

Bulletin de l'Institut International du Froid of the International Institute of Refrigeration



2004-1

*Abstracts and News
Analyses et Informations*

Article de synthèse

**Le rôle du froid dans
le maintien de la qualité
et l'amélioration
de la sécurité des produits
alimentaires d'origine
végétale**

Francisco Artés

16e Note d'information

**Transport frigorifique :
progrès et défis**

Review Article

**Refrigeration for
Preserving the Quality and
Enhancing the Safety of
Plant Foods**

Francisco Artés

16th Informatory Note

**Refrigerated Transport:
Progress achieved and
Challenges to be met**

Prof. Francisco Artés est ingénieur agronome (UPV, Valencia) et ingénieur frigoriste (IFFI, Paris). Il est directeur de l'Institut de Biotechnologie Végétale, professeur de Technologie des Aliments et Chercheur Responsable du Groupe de Recherches sur le Traitement Après Récolte et la Réfrigération (GPR) du Département d'Ingénierie des Aliments à l'Université Polytechnique de Carthagène. Il a été Directeur (1992-1994) du CEBAS (Centre de Biologie Appliquée)-CSIC (Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique) à Murcie (Espagne). Il est l'auteur ou coauteur d'environ 300 publications traitant de divers aspects relatifs aux fruits et légumes frais : métabolisme, qualité, manutention, entreposage réfrigéré, atmosphère contrôlée ou modifiée, techniques d'emballage, traitements physiques alternatifs après récolte et techniques de préparation des produits de quatrième gamme.

Francisco Artés est membre de commission de l'IIF depuis 1971, Vice-Président (1996-1999) puis Président de la Commission C2, Sciences et ingénierie alimentaires (1999-2003). Il est actuellement membre fondateur et Vice-Président de la Société espagnole des Sciences et Techniques du Froid, Membre d'Honneur de l'IIF et Membre Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France. En 2000, le GPR a organisé une conférence de l'IIF, intitulée Amélioration des technologies après récolte des fruits, légumes et plantes ornementales qui a eu un grand succès (pour obtenir le compte rendu sur CD-ROM, voir le site Web de l'IIF : www.iifiir.org). Le GPR effectue un large éventail de recherches et de travaux d'expertise sur l'ensemble de la chaîne du froid, et sur les équipements pour le traitement après récolte des produits alimentaires d'origine végétale, et particulièrement pour les produits de quatrième gamme. Pour des informations complémentaires, consulter le site Web : www.upct.es

Le rôle du froid dans le maintien de la qualité et l'amélioration de la sécurité des produits alimentaires d'origine végétale

par

Francisco Artés

Postharvest and Refrigeration Group, Department of Food Engineering, Technical University of Cartagena,
Paseo Alfonso XIII 48. 30203 Cartagena. Murcie, Espagne
Fax: 34+968-325433, e-mail : fr.artes@upct.es

I. INTRODUCTION

Lors du 21^e Congrès International du Froid de l'IIF, la Commission C2, commission de l'IIF chargée des sciences et de l'ingénierie alimentaires, a présenté 76 communications; les auteurs provenaient de nombreux pays parmi les 61 pays membres de l'IIF et de pays non membre. Les travaux présentés visent à diffuser le plus largement possible les avancées technologiques dans les domaines du froid alimentaire et de ses applications. Nous sommes certains que les travaux présentés lors du congrès contribueront à accomplir rapidement des progrès dans le domaine des sciences et de l'ingénierie alimentaires dans le monde entier, pour le bien-être de l'humanité.

Au cours des récentes conférences patronnées par l'IIF à Murcie (Espagne) en 2000, à Louvain (Belgique) et à Toronto (Canada) en 2002, les avancées et les tendances dans les domaines des techniques après récolte, des produits de 4^e gamme, de l'entreposage frigorifique, du transport et de la distribution des fruits et légumes frais et des plantes ornementales ont été examinées. La qualité et la sécurité des produits alimentaires, en particulier du point de vue du consommateur, et les exigences environnementales ont également été passées en revue.

Le développement et la modernisation d'un pays ne peuvent se faire sans la technologie du froid car elle joue un rôle primordial en faveur de la sécurité alimentaire et de la santé, et a considérablement réduit la prévalence des maladies d'origine alimentaire. A l'aube du nouveau millénaire, il est important d'améliorer les sciences et techniques alimentaires, particulièrement dans les pays en développement, et l'IIF joue un rôle décisif pour la diffusion des connaissances requises. Le défi à relever aujourd'hui est l'amélioration de la manutention des produits réfrigérés et congelés dans les pays en voie de développement.¹ Nous savons tous que l'IIF est fortement impliqué dans la gestion des risques, à travers son expertise dans le domaine des bonnes pratiques du froid et de l'assistance technique destinée à tous les acteurs du froid : décideurs, pouvoirs publics, industriels, chercheurs, enseignants, producteurs de produits alimentaires et professionnels du froid.

Afin d'améliorer la qualité des fruits et légumes au sens large, les ingénieurs et les chercheurs du secteur alimentaire doivent adopter une approche pluridisciplinaire axée sur les consommateurs. La qualité des produits alimentaires s'appuie sur de nombreuses caractéristiques, parmi

lesquelles la couleur, la texture, la flaveur, la valeur nutritive et la sécurité, cette dernière étant particulièrement importante. Lorsque les consommateurs évaluent la qualité des produits alimentaires d'origine végétale, les principaux critères sont l'apparence visuelle et la couleur. Kader² et Kays³ soulignent que la flaveur et l'arôme, ainsi que le croquant et la jutosité, sont également des attributs décisifs pour les acheteurs de fruits et légumes frais.

