

UNIVERSITÉ DE BEJAIA  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE  
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ALIMENTAIRES

## **POLYCOPIÉ DE COURS**

**Module : Approvisionnement et Stockage des Aliments**

**Niveau : Master 1**

**Spécialité : Conservation des Aliments et Emballage (CAE)**

**Elaboré par**

**Dr. ISSAADI Ouarda**

Maître de Conférences MCB – Université de Bejaia

Département des Sciences Alimentaires

Laboratoire 3BS

## Introduction générale

L'approvisionnement et le stockage des aliments constituent les premières étapes fondamentales du système de production agroalimentaire. Ces opérations conditionnent directement la **qualité**, la **sécurité sanitaire**, la **traçabilité** et la **valeur nutritionnelle** des produits finis. Leur maîtrise repose sur une organisation rigoureuse, une planification adaptée et le respect des normes internationales d'hygiène et de qualité établies par la **FAO**, l'**OMS** et le **Codex Alimentarius**.

Dans un contexte marqué par la mondialisation des échanges et l'évolution des modes de consommation, la gestion efficace des matières premières et des ingrédients devient un enjeu stratégique pour les entreprises du secteur agroalimentaire. Elle exige non seulement une connaissance approfondie des circuits d'approvisionnement, mais aussi une vigilance constante quant aux conditions de transport, de stockage et de conservation. Ces paramètres influencent directement la **durabilité**, la **sécurité** et l'**acceptabilité sensorielle** des denrées destinées au consommateur.

Le présent polycopié a pour objectif de fournir aux étudiants une compréhension intégrée des principes et exigences relatifs à l'approvisionnement et au stockage des aliments. Il aborde successivement :

1. Les circuits d'approvisionnement et les critères de choix des matières premières et ingrédients ;
2. Les conditions requises de transport, de stockage et de conservation des denrées ;
3. Les processus de **maturation** et les transformations biochimiques associées à la qualité des produits ;
4. Les **mécanismes d'altération** des aliments et les stratégies de prévention technologique.

À travers ces quatre axes, le cours vise à développer une approche à la fois **scientifique**, **technique et préventive**, en mettant l'accent sur la maîtrise des paramètres environnementaux (température, humidité, oxygène, lumière), le respect des **Bonnes Pratiques d'Hygiène (GHP)** et de **Fabrication (GMP)**, ainsi que sur la mise en œuvre des systèmes de **management de la sécurité alimentaire** (ISO 22000, HACCP).

Ainsi, la compréhension des interactions entre les facteurs biologiques, chimiques et physiques permet de garantir la qualité des produits, de réduire les pertes post-récolte et de contribuer à la durabilité des systèmes alimentaires. L'étudiant sera amené, à l'issue de ce module, à maîtriser les notions essentielles de **sécurité, de traçabilité et de conservation** des denrées, dans une perspective de performance technologique et de responsabilité sociale.

# **chapitre 1 – Approvisionnement en matières premières et ingrédients**

## **Introduction**

L'approvisionnement en matières premières et ingrédients constitue une phase déterminante du système de production agroalimentaire. Il conditionne directement la qualité, la sécurité et la traçabilité des denrées finales. La maîtrise des circuits d'achat, des conditions d'hygiène, du choix et de la gestion des intrants représente ainsi une étape clé dans l'application des principes de sécurité sanitaire et de gestion de la qualité.

Toute entreprise du secteur agroalimentaire doit établir des procédures documentées garantissant que seules les matières conformes aux spécifications définies sont utilisées dans le processus de fabrication. La durabilité et la transparence de la chaîne d'approvisionnement reposent sur des pratiques responsables, depuis la sélection du fournisseur jusqu'à la réception des produits.

Ce chapitre aborde successivement :

- les circuits d'approvisionnement,
- l'hygiène des lieux d'achat,
- les principes de choix des matières premières et des ingrédients,
- et la gestion des matières premières avant leur utilisation dans le processus de transformation.

### **1.1. Les circuits d'approvisionnement**

#### **Définition et importance dans la filière agroalimentaire**

L'approvisionnement constitue l'une des fonctions stratégiques de la gestion de la qualité et de la sécurité dans l'industrie alimentaire. Il englobe l'ensemble des opérations visant à identifier, sélectionner, acquérir, réceptionner et intégrer les matières premières, ingrédients et matériaux nécessaires à la production.

La maîtrise des circuits d’approvisionnement est une condition essentielle à la mise en œuvre des Bonnes Pratiques d’Hygiène (BPH) et des systèmes de management de la sécurité sanitaire tels que le HACCP et la norme ISO 22000.

Un circuit d’approvisionnement efficace doit garantir que les matières premières soient sûres, conformes, traçables et disponibles de manière continue afin de maintenir la stabilité de la production et la qualité du produit fini.

L’approvisionnement est aussi étroitement lié à la performance économique et à la durabilité de l’entreprise agroalimentaire. Des circuits bien organisés réduisent les pertes post-récolte, optimisent les coûts logistiques et contribuent à la sécurité alimentaire en assurant un accès constant à des denrées de qualité.

### **Typologie des circuits d’approvisionnement**

Les circuits d’approvisionnement se différencient selon le nombre d’intermédiaires, la provenance des matières premières, et le mode d’organisation de la chaîne logistique.

#### **a. Les circuits courts**

Les circuits courts impliquent un contact direct ou quasi direct entre le producteur et le transformateur. Ils se caractérisent par un nombre limité d’intermédiaires, ce qui favorise la traçabilité, la fraîcheur des produits et la réduction des risques de contamination croisée. Ces circuits sont particulièrement adaptés aux produits périssables, locaux ou à forte valeur ajoutée. Ils soutiennent également les économies rurales en renforçant le lien entre producteur et consommateur et en réduisant les coûts de transport et de stockage. Toutefois, leur viabilité dépend de la capacité logistique de l’entreprise et de la stabilité de la production locale.

#### **b. Les circuits longs**

Les circuits longs mobilisent plusieurs acteurs tels que les producteurs, grossistes, distributeurs ou importateurs. Ils sont essentiels pour les denrées saisonnières, importées ou non disponibles localement. Bien que ces circuits impliquent une chaîne logistique plus complexe, ils permettent une meilleure continuité d’approvisionnement et une diversification des sources. Il est toutefois

nécessaire de maintenir la traçabilité et la conformité sanitaire tout au long de la chaîne, conformément aux exigences internationales relatives à la sécurité des denrées alimentaires.

### **c. Les circuits intégrés**

Les circuits intégrés regroupent, au sein d'une même entité économique, les activités de production, transformation, conditionnement et distribution. Ce modèle, typique des grandes entreprises agroalimentaires, assure une maîtrise complète de la qualité et une uniformité des standards. L'intégration des différentes étapes de la chaîne constitue un moyen efficace d'assurer la cohérence du système de management de la sécurité des aliments tout au long du processus.

### **d. Les approvisionnements externalisés**

Certaines entreprises recourent à des prestataires externes pour la gestion logistique, l'entreposage ou le transport. Ces approvisionnements externalisés nécessitent la mise en place d'accords contractuels définissant clairement les exigences en matière de sécurité sanitaire, de conditions de transport et de tenue documentaire. Ces opérations doivent être accompagnées de procédures de vérification documentée, de plans d'échantillonnage et de contrôles microbiologiques réguliers afin de garantir l'intégrité des matières premières.

