules à activité biologique comme des vitamines, ou encore cataboliser et donc détruire des produits toxiques ou antinutritionnels (glucides non fermentescibles, protéines toxiques...). Ainsi, il est possible d'éliminer par fermentation certains glucides présents dans des produits d'origine végétale comme des farines ou tourteaux de soja, glucides qualifiés de non-fermentescibles par l'homme en raison de la présence d'une liaison C1-C6. Si de tels composés (stachyose, verbascose, raffinose) sont absorbés par l'homme, ils sont alors catabolisés au niveau du gros intestin par les micro-organismes avec production de gaz, ce qui induit une flatulence plus ou moins importante.

Pour la plupart de nos aliments, le développement d'une flore microbienne superficielle se fait le plus souvent à partir de glucides simples et d'azote non protéique. Ainsi, dans le cas des viandes et des poissons, l'altération de surface se traduisant par la formation de limon et d'odeurs caractéristiques, n'est pratiquement pas accompagnée de protéolyse, donc d'une modification sensible de la valeur nutritionnelle, jusqu'à une densité microbienne voisine de 10^9 germes par cm^2. Quand les phénomènes de protéolyse apparaissent, ils sont suivis de la formation de dérivés d'acides aminés qui confèrent au produit de telles caractéristiques organoleptiques qu'il devient inconsommable.

5) *Conclusion*

Il est clair que les modifications susceptibles d'être produites par les micro-organismes dans nos aliments affectent de façon significative leur qualité. Leur qualité hygiénique, qualité seuil ou obligatoire conférant au produit innocuité et salubrité, représente sans ambiguïté l'aspect le plus important de la microbiologie alimentaire et sera développé ci-après. Il n'en reste pas moins vrai qu'il existe d'autres aspects de la qualité de nos aliments, aspects liés à la présence ou à la prolifération de micro-organismes qui peuvent par exemple rendre un produit appétissant ou non. Ainsi les qualités organoleptiques, l'aspect, la couleur, la texture et

la valeur nutritive de nos aliments, peuvent être améliorés ou dégradés, ces qualités pouvant être regroupées sous le qualificatif de qualité marchande. Comme il s'agit ici de considérations subjectives largement influencées par des réactions instinctives ou par des connaissances acquises, aussi bien au niveau culturel que religieux, des modifications microbiennes d'un même produit alimentaire pourront, selon les consommateurs, le rendre plus ou moins répugnant ou plus ou moins attrayant.

Incidences sanitaires de la présence des micro-organismes dans les aliments : qualité hygiénique

1) Caractères généraux

Comme cela a déjà été décrit, la plupart de nos aliments sont des vecteurs de nombreux micro-organismes, et très souvent ils permettent leur croissance. Les modifications apportées au produit initial peuvent être favorables et recherchées : c'est le cas des produits alimentaires fermentés. Cependant, la prolifération non dirigée de micro-organismes dans un aliment peut poser de graves problèmes au niveau industriel, par exemple par l'apparition d'altérations défavorables des qualités organoleptiques, mais aussi et surtout au niveau de la santé des consommateurs. En effet, des bactéries pathogènes pour l'homme peuvent être présentes et, éventuellement proliférer. Les risques encourus par les consommateurs varient en fonction de nombreux paramètres tels que la nature du germe contaminant, le niveau de contamination ou encore l'âge et les états nutritionnel et physiologique du consommateur.

Schématiquement, il est possible de classer les micro-organismes susceptibles d'être à l'origine de maladies liées à la consommation d'aliments en trois catégories. Dans la première de ces catégories se trouvent les micro-organismes responsables de maladies infectieuses graves, maladies essentiellement caractérisées par la prolifération du germe au détriment d'un ou plusieurs tissus de l'hôte. L'apparition de la maladie infectieuse peut résulter de l'absorption d'un nombre très faible de micro-organismes. Ainsi, quelques centaines de cellules de *Shigella,* de *Salmonella typhi* ou de *Vibrio cholerae* pourraient déclencher respectivement la dysenterie bacillaire, la fièvre typhoïde ou le choléra. Quelques maladies virales ou à rickettsies peuvent être classées dans cette catégorie. Pour répondre au critère de qualité hygiénique, la présence de ces micro-organismes ne peut être acceptée dans les aliments, et leur éventuelle recherche se fait le plus souvent après enrichissement sélectif. Il est

bon de noter que la plupart des micro-organismes décrits ici sont relativement sensibles à des traitements antimicrobiens du type pasteurisation. Seuls *Bacillus anthracis* et *Clostridium perfringens* ne sont éliminés des aliments qu'après stérilisation.

Dans la deuxième catégorie, sont présents des germes qui peuvent être saprophytes de l'homme et des animaux, et qui, en petit nombre dans les aliments, ne posent souvent pas de problème du point de vue sanitaire. Par contre, si ces germes se multiplient abondamment dans le produit alimentaire jusqu'à des valeurs comprises entre 10^6 et 10^9 germes par g ou ml, ils peuvent produire des substances toxiques spécifiques (dont des exotoxines « enzymatiques » pouvant favoriser un pouvoir infectieux), mais aussi des catabolites toxiques à partir de certains composés organiques de l'aliment. Ainsi, la vieille théorie des ptomaïnes émise par Selmi en 1870 pour interpréter les maladies d'origine alimentaire n'est pas à ignorer dans sa totalité. En effet, des polyamines comme la cadavérine ou la putrescine, issues par décarboxylation enzymatique respectivement de la lysine et de l'ornithine, ont une action périphérique locale sur le tube digestif accélérant le péristaltisme et une action centrale pouvant expliquer les nausées et les vomissements. L'action de l'histamine, issue de la décarboxylation de l'histidine, est particulière et bien connue (choc histaminique avec manifestations « allergiques »). La tryptamine provenant du tryptophane, pourrait après hydroxylation fournir de la sérotonine et agir ainsi sur le fonctionnement cérébral et peut-être sur le comportement. Par ailleurs, des endotoxines peuvent, après lyse des micro-organismes, contribuer à la toxicité des produits alimentaires contaminés. La consommation d'un aliment ainsi contaminé se traduit par des syndromes toxiques et/ou infectieux : la toxi-infection (le terme intoxication est utilisé dans le cas de syndromes uniquement toxiques). Les signes classiques varient avec le micro-organisme, mais présentent des caractéristiques communes : ainsi les syndromes digestifs sont pratiquement toujours présents. La plupart des germes responsables des toxi-infections sont tolérés en petit nombre dans les aliments, leur pouvoir toxique étant fonction de la charge microbienne. Des techniques de numération de certains de ces micro-organismes sont utilisées au cours du contrôle microbiologique. Il faut signaler ici que les germes à l'origine des maladies infectieuses (cités dans la première catégorie) peuvent aussi, s'ils se sont multipliés abondamment dans l'aliment, être à l'origine de toxi-infections.

Dans la troisième catégorie se trouvent certains micro-organismes qui sécrètent une ou plusieurs exotoxines dans l'aliment. La consommation de celui-ci peut conduire à une « intoxination » grave (botulisme par exemple). Dans ce cas, ce n'est pas la présence du germe qui est

importante mais celle de la toxine : aussi l'analyse ne porte que sur la recherche de cette dernière.

2) *Bilan sanitaire*

L'étude des maladies microbiennes d'origine alimentaire constitue actuellement un secteur très important de la microbiologie alimentaire. Si de nombreuses inconnues subsistent encore à ce niveau, c'est essentiellement en raison de la gravité modérée de la plupart de ces maladies, souvent qualifiées de « crise de foie ». Un consommateur présentant des nausées ou une diarrhée ne se considère généralement pas malade et un repos de quelques jours permet généralement une guérison complète. Cependant, l'évolution du mode de vie conduit inexorablement à une alimentation collective ou à l'utilisation d'aliments préparés industriellement et ce, au détriment de l'alimentation familiale. La qualité marchande de nos aliments implique donc une nécessaire qualité hygiénique sinon les risques encourus deviendront très grands. Le tableau 4 regroupe les principales maladies microbiennes liées à la consommation d'aliments.

En France, les données relatives aux maladies microbiennes d'origine alimentaire sont peu nombreuses et fort imprécises. En effet, en raison de leur gravité souvent modérée, seul un cas sur 25 ou même 100 est rapporté aux autorités sanitaires. De plus, seules sont obligatoires les déclarations des manifestations collectives de ces maladies. Par ailleurs, il est bien connu qu'entre 40 et 60 % des accidents d'origine alimentaire ne reçoivent pas d'explication étiologique, même si le pays possède un système de surveillance moderne. Malgré l'imprécision obligatoire de l'estimation, il est possible d'évaluer, en France, à plusieurs dizaines de milliers le nombre annuel de personnes atteintes de maladies microbiennes d'origine alimentaire. La mortalité est faible et voisine de 0,1 % du nombre total de maladies recensées.

En France, les micro-organismes qui ont été le plus souvent identifiés comme étant à l'origine de ces manifestations pathologiques sont *Salmonella spp, Staphylococcus aureus* et *Clostridium perfringens,* qui interviennent dans environ 36, 25 et 20 % du nombre total de cas. Parmi les autres micro-organismes rencontrés dans des aliments, responsables de maladies, on peut signaler : *Clostridium botulinum, Escherichia coli* entéropathogène, *Shigella, Vibrio parahaemolyticus, Bacillus cereus* et à un degré moindre, *Yersinia enterocolitica, Campylobacter* et *Listeria monocytogenes.*

Tableau 4

Maladies microbiennes liées à la consommation d'aliments

Maladies	Micro-organismes	Risque (1)	Type (2)	Fréq. (3)	Source	Aliments incriminés
Botulisme	*Clostridium botulinum*	G	I	F,M	Sol, eau tractus intestinal des animaux	Conserves de pH > 4,5 mal stérilisées, poissons, salaisons, non nitritées, aliments sous vide ou dans l'huile
Fièvre typhoïde	*Salmonella typhi*	G	MI	F,M	Porteurs sains, fèces des hommes malades, eau	Aliments riches en protéines (viandes, œufs, poissons, lait) produits crus, coquillages
Dysenterie	*Shigella dysenteria S. sonnei, S. flexneri*	G	MI	F,M	Fèces des malades, eau	Aliments crus, légumes, salades, lait, eau
Choléra	*Vibrio cholerae*	G	MI	F As, Af	Fèces et vomissures des malades eau	Aliments crus, légumes, eau
Fièvre de malte (brucellose)	*Brucella melitensis*	G	MI	R,E	Animaux infectés	Lait et fromage crus d'origine ovine
Tuberculose	*Mycobacterium tuberculosis M. bovis*	G	MI	R,M	Sécrétion des malades, lait des animaux	Lait cru
Listeriose	*Listeria monocytogenes*	G	MI	R,M	Tissus, lait urine des animaux malades	Lait, produits laitiers, viandes, volailles
Pasteurellose	*Pasteurella multocida*	G	MI	R,M	Animaux malades, fèces	Volailles, végétaux
Anthrax intestinal	*Bacillus anthracis*	G	MI	R,M	Animaux malades	Viandes crues charcuteries
Tularémie	*Francisella tularensis*	G	MI	R,M	Sang et tissus de lapins et lièvres malades	Lapin, lièvre (contact)
Entérite nécrosante	*Clostridium perfringens C*	G	MI,I	R,E	Fèces des animaux	Viandes et poissons cuits
Yersiniose	*Yersinia enterocolitica*	M	TI	F,M	Sol, eau animaux	Crudités, viandes lait cru
Campylo-bactériose	*Campylobacter fetus spp, jejuni*	M	MI	F,M	Animaux malades	Eau, lait cru, poulet, coquillages
Empoison-nement	*Pseudomonas aeroginosa*	G	MI	R Indo-nésie	Eau, sol, fèces humains lésions	Lait, lapins, sirops

Tableau 4 (suite)

Maladies	Micro-organismes	Risque (1)	Type (2)	Fréq. (3)	Source	Aliments incriminés
Salmonelloses	*Salmonella typhimurium* *S. heidelberg, S. java* *S. enteritidis* *S. montevideo, S. panama* etc.	M	TI	F,M	Fèces, animaux domestiques	Viandes, volailles, coquillages, poissons, lait, œufs
Entérotoxicose staphylo-coccique	*Staphylococcus aureus*	M	I	F,M	Peau, acné, sécrétions nasales	Jambon, viandes, volailles, crustacés fromages, lait, charcuteries
Toxi-infections à entéro-bactéries	*Escherichia coli* (nombreux sérotypes) *Proteus vulgaris* (+3 autres espèces) *Providencia* *Klebsiella pneumoniae* *K. ozaenae* *Citrobacter freundii* *Enterobacter aerogenes* (+ autres espèces) *Edwardsiella tarda* *Arizona*	M	TI	F,M	Fèces, eau sol	Viandes, volailles lait et produits laitiers crus, pâtisseries, plats cuisinés, œufs
Toxi-infections	*Clostridium perfringens*	M	TI	F,M	Fèces des hommes ou animaux, sol	Viandes et volailles cuites, aliments crus
Toxi-infections	*Vibrio parahaemolyticus*	M	TI	F,M	Eau et produits de la mer	Poissons, crustacés salaison
Gastro-entérites	*Bacillus cereus*	M	TI	F,M	Sol, poussières	Produits céréaliers gâteaux, sauces, viandes, pain
Toxi-infections	*Streptococcus faecalis*	M	TI	R,M	Fèces de l'homme et des animaux	Viandes, gâteaux, lait en poudre
Aflatoxicose	*Aspergillus flavus* (et souches voisines)	G	I	F,M	Sol, plantes	Végétaux (grains) lait
Autres myco-toxicoses*	Champignons inférieurs	M,G	I	R,M	Sol, plantes	Fruits, graines, lait
Hépatite	Virus type A	G	MV	F,M	Fèces, urine, sang des malades	Lait, eau, coquillages, jus d'agrumes
Poliomyélite	Poliovirus	G	MV	F,M	Fèces, sécrétions pharyngées des animaux infectés	Lait, eau pâtisseries

(1) G = grave ; M = modéré.
(2) MV = maladie virale ; MI = maladie infectieuse bactérienne ; TI = toxi-infection ; I = intoxination.
(3) R = rare ; M = mondiale ; F = fréquente ; E = Europe ; As = Asie ; Af = Afrique.

* A l'heure actuelle, plus d'une centaine de mycotoxines ont été isolées et identifiées. Les plus importantes sont les aflatoxines *(Aspergillus flavus)*, l'ergotamine *(Claviceps purpurea)*, la patuline *(Aspergillus clavatus)*, la citrinine *(Penicillium citrinum)*, la zéaralénone *(Fusarium graminearum)*. Ces mycotoxines souvent produites sur des végétaux (arachides, céréales, fruits) sont susceptibles de se retrouver dans des aliments comme les jus de fruits, le pain ou les biscuits ou même dans des produits comme le lait dans le cas d'animaux nourris à partir de produits végétaux contaminés. Peu de données existent actuellement quant à leurs incidences en pathologie alimentaire.

A ce rapide bilan il faudrait ajouter les affections parasitaires ou assimilées liées à la présence de protozoaires (toxoplasmose, amibiase) ou d'autres organismes (trichinose, cysticercose, helminthiases, etc.), et celles dues aux mycotoxines.