M. MATURATION DES FRUITS ET LEGUMES ET CRITERES DE QUALITE

Les professionnels du secteur agroalimentaire définissent la maturité d'un produit d'origine végétale comme le stade de développement auquel, après récolte et manutention, sa qualité sera au moins au niveau acceptable minimal pour le consommateur final. Cette définition suppose que l'on puisse mesurer de manière précise le stade de développement et qu'il existe des techniques pour mesurer la maturité.⁴ Le mûrissement commence aux derniers stades de maturité et peut être considéré comme le début de la sénescence. Au cours du mûrissement, l'organisation intracellulaire commence à se dégrader, la perméabilité aux gaz des membranes cellulaires est réduite, ce qui engendre une respiration anaérobie, et les composés toxiques (tels que l'éthanol, l'acétaldéhyde et l'acétate d'éthyle) s'accumulent et provoquent la mort de la cellule. Au cours de la sénescence, les produits d'origine végétale deviennent de plus en plus sensibles aux infections microbiennes, non seulement parce que les changements biologiques provoqués favorisent le développement microbien, mais également à travers la perte d'immunité naturelle.

La qualité des produits frais résulte de l'association de plusieurs paramètres biophysiques et biochimiques. Plusieurs caractéristiques, attributs et propriétés déterminent la valeur nutritive du produit ou le plaisir procuré lors de sa consommation; l'importance relative de chaque paramètre de qualité dépend du type de produit et de son utilisation finale. Les principaux critères de qualité sont l'apparence visuelle (absence de défauts, y compris d'altérations dues au froid), la texture, la flaveur, la valeur nutritive et la sécurité. Pour chacun de ces paramètres, il existe une série d'éléments (attributs) utiles pour évaluer les produits par rapport aux normes de qualité, pour les sélectionner pour les programmes d'amélioration variétale, et pour évaluer leurs réactions aux facteurs environnementaux et aux traitements après récolte.⁵



La principale difficulté rencontrée pour déterminer la qualité d'un produit d'origine végétale consiste à identifier les paramètres clés et à les quantifier. Il existe une différence qualitative entre le stade de maturité et de comestibilité des fruits et légumes. Un fruit peut être arrivé à maturité mais il n'atteindra une qualité de bouche optimale que lorsqu'il sera complètement mûr, ce qui suppose parfois un mûrissement après récolte. A l'inverse, pour la plupart des légumes, la maturité optimale correspond à la comestibilité optimale.⁴

L'expression « durée de vie » ou « durée de conservation » correspond à la période au cours de laquelle un produit conserve un certain niveau de qualité sous des conditions d'entreposage spécifiques. L'objectif principal lorsque l'on cherche à optimiser la manutention et la durée de conservation des fruits et légumes frais non climactériques est de minimiser les altérations (en réduisant le métabolisme), tandis que pour les produits climactériques, la maturation doit être optimisée en fonction de l'utilisation finale (consommation à l'état frais ou traité). Un stade optimal de maturité d'un produit au moment de la récolte est le principal paramètre déterminant sa qualité finale et sa durée de conservation, définies, en général, par les propriétés sensorielles et par la sécurité microbienne.⁶

De nos jours, les consommateurs ont tendance à se responsabiliser par rapport à leur alimentation et à surveiller ce qu'ils mangent. Les techniques modernes et la publication des résultats d'études menées sur la santé et l'alimentation signifient que les consommateurs ont accès à des informations sur le sujet. Aujourd'hui, les consommateurs sont bien plus conscients du lien entre l'alimentation et la santé et sont suffisamment informés pour choisir leur régime alimentaire en toute connaissance de cause. Pour

répondre à la demande des consommateurs pour des produits frais, sans défauts et savoureux, le traitement thermique des produits et de leurs ingrédients est de plus en plus réduit tandis que le marché des produits réfrigérés est en pleine expansion et la durée de conservation de ces produits s'allonge progressivement. Cependant, les critères d'achat traditionnels que sont la saveur, la facilité d'emploi et le prix continuent d'être les principaux critères des achats à répétition.⁷