### **e. Les modèles hybrides**

Les entreprises modernes adoptent souvent des modèles hybrides, combinant la proximité du circuit court pour certaines matières premières (fruits, lait, légumes) et la souplesse du circuit long pour les produits non disponibles localement (additifs, ingrédients importés). Cette approche favorise la résilience des chaînes d'approvisionnement face aux aléas économiques, climatiques ou logistiques.

## **Traçabilité et documentation**

La traçabilité constitue un principe fondamental de la sécurité alimentaire. Les textes réglementaires internationaux imposent une traçabilité complète « du champ à l'assiette ». Chaque lot de matière première doit être identifiable selon :

- son origine géographique,
- son fournisseur,
- sa date d'achat et de réception,
- et sa destination interne (atelier, ligne de production, client). Les documents de suivi comprennent :
- les certificats d'origine et de conformité,
- les fiches techniques et fiches de sécurité,
- les bons de livraison et de réception,
- les rapports d'inspection et d'analyses microbiologiques.

Cette documentation doit être conservée pendant une période déterminée afin de permettre un rappel rapide et ciblé en cas de non-conformité ou d'alerte sanitaire. La transparence des informations entre les partenaires commerciaux renforce également la confiance dans les échanges internationaux.

### **Vers des approvisionnements durables**

Les tendances récentes encouragent la mise en œuvre de stratégies d'approvisionnement durables intégrant :

- la sélection responsable des fournisseurs,
- la réduction des pertes post-récolte,
- la préférence pour les sources locales et à faible empreinte carbone,
- et la promotion de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

Ces approches s'inscrivent dans la vision d'une chaîne alimentaire résiliente, transparente et éthique, contribuant à la réalisation des Objectifs de Développement Durable des Nations Unies.

### **1.2. Hygiène des lieux d'achat**

- **Rôle et importance**

L'hygiène des lieux d'achat représente une étape critique du contrôle de la qualité dans toute filière agroalimentaire. Elle conditionne directement la salubrité, la durabilité et la sécurité microbiologique des matières premières avant leur entrée dans l'unité de transformation. La maîtrise de l'hygiène dans les zones d'achat, de réception et de stockage constitue un prérequis fondamental à la mise en œuvre des Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH) et du système HACCP. Ces exigences s'appliquent aussi bien aux marchés publics, entrepôts, plateformes logistiques qu'aux points de regroupement des producteurs.

La mauvaise maintenance des installations constitue un vecteur majeur de contamination croisée et de détérioration des denrées périssables, compromettant ainsi la sécurité alimentaire et la confiance des consommateurs.

L'hygiène des lieux d'achat s'inscrit donc dans une approche préventive, visant à garantir que toutes les matières premières acquises soient manipulées et conservées dans des conditions sanitaires maîtrisées.

### **Exigences structurelles et sanitaires**

Les infrastructures destinées à l'achat et au stockage des denrées alimentaires doivent être conçues, construites et entretenues conformément aux normes internationales d'hygiène. Les réglementations en vigueur précisent les critères essentiels relatifs aux locaux de vente, de réception et de stockage des aliments. Ces exigences comprennent :

- l'utilisation de matériaux adaptés : les sols, murs et plans de travail doivent être fabriqués en matériaux non absorbants, lisses et résistants à la corrosion afin de faciliter le nettoyage et d'éviter toute rétention d'humidité ;
- une ventilation adéquate : les locaux doivent être équipés de systèmes d'aération efficaces pour réduire la condensation et prévenir la formation de moisissures ou la prolifération microbienne ;
- une séparation fonctionnelle des zones : les espaces doivent permettre de distinguer clairement les zones propres des zones contaminées, ainsi que les flux de matières premières et de produits finis ;
- une protection contre les nuisibles : les installations doivent être dotées de dispositifs de lutte intégrée contre les insectes, rongeurs et autres animaux indésirables, avec un suivi régulier des mesures de contrôle.

Les conditions physiques des lieux d'entreposage ont un impact direct sur la charge microbienne initiale des denrées ; tout manquement structurel (sols fissurés, humidité, ventilation insuffisante) accroît le risque de contamination avant transformation. Par ailleurs, les organisations internationales en matière de sécurité alimentaire insistent sur la nécessité :

- d'une inspection régulière des marchés et entrepôts ;
- de la mise en œuvre de programmes écrits de nettoyage et de désinfection ;
- et de la vérification documentaire des actions menées (fréquence, produits utilisés, responsables désignés).

Ces programmes doivent être validés, suivis et archivés conformément aux exigences de la norme ISO 22000, qui considère le nettoyage et la désinfection comme des Programmes Pré-Requis Opérationnels (PRPo).

### **Bonnes pratiques de manipulation**

La salubrité des lieux d'achat ne dépend pas uniquement des conditions structurelles, mais également des pratiques de manipulation adoptées par le personnel. La manipulation des aliments doit toujours s'effectuer sur des surfaces propres et désinfectées, en utilisant des ustensiles dédiés à chaque type de denrée (viande, poisson, fruits, légumes, etc.), afin de prévenir toute contamination croisée.

Les produits périssables exigent des conditions thermiques strictes :

- $\leq 5$  °C pour les denrées réfrigérées (produits laitiers, viande, poisson, jus frais) ;
- $\leq -18$  °C pour les produits surgelés.

Ces températures doivent être contrôlées et enregistrées régulièrement. Les équipements de réfrigération et de congélation doivent être nettoyés et désinfectés à intervalles réguliers, et leur maintenance documentée. Les aliments doivent être manipulés avec des gants ou des ustensiles propres, et le personnel doit se laver les mains fréquemment, notamment après toute manipulation d'argent, de déchets ou de produits crus. Les déchets et emballages doivent être évacués de manière à ne pas contaminer les zones de vente ou de stockage. Enfin, la formation continue du personnel à la sécurité alimentaire, à la maîtrise des risques

microbiologiques et à la gestion des températures critiques est essentielle ; elle contribue à instaurer une véritable culture d'hygiène au sein des marchés et entrepôts.

### **Nettoyage, désinfection et surveillance**

Les procédures de nettoyage et de désinfection doivent être planifiées, validées et enregistrées. Les établissements doivent mettre en place des protocoles normalisés précisant :

- les fréquences d'application ;
- les produits chimiques utilisés (accompagnés de leurs fiches de sécurité) ;
- les zones concernées ;
- et les personnes responsables.

Des audits internes et des analyses microbiologiques de surface (tamponnages, tests ATP) sont recommandés pour vérifier l'efficacité des opérations de désinfection. Ces mesures préventives permettent de réduire la charge microbienne environnementale, d'éviter la prolifération de pathogènes tels que *Listeria monocytogenes* ou *Salmonella spp.*, et de maintenir un état sanitaire satisfaisant des locaux.

### **1.3. Principes du choix des matières premières et des ingrédients**

#### **Importance du choix des matières premières**

Le choix approprié des matières premières et des ingrédients constitue une étape déterminante pour garantir la qualité, la sécurité et la stabilité des produits alimentaires finis. Tout intrant introduit dans la chaîne de fabrication doit être évalué, approuvé et contrôlé avant son utilisation. Cette évaluation repose sur des critères physiques, chimiques et microbiologiques permettant de s'assurer que les matières premières répondent aux exigences réglementaires et aux spécifications internes du produit final. La sélection des matières premières constitue un prérequis fondamental dans la mise en œuvre des Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH) et du système HACCP, car elle influence directement la sécurité sanitaire du produit fini. Ainsi, toute défaillance dans la qualité initiale des intrants (présence de

contaminants, résidus de pesticides, charge microbienne élevée) peut compromettre l'efficacité des traitements ultérieurs.