Les principaux aliments responsables sont par ordre décroissant du nombre total de cas analysés : les plats cuisinés (30 %), les charcuteries et jambons (25 %), les conserves (8 %, dont 4 % pour les conserves industrielles et 4 % pour les conserves familiales), le lait et les produits laitiers (8 %), les pâtisseries (5 %), les poissons et crustacés (5 %), les viandes crues (4 %), les viandes de volaille (4 %), les coquillages (3 %), les fruits et légumes (2 %), l'eau (2 %).

3) Principales maladies infectieuses, toxi-infections et intoxinations d'origine alimentaire

Les connaissances actuelles sur chacune des maladies d'origine alimentaire sont très nombreuses et dans ce qui suit nous nous limiterons à décrire et à donner quelques précisions sur les maladies les plus courantes en France.

a) Toxi-infections à *Salmonella*

Dans le genre *Salmonella,* plus de 1 700 sérotypes sont actuellement décrits. Quatre de ces sérotypes, correspondant aux espèces *S. typhi, S. paratyphi A, B* et *C,* sont à l'origine de maladies infectieuses appelées fièvres typhoïde ou paratyphoïde. La fréquence de ces maladies a beaucoup diminué et leur traitement par antibiothérapie est bien au point. De plus, il existe un vaccin (TAB) conférant une bonne protection. Si la fièvre typhoïde est peu courante en France, par contre les toxi-infections à *Salmonella* sont très fréquentes.

Les sérotypes responsables de toxi-infections sont très nombreux ; parmi ceux les plus fréquemment rencontrés dans notre pays, il faut signaler : *S. typhimurium, S. enteritidis, S. heildelberg, S. java, S. panama, S. montevideo, S. goldcoast,* etc. La contamination des produits alimentaires par des germes du genre *Salmonella* peut être originelle (animaux malades), résulter du contact d'un milieu contaminé avec l'aliment et enfin provenir de manipulateurs malades ou porteurs sains de germes. Toutes les variétés d'aliments sont susceptibles d'être contaminées par ces micro-organismes. Si les conditions de température, d'activité de l'eau, de pH le permettent, les *Salmonella* se multiplient. La consommation de l'aliment dans lequel le nombre de *Salmonella* aura atteint au moins 10^6 germes par gramme entraînera une toxi-infection dont les signes cliniques apparaîtront entre 5 et 72 h après l'absorption. Ils sont

caractérisés par une diarrhée, des douleurs abdominales, des frissons, de la fièvre, des vomissements, un état de prostration, une anorexie, une céphalée, des malaises. Une entérite ou une infection localisée surviennent parfois. Ces signes cliniques persistent généralement quelques jours, et les enfants et les personnes âgées sont particulièrement sensibles à cette toxi-infection. Le diagnostic est réalisé par l'analyse microbiologique des matières fécales du malade, malade qui risque de devenir un porteur sain. La proportion de ces derniers varie de quelques pourcents dans une population saine à plus de 20 % chez des individus vivant en groupe dans de mauvaises conditions hygiéniques, ou par exemple chez les ouvriers d'une usine de produits carnés. L'un des problèmes actuels de la bactériologie alimentaire concerne l'augmentation du niveau de contamination de nombreuses matières premières. Rappelons que ces bactéries sont facilement détruites par pasteurisation.

b) Entérotoxicose staphylococcique

Il s'agit d'une maladie microbienne très fréquente dans de nombreux pays et particulièrement en France. Elle résulte de la consommation d'aliments contaminés par des souches de *Staphylococcus aureus* toxinogènes. Six types d'entérotoxines sont actuellement connus (A, B, C, D, E et F) ; en France c'est l'entérotoxine A (65 %) qui est la plus fréquemment rencontrée, suivie de la B (20 %) et des autres types. L'intoxination est caractérisée par une période d'incubation de courte durée (1 à 4 heures). Les symptômes de cette maladie, qualifiée parfois de maladie des banquets, sont caractéristiques : salivation abondante, nausées, vomissements, douleurs abdominales, diarrhée abondante, sueurs, céphalée, état de prostration et quelquefois fièvre. Les symptômes disparaissent en général après 24 à 48 heures, et le malade ne développe pas de défenses immunitaires spécifiques. Il faut signaler enfin que cette intoxination n'est qu'une des manifestations possibles du pouvoir pathogène de *Staphylococcus aureus.* La présence quasi constante de ce micro-organisme sur la peau et les muqueuses de l'homme et des animaux permet sa grande dispersion. Quand un aliment est contaminé, il faut qu'il soit conservé un temps assez long à une température permettant la croissance microbienne. L'entérotoxine staphylococcique étant un métabolite secondaire, elle est synthétisée en fin de phase exponentielle et au cours de la phase stationnaire de croissance. Le nombre minimum de germes nécessaires à la production de suffisamment de toxine pour provoquer l'empoisonnement est évalué selon les auteurs à 5.10^5 ou 5.10^6 germes par g. Avec cette entérotoxine, la DE_{50} (dose émétique qui fait vomir 50 % des individus qui la reçoivent) est estimée à 0,2 µg par kg de poids corporel.

Les entérotoxines A, B, C, D, E et F sont produites par les *Staphylococcus aureus* entérotoxinogènes et une même souche peut excréter plusieurs toxines différentes. Il existe 3 variétés de la toxine C (C_1, C_2 et C_3) et la toxine F est impliquée dans le « toxic stock symdrom ». Ces toxines sont des protéines de masse molaire voisine de 30 000 daltons et leur point isoélectrique varie de 6,8 (A) à 8,6 (B, C_1, C_2, C_3). Ces protéines ne sont pas hydrolysées par les protéases digestives (pepsine, trypsine) et sont très résistantes aux traitements thermiques. Ainsi, une activité toxique (ou sérologique) persiste même après un traitement de type stérilisation (15 minutes à 121°C). Il est donc clair que si un aliment a été contaminé, un traitement thermique du type pasteurisation (60°C, 30 minutes) permettra de détruire les micro-organismes, l'aliment restant alors très dangereux par la présence éventuelle d'une entérotoxine. Les aliments les plus communément susceptibles d'être à l'origine de cette intoxination sont par ordre décroissant de fréquence : les viandes et charcuteries, les pâtisseries, les volailles, les fromages, les légumes, les poissons.

c) Toxi-infections à *Clostridium perfringens*

Cette bactérie est vraisemblablement le germe anaérobie le plus fréquemment rencontré dans la nature. Saprophyte du sol et des eaux, elle est présente dans de très nombreux produits naturels. Elle est commensale de l'homme et des animaux au niveau de la peau et des voies digestives et même respiratoires. C'est grâce à sa spore que cette bactérie peut résister à des conditions particulièrement défavorables. Son caractère anaérobie strict limite cependant sa possibilité de développement dans nos aliments. Ainsi les conserves et les aliments cuits constituent d'excellents milieux de culture pour *Clostridium perfringens,* car la cuisson réduit le taux d'oxygène. On distingue au moins 6 types de *Clostridium perfringens* en fonction de la nature des toxines qu'ils synthétisent et excrètent, les toxines étant au moins au nombre d'une douzaine. La toxi-infection résulte souvent de la prolifération de *Clostridium perfringens* A toxinogène dans de la viande laissée à refroidir quelques heures à des températures voisines ou supérieures à la température ambiante, et ce à partir de spores dont la germination a été induite par la cuisson. En effet, les spores présentes sur la viande crue résistent à des cuissons de type « mijotage » de 3 ou 4 heures ou encore à des cuissons à 110°C pendant 30 minutes. Une charge microbienne au moins égale à 10^8 germes par g est nécessaire pour déclencher la toxi-infection. Les symptômes de cette maladie apparaissent entre 8 et 24 heures après la consommation de l'aliment. Il s'agit essentiellement de douleurs abdominales aiguës et d'une diarrhée ; nausées, vomissements, fièvres, frissons ou prostration sont rares.

d) Intoxination botulinique

Cette intoxination est liée à l'ingestion de toxine botulinique synthétisée après la croissance de *Clostridium botulinum* dans un aliment. Ce germe tellurique sporulé et anaérobie strict, fait courir un très grand risque de contamination à de nombreux aliments, notamment les conserves (boîtes et bouteilles) qui subissent un traitement thermique insuffisant. La toxine botulinique est un des poisons les plus violents connus ; son pouvoir toxique est environ 500 000 fois plus élevé que celui de la strychnine et la DL_{50} (dose qui tue 50 % des sujets qui la reçoivent) est estimée de 10^{-8} à 10^{-9} g par kg de poids corporel. C'est pour cette raison que la mortalité est élevée malgré les thérapeutiques comme les sérums antitoxiques ou les anatoxines. Sur la base de la spécificité sérologique de leur toxine, 6 types (A, B, C, D, E et F) de *Clostridium botulinum* ont été identifiés. Les types A, B et E sont les plus fréquemment rencontrés dans le botulisme humain. Le type E qualifié de pisciaire est rencontré chez les poissons de mer ou d'eau douce. Les toxines botuliniques sont des protéines de masse molaire élevée. Ainsi la toxine de type A comprend 4 espèces moléculaires dont les masses molaires varient de 150 000 à 900 000. Ces toxines sont activées par protéolyse. Après injection elles sont captées par le système lymphatique digestif, passent dans le sang puis se fixent sur les jonctions myoneurales des fibres cholinergiques du système nerveux périphérique où elles inhibent l'activation de l'acétylcholine. Il s'en suit des troubles nerveux tels que asthénie, céphalées, vertiges, diplopie, nausées, vomissements, crampes abdominales, constipation, sécheresse des muqueuses de la peau, de la bouche, pupilles dilatées, dysphagie, disphonie, troubles respiratoires avec paralysie.

La fréquence de cette maladie, dont la déclaration est obligatoire semble en augmentation. La plupart des cas affectent soit des individus soit des cellules familiales et mettent souvent en cause des aliments de fabrication ménagère ou artisanale. Ils concernent le plus souvent des viandes, des jambons, des poissons, des pâtés, parfois aussi des légumes tels que haricots ou asperges. Il faut noter ici que les aliments acides, de pH inférieur à 4,5, ne permettent pas le développement de la bactérie. Dans le cas de produits non acides, l'addition de nitrites permet, à partir d'une teneur de 20 ppm d'inhiber la germination et la prolifération du germe.

En raison de la gravité de l'intoxination, la qualité hygiénique des aliments ne peut reposer, dans ce cas, que sur la prévention. Ainsi, cette prévention repose sur la fabrication de conserves correctement stérilisées, sur la conservation au froid de tous les aliments qui ne sont pas de véritables conserves (semi-conserves, produits fumés, etc.) et sur l'addition de nitrites (à une dose maximale voisine de 200 ppm) à des produits

sensibles comme les jambons. Il faut signaler que les toxines botuliniques sont dénaturées donc inactivées par la chaleur. Les données varient selon les auteurs : à 80°C il faut de 8 à 90 minutes et à 100°C quelques secondes. Une cuisson de l'aliment peut donc, dans la plupart des cas, les dénaturer et rendre l'aliment non dangereux.

e) Autres maladies liées à la consommation d'aliments

De nombreux autres micro-organismes sont impliqués dans des maladies d'origine alimentaire. Bien que statistiquement leurs incidences puissent être quantitativement peu importantes, il n'en reste pas moins que certaines de ces maladies, quelquefois très graves, sont à considérer avec beaucoup d'attention. Parmi celles-ci, on peut en signaler quelques-unes dont les germes responsables sont : *Bacillus cereus, Listeria, Campylobacter, Yersinia, Vibrio,* les coliformes, les streptocoques A et D.

• *Bacillus cereus*

Le rôle de cette bactérie dans les maladies microbiennes liées aux aliments a été mis en évidence à partir de 1950. La prolifération importante du germe est toujours nécessaire pour que la toxicité se manifeste (de 10^7 à 10^9 germes par g). Le plus souvent, les purées de pommes de terre, les pâtisseries, les viandes diverses, le riz cuit à l'avance, sont à l'origine de cette maladie. Deux types d'atteintes sont possibles : la première est caractérisée par des vomissements très violents qui apparaissent rapidement (30 minutes à 5 heures). La deuxième se traduit par une diarrhée abondante avec douleurs abdominales apparaissant une dizaine d'heures après le repas incriminé. Deux toxines ont été décrites comme étant à l'origine de ces syndromes : une entérotoxine protéique qui est le facteur diarrhéique et une toxine polypeptidique qui est le facteur émétique.

• *Vibrio parahaemolyticus*

Il s'agit d'un vibrion marin halophile découvert pour la première fois en 1951 au Japon à la suite d'une toxi-infection résultant de la consommation de sardines semi-séchées. Ce germe est responsable de plus de 50 % des toxi-infections alimentaires dans ce pays. En France, sa présence dans des produits de la mer (crevettes) a été mise en évidence. Le développement du commerce international des produits de la pêche ou d'élevage va favoriser la diffusion de cette bactérie qui résiste aux opérations de congélation ou réfrigération. La maladie se caractérise par une gastro-entérite une douzaine d'heures après l'ingestion du produit alimentaire contaminé ; des vomissements, des douleurs abdominales, des nausées, de la diarrhée et de la fièvre sont fréquents. Son évolution est le plus souvent favorable après 72 heures.

• *Listeria monocytogenes*

La maladie provoquée par *Listeria monocytogenes* est la listériose. Ses manifestations caractéristiques sont une méningite et une septicémie périnatale. Sans intervention thérapeutique, la mort survient par méningite. En 1987, en Suisse, une vingtaine de décès ont pu être attribués à ce germe, tandis qu'en France plusieurs centaines de cas ont été signalés en 1986. Dans les cas diagnostiqués et soignés, la mortalité reste élevée et voisine de 25 %. La présence de cette bactérie a été détectée essentiellement dans du lait ou des produits laitiers non ou mal pasteurisés. Ce germe est capable de survivre longtemps dans des conditions défavorables et son caractère cryophile le rend particulièrement dangereux dans les produits réfrigérés.

• *Escherichia coli*

Ce micro-organisme est un hôte normal de l'intestin de l'homme ; dans les fèces son nombre est voisin de 10^6-10^7 par gramme. Certains types d'*Escherichia coli* peuvent provoquer des troubles digestifs : ce sont les *Escherichia coli* entéropathogènes. Leur implication a été démontrée dans certaines gastro-entérites, notamment dans la « diarrhée des voyageurs ». Si les *Escherichia coli* des diarrhées infantiles (*Escherichia coli* G.E.I.) étaient bien connus depuis 1940, ce n'est qu'une trentaine d'années plus tard qu'ils seront reconnus responsables de diarrhées sévères et de toxi-infections chez l'homme. Deux types de souches sont actuellement décrites : d'une part des souches entérotoxinogènes capables d'excréter soit une entérotoxine thermostable (fraction ST), soit une entérotoxine thermolabile (fraction LT) ; ces germes doivent, pour manifester leur pouvoir pathogène, posséder des structures d'adhérence (CFA I et II). D'autre part, il existe des souches invasives provoquant des diarrhées aiguës, avec fièvre, myalgies et frissons. Parmi les sérotypes, le plus souvent responsables de cette maladie, on peut signaler O 25, O 27, O 111, O 115, O 124, O 157. La viande mal cuite et certains produits laitiers ont été identifiés comme étant à l'origine de la plupart des cas.