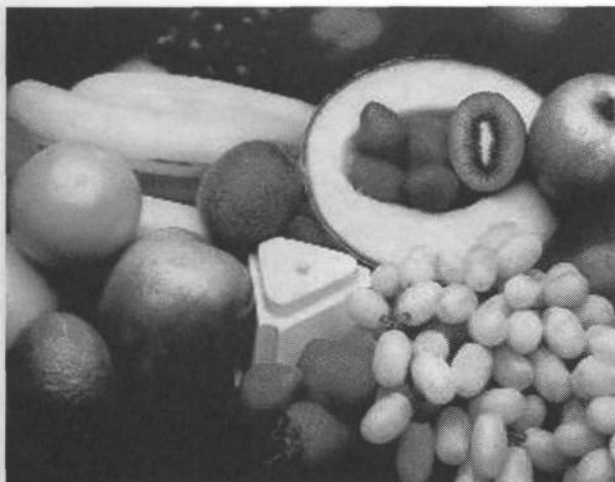
Les consommateurs sont de plus en plus préoccupés par la qualité et la sécurité des produits alimentaires d'origine végétale, et accordent beaucoup d'importance à la fraîcheur lorsqu'ils achètent des produits réfrigérés. La préoccupation la plus fréquente en terme de sécurité alimentaire est la présence de résidus de pesticide sur les végétaux, suivie par la manutention inadaptée et la propreté. Pour cette raison, certains supermarchés garantissent que leurs produits sont conformes aux limites de résidus de pesticides imposées par la loi ou ne contiennent aucun résidu, et de plus en plus de fruits et légumes biologiques apparaissent dans les supermarchés.⁸ Mais les consommateurs sont également attirés par une alimentation saine en terme de composition, et surveillent leurs apports en matières grasses, en cholestérol, en sodium, et en macro- et micro-nutriments. Il existe de nombreuses études scientifiques sur le sujet, telles que le Community Nutrition Mapping (CNMap) Project, développé par ARS Community Nutrition Research Group (Beltsville, MD, Etats-Unis). Le projet CNMap définit la sécurité alimentaire comme « l'accès pour toute personne, à tout moment, à une alimentation suffisante pour mener une vie active en pleine santé » et permet d'établir des profils pour déterminer si une communauté est exposée à un risque en termes de sécurité alimentaire ou d'autres problèmes nutritionnels d'ordre nutritif.⁹



Les fruits et légumes frais sont relativement peu chers et contiennent de nombreuses substances de forte valeur nutritive, tels que les vitamines, les minéraux, les fibres, etc., y compris certaines substances qui ne peuvent être synthétisées par l'organisme. La valeur nutritive des antioxydants suscite de plus en plus d'intérêt, et les fruits et légumes sont leur principale source dans l'alimentation. Les anthocyanines et d'autres composés phénoliques dotés de propriétés antioxydantes et capables de neutraliser les radicaux libres sont hautement appréciés. Le rôle potentiel des caroténoïdes, des tocophérols et de la vitamine C dans la prévention des maladies cardiovasculaires, de l'athérosclérose, du cancer du colon, de l'immunodépression et de la cataracte a été étudié.^{10,13}

Les produits alimentaires de 4^e gamme sont devenus très appréciés depuis l'apparition de nouvelles habitudes alimentaires telles que le snacking ou le grignotage, et en raison d'une disponibilité des produits toute l'année et une tendance à vouloir une alimentation saine et à surveiller des apports calorifiques. Le marché des produits de 4^e gamme s'est donc considérablement développé en termes de quantité et de variété de produits disponibles pour les consommateurs.¹⁴ Ceci a entraîné une forte demande pour les produits nécessitant moins de préparation, ce qui correspond davantage au mode de vie actuel des consommateurs. Outre l'aspect pratique, les consommateurs perçoivent les fruits et légumes fraîchement coupés comme étant bon marché en raison de la quantité limitée de pertes et de leur qualité élevée.⁸

Les propriétés thermophysiques des produits alimentaires sont d'une grande importance dans le secteur du froid. Des données précises sur les caractéristiques thermiques sont requises pour calculer les vitesses de réchauffement et de refroidissement des fruits et légumes. Des mesures de conductivité thermique de nombreux produits ont été réalisées par plusieurs chercheurs. Pour la plupart des applications en ingénierie alimentaire, une bonne connaissance des propriétés thermiques est un critère essentiel. Une des approches les plus rencontrées consiste à déterminer ces propriétés à l'aide de formules empiriques pour une composition de produit et une température données. Dans la pratique, si des expériences élaborées ne peuvent être réalisées, les ingénieurs demandent une estimation rapide des propriétés. Un logiciel permettant de déterminer les propriétés thermiques à l'aide de relations empiriques en fonction de la température et de la composition, a récemment été développé.¹⁵



IM. CHAÎNE DU FROID, TRACABILITÉ ET QUALITÉ

Le froid contribue au maintien de la qualité d'un produit en conservant sa fraîcheur et en empêchant les altérations, essentiellement en ralentissant le développement microbien et en particulier des microorganismes pathogènes (par exemple *Salmonella spp.*, *E. coli* ou *Clostridium spp.*). Cependant, même s'il faut maintenir une température basse (déterminée en fonction du produit) pendant toute la durée de conservation, les produits d'origine végétale peuvent tout de même subir des altérations, telles qu'attaques fongiques et détérioration de la qualité.

Les critères et les recommandations pour un entreposage optimal sous atmosphère conventionnelle, contrôlée ou modifiée, et les traitements alternatifs applicables à la plupart des denrées périssables sont accessibles par les utilisateurs à travers diverses sources.¹⁶⁻²¹ Ces recommandations dépendent de la variété, de la température et de la durée d'entreposage. L'harmonisation nécessaire des températures réglementaires ou recommandées dans le domaine du transport frigorifique a été concrétisée par l'Accord relatif aux Transports internationaux de denrées Périssables (ATP), établi par la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (Comité des transports intérieurs).²² A chaque maillon de la chaîne alimentaire, la température de manutention peut influencer la sécurité et la qualité des produits, ce qui devient d'autant plus critique que les produits frais sont transportés sur de plus grandes distances. Ainsi, au niveau de l'Europe et de nombreux pays, une réglementation a été mise en place concernant le maintien des températures et l'évaluation des performances des équipements, pour les différentes étapes de la

chaîne du froid, des entrepôts aux meubles de vente. Les directives européennes relatives à la température des produits surgelés et lors des principales étapes de la chaîne de production et de distribution ont été harmonisées. Les réglementations et les codes de bonnes pratiques jouent un rôle essentiel dans ce domaine, par exemple en recommandant un chargement et un déchargement rapides, des quais de chargement fermés munis de systèmes de conditionnement d'air et, à l'échelle du consommateur, l'utilisation de sacs isothermes ou réfrigérés pour transporter leurs achats.