La maîtrise de l'approvisionnement et du choix des matières premières représente également un élément stratégique de la gestion de la qualité totale dans les industries agroalimentaires. Les matières premières représentent souvent plus de 60 % du coût total du produit, d'où l'importance d'un choix rationnel et documenté.

### **Critères de sélection**

Le choix des matières premières repose sur un ensemble de critères techniques et réglementaires visant à garantir la conformité et la constance des caractéristiques des intrants.

#### **a. Origine et traçabilité**

Les fournisseurs doivent être capables de démontrer l'origine géographique, la date de récolte ou de production, et la traçabilité complète de leurs produits, conformément aux exigences réglementaires.

Chaque lot doit être accompagné de documents justificatifs : certificats d'origine, fiches techniques, certificats d'analyse et rapports d'inspection. Cette traçabilité permet une identification rapide des sources de non-conformité et une gestion efficace des rappels de produits.

#### **b. Conformité réglementaire**

Toutes les matières premières doivent répondre aux limites maximales de résidus chimiques (pesticides, métaux lourds, contaminants) établies par les organismes internationaux de sécurité alimentaire.

Les produits d'origine animale doivent être exempts de pathogènes réglementés tels que *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes* ou *E. coli*. Cette conformité garantit que les intrants ne représentent aucun danger pour la santé publique ni pour la sécurité du consommateur.

#### **c. Caractéristiques organoleptiques**

Le contrôle sensoriel (goût, odeur, couleur, texture) est essentiel pour assurer la constance de la qualité des produits finis. Les fiches techniques et spécifications sensorielles des fournisseurs servent de référence pour vérifier la conformité des lots entrants. L'évaluation organoleptique

permet également de détecter précocement les altérations dues à une mauvaise conservation, à une oxydation ou à une contamination microbienne.

#### **d. Propriétés nutritionnelles et stabilité**

Les intrants doivent être choisis en tenant compte de leur valeur nutritionnelle (teneur en protéines, lipides, vitamines, minéraux) et de leur stabilité au cours du stockage et de la transformation.

Il est recommandé d'évaluer la compatibilité technologique entre les ingrédients (pH, activité de l'eau, interactions physico-chimiques) afin de garantir une formulation stable et conforme aux objectifs du produit.

#### **e. Évaluation et approbation des fournisseurs**

La sélection des fournisseurs doit s'appuyer sur une évaluation documentée et périodique de leurs performances :

- respect des spécifications techniques ;
- respect des délais de livraison ;
- conformité microbiologique et chimique des produits fournis ;
- et existence d'un système de gestion de la qualité certifié (HACCP, ISO 22000).

Les fournisseurs approuvés doivent figurer dans une liste officielle tenue à jour par l'entreprise. La vérification de cette conformité peut inclure des audits fournisseurs, des analyses de routine sur les lots entrants et un suivi des réclamations qualité.

#### **Spécificités des ingrédients fonctionnels**

Les ingrédients fonctionnels, tels que les additifs alimentaires, agents texturants, antioxydants ou colorants, jouent un rôle technologique ou nutritionnel essentiel dans la formulation des produits. Leur sélection doit reposer sur trois critères majeurs : pureté, efficacité et innocuité.

#### **a. Cadre normatif et sécurité**

Les normes internationales fixent des exigences précises pour chaque catégorie d'additifs, notamment les limites maximales d'usage et les spécifications de pureté. Ces règles imposent également la vérification de la dose journalière admissible (DJA) pour chaque substance. Les additifs doivent figurer dans les listes reconnues comme sûres (GRAS) ou être préalablement autorisés avant leur mise sur le marché.

### **b. Ingrédients naturels et éco-responsabilité**

Les tendances actuelles dans l'industrie alimentaire privilégient l'utilisation d'ingrédients d'origine naturelle, tels que les extraits végétaux riches en antioxydants, les fibres fonctionnelles ou les agents gélifiants issus de biopolymères. Les entreprises sont encouragées à collaborer avec des fournisseurs engagés dans des pratiques durables, minimisant l'impact environnemental tout en garantissant la sécurité sanitaire.

Cette approche s'inscrit dans une logique de développement durable et de responsabilité sociétale des entreprises.

### **c. Compatibilité technologique et qualité sensorielle**

Les additifs et agents fonctionnels doivent être choisis en fonction de leur efficacité technologique (émulsification, stabilisation, coloration, conservation) sans altérer les caractéristiques organoleptiques du produit final. L'évaluation préalable de la compatibilité des ingrédients (pH, interactions avec les protéines, effet sur la texture) est indispensable pour éviter les instabilités, pertes de saveur ou déphasages durant la production.

### **Vers une approche intégrée de sélection**

L'application simultanée des principes internationaux relatifs à la sécurité alimentaire conduit à une approche intégrée de la sélection des matières premières :

- choix basé sur des critères objectifs et mesurables,
- vérification analytique systématique,
- audits fournisseurs réguliers,
- et amélioration continue du processus d'approvisionnement.

Cette approche renforce la maîtrise des risques tout au long de la chaîne d'approvisionnement et contribue à la production d'aliments sûrs, de qualité constante et conformes aux exigences réglementaires internationales.

## **1.4. Gestion des matières premières**

### **✓ Définition et portée**

La gestion des matières premières constitue un maillon central du système de management de la qualité dans les industries agroalimentaires. Elle couvre l'ensemble des opérations allant de la réception des produits jusqu'à leur distribution interne vers les unités de transformation.

Une gestion rigoureuse des intrants permet d'assurer la continuité de la production, la prévention des non-conformités et le maintien de la qualité sanitaire tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Les matières premières doivent être gérées selon des procédures documentées garantissant :

- la maîtrise des risques physiques, chimiques et microbiologiques ;
- la traçabilité complète des lots ;
- et la préservation des caractéristiques d'origine jusqu'à leur utilisation.

Une mauvaise gestion à ce stade peut compromettre la sécurité des produits finis et générer des pertes économiques importantes.

### **1.4.1. Réception des matières premières**

La réception constitue le premier point de contrôle opérationnel de la qualité.

Chaque livraison doit faire l'objet d'une vérification minutieuse portant sur :

- la température des produits, mesurée à cœur ou à la surface selon la nature de la denrée ;
- l'état de propreté et d'intégrité des emballages, afin de s'assurer qu'ils ne présentent ni rupture ni contamination ;
- la conformité administrative, en comparant la marchandise aux documents de livraison, certificats d'analyse et fiches techniques correspondants.

Les produits doivent être réceptionnés dans des zones propres, distinctes des zones de stockage et de production, conformément aux Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH). Tout lot non conforme (emballage endommagé, température inadaptée, date périmée, odeur suspecte, infestation visible) doit être isolé et identifié. Une procédure spécifique doit définir les modalités d'acceptation, de retour ou de destruction, accompagnée d'une fiche de non-conformité.

Les relevés de température et d'inspection doivent être archivés pour assurer la traçabilité

documentaire, conformément aux exigences du système de management de la sécurité des aliments.