• *Yersinia enterocolitica*

L'infection causée par cette bactérie est qualifiée de yersiniose : la forme la plus commune est une gastro-entérite. Des syndromes plus sérieux comme une septicémie, une méningite, une polyarthrite, ou une adénite, peuvent subvenir. La mortalité reste rare et les signes cliniques disparaissent généralement au bout de 48 heures. Le plus souvent ce sont des aliments crus, et en particulier le lait, les produits laitiers, les coquillages, les viandes et les volailles qui sont impliqués dans cette maladie. Seules certaines souches sont pathogènes. Ce micro-organisme cryophile est très sensible à la chaleur et est facilement détruit par cuisson ou pasteurisation.

• *Campylobacter jejuni*

La campylobactériose est une maladie d'origine alimentaire très répandue. Aux Etats-Unis, cette maladie est plus fréquente que salmonellose et shigellose réunies. Les symptômes vont de l'entérite insignifiante à l'entérocolite grave associée parfois à une méningite ou une arthrite. Cette infection d'une durée moyenne de 2 à 3 jours peut parfois persister plusieurs semaines. Cette bactérie est un hôte intestinal normal de très nombreux animaux ; dans les fèces de poulet ou de dinde il n'est pas rare d'en rencontrer plus de 10^6 par gramme. De la sorte, ce sont des aliments d'origine animale mal cuits qui sont le plus souvent mis en cause dans l'infection humaine. Ce genre est sensible aux traitements thermiques et ne se multiplie pas en dessous de 30°C.

4) Conclusion

De très nombreuses enquêtes ont été réalisées pour déterminer les causes des maladies microbiennes liées à la consommation d'aliments, mais aussi pour connaître leur importance et leur coût dans une Société.

Les causes de ces maladies peuvent résulter :

– De risques liés à la préparation des produits alimentaires.

A ce niveau, il faut signaler que les produits d'origine industrielle qui représentent actuellement la plus grande partie de notre alimentation ne sont que rarement impliqués. Ce sont surtout la restauration et la cuisine familiale qui sont le plus souvent à l'origine de ces maladies. Dans ces conditions, il apparaît que ce sont dans l'ordre : une réfrigération insuffisante, une préparation trop à l'avance, une cuisson insuffisante, des manipulations non hygiéniques par des personnes malades ou porteuses de germes, un réchauffage inadéquat, la présence de produits crus contaminés dans des plats non cuits et le nettoyage insuffisant qui sont responsables de la présence et/ou de la prolifération des micro-organismes. Au niveau industriel, la plupart des toxi-infections résultent de la contamination des matières premières ou de défauts de traitements et d'emballage, les phases de refroidissement étant potentiellement très dangereuses.

– De risques liés à la conservation et à l'entreposage.

Parmi les nombreux facteurs qui sont à prendre en considération au cours de cette opération (durée, nature de l'aliment, type de traitement technologique de conservation, activité de l'eau, pH, nature de l'emballage, nature et nombre de micro-organismes contaminants), c'est la température qui joue le rôle le plus important. Ainsi, il faut que les produits alimentaires au sein desquels des micro-organismes sont suscep-

tibles de se développer soient conservés à des températures pour lesquelles ce développement est ralenti, voire impossible, c'est-à-dire moins de 2°C ou à plus de 60°C (voir plus haut dans « Le métabolisme microbien » : « Température »). Dans ce dernier cas, il ne peut être envisagé de conservation de longue durée en raison de contraintes technologiques, mais aussi en raison de modifications physicochimiques rapides (réaction de Maillard par exemple) que subit le produit. Quoi qu'il en soit, ces deux températures doivent être appliquées le plus rapidement possible au produit alimentaire qui vient d'être préparé. Rappelons ici que parmi les bactéries responsables de toxi-infections, certaines sont capables de se développer à des températures voisines de 10°C, voire de 3 à 4°C *(Yersinia, Listeria)*. Par ailleurs, dans ces conditions, d'autres germes peuvent être à l'origine d'altérations diverses *(Alcaligenes, Pseudomonas, Achromobacter, Flavobacterium)*. L'activité de l'eau de certains types d'aliments, comme les produits déshydratés, leur confère une grande stabilité microbiologique. Il est alors nécessaire d'éviter la réhydratation de ces produits car certains micro-organismes pourraient cultiver et, dans le cas où il s'agit de levures et moisissures, les risques d'apparition de mycotoxines deviennent prépondérants. Il faut enfin signaler que des innovations technologiques comme les emballages sous vide ou la cuisine sous vide peuvent contribuer, si par exemple les conditions requises de température d'entreposage ne sont pas respectées, à l'augmentation de fréquence d'un type donné de maladie microbienne.

– De nouvelles habitudes alimentaires.

Ces nouvelles habitudes font appel à la cuisine collective, à la consommation de produits crus ou mal cuits, à l'utilisation de plats pré-cuisinés, etc.

Les conséquences socio-économiques des maladies microbiennes liées à la consommation d'aliments sont encore mal connues. Une étude réalisée en 1986 aux Etats-Unis par le National Center For Health Statistics estime à environ 100 millions le nombre de cas de diarrhée alimentaire par an. Les pertes économiques en résultant (soins médicaux, perte de productivité) atteindraient alors 25 milliards de dollars. Les informations dont on dispose pour la France sont fragmentaires (Veit, 1987). Il n'en reste pas moins qu'une rapide estimation montre que le coût d'un seul cas de maladie microbienne d'origine alimentaire peut être globalement (perte de productivité, soins médicaux) estimé aux environs de 2 à 5 000 F : ceci représente, en tenant compte du nombre total de cas, des pertes très importantes pour notre Société. Les risques de mortalité liés à ces maladies sont faibles, et on peut estimer à quelques dizaines le nombre annuel de victimes. Il importe donc que nos aliments tendent de plus en plus vers une excellente qualité microbiologique et plus particulièrement vers une qualité hygiénique irréprochable. Pour ce faire il existe, en plus de l'éducation nécessaire des « cuisiniers domestiques et

industriels » mais aussi des consommateurs, des moyens technologiques nombreux et variés : traitements thermiques (pasteurisation, stérilisation), radiations ionisantes, abaissement de l'activité de l'eau, réfrigération, congélation, mode de conditionnement, produits chimiques souvent qualifiés de conservateurs (nitrites, sorbate, acides divers, etc.). Par ailleurs, il existe des méthodes d'analyses microbiologiques qui permettent aux industriels de se conformer à la réglementation, d'éviter la contre-publicité en cas d'accident, de gérer la qualité en cours de fabrication et enfin de prévenir les intoxications alimentaires. Enfin, il faut signaler que des concepts récents, comme celui du contrôle des points critiques (HACCP) ou de l'analyse du risque, tendent vers des réalisations de produits alimentaires avec « zéro défaut ». L'analyse du risque consiste à identifier les ingrédients sensibles, les points critiques de fabrication et les facteurs humains qui peuvent affecter la qualité microbiologique de l'aliment. Les points critiques sont des paramètres ou déterminants de fabrication dont la perte de contrôle pourrait engendrer un risque inacceptable quant à la qualité hygiénique. Ainsi, avec de telles démarches et bien que la variété de nos aliments ne cesse d'augmenter, il est évident que leur qualité microbiologique ira en s'améliorant pour tendre vers la qualité idéale que constitue le « zéro défaut ».

Utilisation des micro-organismes dans l'industrie alimentaire

Les micro-organismes sont utilisés dans l'industrie alimentaire dans des buts variés : obtention de produits fermentés, de cultures microbiennes ou de métabolites utilisables comme additifs alimentaires.

1) Fermentations

La fermentation transforme le produit en modifiant dans un sens favorable ses propriétés. La valeur alimentaire peut être améliorée par destruction de substances toxiques ou indigestes, par apparition de facteurs de croissance d'origine microbienne (vitamines, acides aminés) ou de manière plus générale par une modification favorable de la composition chimique. Les qualités organoleptiques peuvent être modifiées par transformation ou apparition de goûts et odeurs dans un sens favorable. Enfin l'aptitude à la conservation peut être meilleure grâce à la stabilisation du produit par élimination de substances aptes au développement de contaminants indésirables, par « effet de masse » de la flore technologique sur l'implantation de contaminants, ou par produc-

tion de substances à effet stabilisant ou antimicrobien (acides, alcools, produits générateurs de phénomènes d'« antibiose », etc.).

Il faut noter que les transformations en cause ne sont pas des transformations particulières : on retrouve une grande partie des phénomènes décrits plus haut. On rappellera que la même réaction peut selon le produit, les conditions d'application ou même le goût du consommateur, se révéler nuisible pour la qualité d'un produit ou utile dans le cadre d'une fermentation.

Les principales fermentations alimentaires sont :

- *La fermentation alcoolique*

Provoquée par les levures, cette fermentation intervient dans la fabrication du vin, de la bière, du cidre et de boissons fermentées diverses. Son but est essentiellement la production d'éthanol, mais de nombreux produits intervenant dans les qualités organoleptiques sont aussi formés. La teneur en alcool assure la stabilité du produit dans des conditions de stockage appropriées. La fermentation alcoolique est aussi utilisée en boulangerie : dans ce cas le facteur essentiel est la production de CO_2 qui fait lever la pâte.

- *La fermentation acétique*

Elle intervient dans la fabrication du vinaigre et est due aux *Acetobacter*. Le vinaigre est un produit stabilisé par son pH ; il est utilisé comme conservateur.

- *Les fermentations lactiques*

Elles sont provoquées par de très nombreuses bactéries (beaucoup plus rarement par des moisissures). La fermentation lactique est une étape essentielle dans la fabrication des fromages, mais aussi de nombreux produits végétaux fermentés (ensilages, choucroute, olives, cornichons...) et la charcuterie (saucisson, jambon...). Les fermentations lactiques, outre leur rôle organoleptique, jouent un grand rôle de stabilisation et surtout un grand rôle sur la qualité alimentaire : les ferments lactiques sont source de facteurs de croissance. En fromagerie, le développement des ferments lactiques *(Lactobacillus, Streptococcus, Leuconostoc)* provoque une acidification participant (avec la présure lorsqu'elle est utilisée) à la coagulation. Par production de CO_2 les bactéries lactiques hétérofermentaires provoquent la formation de cavités (ouverture) qui sont très importantes pour certains types de fromage. Dans les fromages à pâte persillée par exemple, c'est dans les cavités que se développera le *Penicillium roqueforti*.

Signalons que d'autres micro-organismes jouent un grand rôle en fromagerie : levures, microcoques, bactéries protéolytiques et surtout moisissures. Ils réalisent des transformations postérieures à la fermentation lactique au cours de l'affinage. Parmi les transformations, citons la maturation du caillé par protéolyse et lipolyse, l'ouverture des fromages type Emmenthal par production de CO_2 au cours d'une fermentation propionique par *Propionibacterium shermanii,* etc.

– Divers autres types de fermentations qui sont rencontrées dans de nombreux produits exotiques : shoyu, miso, tempeh, koji...

2) Production de biomasse microbienne

Cette production peut s'effectuer dans différentes optiques : soit dans un but de consommation alimentaire directe, soit comme source de métabolites après lyse et extraction, soit enfin pour l'obtention de levains destinés aux industries de fermentations.

Les principales fabrications sont celles de levure « diététique », de ferments de régénération de la flore intestinale, de « levure aliment » pour le bétail (Single Cell Protein) ainsi que de levains pour la boulangerie et la fromagerie.

Production de métabolites

Divers produits utilisables comme additifs alimentaires sont fabriqués par fermentation microbienne. Des acides aminés comme la lysine, l'acide aspartique, la thréonine ou l'acide glutamique sont utilisés pour complémenter les rations en alimentation animale ou sont ajoutés à certains produits. Le glutamate est fréquemment employé comme agent de sapidité. Des acides organiques comme les acides lactique, citrique, gluconique, acétique... sont utilisés comme agents d'acidification pour la conservation. Quelques vitamines sont fabriquées par voie microbienne : l'acide ascorbique (vitamine C), la riboflavine (vitamine B2), la cyanocobalamine (vitamine B12), la vitamine D... Certains antibiotiques peuvent dans certaines conditions être employés comme conservateurs : subtiline, tylosine, nisine, pimaricine. Des nucléotides et dérivés d'origine microbienne sont souvent utilisés comme agents de sapidité. Des matières grasses d'origine microbienne sont fabriquées en période de pénurie. Enfin, de nombreuses enzymes d'origine microbienne sont utilisables au cours de la fabrication ou du traitement de denrées alimentaires : protéases, lipases, amylases, pectinases...

• ***Stratégies d'utilisation et d'amélioration des micro-organismes***

Il peut se poser dans l'industrie alimentaire le problème du choix, de la sélection ou de l'amélioration d'un micro-organisme nécessaire pour une fabrication donnée. Le premier problème à résoudre est celui des critères de sélection. Il faut d'abord définir de manière précise la ou les propriétés souhaitées (par exemple : activité lipolytique, production aromatique particulière). De plus, la souche souhaitée doit être d'emploi facile, la plus robuste et la moins exigeante possible, son coût de production doit être faible et, bien sûr, elle doit être dépourvue de pouvoir pathogène ou toxique. Dans l'industrie alimentaire, il est rare que l'on doive innover totalement au niveau microbien ; aussi le choix des souches s'effectuera le plus souvent à partir de flores complexes issues de fermentations spontanées ou de fabrications artisanales peu ou pas contrôlées. L'amélioration des propriétés d'une souche est possible par des techniques génétiques. Une mutation permet de modifier certaines propriétés mais il faut vérifier la stabilité de la souche obtenue et surtout l'absence de modifications secondaires indésirables. L'hybridation par l'intermédiaire d'un cycle sexuel ou parasexuel ou par une méthode de fusion somatique induite permet la combinaison de caractères intéressants issus de deux souches, mais il s'agit de procédés complexes que l'on peut parfois remplacer plus simplement par une double mutation. Enfin les méthodes du génie génétique sont en théorie applicables et sont très prometteuses : elles permettent d'introduire dans une souche microbienne une propriété ne pouvant être acquise par les autres méthodes. Dans tous les cas, la phase la plus importante est celle de la mise au point du crible de sélection. Toutes ces techniques sont actuellement utilisées dans les laboratoires des industries alimentaires « de pointe ». Il ne faut pas perdre cependant de vue l'infinie variété des biotypes microbiens existant dans la nature : il faut toujours tenter de trouver la bonne souche parmi les souches naturelles avant de tenter une amélioration génétique.

CINÉTIQUE DES DÉVELOPPEMENTS ET TRANSFORMATIONS MICROBIENNES : MAÎTRISE DES POPULATIONS MICROBIENNES DANS LES ALIMENTS

Dans ce paragraphe seront développées des notions élémentaires de cinétique des réactions biologiques. Ces notions générales s'appliquent

lorsqu'il y a altération d'aliments par les micro-organismes ou lorsque ceux-ci sont utilisés dans des transformations technologiques (fermentations ou autres).