Parmi les outils qui fournissent une indication de la performance des appareils frigorifiques, on peut citer les instruments de mesure de la température de l'air (enregistreurs de température des entrepôts et véhicules frigorifiques; thermomètres des petites chambres froides, des meubles de vente et des réfrigérateurs). Une utilisation continue de ces outils contribuerait à l'amélioration de la chaîne du froid entre le producteur et le consommateur, engendrant ainsi une meilleure qualité alimentaire.

La chaîne de distribution des denrées alimentaires est le plus souvent composée de plusieurs étapes au niveau de l'entreposage et du transport avant la consommation, et la traçabilité est aujourd'hui devenue un concept clé. Chacun des acteurs de la chaîne du froid doit avoir accès à l'historique temps-température du produit par le biais du précédent opérateur et doit à son tour fournir les informations nécessaires au maillon suivant. La température du produit peut varier d'une étape à l'autre, en particulier si le chargement et le déchargement ont lieu en dehors des conditions de température contrôlée, et après la vente au consommateur. La traçabilité peut être mise en place en utilisant les outils actuels, tels que les thermomètres, les enregistreurs de température, les indicateurs de température et les intégrateurs temps-température. Ces outils permettent d'acquérir une meilleure connaissance de l'historique temps-température tout au long de la chaîne du froid. Cependant, l'historique des températures du produit, de la production à la distribution, est difficile à déterminer. A titre d'exemple, la *Figure 7* simule la chaîne de distribution de fruits et légumes fraîchement coupés.²³ En réalité, on enregistre souvent la température de l'air, qui ne correspond pas à la véritable température du produit.

Peu d'études ont été menées pour évaluer le transport frigorifique comme un point de contrôle critique dans le système des points de



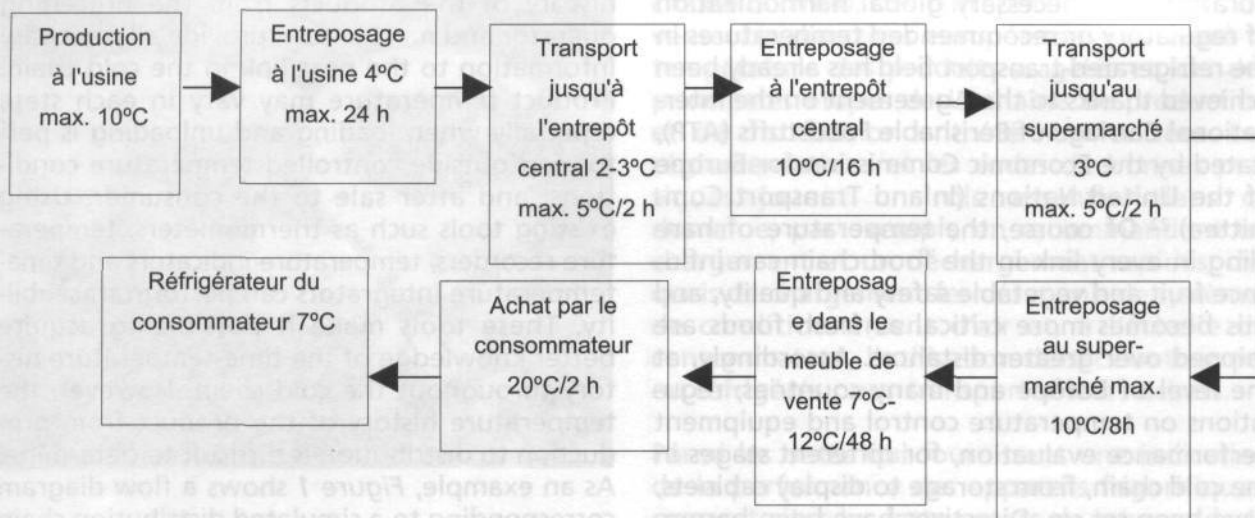


Figure 1. Simulation d'une chaîne de distribution de fruits et légumes de 4^e gamme (basé sur Allende et al.)

contrôle critiques pour l'analyse des risques (HACCP), qui permet de s'assurer de la sécurité des produits frais. Il existe très peu de données scientifiques sur lesquelles baser un programme d'équivalence HACCP. A l'avenir, les stratégies de sécurité alimentaire adoptées par les pouvoirs publics devront combiner la réglementation actuelle relative aux limites de température des produits et aux essais de performance des équipements, et de nouvelles approches telles que l'audit des systèmes HACCP développés par les entreprises, la communication sur les risques et la diffusion d'informations auprès des consommateurs.