### **1.4.2. Traçabilité interne**

La traçabilité est un pilier fondamental du système de gestion des matières premières. Chaque lot reçu doit être immédiatement codifié à l'aide d'un identifiant unique intégrant :

- la date de réception ;
- le nom du fournisseur ;
- le numéro de livraison ou du bon de commande ;
- et, si nécessaire, le numéro de lot d'origine.

La traçabilité doit être assurée dans les deux sens : ascendante (depuis les produits finis jusqu'aux intrants) et descendante (depuis les matières premières jusqu'aux produits distribués).

Ce double suivi permet une réaction rapide et ciblée en cas d'incident de qualité ou d'alerte sanitaire.

L'intégration de solutions numériques telles que les codes-barres, systèmes ERP, QR codes ou la blockchain améliore la fiabilité et la transparence du suivi des lots. Ces outils permettent également de réduire les erreurs humaines, d'automatiser la documentation et de faciliter les audits internes.

### **1.4.3. Stockage et rotation des stocks**

Les conditions de stockage sont déterminantes pour préserver la qualité des matières premières. Elles doivent être adaptées à la nature du produit et faire l'objet d'un contrôle régulier afin d'éviter toute dégradation, contamination croisée ou perte de valeur nutritionnelle.

#### **a. Produits secs**

Les matières premières sèches (farines, sucres, légumineuses, épices, etc.) doivent être conservées dans des locaux propres, secs et bien ventilés, à une température inférieure à 25 °C et une humidité relative inférieure à 60 %, afin d'éviter la formation de moisissures et la production de mycotoxines. Les stocks doivent être palettisés et éloignés des murs pour permettre une bonne aération et faciliter les inspections sanitaires.

Des contrôles visuels et olfactifs périodiques permettent de détecter précocement toute infestation ou condensation.

### **b. Produits réfrigérés**

Les denrées périssables réfrigérées (lait, viande, poisson, fruits, légumes frais) doivent être maintenues à une température ne dépassant pas 5 °C.

Une surveillance régulière des températures et la vérification de la calibration des thermomètres sont essentielles. Les chambres froides doivent être équipées d'un enregistreur automatique de température, dont les données sont conservées dans le système documentaire qualité.

### **c. Produits surgelés**

Les produits surgelés doivent être stockés à une température égale ou inférieure à -18 °C. Toute remontée de température au-dessus de -15 °C doit être signalée, car elle peut entraîner la recristallisation et une perte de qualité microbiologique. Le dégivrage régulier des chambres froides est indispensable pour maintenir une circulation d'air homogène et prévenir toute contamination croisée.

### **d. Rotation des stocks**

La gestion des stocks doit suivre la règle FEFO (*First Expired, First Out*), c'est-à-dire que les produits dont la date de péremption est la plus proche sont utilisés en premier. Cette méthode permet de limiter les pertes, de garantir la fraîcheur des produits et d'assurer la conformité aux exigences réglementaires.

#### **1.4.4. Non-conformités et actions correctives**

Toute non-conformité détectée lors des contrôles de réception ou de stockage (altération, rupture de la chaîne du froid, infestation, contamination visible) doit être signalée immédiatement au service qualité et documentée dans un rapport décrivant la nature de l'écart, sa cause probable et les actions correctives engagées. Ces actions peuvent inclure le retour au fournisseur, la destruction contrôlée ou le reconditionnement sous supervision qualité. Avant toute décision d'utilisation, la stabilité microbiologique des lots suspects doit être vérifiée par des analyses appropriées. L'ensemble de ces données doit être archivé dans le

système documentaire qualité afin d'assurer une traçabilité totale des incidents et des mesures prises.

#### **1.4.5. Formation du personnel**

La compétence du personnel est un facteur clé dans la maîtrise des matières premières. Les employés affectés à la réception, à la manutention et au stockage doivent être formés aux Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH) et aux Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF). La formation doit porter sur la reconnaissance des signes de non-conformité, la prévention des contaminations croisées, la gestion des températures critiques et les procédures d'urgence en cas de défaillance (panne de froid, contamination, etc.). Une sensibilisation continue du personnel est indispensable pour instaurer une culture de sécurité alimentaire au sein de l'entreprise.

Des sessions de recyclage périodiques doivent être planifiées et documentées, conformément aux exigences du système de management de la sécurité des aliments.

## **Chapitre 2 : Les conditions requises de transport, de stockage et de conservation des matières premières et des ingrédients**

### **2.1. Transport des matières premières et ingrédients**

#### **2.1.1. Importance et objectifs du transport alimentaire**

Le transport des denrées alimentaires représente une étape critique de la chaîne d'approvisionnement, car il conditionne la sécurité sanitaire, la qualité organoleptique et la conformité réglementaire des produits livrés au consommateur. Le transport ne se limite pas à la logistique : il fait partie intégrante du système global d'assurance qualité et doit être planifié pour prévenir toute contamination, maintenir la chaîne du froid et garantir la traçabilité. Il doit être organisé de manière à protéger les produits contre toute détérioration physique, chimique ou biologique. Les véhicules utilisés doivent être adaptés à la nature des produits, correctement entretenus et soumis à un programme de nettoyage documenté. L'objectif ultime est de préserver les propriétés sensorielles (couleur, goût, odeur, texture) et la valeur nutritionnelle des denrées tout au long de leur transfert.

#### **2.1.2. Conception et caractéristiques des véhicules de transport**

Les véhicules, conteneurs et équipements utilisés pour le transport alimentaire doivent être conçus et entretenus de manière à :

- protéger les denrées contre la poussière, les insectes, les fumées, les gaz et la condensation ;
- éviter toute contamination croisée entre produits crus et cuits ;
- et préserver la température adaptée au type d'aliment transporté.

Les surfaces internes doivent être lisses, non poreuses, résistantes à la corrosion, faciles à nettoyer et à désinfecter, et fabriquées à partir de matériaux compatibles avec les produits chimiques de nettoyage. Les réglementations exigent également que les produits crus et les produits cuits soient transportés dans des compartiments séparés ou dans des conteneurs étanches et identifiés afin d'éviter toute contamination croisée. Des procédures documentées doivent être établies pour le nettoyage, la désinfection et l'inspection des véhicules avant et

après chaque transport. Les normes internationales relatives au transport alimentaire précisent les caractéristiques techniques minimales des véhicules isothermes ou réfrigérés : isolation thermique, dispositifs d'enregistrement de la température et validation régulière des performances du matériel.

### **2.1.3. Conditions de transport et maintien de la chaîne du froid**

Les conditions de transport doivent être adaptées à la nature du produit :

- les produits réfrigérés doivent être maintenus à une température inférieure ou égale à 5 °C ;
- les produits surgelés doivent être conservés à une température inférieure ou égale à -18 °C, avec un contrôle continu pendant le trajet ;
- les produits secs ou stables à température ambiante doivent être protégés contre l'humidité (inférieure à 60 %) et stockés dans des véhicules propres, secs et ventilés.

Les véhicules à température dirigée doivent disposer d'un enregistreur automatique ou d'un système numérique de surveillance permettant la traçabilité des conditions thermiques tout au long du trajet. Toute rupture de la chaîne du froid doit être signalée immédiatement et consignée dans un rapport d'écart, soumis à l'évaluation du service qualité. Les accords internationaux sur le transport des denrées périssables définissent également les exigences techniques relatives à la classification des véhicules, à l'isolation, au contrôle des performances thermiques et aux inspections périodiques du matériel.