Croissance cellulaire

Nous ne traitons ici que le cas des organismes unicellulaires : bactéries et levures. Placés dans des conditions idéales les organismes unicellulaires croissent et se divisent de façon continue ; cette division est généralement binaire. Après chaque division cellulaire, les deux cellules « fille » entament immédiatement un nouveau cycle de croissance conduisant à la division. Dans cet environnement idéal toutes les cellules se multiplient à la même vitesse, probablement à la vitesse la plus rapide possible (ou maximale). Par conséquent, une cellule nouvelle met un certain temps pour achever un cycle de croissance et donner naissance à deux cellules « fille ». La durée totale d'un cycle de division cellulaire est appelée temps de doublement ou temps de génération (t_g) puisque chaque doublement est équivalent à une nouvelle génération.

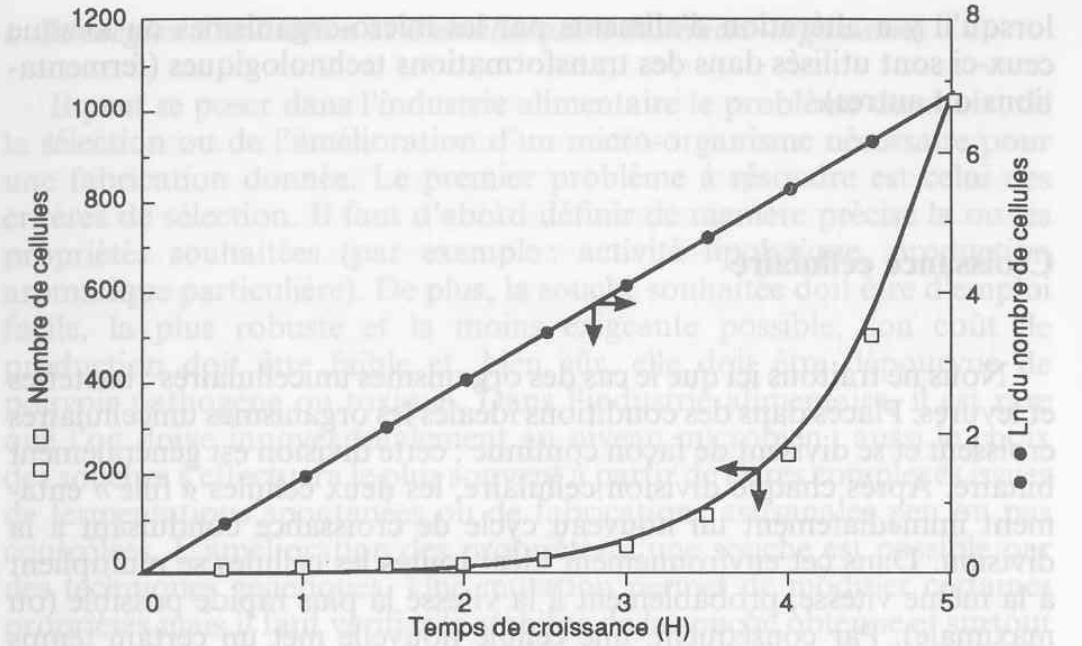
Ce modèle de croissance cellulaire, où le nombre de cellules croît d'un facteur constant à intervalle régulier, est appelé croissance exponentielle. Lorsque le nombre de cellules est représenté en fonction du temps de culture en coordonnées arithmétiques, on obtient une courbe présentant une pente constamment croissante (Figure 1). Une telle représentation n'étant pas toujours commode, il lui est souvent préféré une représentation en coordonnées semi-logarithmiques qui conduit à une évolution linéaire. Au niveau d'une cellule le phénomène de division cellulaire est séquentiel, alors que celui de la croissance est continu. Néanmoins, dans une population en croissance, sauf dans le cas particulier d'une culture synchrone, le nombre de cellules évolue de façon continue.

A cette approche descriptive on peut ajouter une approche plus analytique. Ainsi une population initiale de N_0 individus renfermera :

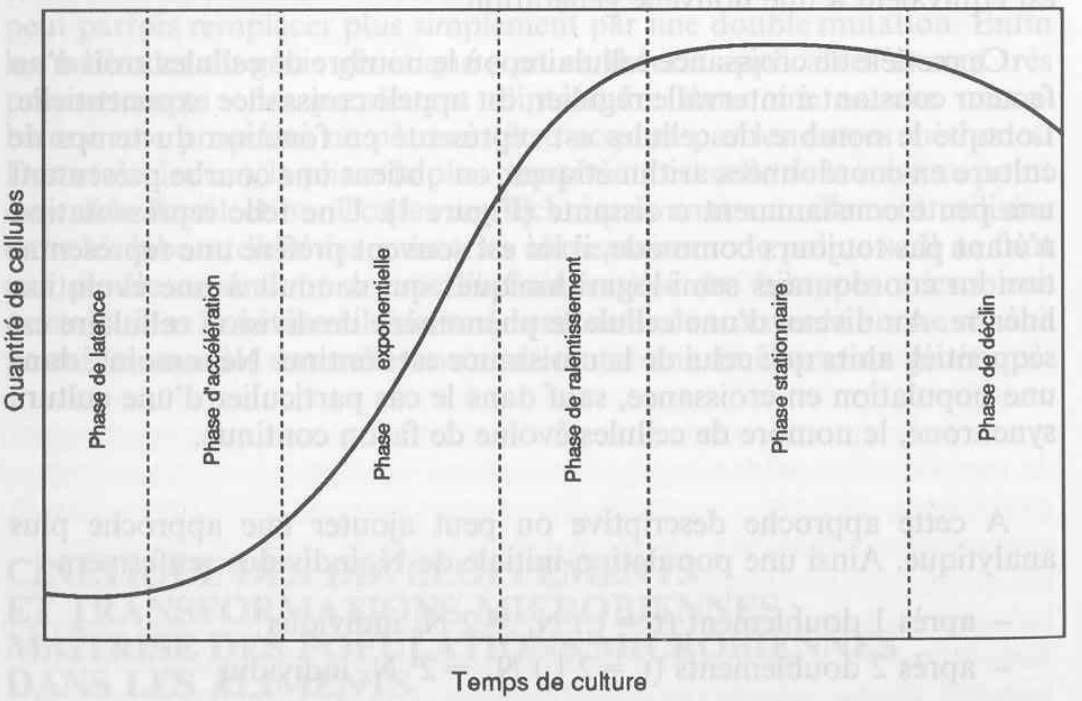
- après 1 doublement ($t = t_g$) $N_1 = 2\ N_0$ individus
- après 2 doublements ($t = 2\ t_g$) $N_2 = 2^2\ N_0$ individus
- après n doublements ($t = n\ t_g$) $N_n = 2^n\ N_0$ individus

Si on note r le nombre de doublements par unité de temps, dans un intervalle de temps le nombre de doublements sera $n = r.t$

Au temps t la population sera : $N_t = 2^{rt}\ N_0$



A – Croissance exponentielle



B – Les diverses phases d'une croissance microbienne en milieu fermé

Figure 1

Croissance cellulaire

r est appelé taux de croissance et son inverse est égal au temps de génération (t_g). Ce dernier est égal au temps nécessaire pour qu'une population voie sa taille doubler.

Si l'on réécrit la dernière relation sous forme logarithmique :

$\text{Ln}\ (N_t/N_0) = r.t\ \text{Ln}\ 2$

ou $\text{Ln}\ (N_t/N_0) = \mu\ t$

Si μ est constant, on peut intégrer et $N = N_0\ e^{\mu t}$, μ est le taux de croissance népérien.

Cette équation est très utile car elle permet la prédiction de la taille d'une population à un instant donné, connaissant cette taille à un autre instant et le taux de croissance.

Enfin $\mu = r\ \text{Ln}2 = 0{,}693r = 0{,}693/t_g$

Une des caractéristiques de la croissance exponentielle est que la vitesse de croissance est faible au début mais subit une forte accélération de sorte que la vitesse devient rapidement vertigineuse. L'implication pratique est qu'un produit naturel peut subir sans dommage apparent les premières phases d'une croissance exponentielle, mais que rapidement les effets deviennent néfastes.

La croissance exponentielle, telle que nous venons de la décrire, ne représente qu'une partie d'un cycle complet de la croissance d'une population microbienne. Une courbe de croissance typique peut être divisée en : phase de latence, phase exponentielle, phase stationnaire et phase de déclin.

1) Phase de latence

Quand une population microbienne est placée dans un milieu favorable, la croissance ne débute pas immédiatement mais seulement après une phase de latence qui peut être, selon les conditions, très courte ou au contraire particulièrement longue. La phase de latence est généralement minime lorsqu'un micro-organisme est transféré d'un milieu sur un milieu identique, ce qui est souvent le cas au laboratoire ou dans les procédés technologiques. Par contre, si le micro-organisme provient d'un milieu différent ou s'il s'agit d'un inoculum provenant d'une culture âgée, même dans des conditions de milieu identiques, une phase de latence importante apparaîtra. Cette situation est la conséquence de phénomènes divers : réaction « toxique » transitoire du milieu, effet de « dilution » et surtout adaptation enzymatique aux nouvelles conditions car les cellules doivent synthétiser l'outil biologique indispensable à l'assimilation et à la transformation des constituants du nouveau milieu.

A la suite de cette phase d'adaptation survient une phase d'accélération au cours de laquelle la multiplication cellulaire démarre avec un taux moyen de croissance de plus en plus grand. L'existence de la phase de latence explique qu'un contaminant entrant en contact avec un aliment ne va pas se développer immédiatement même si cet aliment présente des conditions en théorie favorables au développement.

Lors d'applications technologiques, on recherche les conditions qui limitent la durée de la phase de latence. De nombreux traitements de stabilisation destinés à empêcher le développement microbien, donc les altérations, entraînent des conditions dans lesquelles la phase de latence est maximale voire infinie (réfrigération, congélation, déshydratation, agents stabilisants : sucres, sel...).

2) Phase exponentielle

Au cours de cette phase, le taux de croissance est maximal (temps de génération minimal). Cette croissance est de type « explosif » et aboutit à une augmentation très importante du nombre des micro-organismes. A titre d'exemple, si une bactérie trouve dans un aliment des conditions favorables et que son temps de génération dans ces conditions soit de 15 minutes, la phase de croissance exponentielle donnera à partir d'une seule cellule :

- en 1 heure 16 cellules
- en 2 h 30 > 10^3 cellules
- en 5 h > 10^6 cellules !

Tableau 5

Exemples de valeurs de taux de croissance et temps de génération de quelques micro-organismes.

Micro-organismes	Taux de croissance népérien (h^{-1})	Temps de génération
Escherichia coli	2,5	15 min
Salmonella Sp	1,67	25 min
Clostridium Sp	1	40 min
Lactobacillus Sp	0,42	1 h 40 min
Saccharomyces cerevisiae	0,45	1 h 30 min
Candida utilis	0,40	1 h 45 min
Schizosaccharomyces pombe	0,17	4 h
Geotrichum lactis	0,35	2 h
Chlorella pyrenoidosa	0,08	8 h 30 min

De façon générale, les cellules procaryotes se développent plus rapidement que les cellules eucaryotes. Le tableau 5 donne les valeurs du temps de génération de quelques micro-organismes importants en industrie alimentaire. Pour un organisme donné, la vitesse de croissance varie avec les conditions d'environnement et avec la composition du milieu. Un milieu riche dans lequel des métabolites directement utilisables sont présents donnera une croissance plus rapide qu'un milieu où les cellules doivent effectuer des synthèses complexes.

Dans les fabrications utilisant les micro-organismes, on s'efforce souvent de travailler dans des conditions où la croissance est la meilleure, donc en phase exponentielle.

3) Phase stationnaire

Dans un espace clos, une population ne peut croître infiniment de façon exponentielle. Une limitation de la croissance apparaît lorsque un nutriment essentiel est épuisé ou à la suite de l'accumulation de substances toxiques. La période à partir de laquelle la croissance cesse est appelée phase stationnaire. Le taux de croissance est alors nul. On peut définir une phase de ralentissement entre la phase exponentielle et la phase stationnaire. Durant cette phase, le taux de croissance passe de sa valeur maximale à zéro. C'est durant cette phase que survient généralement la récolte des produits et micro-organismes dans les procédés technologiques.

4) Phase de déclin

Après qu'elles aient atteint la phase stationnaire, les cellules peuvent conserver une certaine activité métabolique, mais généralement elles meurent. Dans ce cas, on parle de phase de déclin. Le phénomène de lyse ne survient pas obligatoirement. Durant cette phase, il y a excrétion dans le milieu du contenu cellulaire, et en particulier des enzymes, toxines...

Classification et cinétiques des transformations microbiennes

Il existe trois grands types de réactions microbiennes qui sont souvent associées :

– La réaction de croissance se traduit par l'augmentation de la taille cellulaire et/ou la multiplication végétative. A partir des substrats, il se

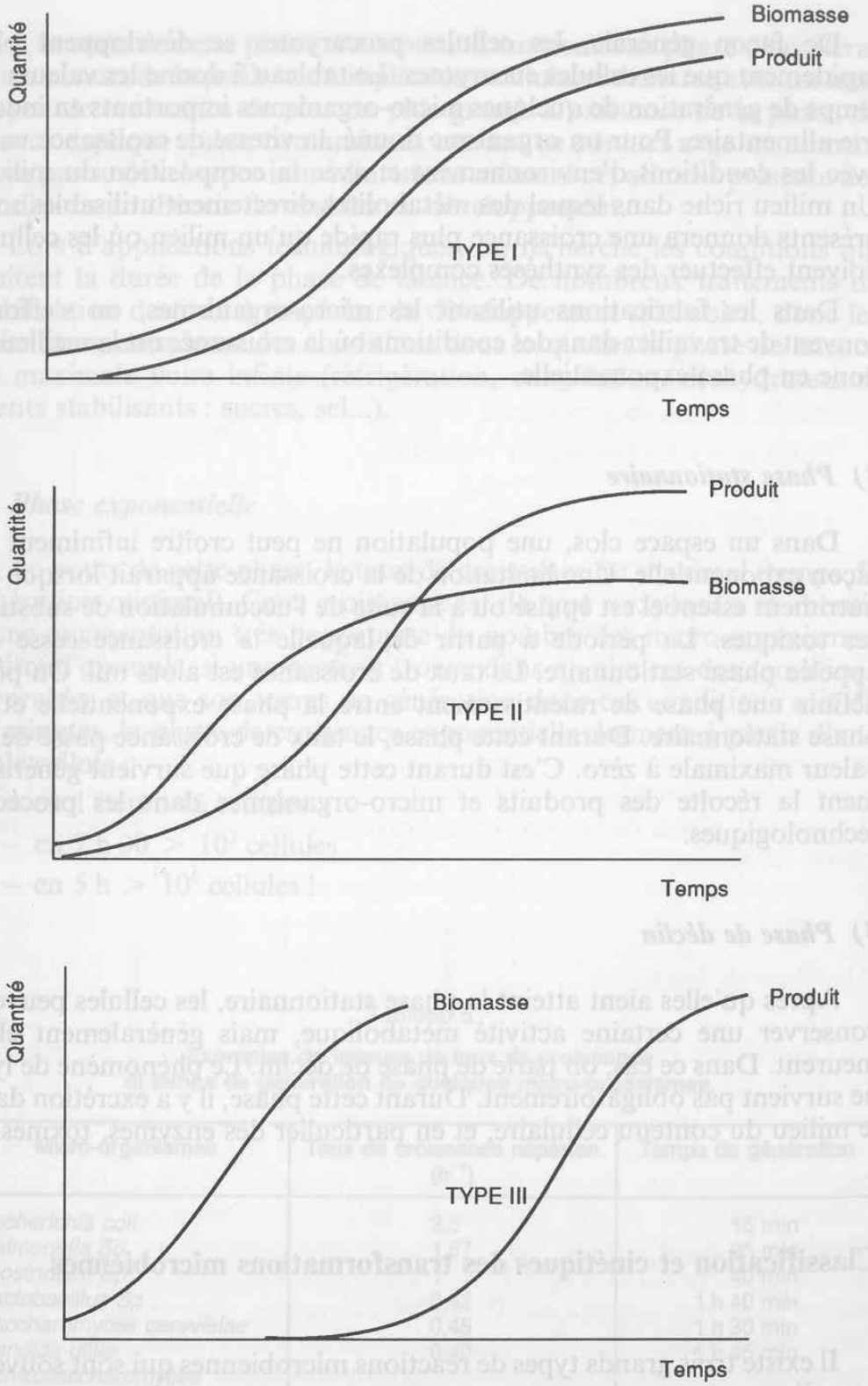


Figure 2
Classification des transformations microbiennes selon Gaden.

forme de la biomasse avec production de CO_2, H_2O et chaleur. Cette réaction est à favoriser dans tous les cas où l'on veut obtenir la formation de biomasse.