Le maintien de la température au cours du transport est un maillon critique de la chaîne du froid et permet de garantir la qualité des produits frais et de réduire les risques liés aux infections microbiennes, en particulier pour les fruits et légumes fraîchement coupés et emballés. Pour la plupart des pathogènes, le maintien d'une basse température est une méthode de contrôle efficace. Tout au long du transport et de la distribution, le conteneur doit être propre et doit maintenir efficacement la température souhaitée. Les conduits doivent être exempts de particules qui pourraient obstruer l'écoulement d'air et empêcher la circulation d'air refroidi autour du chargement. De plus, le suivi précis du contrôle et de l'historique de la chaîne du froid est un élément essentiel pour garantir la qualité et la sécurité. Les centrales de mesure modernes ont simplifié la procédure requise pour surveiller la performance d'un système frigorifique au cours du transport, et des indicateurs signalent lorsqu'un point critique est dépassé.²⁴

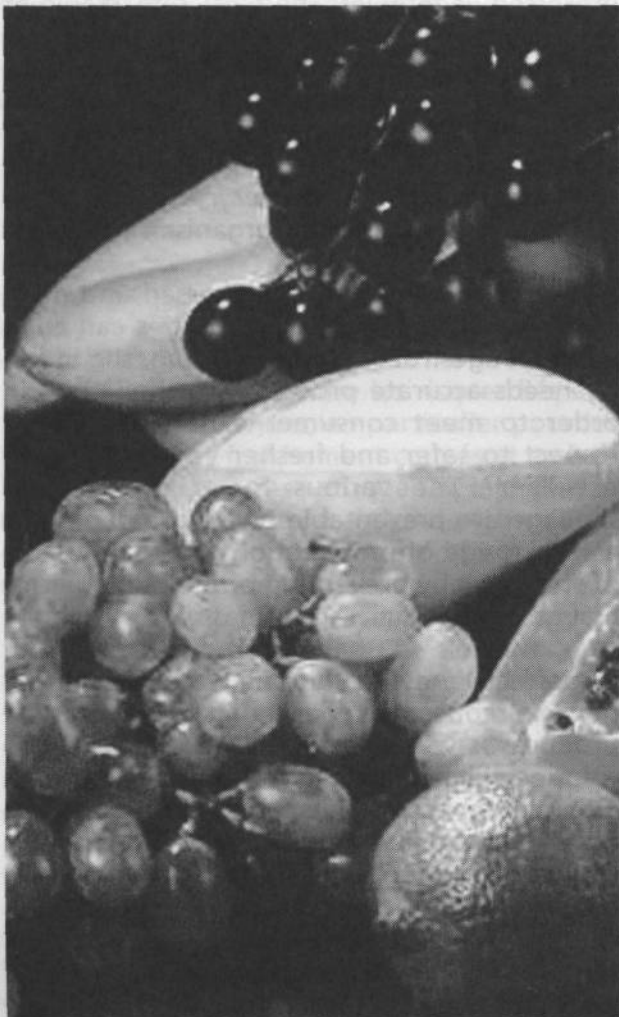
IV. CHAÎNE DU FROID ET SECURITE

Les avancées récentes dans le domaine de la santé publique, l'évolution des besoins des consommateurs et la croissance du commerce international augmentent l'importance de la sécurité alimentaire.²⁵ De plus, dans l'industrie agroalimentaire, les altérations microbiennes gaspillent des ressources précieuses. L'altération des fruits et légumes frais peut survenir à n'importe quelle étape entre la récolte et la consommation, que ce soit lors de la manutention, du traitement, de l'emballage, de l'entreposage, du transport, de la distribution, de la présentation à la vente ou de l'utilisation par le consommateur. Ainsi, la production de produits alimentaires sûrs implique une surveillance des produits entrant dans la chaîne du froid, une élimination de tout développement microbien et une réduction ou une suppression de la charge microbienne grâce aux traitements et à la prévention de la contamination après traitement.²⁶ De plus en plus, de nouveaux pathogènes ou risques alimentaires surviennent à cause de paramètres hors du contrôle du producteur. En effet, de nos jours, les produits alimentaires ne proviennent que rarement d'une même source ou pays; ils résultent le plus souvent d'une combinaison de matières premières provenant de plusieurs pays et de différents modes de production. Il paraît donc nécessaire d'établir des procédures HACCP précises pour l'ensemble des installations de production.

L'objectif le plus important à réaliser pour maintenir la qualité des légumes de 4^e gamme est la réduction de la flore responsable des altérations microbiennes, car cette flore engendre à la fois

une altération du produit et des risques sanitaires.²³ On a démontré que les pathogènes s'infiltrant par les fissures, crevasses et espaces intracellulaires des fruits et légumes, en fonction de plusieurs facteurs tels que la température, le temps et la pression.^{27,28} L'intérêt accru porté aux produits alimentaires crus ou fraîchement coupés, la modification de l'environnement de production des produits de 4^e gamme, les nouveaux produits de 4^e gamme, et le non respect des bonnes pratiques de manutention des produits frais signifient que la prévalence de pathogènes d'origine alimentaire ne diminuera pas, et il est même possible qu'elle augmente. La survie et le développement d'un pathogène sur ou dans un produit cru ou fraîchement coupé sont principalement dictés par son potentiel métabolique qui dépend des facteurs écologiques du produit ou ceux imposés lors de la production, de la distribution et de la préparation avant consommation.^{14,29}

Alors que de nombreuses informations sont disponibles sur l'écologie des microbes pathogènes dans les produits d'origine animale, le comportement des pathogènes associés à la



microflore naturelle des végétaux est peu connue.¹⁴ De nombreux parasites, bactéries pathogènes et virus capables d'engendrer des infections chez l'homme ont été isolés dans les légumes crus, même si les bactéries d'altération, les levures et les moisissures dominent la microflore de ces produits.^{30,33} Malgré les nombreux efforts mis en œuvre pour contrôler les infections d'origine alimentaire, celles-ci demeurent importantes.³⁴