### **2.1.4. Procédures de nettoyage, désinfection et inspection**

Les véhicules multi-usages ou ceux transportant successivement des produits alimentaires différents doivent être soumis à une procédure stricte de nettoyage et d'inspection avant toute nouvelle utilisation.

Cette procédure doit être documentée, vérifiable, adaptée au type de produit transporté et accompagnée de fiches de suivi mentionnant la date, les produits chimiques utilisés et le nom du responsable.

Les opérations doivent être réalisées avec des détergents et désinfectants agréés, suivies d'un rinçage complet à l'eau potable pour éviter toute contamination chimique. Les surfaces doivent ensuite être séchées à l'air libre avant le rechargement. Des contrôles microbiologiques de surface, tels que les tamponnages ou les tests ATP, doivent être effectués régulièrement pour vérifier l'efficacité du nettoyage. Les résultats sont archivés et tenus à disposition lors des audits internes ou des inspections officielles.

### **1.5. Séparation et compatibilité des produits**

Le transport doit garantir une séparation stricte entre les produits présentant des risques différents :

- produits crus et produits cuits ;
- produits allergènes et non allergènes ;
- produits d'origine animale et produits végétaux.

Les compartiments ou conteneurs doivent être clairement identifiés, et les produits emballés et non emballés ne doivent jamais être transportés ensemble sans cloisonnement physique. Les produits chimiques ou non alimentaires (détergents, carburants, etc.) doivent être transportés séparément afin d'éviter tout risque de contamination. Le personnel de transport doit être formé à la reconnaissance des risques, à l'hygiène personnelle et à la manipulation sécurisée des aliments. La prévention des contaminations croisées et la propreté du véhicule constituent des exigences essentielles à la sécurité du transport alimentaire.

### **1.6. Documentation et traçabilité du transport**

Le système de traçabilité doit couvrir l'ensemble des étapes du transport en identifiant :

- le lot transporté ;
- la date et l'heure de chargement et de déchargement ;
- le fournisseur et le destinataire ;
- la température moyenne enregistrée ;
- et les actions correctives appliquées en cas d'incident.

Cette documentation garantit la transparence et la responsabilité tout au long de la chaîne logistique, facilitant les audits, les rappels éventuels et l'amélioration continue du système qualité.

L'application des normes internationales impose la tenue d'une documentation complète, incluant les rapports de maintenance des véhicules, les calibrations des thermomètres et les fiches de désinfection. Les systèmes modernes de suivi numérique, tels que le GPS, les enregistreurs de données ou la technologie blockchain, permettent une traçabilité en temps réel et une meilleure transparence logistique.

## **2. Exigences thermiques et hygiéniques**

### **2.1. Rôle des paramètres thermiques dans la sécurité alimentaire**

Le contrôle des températures pendant le transport constitue un facteur déterminant pour maintenir la salubrité et la qualité des denrées alimentaires.

La maîtrise des conditions thermiques fait partie intégrante des Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH) et du système HACCP, car toute variation de température peut favoriser la prolifération microbienne, l'altération des produits et la perte de qualité organoleptique. Les produits hautement périssables tels que la viande, le poisson, le lait, les produits laitiers, les produits de la mer et les plats cuisinés doivent être transportés à une température inférieure ou égale à +4 °C afin de limiter le développement des microorganismes pathogènes tels que *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp.* ou *E. coli*.

Les produits surgelés doivent rester à une température égale ou inférieure à -18 °C tout au long du transport. Le respect strict de ces seuils permet de ralentir la dégradation enzymatique et microbienne tout en préservant les caractéristiques sensorielles et nutritionnelles des aliments. Ces températures sont conformes aux prescriptions internationales relatives au transport des denrées périssables à température dirigée.

### **2.2. Surveillance et enregistrement des températures**

La surveillance des conditions thermiques doit être continue, fiable et traçable. Chaque véhicule transportant des produits à température contrôlée doit être équipé d'un

thermomètre ou d'un enregistreur électronique calibré garantissant la précision des mesures. Les relevés de température doivent être :

- effectués à intervalles réguliers ;
- archivés sur support papier ou numérique ;
- et disponibles pour vérification lors des audits ou inspections.

Ces enregistrements permettent de démontrer la conformité réglementaire et d'identifier rapidement toute rupture de la chaîne du froid. Des protocoles de vérification journalière des thermomètres doivent être établis, incluant leur étalonnage régulier et la formation du personnel à leur utilisation correcte. En cas de dépassement des limites fixées, une fiche d'écart thermique doit être remplie, précisant la durée, la cause probable et les mesures correctives appliquées (transfert immédiat, rejet ou destruction du lot concerné).

### **2.3. Ventilation et stabilité thermique**

Le maintien d'une ventilation adéquate à l'intérieur des véhicules est essentiel pour garantir une circulation homogène de l'air froid et éviter la formation de zones de condensation. Une répartition uniforme de la température dans les compartiments réduit le risque de points chauds où des microorganismes peuvent se multiplier rapidement.

Les véhicules doivent être dotés de systèmes de ventilation performants permettant :

- la prévention de la condensation sur les parois et les emballages ;
- la stabilisation de la température ;
- et la protection contre la poussière et les contaminants externes.

La vérification du système de ventilation fait partie des contrôles de maintenance préventive imposés par la réglementation. Tout dysfonctionnement doit être notifié et corrigé avant la reprise du service afin d'éviter tout risque de contamination ou de rupture de la chaîne du froid.

### **2.4. Emballages et protection hygiénique**

Les emballages jouent un rôle essentiel dans la préservation de la salubrité des aliments pendant le transport. Les matériaux utilisés doivent être :

- résistants à l'écrasement et aux chocs mécaniques ;
- imperméables à l'humidité, aux graisses et aux gaz ;
- et compatibles avec les températures de transport (réfrigération ou congélation).

Les emballages doivent également prévenir toute contamination croisée et éviter les fuites ou suintements susceptibles d'altérer la qualité hygiénique du véhicule ou des autres produits transportés.

Chaque emballage doit comporter un étiquetage clair indiquant :

- la nature du produit ;
- la température de conservation recommandée ;
- le numéro de lot ou code de traçabilité ;
- et les précautions de manipulation (fragile, à maintenir au froid, etc.).

Le choix de matériaux adaptés et l'application de bonnes pratiques d'étiquetage contribuent à une traçabilité intégrale et à la prévention des erreurs de manutention. L'utilisation de matériaux recyclables ou biodégradables est encouragée, à condition qu'ils répondent aux exigences d'hygiène et de résistance définies par les normes internationales.

## **2.5. Hygiène des véhicules et des équipements**

La propreté du matériel de transport constitue un paramètre aussi essentiel que la maîtrise thermique.

Les véhicules doivent être entièrement nettoyés et désinfectés après chaque trajet, inspectés avant rechargement et maintenus à l'abri de toute source de contamination externe (poussières, fumées, parasites). Les produits de nettoyage et désinfectants utilisés doivent être compatibles avec les matériaux des surfaces et homologués pour un usage alimentaire. Des analyses microbiologiques de surface peuvent être réalisées afin de vérifier l'efficacité du nettoyage et prévenir les contaminations croisées.