– Les réactions de synthèse de métabolites. A partir des substrats il se forme dans le milieu un ou plusieurs produits avec également libération de chaleur. Ces réactions sont utilisées pour la production de métabolites et pour les fermentations (lactique, alcoolique...). Elles sont souvent associées à la croissance.

– Les réactions de maintenance. Par ces réactions de maintenance, la cellule produit l'énergie qui lui est nécessaire pour se maintenir en vie. A titre d'exemple, on peut citer le renouvellement des constituants cellulaires qui sont continuellement dégradés (turn-over), les transports de métabolites contre gradient ou le maintien de ces gradients. Ces réactions sont prépondérantes dans le cas de germes transmis (sans développement) par les aliments. La cellule se maintient en vie sans développer d'activité notable.

Les réactions microbiennes font l'objet d'une classification basée sur les relations existant entre la croissance et la production du (des) métabolite(s) : la classification de Gaden.

– Dans le type I, le produit principal apparaît comme un résultat du métabolisme énergétique primaire. Les produits considérés résultent de l'oxydation directe d'un substrat. Les maxima de vitesse, pour chaque type de réaction, sont proches dans le temps. A titre d'exemple on peut citer la production de protéines, la fermentation alcoolique lorsque la concentration en substrat est relativement faible.

– Dans le type II, le produit considéré est encore le résultat du métabolisme énergétique, mais de façon indirecte. Les vitesses de réaction ont un comportement complexe. Plusieurs maxima peuvent apparaître. Un grand nombre de productions par voie biologique, à vocation alimentaire, résultent de réactions de ce type (fermentation lactique, fermentation alcoolique...).

– Dans le type III, on trouve les biosynthèses de molécules plus ou moins complexes qui ne résultent pas directement du métabolisme énergétique. Les vitesses maximales pour la croissance et l'activité métabolique sont atteintes rapidement. La synthèse du produit considéré ne devient significative qu'en fin de culture alors que le métabolisme oxydatif est très peu intense. La production de certains acides aminés ou de molécules plus complexes, appartient à ce type.

La figure 2 rassemble une illustration de chacun de ces trois types.

Si les micro-organismes sont utilisés à des fins technologiques, il est d'usage de définir un certain nombre de grandeurs utiles pour la

description de l'état et de l'évolution de la production. Les renseignements sur l'état de la culture et plus particulièrement sur son degré d'avancement sont fournis par les concentrations en biomasse exprimée en nombre de cellules (N) ou en masse cellulaire (X), en produit(s) (P(i)) et en substrat(s) résiduel(s) (S(i)) mais également le pH et la concentration en oxygène dissous lorsque ceux-ci ne sont pas régulés (paramètre d'état). Par exemple la production d'acide lactique en laiterie est suivie par la mesure de l'acidité. Tous les paramètres sur lesquels il est possible d'intervenir par divers moyens, généralement des régulations (pH, température...) sont appelés paramètres de commande (ou de contrôle). En dérivant les concentrations ou plus généralement les paramètres d'état par rapport au temps, on définit des paramètres de vitesse. On peut signaler à titre d'exemple :

– La productivité globale en biomasse ou vitesse d'apparition de la biomasse : $r_X = dX/dt$

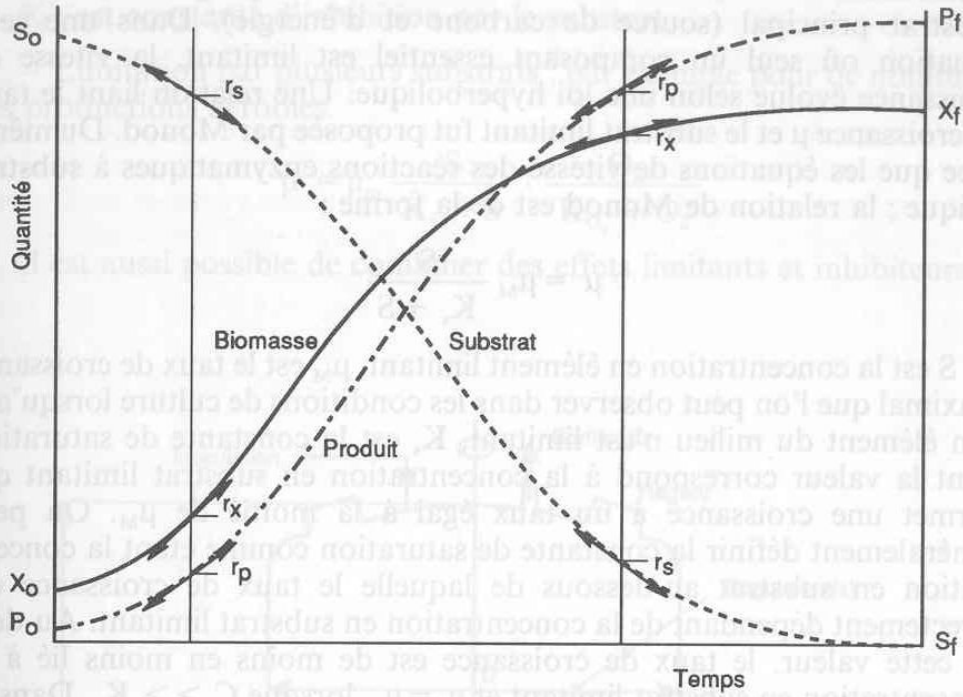
– La productivité globale en produit(s) ou vitesse d'apparition d'un (de) produit(s) : $r_P = dP/dt$

– La vitesse d'assimilation du (des) substrat(s) ou réactivité de la culture : $r_S = dS/dt$, encore appelée demande en substrat.

Ces paramètres sont par exemple utilisés en brasserie pour faire du contrôle prévisionnel. Ils permettent d'exprimer une activité en la ramenant à l'unité de biomasse par exemple : le facteur d'activité métabolique $r_s/X = q$. Le rendement est une notion qui permet de corréler les quantités produites aux quantités consommées ou produites simultanément. Il se définit donc toujours comme une quantité produite par rapport à une quantité produite ou consommée. Cette notion est très utilisée pour l'étude économique des procédés.

Les rendements sont globaux (à partir des concentrations ils concernent des intervalles de temps finis, généralement la durée totale de la culture) ou instantanés (à partir des paramètres de vitesse ils concernent un instant donné de la culture). Ils peuvent être apparents, limites (théoriques, maximaux) ou effectifs. La figure 3 illustre la détermination de rendements apparents ainsi que quelques exemples d'équations stoechiométriques et les rendements limites correspondants.

L'étude des cinétiques des réactions biologiques est importante dans le cadre des industries qui utilisent les micro-organismes comme agents technologiques. Elle est plus délicate que celle concernant les processus chimiques puisque relative à des êtres vivants, capables de se construire eux-mêmes. Il est donc évident que, dans la plupart des cas, la modélisation, c'est-à-dire la représentation approchée par un modèle mathématique d'une partie de la réalité, ne peut se préoccuper intégralement des rapports de la structure complète des micro-organismes vis-à-vis de leur fonction : on a des modèles concrets ou phénoménologiques. Quelles que



Rendement instantané : r_x / r_s ou r_p / r_s ou r_p / r_x

Rendement global : $(x_f - x_o) / (S_o - S_f)$ ou $(P_f - P_o) / (S_o - S_f)$

TRANSFORMATION DU GLUCOSE EN ACIDE CITRIQUE

$$C_6H_{12}O_6 + 1{,}5\ O_2 \longrightarrow C_6H_8O_7 + 2\ H_2O$$

Rendement théorique : 1,07g d'acide citrique par g de glucose

TRANSFORMATION DU GLUCOSE EN ÉTHANOL

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ CH_3CH_2OH + 2\ CO_2$$

Rendement théorique : 0,51g d'éthanol par g d'acide acétique

TRANSFORMATION DE L'ACIDE ACÉTIQUE EN MÉTHANE

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

Rendement théorique : 0,27g de méthane par g d'acide acétique

Figure 3

Détermination des rendements apparents et théoriques (limites) au cours d'une transformation microbienne.

soient les conditions de culture, la croissance est toujours limitée par la présence dans le milieu d'un ingrédient qui sera limitant. Dans le cas de productions à vocation alimentaire ou non, il s'agit généralement du substrat principal (source de carbone et d'énergie). Dans une telle situation où seul un composant essentiel est limitant, la vitesse de croissance évolue selon une loi hyperbolique. Une relation liant le taux de croissance μ et le substrat limitant fut proposée par Monod. Du même type que les équations de vitesse des réactions enzymatiques à substrat unique ; la relation de Monod est de la forme :

$$\mu = \mu_M \frac{S}{K_s + S}$$

S est la concentration en élément limitant, μ_M est le taux de croissance maximal que l'on peut observer dans les conditions de culture lorsqu'aucun élément du milieu n'est limitant, K_s est la constante de saturation dont la valeur correspond à la concentration en substrat limitant qui permet une croissance à un taux égal à la moitié de μ_M. On peut généralement définir la constante de saturation comme étant la concentration en substrat au-dessous de laquelle le taux de croissance est directement dépendant de la concentration en substrat limitant. Au-delà de cette valeur, le taux de croissance est de moins en moins lié à la concentration en substrat limitant et $\mu = \mu_M$ lorsque $C >> K_s$. Dans la pratique, on considère que lorsque la concentration en substrat S est égale ou supérieure à 4 fois la valeur K_s, il n'y a pas d'effet limitant occasionné par S.

Pour une production en général, des situations correspondant à des constantes de saturation faibles seront appréciées, par contre lorsqu'un risque d'altération existe, on recherchera des conditions conduisant à des K_s élevés. Une formulation aussi simple que celle du modèle de Monod ne peut évidemment pas illustrer de façon entièrement satisfaisante toutes les situations possibles d'une culture microbienne. Néanmoins, par une extension directe de ce modèle, on peut interpréter différentes situations :

– Inhibition par un métabolite : par exemple pour la fermentation alcoolique ou la production d'acide lactique.

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{I}{K_i + I}$$

I est la concentration en métabolite inhibiteur et K_i la constante d'inhibition.

– Inhibition par un excès de substrat : par exemple dans les procédés de stabilisation.

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{K'_s}{K'_s + S}$$

K'_s est constante d'inhibition par le substrat.

– Limitation par plusieurs substrats : par exemple pour de nombreuses productions aérobies.

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2}$$

Il est aussi possible de combiner des effets limitants et inhibiteurs.

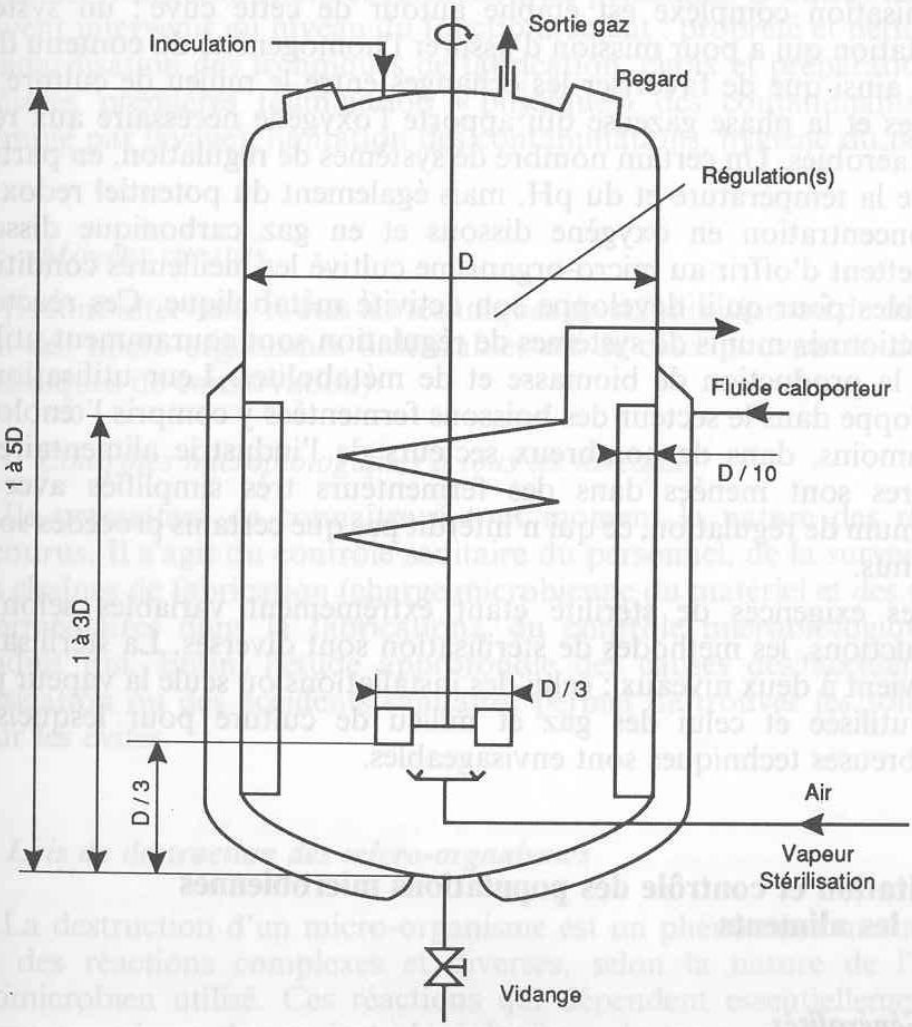


Figure 4
Schéma d'un fermenteur.