Le spectre des pathogènes peut varier de manière significative en fonction du temps.³⁴ Les pathogènes psychrotrophes, capables de maintenir leur potentiel infectieux à basse température, sont particulièrement préoccupants pour les légumes de 4^e gamme; parmi eux, les plus notables sont *Listeria monocytogenes*, *Aeromonas hydrophila* et *caviae* et *Clostridium botulinum*. D'autres pathogènes fréquemment associés aux légumes de 4^e gamme sont *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni*, ainsi que les microorganismes viraux et protozoaires.^{35,38}

Vu que le nombre de bactéries dans les produits non traités et ceux de 4^e gamme est communément compris entre 10⁵ et 10⁷ CFU/g, l'industrie doit adopter des techniques de traitement de haute précision afin de répondre aux attentes des consommateurs concernant la fraîcheur et la sécurité des fruits et légumes.^{26,38,43} Les différents types d'altération microbienne peuvent être grandement évités en appliquant un large éventail de techniques de conservation, la plupart desquelles agissent en empêchant ou en limitant le développement microbien.

L'efficacité du lavage au chlore (100-150 ppm) pour réduire le nombre de bactéries dans les produits horticoles est bien connue. Cependant, l'utilisation du chlore sera de plus en plus réduite à l'avenir. En effet, la chloration introduit des risques potentiels par le biais des sous-produits du processus de désinfection. Des travaux démontrant le lien entre ces risques et la production des trihalométhanes (THM) ont été rapportés. Les THM sont des sous-produits de l'eau chlorée, contenant des composés organiques naturels qui ont des effets néfastes connus, par exemple une toxicité hépatique et rénale. Une manière de réduire la teneur en THM serait de passer d'un traitement au chlore à un traitement aux chloramines; l'ajout d'ammoniac lors de la chloration convertit le chlore en chloramines. Contrairement au chlore, les chloramines ne s'associent pas aux composés organiques de l'eau pour former des THM. Cependant, vu que les chloramines sont moins



efficaces en tant qu'agents désinfectants, la quantité de désinfectant utilisé doit être augmentée pour maintenir le même niveau de sécurité. Ainsi, pour passer d'un lavage au chlore à un lavage aux chloramines, il faut au préalable effectuer les essais nécessaires pour optimiser la performance du système et le contrôle de THM.⁴⁴

Récemment, l'industrie agroalimentaire s'est davantage consacrée au développement des techniques applicables aux produits frais, par exemple le traitement à l'ozone ou l'emballage sous atmosphère modifiée.^{23,29,39-41,43,45} On sait que le CO_2 est le principal composant des mélanges gazeux appliqués aux légumes fraîchement coupés en raison de son activité antimicrobienne. Le CO_2 a pour effet d'augmenter à la fois le temps de latence et le délai d'apparition des microorganismes de contamination. La concentration de CO_2 requise pour une inhibition optimale du développement bactérien et le potentiel de développement des bactéries pathogènes en présence de taux de CO_2 élevés sont des questions qui doivent être étudiées dans le cadre de la conservation des produits alimentaires.^{23,46-47} De plus, l'utilisation de teneurs en CO_2 élevées pourrait être très efficace pour la prévention des pertes dues à la sénescence avancée des fruits et légumes qui les rend vulnérables aux infections par les pathogènes profitant d'un dommage physique ou d'une dégradation physiologique.⁴²

L'amélioration des qualités sensorielles des feuilles de laitue en contact avec des teneurs en O_2 élevées par rapport aux témoins pourrait être liée à une réduction du développement microbien résultant de l'action antimicrobienne



des concentrations élevées en CO_2 . En réalité, la présence d' O_2 à une pression supérieure à la pression atmosphérique permet d'utiliser des teneurs en CO_2 élevées dans les emballages sans altérer la qualité sensorielle de la laitue. Ainsi, l'association de concentrations d' O_2 et de CO_2 élevées peut être considérée comme la clé de la réussite de cette nouvelle technique de conservation de la laitue de 4^e gamme.²⁹

Certaines techniques agissent en inactivant les microorganismes en altérant de manière significative leurs fonctions physiologiques ou structure cellulaire, y compris par une rupture des brins d'ADN, une rupture des membranes cellulaires ou une dégradation mécanique de l'enveloppe cellulaire, ce qui est le cas avec le rayonnement UV-C.^{39-40,48-49} Il s'avère que les rayons UV-C, combinés à la réfrigération et à des atmosphères modifiées, permettent de conserver efficacement la laitue rouge ('Lollo Rosso' et 'Red Oak Leaf') de 4^e gamme. Lorsque le produit traité par UV-C est comparé au témoin, les populations microbiennes psychrotrophes, de coliformes, et de levures sont réduites, même si les bactéries lactiques semblent plus résistantes.^{39,40}

Lorsque l'on prépare des produits de 4^e gamme, chacune des étapes de manutention, traitement, distribution et vente au détail doit être réalisée à l'aide d'une intégration des systèmes appelée « approche systématique », par laquelle chaque étape est considérée conjointement aux autres. La nécessité de se consacrer aux problèmes liés à la sécurité alimentaire à l'aide d'une approche holistique intégrée a été soulignée.⁷ Un contrôle systématique rigoureux des pratiques en matière d'hygiène est essentiel tout au long de la chaîne, depuis la récolte des matières premières jusqu'à la consommation, en passant par la production des produits fraîchement coupés.^{26, 35,41} En particulier, toute la zone propre doit être isolée et munie d'un système de conditionnement d'air maintenant une température inférieure à 10 °C, et les exigences de traitement d'air basées sur le concept de « salle blanche » sont particulièrement importantes.⁵⁰

V. EMBALLAGE

Le rôle de l'emballage dans l'industrie agroalimentaire est de plus en plus reconnu grâce à ses multiples fonctions. Un emballage bien conçu doit permettre d'augmenter la durée de conservation d'un produit en retardant la dégradation de sa qualité et en garantissant sa sécurité.