## **3. Séparation et compatibilité des produits transportés**

### **3.1. Objectif et importance du principe de séparation**

Le principe de séparation des produits transportés constitue une mesure essentielle de prévention des contaminations croisées et un élément clé de l'assurance qualité dans le transport

des denrées alimentaires. La sécurité alimentaire repose non seulement sur la maîtrise des conditions thermiques et d'hygiène, mais aussi sur la prévention de tout contact direct ou indirect entre catégories de produits présentant des risques incompatibles. La séparation des produits permet de :

- éviter la migration de contaminants physiques, chimiques ou biologiques d'un produit à l'autre ;
- préserver les propriétés organoleptiques et nutritionnelles ;
- et maintenir la conformité réglementaire lors du transport et de la distribution.

Les contaminations croisées peuvent survenir à tout moment : contact direct, écoulement de liquides, dispersion d'aérosols, ou contamination par les mains, les équipements ou les surfaces du véhicule. Une organisation rigoureuse des chargements et la mise en œuvre de procédures de compartimentage adaptées sont donc indispensables.

### **3.2. Catégories de produits nécessitant une séparation stricte**

#### **a. Produits crus et produits cuits**

La séparation entre produits crus (viande, volaille, poisson, fruits et légumes non transformés) et produits cuits ou prêts à consommer est obligatoire pour prévenir la contamination croisée microbiologique.

Les microorganismes pathogènes présents sur les produits crus peuvent contaminer les produits cuits, souvent dépourvus d'étape ultérieure de destruction thermique. Les réglementations en vigueur imposent que ces produits soient transportés :

- soit dans des compartiments physiquement séparés ;
- soit dans des emballages hermétiques et clairement identifiés.

Les équipements (palettes, conteneurs, chariots) doivent être nettoyés et désinfectés entre chaque utilisation. Il est recommandé de charger les produits cuits en dernier et de les décharger en premier, afin de réduire leur exposition à un environnement potentiellement contaminé.

#### **b. Denrées alimentaires et produits non alimentaires**

Les produits alimentaires ne doivent jamais être transportés en même temps que des produits non alimentaires susceptibles de les contaminer, tels que les détergents, désinfectants, carburants, produits chimiques ou emballages neufs non protégés. Une séparation stricte entre ces catégories de marchandises est indispensable, car les produits non alimentaires peuvent dégager des vapeurs toxiques ou laisser des résidus chimiques pouvant altérer les denrées. Si des produits non alimentaires ont été transportés dans un véhicule, une désinfection complète suivie d'une inspection documentée doit être effectuée avant toute réutilisation pour le transport de denrées alimentaires. L'usage de cloisons amovibles ou de compartiments étanches, clairement identifiés selon la nature des produits transportés, est fortement recommandé.

### **c. Produits allergènes et non allergènes**

Les produits contenant des allergènes (arachides, lait, soja, fruits à coque, gluten, etc.) doivent être manipulés et transportés séparément des produits qui n'en contiennent pas. Une simple contamination croisée peut rendre un aliment impropre à la consommation pour les personnes allergiques. Les produits allergènes doivent être clairement étiquetés et identifiés, le matériel utilisé doit être entièrement nettoyé et rincé avant tout contact avec un produit non allergène, et le personnel de transport doit être formé à la gestion du risque allergénique. La maîtrise des allergènes fait partie des Programmes Pré-requis Opérationnels (PRPo) dans le cadre du système de management de la sécurité des aliments. Les enregistrements relatifs au nettoyage, à la désinfection et au chargement doivent être conservés afin de démontrer la conformité et la traçabilité du processus.

### **3.3. Moyens techniques de séparation dans les véhicules**

Les véhicules de transport de denrées périssables doivent répondre à des normes techniques précises garantissant la sécurité alimentaire. Ils doivent comporter :

- des cloisons fixes ou amovibles assurant l'étanchéité entre compartiments ;
- des surfaces lavables et désinfectables ;
- une identification visuelle claire des zones, à l'aide de pictogrammes ou de codes couleur.

Les compartiments peuvent être :

- thermiquement indépendants, permettant le transport simultané de produits à différentes températures (par exemple : surgelés et frais) ;

- ou physiquement séparés, afin d'isoler les catégories incompatibles (produits crus/cuits, alimentaires/non alimentaires).

Le compartimentage doit également tenir compte de la ventilation et de la circulation d'air pour éviter la diffusion d'odeurs, de vapeurs ou de particules entre les zones. Il est recommandé que chaque compartiment dispose d'un contrôle de température indépendant lorsque plusieurs types de produits sont transportés simultanément.

### **3.4. Rotation et priorisation du chargement**

La rotation des produits pendant le transport vise à optimiser la sécurité thermique et à limiter les risques d'altération.

Les produits les plus sensibles aux variations de température (produits laitiers, viandes, poissons, plats cuisinés) doivent :

- être chargés en dernier afin de réduire le temps passé hors de la chaîne du froid ;
- et être livrés en priorité à leur destination.

Cette organisation logistique permet de réduire l'exposition aux conditions ambiantes et de prévenir la rupture thermique. Les produits secs ou stables à température ambiante peuvent, au contraire, être transportés en fin de tournée.

La documentation de transport, telle que le bon de livraison ou la feuille de route, doit mentionner la séquence de chargement et les températures enregistrées pendant le trajet.

### **3.5. Formation et responsabilité du personnel de transport**

Le personnel impliqué dans le chargement, la manutention et la livraison des produits doit être formé aux principes de compatibilité et de séparation. Cette formation doit inclure :

- la compréhension des risques de contamination croisée ;
- la lecture et l'interprétation des étiquettes et codes couleur ;
- les bonnes pratiques de nettoyage et de désinfection ;
- et la gestion des situations d'urgence (renversement, fuite, bris d'emballage).

Une telle sensibilisation renforce la culture d'hygiène et la maîtrise opérationnelle des risques durant le transport alimentaire.

## **4. Traçabilité et contrôle à réception**

### **4.1. Rôle et importance de la traçabilité dans le transport alimentaire**

La traçabilité constitue un pilier fondamental de la sécurité alimentaire. Elle permet de suivre le parcours d'un produit tout au long de la chaîne logistique, depuis son expédition jusqu'à sa réception, et de retracer rapidement l'origine d'un incident en cas de non-conformité.

Elle fait partie intégrante du système de management de la sécurité des aliments et doit couvrir toutes les étapes, y compris le transport et la réception des matières premières et des produits finis.

La traçabilité garantit la conformité réglementaire, la transparence vis-à-vis des clients et des autorités de contrôle, et renforce la confiance dans la chaîne d'approvisionnement. Elle facilite également les actions correctives rapides en cas de contamination, d'altération ou de rappel de produits.

### **4.2. Registre de transport et documentation obligatoire**

Chaque expédition alimentaire doit être accompagnée d'un registre de transport documentant les informations clés relatives au lot transporté. Ces registres constituent des preuves de conformité et facilitent les audits internes ou officiels. Les informations minimales exigées sont :

- le numéro de lot ou code de traçabilité ;
- le type de véhicule et le numéro d'immatriculation ;
- la date et l'heure de départ ;
- la température de chargement et de transport ;
- le nom du conducteur ou de l'opérateur logistique ;
- les conditions et l'heure de réception.