Mise en œuvre des micro-organismes

Le trait caractéristique des procédés biologiques est que quelle que soit la technique de production utilisée, on exploite toujours un organisme vivant pour fabriquer une substance utile. On peut imaginer des installations industrielles de conceptions différentes, le facteur limitant étant la créativité de l'ingénieur concepteur. Dans la pratique, seul un petit nombre de procédés de production sont utilisés ; ceux-ci se divisent en trois grandes catégories : les procédés discontinus, semi-continus et continus. La transformation a lieu dans un réacteur nommé fermenteur (Figure 4). En apparence, il s'agit le plus souvent d'une simple cuve réalisée en verre pour les petites tailles ou en acier lorsque la taille est plus conséquente. La hauteur représente 2 à 5 fois le diamètre. En réalité, une organisation complexe est établie autour de cette cuve : un système d'agitation qui a pour mission d'assurer l'homogénéité du contenu de la cuve, ainsi que de favoriser les échanges entre le milieu de culture, les cellules et la phase gazeuse qui apporte l'oxygène nécessaire aux réactions aérobies. Un certain nombre de systèmes de régulation, en particulier de la température et du pH, mais également du potentiel redox, de la concentration en oxygène dissous et en gaz carbonique dissous, permettent d'offrir au micro-organisme cultivé les meilleures conditions possibles pour qu'il développe son activité métabolique. Ces réacteurs perfectionnés munis de systèmes de régulation sont couramment utilisés pour la production de biomasse et de métabolites. Leur utilisation se développe dans le secteur des boissons fermentées y compris l'œnologie. Néanmoins, dans de nombreux secteurs de l'industrie alimentaire les cultures sont menées dans des fermenteurs très simplifiés avec un minimum de régulation, ce qui n'interdit pas que certains procédés soient continus.

Les exigences de stérilité étant extrêmement variables selon les productions, les méthodes de stérilisation sont diverses. La stérilisation intervient à deux niveaux : celui des installations où seule la vapeur peut être utilisée et celui des gaz et milieu de culture pour lesquels de nombreuses techniques sont envisageables.

Limitation et contrôle des populations microbiennes dans les aliments

1) Généralités

L'hygiène est nécessaire dans l'industrie alimentaire pour l'obtention d'aliments sains (non dangereux pour la santé), satisfaisants aux points

de vue alimentaire (nutritionnel) et commercial (bonne conservation, confiance du consommateur vis-à-vis de la qualité générale). Pour obtenir des aliments de qualité, il faut utiliser des matières premières saines et répondant à un cahier des charges strict, éviter les contaminations au cours de la transformation (les limiter ou le cas échéant les éliminer ou les détruire). Les moyens pour attendre ce but sont variés.

– *Moyens préventifs*

Toute une série de mesures sont nécessaires. L'information des manipulateurs permet de les sensibiliser aux problèmes d'hygiène. Des mesures préventives doivent être prises au niveau de la conception et de l'organisation : aménagement des locaux, choix du matériel (facilité de nettoyage), qualité des fluides, lutte contre les vecteurs de contamination (insectes, rongeurs), choix et formation du personnel. D'autres mesures doivent intervenir au niveau du fonctionnement : propreté et nettoyage, standardisation des techniques de fabrication, choix et préparation des matières premières (élimination « physique » des contaminants, par exemple par lavage), limitation des contaminations, hygiène du personnel.

– *Moyens curatifs*

Ils font intervenir toutes les techniques de stabilisation ou de destruction des micro-organismes indésirables ou de ceux pouvant le devenir (techniques de conservation).

– *Contrôles microbiologiques à tous les niveaux*

Ils permettent de connaître à tout moment la nature des risques encourus. Il s'agit du contrôle sanitaire du personnel, de la surveillance des chaînes de fabrication (charge microbienne du matériel et des stades intermédiaires dans la fabrication), du contrôle microbiologique du produit fini. Enfin, l'étude approfondie des causes des accidents de fabrication ou des accidents sanitaires permet de trouver les solutions pour les éviter.

2) Lois de destruction des micro-organismes

La destruction d'un micro-organisme est un phénomène mettant en jeu des réactions complexes et diverses, selon la nature de l'agent antimicrobien utilisé. Ces réactions qui dépendent essentiellement du micro-organisme, de son état physiologique, du temps et de la « dose » utilisée (concentration d'un produit chimique, température, énergie d'une radiation) se traduisent par des « lésions » de plus en plus graves

au niveau microbien, lésions qui évoluent le plus souvent vers la mort. Lorsqu'un traitement antimicrobien est appliqué, non plus à un germe mais à une population, l'évolution du nombre de micro-organismes revivifiables en fonction du temps suit une cinétique d'ordre apparent égal à 1 et peut s'écrire :

$$-\frac{dN}{dt} = kN \text{ soit } \mathrm{Ln}\ N = -kt + \mathrm{Ln}\ N_0 \text{ ou encore } N = N_0\, e^{-kt}$$

avec N nombre de germes vivants au temps t et k = constante de vitesse.

Ainsi, lorsqu'un traitement antimicrobien est appliqué à un produit alimentaire contenant initialement N_0 germes (charge), il apparaît que le nombre de germes vivants décroît en fonction du temps et évolue vers 0 quand la durée d'application tend vers l'infini (Figure 5 a).

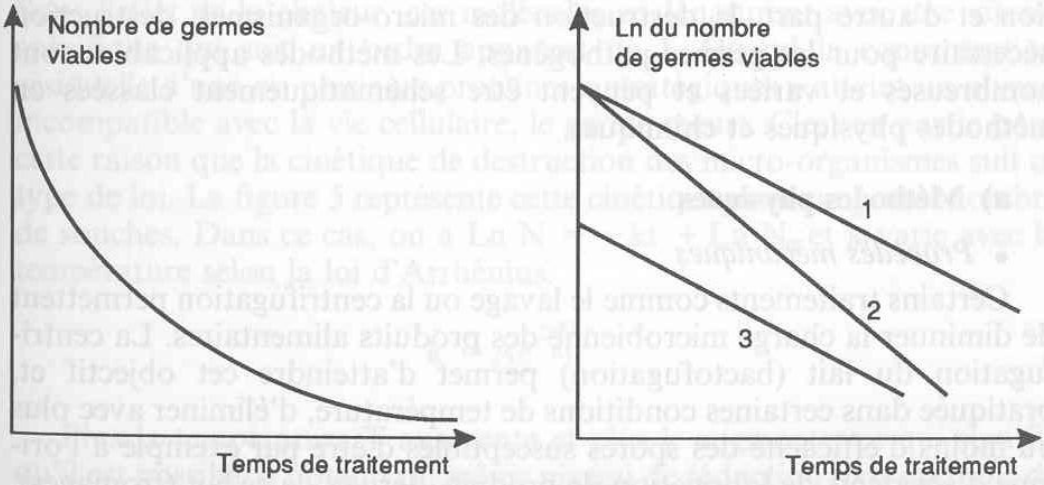
La représentation de la loi $\mathrm{Ln}\ N = -kt + \mathrm{Ln}\ N_0$ est beaucoup plus riche d'enseignement que la loi $N = f(t)$. En effet, la variation du Ln N en fonction du temps est une droite de pente $-k$ et d'ordonnée à l'origine N_0 (charge). Il devient ainsi facile d'extrapoler et d'évaluer graphiquement certaines données fondamentales. La réduction du nombre de microbes vivants dans un milieu défini, tendant vers 0 au cours d'un traitement antimicrobien donné, il existera donc une certaine probabilité de trouver encore un ou plusieurs germes vivants. Cette probabilité est directement donnée par la valeur de N lorsque celui-ci est inférieur à 1. Par exemple N = 0,01 s'interprète comme une chance sur 100 pour qu'il reste un germe viable dans le milieu traité N = 0,0001 pour 1 chance sur 10 000. Il suffira alors de faire en sorte que cet événement soit le moins probable possible pour que l'aliment puisse être considéré comme totalement « débarrassé » de micro-organismes vivants. Comme il est démontré statistiquement qu'une réduction du nombre de germes de 10^{12} à 1 (soit en expression logarithmique décimale de 12 à 0) conduit à une probabilité de présence d'un germe vivant infiniment faible, de tels modèles sont souvent utilisés pour définir les traitements antimicrobiens appliqués à nos aliments.

Parmi les autres enseignements à tirer de cette loi, il faut signaler l'effet très important de la charge initiale en micro-organismes. Il apparaît ainsi que toutes conditions étant égales par ailleurs (nature du traitement, du germe, de l'aliment), l'efficacité du traitement sera d'autant plus grande que cette charge sera faible (Figure 5 b, courbes 1 et 3). Ceci suppose donc de faire en sorte que la charge microbienne dans le produit alimentaire soit toujours la plus petite possible (bonne qualité des matières premières, élimination des germes par lavage ou centrifugation, hygiène des opérations de transformation, etc.).

La dernière donnée exploitable à partir de cette loi concerne l'effet de l'« intensité » du traitement (Figure 5 b, courbes 1 et 2). Cet effet se manifeste sur la valeur de la constante de vitesse k qui sera d'autant plus grande que l'intensité sera élevée (température, énergie d'une radiation, concentration d'un antimicrobien chimique, etc.). Il est alors facile de concevoir des traitements qui conduisent au même effet avec des temps variables à condition de les réaliser avec des « intensités » adaptées.

Pour caractériser un traitement antimicrobien, il faut donc parfaitement définir : la nature du germe (espèce, état physiologique), le niveau de réduction théorique souhaité (10^{12} à 1 par exemple), le milieu, la nature du traitement et son intensité d'application.

Il devient alors possible de définir les conditions des traitements antimicrobiens, par exemple ceux utilisant la chaleur, comme la pasteurisation ou la stérilisation. Ainsi du point de vue hygiénique la pasteurisation correspond à un traitement antimicrobien capable de faire passer (en théorie) le nombre de bactéries dangereuses pour le consommateur sous leur forme végétative de 10^{12} à 1, tandis que la stérilisation devra atteindre ce but mais avec des bactéries dangereuses sous leur forme sporulée. Le plus souvent, les bactéries modèles choisies sont *Mycobacterium tuberculosis* (ou *Streptococcus faecalis*) et *Clostridium botulinium* de type A qui représentent les espèces microbiennes pathogènes les plus résistantes respectivement sous leur forme végétative et sporulée.



Evolution du nombre de germes viables au cours d'un traitement de destruction.

Illustration de l'influence de la charge initiale et de la constante de vitesse sur la durée du traitement.

Figure 5

Lois de destruction des micro-organismes.

Enfin, il est préférable d'exprimer le résultat d'un traitement de stérilisation en nombre de germes viables résiduels plutôt qu'en pourcentage de destruction.

3) Techniques d'élimination, de stabilisation ou de destruction des flores microbiennes

Il existe un grand nombre d'agents antimicrobiens qui ne sont pas tous utilisables pour les produits alimentaires. En effet, il ne faut pas que le traitement nuise à la qualité alimentaire et commerciale du produit et surtout à la qualité sanitaire et donc à la santé du consommateur. La plus grande partie des traitements antimicrobiens de nature physique sont utilisables. Par contre, une grande prudence s'impose en ce qui concerne l'utilisation des agents antimicrobiens de nature chimique ou biochimique. Souvent qualifiés de conservateurs alimentaires, leur addition à nos aliments est soumise à une réglementation stricte.

Le problème essentiel est la destruction des germes pathogènes et celui de la réduction de la flore banale. Une bonne qualité microbiologique tout au long de l'« histoire » d'un aliment est indispensable. Elle permettra au produit de conserver de bonnes qualités organoleptique et nutritionnelle, mais aussi permettra une destruction plus efficace. Pour assurer la conservation des produits alimentaires et leur conférer une qualité hygiénique irréprochable, les microbiologistes et technologues disposent de deux principaux types de moyens : d'une part, la stabilisation et d'autre part, la destruction des micro-organismes, destruction nécessaire pour les germes pathogènes. Les méthodes applicables sont nombreuses et variées et peuvent être schématiquement classées en méthodes physiques et chimiques.

a) Méthodes physiques

• *Procédés mécaniques*

Certains traitements comme le lavage ou la centrifugation permettent de diminuer la charge microbienne des produits alimentaires. La centrifugation du lait (bactofugation) permet d'atteindre cet objectif et, pratiquée dans certaines conditions de température, d'éliminer avec plus ou moins d'efficacité des spores susceptibles d'être par exemple à l'origine d'accidents de fabrication de produits dérivés de ce lait (fromages). D'autres procédés sont mis en œuvre pour servir d'écrans protecteurs : films de paraffine, etc.

• *Filtration*

L'utilisation de filtres organiques (nitrate de cellulose) ou minéraux (alumine) dont le diamètre apparent des pores est inférieur aux dimen-

sions des micro-organismes (inférieur à 0,5 micromètre par exemple) permet d'éliminer ces derniers de fluides tels que les gaz et les liquides. Certains produits alimentaires liquides peuvent être « débarrassés » de leurs germes par filtration, technologie qui présente l'avantage majeur de ne pas altérer les qualités organoleptiques. Cette technique est utilisée au laboratoire soit pour « récupérer » un faible nombre de germes dans un milieu alimentaire liquide (eau minérale par exemple) dans le but de les compter et les caractériser, soit pour « stériliser » des produits liquides fragiles qui, soumis à un autre traitement antimicrobien pourraient subir des modifications défavorables.

• *Chaleur*

Il s'agit sans conteste du procédé antimicrobien le plus largement utilisé au niveau des produits alimentaires. La cuisson, l'ébullition, le blanchiment sont des procédés classiques utilisés dans la préparation des aliments : ils entraînent le plus souvent la destruction de tout ou partie de la flore thermosensible. En milieu industriel, ce sont les procédés de cuisson, blanchiment, pasteurisation et stérilisation qui sont généralement pratiqués, les deux derniers n'étant réalisés que dans le but de stabiliser et rendre non dangereux le produit.

Le mécanisme par lequel la chaleur conduit à la destruction des micro-organismes est complexe. Par exemple, la chaleur est à l'origine de réactions de dénaturation de protéines, molécules qui perdent alors leur activité biologique ou structurale. Il existe dans un micro-organisme plusieurs milliers de protéines différentes à des concentrations variées. Sous l'effet de la chaleur, ces molécules se dénaturent avec une vitesse spécifique qui suit un ordre apparent de 1. Quand la concentration résiduelle d'une ou plusieurs protéines « stratégiques » atteint un niveau incompatible avec la vie cellulaire, le germe meurt. C'est en partie pour cette raison que la cinétique de destruction des micro-organismes suit ce type de loi. La figure 5 représente cette cinétique pour un grand nombre de souches. Dans ce cas, on a $\mathrm{Ln}\ N = -kt + \mathrm{Ln}\ N_0$ et k varie avec la température selon la loi d'Arrhénius.

$$k = Ae^{\frac{-Ea}{Rt}}$$

Plus la température T augmente et plus k augmente, ce qui signifie qu'il est possible d'obtenir un même niveau de réduction (par exemple de 10^{12} à 1) théorique pour des couples temps-température différents. Ainsi à la pasteurisation basse (63°C-30 minutes) s'est substituée la pasteurisation haute (90°C, quelques secondes). Cette dernière méthodologie, bien que d'une efficacité identique du point de vue de la destruction microbienne, peut présenter des avantages au niveau de réactions chimiques défavorables. En effet, en raison de leur énergie d'activation différente

(E_a) les réactions de destruction de bactéries ou de vitamines, par exemple comme la thiamine, pourront être contrôlées de telle sorte que pour un même niveau de destruction des germes, la destruction de la vitamine soit minimisée (par exemple en augmentant la température et en diminuant le temps). Compte tenu du but recherché au cours d'une opération de pasteurisation, le produit obtenu ne contiendra plus de formes végétatives de germes pathogènes (*Escherichia coli, Staphylococcus, Salmonella, Mycobacterium,* etc.) mais pourra encore renfermer des germes thermorésistants dont la destruction n'aura pas été totale. De ce fait, les produits devront, pour rester stables, être conservés dans des conditions ne permettant que peu (ou pas) la multiplication de ces germes d'altération non pathogènes (voir plus haut, « Croissance cellulaire »). Ainsi, les laits pasteurisés doivent être conservés au froid sinon les *Lactobacillus* et *Streptococcus* ayant survécu au traitement se multiplient et acidifient le milieu qui peut coaguler.