L'utilisation de trous ou microperforations permet d'éviter les risques de fermentation dans les emballages sous atmosphère modifiée, mais le risque de recontamination des produits emballés est alors augmenté. Plusieurs études ont récemment été menées sur le développement d'un emballage sous atmosphère modifiée à perforations, à la fois pour les fruits et légumes entiers et de 4^e gamme, conçu de telle sorte qu'il permette de réduire les effets indésirables des variations de température au sein des palettes de produits. Le développement d'un film coextrudé pour l'emballage de fruits et légumes entiers ou fraîchement coupés et le développement de modèles permettant de prévoir la perméabilité de ces films suscitent une attention toute particulière.⁵¹ Il reste à valider les modèles mathématiques intégrés permettant de déterminer la perméabilité à l' O_2 et au CO_2 requise pour atteindre un équilibre optimal de l'atmosphère à l'intérieur des emballages, et à étudier l'influence des variations de température au cours de la chaîne de distribution sur le taux de respiration, l'énergie d'activation, et la perméabilité du film.⁵²⁻⁵⁴ Lorsque l'on conçoit des emballages sûrs sous atmosphère modifiée, une attention toute particulière doit être portée aux teneurs très élevées ou très faibles en O_2 . En revanche, les techniques avec application de vide modéré pourraient être utiles seules ou en association avec des antioxydants pour l'emballage individuel des produits de 4^e gamme.

L'introduction de la technologie des codes barres sur le marché des produits alimentaires (y compris des fruits et légumes) peut être considérée comme l'avancée la plus importante de ces dernières décennies. En l'espace d'environ 25 ans, cette technologie a été instaurée dans plus de 120 pays, et est aujourd'hui un outil indispensable pour la chaîne d'approvisionnement du marché mondial et pour le commerce électronique. En particulier, les codes barres contribuent de manière significative à la traçabilité des produits. De plus, dans le but de

fournir un service supplémentaire aux consommateurs, les cybermarchés développent les achats en ligne dans le secteur du commerce de détail, soit à domicile par le biais de stylos électroniques, soit sur place à l'aide d'ordinateurs de poche.

Le développement de systèmes de traçabilité fiables permettant d'établir l'origine et le mode de production des produits alimentaires est très utile pour chaque acteur de la chaîne de distribution. Des informations précieuses pourraient facilement être incorporées dans le code barre.

Il faut également encourager l'optimisation des méthodes d'emballage des fruits et légumes exportés dans des conteneurs frigorifiques, l'amélioration des véhicules utilisés pour le transport des fruits et légumes réfrigérés et surgelés et l'évaluation des performances des véhicules à plusieurs compartiments utilisés pour la livraison des produits réfrigérés et congelés.

VI. BESOINS EN MATIERE DE RECHERCHE

Le XX^e siècle a été le témoin du développement réussi de différents traitements avant et après récolte conçus pour maintenir la qualité des fruits et légumes récoltés et pour permettre de les transporter vers des marchés lointains.⁵⁵ Ainsi, le transport sous atmosphère contrôlée ou modifiée et les terminaux intermodaux jouent des rôles de plus en plus importants. Le défi actuel est l'amélioration de l'apparence visuelle des fruits et légumes, tout en optimisant



leur sécurité et leurs attributs, par exemple leur composition chimique et leur qualité nutraceutique. Des preuves scientifiques du lien entre le régime alimentaire, la nutrition et l'activité physique d'une part et les maladies chroniques d'autre part doivent être mises en évidence.

L'élément essentiel d'une stratégie intégrée en faveur d'une meilleure sécurité alimentaire est le développement de nouvelles méthodes rapides et précises pour détecter les pathogènes et leurs métabolites toxiques, tels que les mycotoxines. De plus, il existe une importante demande pour des méthodes harmonisées, fiables, rapides et rentables et des protocoles permettant d'empêcher la fraude et de garantir la confiance des consommateurs vis-à-vis de la qualité et de la sécurité des produits alimentaires. En plus du système HACCP, d'importants efforts et ressources doivent être consacrés au développement et à l'application efficace de programmes sanitaires tels que les bonnes pratiques de fabrication (Good Manufacturing Practices), de programmes d'assainissement systématisés tels que les modes opératoires normalisés en matière d'hygiène (Sanitation Standard Operating Procedures), et de programmes d'analyse microbiologique de l'environnement.⁵⁶

Afin d'améliorer la qualité et la sécurité des produits horticoles, davantage de recherches sont nécessaires pour identifier le lien entre les traitements avant et après récolte. En particulier, il faut développer des méthodes non destructrices (telles que les techniques par impact, technique acoustique impulsionnelle, ultrasons, analyse d'images couleur, spectroscopie de réflexion, imagerie proche et moyen infrarouge, radiographie ou imagerie par résonance magnétique) permettant l'évaluation rapide des paramètres de qualité (couleur, texture, fermeté et certains défauts) des fruits vendus au détail. En outre, davantage de travaux doivent être consacrés à l'identification des risques potentiels et des limites d'efficacité des nouvelles technologies de traitement après récolte des fruits et légumes entiers frais et ceux de 4^e gamme. Parmi ces technologies, le contrôle biologique des antagonistes microbiens des microorganismes responsables des pertes après récolte pourrait être une priorité.