Ces données doivent être enregistrées au moment du chargement et vérifiées à la réception. Les registres peuvent être tenus sous format papier ou numérique, mais doivent être conservés

pendant une période minimale conforme aux exigences légales nationales. L'utilisation de systèmes informatisés est recommandée pour automatiser la collecte et la sauvegarde des données, ce qui réduit le risque d'erreur humaine et améliore la fiabilité du suivi logistique.

### **4.3. Contrôle à réception des produits alimentaires**

À la réception des marchandises, la vérification systématique de la conformité des produits constitue une étape essentielle du plan de maîtrise sanitaire.

Le responsable qualité ou le personnel habilité doit effectuer un contrôle à trois niveaux : environnemental, documentaire et produit.

#### **a. Vérification de la propreté et de l'état du véhicule**

Avant le déchargement, le véhicule doit être inspecté pour vérifier :

- son état général (absence de saletés, d'odeurs, de débris ou d'humidité) ;
- la propreté des surfaces internes ;
- et la présence d'un certificat de nettoyage lorsque cela est requis.

Tout véhicule présentant des signes de contamination ou de manque d'entretien doit être refusé ou soumis à un nettoyage et à une désinfection complets avant toute nouvelle utilisation.

#### **b. Contrôle de la température des produits**

Les températures doivent être mesurées à l'aide d'un thermomètre calibré. Les valeurs relevées sont comparées aux limites réglementaires :

- $\leq +4$  °C pour les produits réfrigérés ;
- $\leq -18$  °C pour les produits surgelés.

Toute anomalie (écart supérieur à 3 °C, absence d'enregistrement, rupture de la chaîne du froid) doit être signalée immédiatement et consignée dans le rapport de non-conformité.

### **c. Contrôle documentaire**

Le responsable qualité vérifie la concordance entre la marchandise reçue et les documents de transport :

- bons de livraison ;
- certificats d'origine et d'analyse ;
- fiches techniques ;
- rapports de contrôle qualité du fournisseur.

L'absence de documents obligatoires ou d'un étiquetage conforme constitue une non-conformité majeure et doit être traitée selon la procédure interne.

### **d. Contrôle de l'intégrité des emballages**

Les emballages doivent être intacts, propres, secs et conformes aux normes d'étiquetage en vigueur.

Tout signe d'altération (perforation, fuite, gonflement, humidité, infestation) entraîne la mise en quarantaine du lot concerné. Les produits altérés ne peuvent être acceptés qu'après une expertise interne ou externe documentée et une validation du service qualité.

## **4.4. Gestion des non-conformités à la réception**

Toute non-conformité détectée qu'il s'agisse d'un retard de livraison, d'une rupture de la chaîne du froid, d'un emballage défectueux ou d'une contamination visible doit être consignée dans un rapport de non-conformité. Ce rapport doit comporter :

- la description de l'écart ;
- la date et l'heure du constat ;
- le nom de la personne ayant effectué le contrôle ;
- les mesures correctives immédiates (refus, destruction, reclassement ou reconditionnement) ;
- et la notification au fournisseur pour action corrective.

Cette documentation est indispensable pour le suivi des performances des fournisseurs et la prévention de la récurrence des anomalies. Les rapports doivent être intégrés au système de management de la qualité afin de permettre une analyse des causes et d'assurer l'amélioration continue.

#### **4.5. Traçabilité numérique et innovations technologiques**

Les avancées technologiques récentes ont renforcé la fiabilité du suivi logistique et de la traçabilité alimentaire. L'usage de dispositifs électroniques tels que les sondes connectées, les enregistreurs GPS, les capteurs d'humidité et de température, ainsi que les plateformes numériques de suivi en temps réel, permet :

- de surveiller en continu les paramètres critiques ;
- d'enregistrer automatiquement les données ;
- et de détecter immédiatement toute dérive thermique ou mécanique.

Les systèmes numériques assurent une meilleure transparence et facilitent la transmission des informations aux parties concernées. La technologie blockchain, de plus en plus utilisée, offre une traçabilité inviolable et transparente de chaque lot alimentaire, depuis la production jusqu'à la réception. Bien que plus coûteuses, ces solutions permettent d'atteindre un haut niveau de fiabilité et d'efficacité dans la gestion des flux de denrées périssables.

### **5. Exigences réglementaires et bonnes pratiques**

#### **5.1. Cadre général de la réglementation internationale**

Le transport des denrées alimentaires est encadré par un ensemble cohérent de réglementations et de normes internationales visant à garantir la sécurité sanitaire, la qualité et la traçabilité des produits tout au long de la chaîne logistique. Ces textes harmonisent les exigences applicables aux opérateurs du secteur alimentaire, qu'il s'agisse du conditionnement, du stockage, du transport ou de la distribution. Ils constituent le socle juridique des bonnes pratiques d'hygiène et de sécurité alimentaire adoptées à l'échelle mondiale.

Selon les instances internationales, ces textes assurent une harmonisation des pratiques entre les différents acteurs producteurs, transporteurs et distributeurs et servent de référence aux

autorités nationales pour la mise en œuvre de leurs législations. Ils fixent les obligations minimales en matière :

- d'hygiène et d'entretien des véhicules ;
- de contrôle des températures ;
- de séparation des produits incompatibles ;
- de gestion documentaire ;
- et de formation du personnel impliqué dans le transport alimentaire.

Leur application est essentielle non seulement pour protéger la santé publique, mais aussi pour réduire les pertes post-récolte, assurer la conformité aux exigences commerciales internationales et renforcer la confiance du consommateur.

## **5.2. Codex Alimentarius – Principes d'hygiène applicables au transport**

Le Codex Alimentarius, élaboré conjointement par la FAO et l'OMS, constitue la référence mondiale en matière de principes généraux d'hygiène alimentaire. Il établit plusieurs obligations fondamentales pour le transport des denrées :

- les véhicules et conteneurs doivent être conçus pour protéger les aliments contre toute contamination ;
- les surfaces en contact avec les aliments doivent être propres, lisses, non absorbantes et faciles à désinfecter ;
- les produits crus et cuits doivent être transportés séparément ;
- et les aliments doivent être maintenus à des températures adaptées afin de prévenir la prolifération microbienne.

Ces principes s'appliquent à toutes les étapes logistiques, du chargement à la livraison, et constituent la base des Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH) et du système HACCP. Le Codex souligne également l'importance de la formation du personnel au respect des règles d'hygiène du transport et à la gestion des risques liés aux denrées périssables.

## **5.3. Règlement (CE) n° 852/2004 – Hygiène des denrées alimentaires**

Le Règlement (CE) n° 852/2004 encadre de manière stricte l'hygiène des denrées alimentaires, y compris durant leur transport. Il impose aux exploitants du secteur alimentaire de garantir que

:

- les locaux et équipements de transport soient entretenus, nettoyés et désinfectés régulièrement ;
- les produits soient protégés contre toute contamination pendant leur déplacement ;
- les matières premières et produits finis soient séparés afin d'éviter les contaminations croisées ;
- et que la chaîne du froid soit respectée sans interruption.

Le règlement exige également une documentation complète comprenant :

- les procédures de nettoyage et de désinfection des véhicules ;
- les relevés de température ;
- et les rapports d'inspection ou d'audit.

Cette réglementation constitue la base légale de référence à l'échelle internationale. tout en servant de référence internationale pour les pays exportateurs de produits agroalimentaires vers le marché international

#### **5.4. Accord ATP – Transport international des denrées périssables**

L'Accord ATP (Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs), adopté par la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, définit les exigences techniques minimales pour le transport international des denrées périssables.