La stérilisation par la chaleur s'applique surtout aux conserves. De la même façon que pour la pasteurisation, plusieurs méthodes aboutissant au même niveau de réduction théorique de spores « modèles » sont appliquables : stérilisation classique (par exemple 120°C, 10 minutes), stérilisation ultra haute température (UHT ; par exemple 140°C, quelques secondes). C'est le niveau d'une autre réaction défavorable de dégradation (perte en vitamine) ou de synthèse (réaction de Maillard se traduisant entre autre par un brunissement et un goût de caramel) qui va permettre de fixer le choix de la température et du temps. Traditionnellement, l'industrie de la conserve utilise les notions de constantes de vitesse, d'Arrhénius et d'énergie d'activation par l'intermédiaire des paramètres suivants :

Valeur D : temps nécessaire à une température donnée pour détruire 90 % de la population initiale.

Valeur Z : nombre de degrés Farenheit nécessaire pour que D varie d'un facteur 10.

Valeur F : temps nécessaire à 121°C pour produire un niveau de destruction donné des spores ou des formes végétatives d'un micro-organisme donné.

- *Radiations*

Les radiations sont utilisables pour détruire les micro-organismes dans les produits alimentaires. Leurs effets se traduisent par une destruction qui suit une cinétique d'ordre apparent 1. Comme dans le cas de la chaleur où la vitesse augmentait avec la température, leurs effets augmentent avec l'énergie mise en jeu. Cette énergie est fonction de la fréquence ou de l'inverse de la longueur d'onde de la radiation ($W = h\nu = h\,C/\lambda$ avec h : constante de Planck, C vitesse de la lumière dans le vide,

λ longueur d'onde, ν fréquence) en fonction de leur nature, il est possible de décrire les effets des :

– *Radiations électromagnétiques* dont les effets antimicrobiens ne se manifestent qu'à des longueurs d'ondes inférieures à 300 nm (nm = 10^{-9} m). Les rayonnements ultra-violets peu pénétrants sont utilisables pour réduire la charge microbienne d'atmosphères, de pièces, de l'eau ; leur domaine de longueur d'onde s'étend de 400 à 10 nm mais leur pénétration est très limitée. Ils agissent par illumination directe et les réactions qu'ils provoquent chez les micro-organismes se situent essentiellement au niveau des acides nucléiques et de certaines protéines. Les rayonnements X ne sont que très rarement utilisés, tandis que les rayonnements γ produits par des composés radioactifs comme le ^{60}Co sont de plus en plus fréquemment utilisés dans les industries alimentaires, leur domaine de longueur d'onde s'étend de 0,1 à 0,01 nm. Qualifiés de rayonnements ionisants, leur pouvoir pénétrant est élevé et ils provoquent la mort des micro-organismes en ionisant leurs molécules constitutives ou en provoquant des ruptures homolytiques de liaisons chimiques de ces mêmes molécules. Il apparaît alors des radicaux libres dont la durée de vie est très brève ; ils se recombinent entre eux pour donner de nouvelles molécules inactives ce qui se traduit, quand le niveau de destruction est important, par la mort du germe. Ce procédé permet de réaliser des « pasteurisations » ou même des « stérilisations », procédés qualifiés de « à froid ». La notion de dose de radiation D est évaluée par la loi : $\mathrm{Ln}\ N = -k\ D + \mathrm{Ln}\ N_0$. Cette dose a pour dimension une énergie par unité de poids de matériel irradié et est proportionnelle au temps d'irradiation. Signalons enfin que le Commissariat à l'Energie Atomique a installé en 1988 à Nantes un équipement d'irradiation des produits alimentaires alors que bon nombre de pays de la Communauté Economique Européenne les utilisent déjà depuis de nombreuses années.

Les micro-ondes, de nature électromagnétique, se traduisent, en fonction de leur fréquence, par l'agitation de molécules polaires (dipôles) et en particulier de l'eau. Cette agitation comparable à celle obtenue par la chaleur se traduit par une élévation de température qui peut atteindre, pour les aliments riches en eau, 100°C. Les effets antimicrobiens résultent alors de ce phénomène. En absence d'eau, les effets antimicrobiens des micro-ondes par agitation de l'eau intracellulaire des germes sont significatifs sur les formes végétatives mais négligeables sur les formes sporulées de faible teneur en eau.

– *Radiations soniques* dont les effets antimicrobiens ne se manifestent qu'à partir de faibles longueurs d'onde (ultra-sons). Les radiations ne sont pas transmises dans le vide et sont surtout utilisées à des fins de recherche pour « casser » les cellules microbiennes.

– *Radiations particulaires* dont les plus utilisées sont produites par des accélérateurs d'électrons. Dans ce cas l'énergie mise en jeu est d'ordre cinétique ($W = 1/2\ m\ v^2$ avec m masse de la particule et v sa vitesse). En général peu pénétrantes, les radiations électroniques ne sont encore que peu utilisées en industrie alimentaire.

• *Environnement atmosphérique de l'aliment*

La mise sous vide du produit alimentaire après cuisson, opération au cours de laquelle les formes végétatives des micro-organismes sont facilement détruites, ne permet que le développement de germes sporulés. Pour éviter ce phénomène qui pourrait s'avérer dangereux dans le cas de spores de *Clostridium botulinium* ou encore de *Clostridium perfringens* par exemple, ces produits doivent alors absolument être réfrigérés à des températures inférieures à 5°C et leur durée de vie, variable selon les produits, est de l'ordre de la semaine dans ces conditions. Pour leur assurer une bonne qualité hygiénique, il faut que la chaîne du froid ne soit jamais interrompue.

• *Froid*

Le froid ne tue pas la plupart des micro-organismes. Les réactions chimiques sont généralement ralenties quand la température diminue (loi d'Arrhénius). De ce fait, le froid ralentit les réactions métaboliques chez les micro-organismes et diminue donc leur vitesse de prolifération. La réfrigération qui consiste à maintenir un produit alimentaire à une température proche de 0°C empêche, en principe, la multiplication de la plupart des germes pathogènes mais pas celle des germes cryophiles parmi lesquels on rencontre de nombreux agents d'altération et parfois des germes pathogènes *(Listeria, Campylobacter)*. La congélation à −18°C et la surgélation (−40°C et même −80°C) permet une stabilisation totale vis-à-vis des micro-organismes et entraîne une mortalité plus ou moins importante selon la nature des germes et la vitesse de refroidissement.

• *Déshydratation*

Il s'agit d'une technique de stabilisation utilisée depuis la plus haute Antiquité, le séchage étant alors réalisé par exposition au rayonnement solaire. Il existe actuellement plusieurs procédés de déshydratation, l'atomisation étant l'un des plus utilisés. La lyophilisation est une sublimation de l'eau (passage de l'état solide à l'état gazeux) qui s'effectue à basse température et qui n'altère que très peu les propriétés nutritionnelles et organoleptiques du produit. La stabilisation par déshydratation, conduisant à des produits de faible activité d'eau, offre l'avantage de réduire le poids et le volume du produit. Selon le traitement utilisé, seule une partie de la flore est détruite. Le fumage, souvent associé au séchage, introduit dans l'aliment des produits de la pyrolyse du bois dont l'effet antimicrobien est connu depuis fort longtemps.

b) Méthodes chimiques et biologiques

Il s'agit de méthodes utilisées pour stabiliser ou détruire la flore microbienne d'un aliment ou de matériels mis en œuvre dans leur fabrication. Les produits mis en jeu dans ce processus doivent surtout être microbicides lorsqu'il s'agit de désinfecter des matériels, locaux, sols, etc., tandis que dans le cas de produits ajoutés à l'aliment, il faut d'abord que ces composés ne soient pas toxiques pour le consommateur.

Le mécanisme d'action est fonction de la nature du composé antimicrobien et la cinétique de destruction est d'ordre apparent égal à 1. La loi est de la forme $\mathrm{Ln}\ N = -k\ C^m\ t + \mathrm{Ln}\ N_0$ avec N nombre de survivants au temps t, N_0 charge microbienne initiale, k constante de vitesse, C concentration du produit chimique et m constante qui dépend du produit. Il apparaît ainsi que la vitesse de destruction est fonction de la concentration en agent antimicrobien et, au travers de k, de la température.

Les composés chimiques dotés d'activité antimicrobienne sont très nombreux. Parmi ceux qui sont utilisables pour leurs propriétés microbicides (désinfectants) on peut signaler l'hypochlorite de sodium (eau de javel) ou les ammonium quaternaires. L'eau de javel agit au niveau bactérien en oxydant et en chlorant de nombreuses protéines tandis que les ammonium quaternaires agissent surtout par leur effet tensioactif. Les produits à effet antimicrobien (microbiostatique ou microbicide) susceptibles d'être ajoutés aux aliments sont généralement qualifiés de conservateurs alimentaires. Leurs effets peuvent être propres (alcool, acide sorbique, nitrite, anhydride sulfureux, acide propionique, phénol, antibiotiques...) ou résulter de modifications de certaines propriétés de l'aliment comme le pH (acides acétique, citrique, tartrique, lactique...) ou l'activité de l'eau (chlorure de sodium, saccharose...). Ainsi l'adjonction de sel (salage ou saumurage) ou de sucre modifie le goût de l'aliment et permet d'abaisser l'activité de l'eau à des valeurs pour lesquelles seule une flore non dangereuse pour le consommateur est susceptible de survivre ou de se multiplier. Ainsi, une confiture ne permet la prolifération que de germes osmophiles, c'est-à-dire essentiellement des moisissures. Comme il s'agit de micro-organismes aérobies stricts, une couche barrière placée entre la surface de la confiture et l'air permet alors de stabiliser le produit (papier paraffiné ou paraffine).

Certaines modifications de l'aliment conduisant à l'amélioration de sa stabilité microbiologique peuvent résulter de processus de fermentation au cours desquels apparaissent par exemple des acides (fermentations lactiques pour le yaourt, les divers fromages, certaines charcuteries ; fermentation acétique pour le vinaigre) ou des composés à activité antimicrobienne (par exemple des nitrites à partir de nitrate, des antibiotiques...).

LES MÉTHODES DE LA MICROBIOLOGIE ALIMENTAIRE

La plupart des produits alimentaires que nous consommons peuvent renfermer de nombreux microbes dont certains possèdent un redoutable pouvoir pathogène pour l'homme. Il faut donc que ces bactéries ne soient pas présentes dans nos aliments, ou si elles le sont, que leur nombre soit tel que l'aliment ne soit pas dangereux. Par ailleurs, il est nécessaire que tous les produits que nous consommons n'aient pas subi de modifications indésirables résultant d'une prolifération microbienne trop intense. Il faut donc procéder à des analyses permettant de contrôler l'absence de certains micro-organismes dangereux ou encore de compter les germes « tolérables ». Les résultats obtenus seront alors comparés à des normes établies par des commissions de spécialistes au sein d'organismes ou d'organisations comme l'AFNOR, la CEE, le CNERNA ou encore l'OMS, la FAO, l'ISO ou l'ICMSF.

Un des buts de la microbiologie alimentaire est donc de vérifier la conformité de nos aliments à des critères préétablis. Ces critères ne concernent qu'un nombre limité de micro-organismes, car d'une part il vaut mieux s'assurer d'une bonne qualité microbiologique par des règles strictes appliquées en cours de fabrication et, d'autre part, il est évident que l'analyse systématique des germes susceptibles d'être rencontrés ne pourrait être, indépendamment de toute autre considération, qu'incomplète et approchée. De ce fait, le nombre de micro-organismes recherchés ou comptés est relativement limité. De plus, il s'agit souvent de groupes microbiens mal définis au plan taxonomique. Ainsi, les analyses les plus couramment pratiquées en microbiologie alimentaire, aussi bien sur les matières premières qu'en cours de fabrication ou sur les produits finis, concernent pour l'essentiel les numérations de la flore aérobie mésophile totale, des coliformes totaux et fécaux, des streptocoques du groupe D, des anaérobies sulfito-réducteurs, des levures, des moisissures et parfois la recherche par des épreuves du type présence ou absence de bactéries pathogènes comme *Salmonella, Shigella* ou *Staphylococcus aureus.* Selon les produits alimentaires, d'autres types d'analyses peuvent être réalisés comme par exemple les numérations de la flore psychrophile, de la flore protéolytique, etc.

Sous son apparente simplicité, cette partie de la microbiologie alimentaire s'avère en fait délicate à maîtriser. Il existe en effet de nombreuses difficultés à surmonter pour que les résultats obtenus puissent être, entre autre, comparés aux normes. Il importe donc que les techniques utilisées soient standardisées, rapides et les moins onéreuses possible. Des progrès importants, dans ces analyses alimentaires, ont été apportés aussi bien par des développements technologiques (méthodes

de filtration, utilisation de matériels à usage unique, de milieux déshydratés ou prêts à l'emploi, de systèmes automatisés de remplissage des boîtes de Pétri, d'appareils automatisés d'ensemencement de ces boîtes comme l'ensemenceur spiral, de compteurs électroniques de colonies à faisceau laser, etc.) que par les découvertes réalisées dans certaines disciplines comme l'immunologie (immunofluorescence, ELISA) ou encore la biologie moléculaire (détection de *Salmonella* ou *Listeria,* par hybridation DNA-DNA).

L'immunofluorescence (FIA : fluorescent Immuno Assay) consiste en une réaction antigène-anticorps, dans laquelle l'antigène est un des « composants externes » du corps microbien et l'anticorps, préalablement produit chez un animal au contact de cet antigène, est marqué avec un composant fluorescent (fluorescéine). La spécificité de reconnaissance d'un antigène par un anticorps étant très grande, la formation du complexe antigène (bactérien) – anticorps (fluorescent) sera mise en évidence par microscopie et permettra de confirmer la présence de la bactérie contenant l'antigène spécifique de l'anticorps utilisé. Ainsi, il est possible de détecter des *Salmonella* après enrichissement, en moins de 48 heures.