Des techniques physiques alternatives pour réduire les moisissures et les altérations dues au froid des produits frais entiers et/ou ceux de 4^e gamme doivent être développées en vue d'une commercialisation. Les traitements thermiques par air chaud, par trempage dans l'eau chaude ou par pulvérisation d'eau chaude, seuls ou

combinés à de faibles doses de fongicides et à un rayonnement UV-C, doivent être les principales techniques appliquées.^{16, 57}

L'utilisation de concentrations élevées d'O₂ est un outil prometteur. Cependant, certains aspects, comme la manière dont les fortes concentrations d'O₂, seules ou combinées à des taux élevés de CO₂, influencent le développement de divers types de bactéries, de moisissures et de pathogènes pour l'homme, doivent être explicités. La combinaison de taux d'O₂ à une pression supérieure à la pression atmosphérique et de fortes concentrations de CO₂ et son effet sur la texture, la flaveur et la qualité nutritionnelle des produits deviendra un domaine de recherche intéressant pour les années à venir.^{29, 58}

L'ozone, un gaz autorisé dans certains pays en tant que traitement après récolte en contact direct avec les produits frais, est une alternative intéressante à la chloration. Les recommandations récentes d'un panel d'experts au FDA en faveur de la classification de l'O₃ en tant que désinfectant sûr pour les produits alimentaires ont permis à l'industrie d'affirmer de manière indépendante que cette technique garantissait la sécurité alimentaire si elle était appliquée conjointement à de bonnes pratiques de production.²⁴

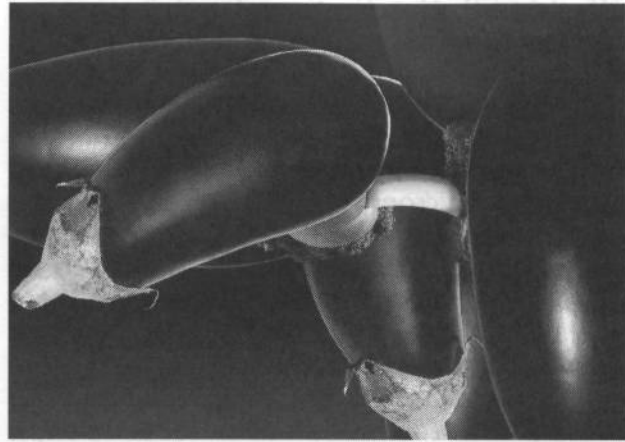
Les nouveaux emballages sous atmosphère modifiée utilisés avec des polymères (tels que les polymères antimicrobiens, contenant un substrat poreux couvert de polymères cristallisables à chaînes latérales, un émetteur d'O₂ et/ou des dispositifs de neutralisation du CO₂ ou du C₂H₄, ou des absorbeurs d'humidité) et les films comestibles améliorés (tels que ceux combinés à des antioxydants) ont également un grand potentiel d'application. Ces matériaux pourraient permettre d'éviter l'anaérobiose et de réduire le taux de respiration, les émissions d'éthylène, le brunissement et la perte de masse, en atténuant ainsi les altérations indésirables de la qualité sensorielle, en améliorant les propriétés mécaniques et la manutention, et en contrôlant le développement microbien. Toutes ces applications potentielles doivent être testées individuellement pour chaque type de produit.

Les techniques de manipulation génétique sont aujourd'hui utilisées pour améliorer les attributs d'un produit, tels que sa couleur, son arôme, sa flaveur et son goût. Le premier produit alimentaire transgénique fut la tomate FLAVR-SaVR, dont on avait réduit l'activité polygalac-



turonase. Malgré ce premier succès, certains paramètres importants régissant la qualité après récolte, par exemple la résistance au froid, l'extension de la durée de conservation, la résistance aux pathogènes etc., n'ont pas encore été considérés, et doivent à l'avenir être étudiés. Il reste beaucoup de travail à accomplir dans ce domaine et les avancées récentes en génomique fonctionnelle devraient mettre en évidence les gènes susceptibles d'être manipulés.

La 4^e gamme devrait résoudre certains problèmes et favoriser la consommation de fruits et légumes frais, en particulier ceux qui ont une écorce rigide ou qui contiennent des graines, etc. En revanche, la 4^e gamme n'a pas encore été développée pour un certain nombre de produits. L'application de techniques non thermiques pour améliorer les fruits et légumes de 4^e gamme suscite de plus en plus d'intérêt. Parmi les exemples notables, le traitement à haute pression et le traitement par champ électrique puisé ont montré qu'ils pourraient jouer un rôle dans l'inactivation de certains enzymes et microorganismes des produits d'origine



végétale, sans augmentation de température, ni changement indésirable des qualités sensorielles et nutritives. Cependant, on a souvent rapporté des résultats variables selon le type de substrat, d'enzymes ou de microorganismes et il reste donc à approfondir ces résultats. Une approche intéressante à explorer serait l'application de ces nouvelles techniques en association avec le refroidissement et/ou l'emballage sous atmosphère modifiée.