L'immunoenzymologie (EIA : Enzymo Immuno Assay) utilise des anticorps sur lesquels est greffée une enzyme (phosphatase, peroxydase). Après réaction antigène (bactérien) – anticorps (enzyme), la présence de l'enzyme est détectée par addition de substrat. Ce dernier, sous l'action de l'enzyme, donne le plus souvent un dérivé coloré, facile à visualiser. Dans la technique ELISA (Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay), l'anticorps spécifique de la bactérie à mettre en évidence est d'abord fixé sur les parois d'un tube en polystyrène. Le mélange liquide dans lequel on recherche la bactérie est introduit dans le tube et, si la bactérie est présente, celle-ci est fixée par l'anticorps. Après lavage, on ajoute au tube un anticorps (antibactérien), sur lequel on a préalablement fixé une enzyme ; après lavage, la fixation de cet anticorps-enzyme est mise en évidence par addition d'un substrat de l'enzyme (Figure 6).

Les techniques très modernes de l'hybridation ADN/ADN (ou ARN), issues de la biologie moléculaire, permettent une recherche très spécifique de certaines bactéries. Dans les années à venir, il n'est pas irréaliste de prévoir une mise en évidence de *Salmonella* (ou *Listeria,* ou *Yersinia*...) dans nos aliments en moins d'une heure. Pour ce faire, des séquences de l'ADN microbien seront préalablement « multipliées » par la technique PCR (Polymerase Chain Reaction), puis mises en évidence par des sondes (oligonucléotides) capables de s'hybrider spécifiquement avec certaines régions de cet ADN. La mise en évidence de cette hybridation est alors obtenue soit par des marqueurs radioactifs, soit par

des marqueurs froids (enzymes). Rappelons que cette hybridation résulte de la possibilité qu'ont les bases puriques et pyrimidiques des acides nucléiques de former des liaisons spécifiques entre elles (A–T, G–C).

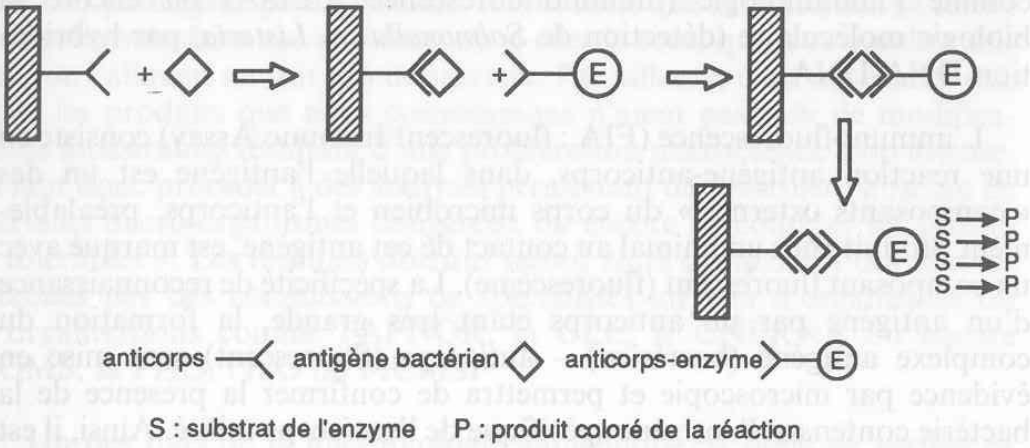


Figure 6
Schéma du système ELISA.

Le laboratoire de microbiologie

L'équipement d'un laboratoire de microbiologie alimentaire diffère peu de celui d'un laboratoire de bactériologie médicale ; la fréquence des mesures quantitatives exige cependant un nombre beaucoup plus grand de milieux de culture. Par ailleurs, il comprend du matériel dont l'emploi n'est qu'exceptionnel en bactériologie médicale. Outre le matériel de stérilisation (autoclave, four Pasteur), le laboratoire doit posséder plusieurs étuves (30, 37, 44 et parfois 55°C), des broyeurs-homogénéisateurs (type Virtis ou Stomacher), des bains-marie (45 et 100°C), un compteur de colonie, un microscope et ses accessoires, des paillasses stérilisables avec plusieurs becs de gaz, éventuellement une hotte à flux laminaire. Il faut aussi disposer d'un très grand nombre de boîtes de Pétri (stériles à usage unique en polycarbonate par exemple), de tubes à essai, de pipettes graduées stériles ou de pipettes automatiques à cônes en polypropylène stérilisables. Certains matériels particuliers comme des pipettes harpons, des poinçons, des cautérisateurs, etc., utilisés au cours de prélèvements d'aliments solides, doivent également faire partie des équipements du laboratoire.

Les techniques générales d'analyse

En microbiologie alimentaire, un large éventail de techniques est utilisé : techniques d'isolement, de numération, d'identification. En fait, il n'est pas toujours nécessaire de rechercher, compter et identifier systématiquement tous les micro-organismes présents dans l'aliment. Une analyse exhaustive n'est utile que dans quelques cas particuliers, par exemple pour la recherche des causes d'un accident de fabrication ou d'un problème sanitaire. Dans la plupart des cas, l'analyse pratiquée est une analyse de routine dont le but est de définir la qualité microbiologique de l'aliment. Ce type d'analyse comporte :

– *Une étude quantitative de la flore,* soit par dénombrement de la flore dite « totale » (par exemple de la flore aérobie mésophile revivifiable), soit par dénombrement d'un groupe microbien pouvant correspondre à une contamination déterminée ou provoquer une altération particulière : coliformes, coliformes « fécaux » (se développant à 44°C), streptocoques fécaux, germes indologènes, putrides ou sulfito-réducteurs, levures et moisissures, germes cryophiles, thermorésistants, protéolytiques, etc. L'étude quantitative permet d'évaluer la charge microbienne globale de l'aliment et les conséquences qui peuvent en résulter sur la qualité commerciale. Elle permet aussi de déterminer la qualité hygiénique générale et de prévoir par l'étude de « flores indicatrices » la présence de germes pathogènes spécifiques.

– *Une recherche orientée de certaines bactéries pathogènes,* telles que *Salmonella, Shigella, Staphylococcus* et selon le cas, *Mycobacterium, Brucella, Listeria, Vibrio* : cette recherche se fait généralement par une épreuve « présence/absence ».

– Eventuellement, *une recherche de toxines.*

Le plus souvent ces études ne diffèrent d'un produit alimentaire à un autre que par certains détails d'exécution. Parmi les analyses systématiquement réalisées, pour la plupart des produits alimentaires, on peut signaler les numérations de la flore aérobie mésophile ou encore celle des coliformes. Signalons aussi que des dosages chimiques ou biochimiques sont parfois réalisés pour remplacer ou compléter certaines analyses microbiologiques.

Le contrôle microbiologique des aliments

1) Préparation de l'échantillon

La première intervention à réaliser par l'analyste dans le cadre d'un contrôle systématique est l'échantillonnage. Il s'agit là d'un élément fondamental sans lequel les résultats obtenus et leur comparaison à des normes préétablies n'auront aucune signification. Un échantillonnage correct, suivi d'une analyse microbiologique adéquate, permettent d'évaluer la qualité hygiénique moyenne d'une production. Ceci est d'autant plus important qu'en raison de la durée des analyses et du caractère périssable de certains aliments, ceux-ci sont commercialisés, voire consommés, avant que les résultats ne soient connus. Pour réaliser correctement cette opération, l'ICMSF (International Commission on Microbiological Specifications for Foods) a défini une méthodologie d'échantillonnage applicable à l'analyse systématique des produits alimentaires. Cette méthodologie tient compte de la nature de la bactérie, du type de produit alimentaire et permet une estimation de la qualité hygiénique et/ou de la qualité marchande.

Après un prélèvement réalisé dans des conditions rigoureuses d'asepsie, l'échantillon doit être le plus rapidement possible soumis à l'analyse ; en cas d'impossibilité d'analyse immédiate il peut être conservé à l'état réfrigéré ou quelquefois congelé pendant quelques heures.

La plupart des produits à analyser étant hétérogènes, l'étape suivante consiste à homogénéiser l'échantillon, le plus souvent au moyen d'un broyeur (Virtis) ou à l'aide d'un Stomacher. Un bouillon tryptone-sel ou du liquide de Ringer stériles sont ajoutés en quantité connue pour favoriser l'opération. Certains micro-organismes « endommagés » mais non tués au cours des traitements technologiques appliqués aux aliments (déshydratation, chaleur, etc.) voient leurs propriétés physiologiques (phase de latence), leurs besoins nutritionnels ou encore leur sensibilité aux conditions défavorables de milieu modifiés de telle façon qu'ils sont souvent incapables de cultiver, donc d'être mis en évidence, dans des conditions « classiques » d'analyse. Pour les mettre en évidence, il faut alors procéder à une opération qualifiée de « revivification », opération qui consiste donc à permettre aux micro-organismes de récupérer leur aptitude à cultiver sans modifier leur nombre.

2) *Analyses quantitatives*

Les numérations de micro-organismes sont actuellement réalisées à l'aide de deux principales méthodologies. La première consiste à compter les germes par calcul statistique, après ensemencement de milieux liquides ; il est alors possible d'estimer un nombre de germes le plus probable (NPP). La deuxième repose sur l'utilisation de milieux de culture solides répartis dans des boîtes de Pétri. Dans ce cas, un germe isolé dans la masse ou à la surface du milieu de culture donne naissance à une colonie macroscopique qui lui est caractéristique et qu'il est facile de compter. On parlera alors d'UFC (Unité Formant Colonie). Par un choix judicieux du milieu, il est alors possible de compter une flore donnée ; par exemple, la numération des coliformes fécaux est réalisée par incubation à 44°C à l'aide de milieux qui contiennent des sels biliaires (composés tensio-actifs présents dans l'intestin), des inhibiteurs de bactéries gram + (vert brillant par exemple), du lactose, un indicateur coloré. L'application de ces méthodes nécessite la réalisation préalable de dilutions décimales du produit ou de son homogénat, en particulier lorsque la flore est abondante. Dans le cas contraire et pour les produits alimentaires liquides, il est possible de recueillir les germes présents dans un volume donné par filtration sur membrane. Celle-ci est ensuite placée sur un milieu de numération adapté pour permettre à certains des germes de se multiplier.

Parmi les numérations réalisables, celle de la flore aérobie mésophile permet d'évaluer la qualité microbiologique au sens large du terme et reflète l'histoire du produit. Il est ainsi possible, pour un aliment donné, de prédire les types microbiens que l'on a le plus de chance de rencontrer tout au long de leur histoire. Ce nombre de germes totaux représente l'état de fraîcheur ou de décomposition du produit. Sur le produit manipulé ou soumis à divers traitements technologiques, le dénombrement des germes totaux permet de juger de la qualité des opérations de production, transport, entreposage, etc. Cependant, un nombre peu élevé de germes peut ne pas correspondre à un produit sain et vice versa. La numération des coliformes fécaux représente, quant à elle, un bon indice de contamination, à partir des matières fécales de l'homme et des animaux d'où son appellation de « flore indicatrice de contamination fécale ». Ces bactéries sont souvent associées à des entérobactéries pathogènes comme *Salmonella* et *Shigella*.

3) *Recherche des bactéries pathogènes*

Cette recherche se fait par des épreuves de type présence ou absence qui sont généralement longues car elles imposent souvent d'aller jusqu'au

stade de l'identification. Ainsi la recherche de *Salmonella* après préenrichissement (revivification), enrichissement sélectif, isolement et identification, nécessite 3 à 4 jours. Par utilisation partielle de techniques immunologiques, ce délai peut être ramené à 2, voire 1 jour. Les méthodes immunologiques sont spécifiques et permettent de dépasser la notion d'espèce pour atteindre celle de biotype (sérotype) ce qui est très important car le pouvoir pathogène est variable selon les biotypes et que ces données sont utiles pour les études épidémiologiques. Une méthode immunologique peut être utilisée pour rechercher directement une souche de manière présomptive : c'est le cas pour *Brucella,* recherché dans le lait par l'intermédiaire des anticorps produits (Ring Test).

Les méthodes immunologiques sont aussi très utiles pour la recherche des toxines.

Notons que la présomption de la présence de *Mycobacterium tuberculosis* peut se faire par microscopie, grâce à la coloration de Ziehl Nielsen, en utilisant la propriété d'acido-alcoolo-résistance de ce germe.

4) Analyses particulières ou complémentaires

Des analyses simplifiées peuvent être réalisées pour certains types d'aliments : citons dans le cas du contrôle de routine des conserves, le test de stérilité. Le but de ce test est de donner une réponse « présence ou absence » au niveau de la flore globale. Pour se faire, il faut disposer de conditions de culture « universelles » permettant la mise en évidence de tous les micro-organismes susceptibles d'être présents ; ceci ne peut être réalisé en une fois car il faut tenir compte des impératifs d'aérobiose/anaérobiose et de température. Il faut ensemencer au moins 2 milieux « aérobies » et 2 « anaérobies », avec dans chaque cas une incubation à 30°C et 55°C. L'analyse des conserves fait intervenir aussi le test de stabilité qui comporte un étuvage suivi d'une étude macroscopique, puis microscopique, d'une mesure de pH et d'un test de stérilité.

Divers dosages de type chimique ou biochimique sont utilisés pour remplacer ou compléter des analyses microbiologiques. Ils peuvent servir à estimer le développement de la flore « totale » ou d'une flore particulière par exemple par mesure d'activités enzymatiques (réductase microbienne dans le lait), par dosage d'un produit (acide lactique dans le lait, Azote Basique Volatil Total dans les viandes). Citons pour terminer les tests de chauffage qui, en laiterie, permettent de savoir si un lait a été pasteurisé (ou stérilisé) ou non et donc de prévoir le risque sanitaire : ces tests sont basés le plus souvent sur la mesure de l'activité d'enzymes thermosensibles du lait.

5) *Interprétation*

Les résultats des différentes analyses sont, le plus souvent, comparés à des normes préétablies et les critères microbiologiques retenus sont, pour la plupart de nos aliments, les suivants :

Flore aérobie mésophile moins de 10^5/g ou ml
Coliformes fécaux moins de 1/g ou ml
Salmonella absence dans 25 g ou 25 ml
Germes anaérobies sulfito-réducteurs moins de 10/g ou ml
Staphylococcus aureus entérotoxinogènes moins de 100/g ou ml.

Ces critères représentent un système d'évaluation relatif qui doit être adapté aux nombreux et différents types de produits alimentaires. Par ailleurs, ces critères varient d'un pays à un autre et parfois même au sein d'un même pays selon les laboratoires. Ce n'est qu'à partir du moment où la méthodologie sera parfaitement standardisée que les résultats pourront être comparés, en particulier entre pays.

CONCLUSION

La microbiologie alimentaire est une science en pleine évolution qui se doit d'abord de protéger le consommateur et ensuite d'améliorer la qualité marchande des produits alimentaires. Il s'agit d'un outil mis à la disposition de l'hygiéniste mais aussi du technologue, outil qui, utilisé dans des conditions bien définies, doit permettre une évolution de plus en plus favorable de la qualité, au sens large du terme, de nos aliments. Des systèmes d'autocontrôle au sein même des usines se généralisent et contribuent à conférer aux produits alimentaires manufacturés une excellente qualité microbiologique.