Il s'applique à tous les produits nécessitant un contrôle de température, tels que les viandes, produits laitiers, poissons, fruits et légumes frais, ainsi que les plats préparés. L'Accord fixe notamment :

- les catégories de véhicules isothermes, réfrigérés et frigorifiques ;
- les valeurs limites de température selon le type de produit transporté ;
- les modalités d'inspection et de certification des véhicules ;
- et les procédures d'entretien et de contrôle des équipements frigorifiques.

Chaque véhicule utilisé pour le transport international doit disposer d'un certificat ATP valide, délivré par une autorité compétente après vérification de sa conformité technique.

Cette norme garantit que les conditions de transport répondent aux exigences de sécurité sanitaire et de performance thermique reconnues au niveau mondial.

### **5.5. FDA Food Code – Exigences américaines**

Aux États-Unis, le *Food Code* établi par la Food and Drug Administration définit les règles fédérales relatives au transport, à la conservation et à la manipulation des aliments. Il précise notamment :

- les températures maximales autorisées pour le transport des denrées réfrigérées ( $\leq 5$  °C) et surgelées ( $\leq -18$  °C) ;
- les exigences relatives à l'entretien des véhicules et à la propreté des équipements ;
- la formation obligatoire des employés sur la sécurité alimentaire ;
- et les procédures d'enregistrement et de vérification des contrôles de température.

Ce code s'aligne sur les recommandations internationales en matière de prévention des contaminations et de maîtrise microbiologique pendant le transport. Son application contribue à harmoniser les pratiques entre les industries agroalimentaires européennes et nord-américaines, tout en renforçant la cohérence des normes internationales de sécurité alimentaire.

### **5.6. ISO 22000:2018 – Système de management de la sécurité des aliments**

La norme ISO 22000:2018 constitue un cadre global de management intégré de la sécurité alimentaire.

Elle complète les textes réglementaires en introduisant des exigences organisationnelles et documentaires, telles que :

- la mise en place d'un système de traçabilité couvrant toutes les étapes, y compris le transport ;
- la gestion documentée des non-conformités et des actions correctives ;
- la formation continue du personnel à la sécurité des aliments ;
- les revues périodiques de la performance du système qualité ;
- et la communication transparente entre les acteurs de la chaîne alimentaire.

Cette norme relie les exigences techniques (Codex, CE, ATP, FDA) à une approche de management par processus, garantissant la cohérence et la fiabilité de l'ensemble du système qualité.

Elle encourage également l'utilisation d'outils numériques (enregistreurs de données, capteurs connectés, blockchain) afin d'améliorer la traçabilité en temps réel et la fiabilité des registres.

## **5.7. Complémentarité des cadres normatifs et bonnes pratiques**

L'application coordonnée de ces différents textes permet d'établir un système logistique conforme aux standards internationaux de sécurité alimentaire. Chaque cadre joue un rôle spécifique :

- le Codex Alimentarius établit les fondements hygiéniques universels ;
- le Règlement (CE) n° 853/2004 définit les obligations légales européennes ;
- l'Accord ATP fixe les exigences techniques du transport ;
- le FDA Food Code renforce les paramètres thermiques et microbiologiques ;
- et la norme ISO 22000:2018 intègre l'ensemble dans un système de management documenté.

Cette complémentarité assure la cohérence internationale des pratiques, réduit les risques sanitaires et économiques, et favorise la sécurité du commerce alimentaire mondial. En appliquant ces réglementations, les entreprises protègent la santé publique, limitent les pertes post-récolte et renforcent la confiance du consommateur dans la chaîne alimentaire.

## **2.2. Stockage et la conservation des matières premières et ingrédients**

### **1. Objectifs et principes du stockage alimentaire**

#### **1.1. Rôle et finalité du stockage dans la chaîne alimentaire**

Le stockage alimentaire constitue une étape stratégique du système de production et de distribution.

Il a pour objectif principal de préserver la qualité initiale des matières premières et des produits finis jusqu'à leur transformation ou leur consommation. Cette opération doit être réalisée dans des conditions qui empêchent la prolifération microbienne, réduisent les risques de

contamination croisée et préviennent la détérioration physique des produits. Une gestion optimale du stockage permet de :

- maintenir les caractéristiques organoleptiques (couleur, texture, arôme, saveur) ;
- préserver la valeur nutritionnelle ;
- et assurer la sécurité sanitaire des aliments destinés au consommateur.

Les pratiques de stockage font partie intégrante des Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH) et du système HACCP, piliers essentiels de la norme ISO 22000:2018 sur la gestion de la sécurité des denrées alimentaires.

## **1.2. Exigences générales de conception des locaux de stockage**

Les locaux de stockage doivent être conçus, construits et entretenus de manière à garantir la salubrité des produits. Les conditions structurelles de base sont les suivantes :

- **Propreté et entretien régulier** : les sols, murs et plafonds doivent être faciles à nettoyer, résistants à la corrosion et réalisés avec des matériaux non absorbants.
  - **Sécheresse et ventilation** : les zones doivent être sèches, propres et bien ventilées afin d'éviter la condensation et la formation de moisissures.
  - **Protection contre les nuisibles** : les installations doivent être protégées contre l'intrusion d'insectes, de rongeurs et d'oiseaux grâce à des moustiquaires, des joints d'étanchéité et des dispositifs de lutte intégrée.
  - **Éclairage et signalisation** : un éclairage suffisant doit permettre les inspections visuelles et la signalisation doit clairement identifier les zones de stockage.
- Les zones de stockage doivent permettre une séparation physique nette entre :

- produits crus et produits transformés ;
- denrées périssables et non périssables ;
- produits alimentaires et non alimentaires (emballages, produits d'entretien, etc.).

## **1.3. Conditions environnementales du stockage**

Les paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité et la circulation de l'air influencent directement la qualité microbiologique et physicochimique des produits stockés.

### **a. Température**

La température de stockage doit être adaptée à la nature du produit :

- **Produits secs** : température inférieure à 25 °C et humidité relative inférieure à 60 %.
- **Produits réfrigérés** : température  $\leq 5$  °C.
- **Produits surgelés** : température  $\leq -18$  °C.

Ces seuils visent à limiter la croissance microbienne et à prévenir les altérations enzymatiques, assurant ainsi la stabilité et la qualité des produits pendant leur conservation.

### **b. Humidité et aération**

Une ventilation adéquate empêche l'accumulation d'humidité et favorise une stabilité thermique homogène dans l'ensemble du local.

Le renouvellement régulier de l'air est indispensable pour éviter la condensation sur les parois et les emballages, qui constitue une source potentielle de développement de moisissures et de corrosion.

### **c. Équipements de suivi**

La norme ISO 22000:2018 exige la présence d'instruments de mesure et d'enregistrement fiables pour surveiller la température et l'humidité dans les locaux de stockage. Les dispositifs recommandés incluent :

- des thermomètres et hygromètres calibrés ;
- des enregistreurs numériques automatiques ;
- et des systèmes d'alarme en cas de dépassement des seuils critiques.

Les relevés doivent être archivés et tenus à disposition lors des inspections internes ou des audits de certification, afin de démontrer la maîtrise des paramètres environnementaux.

#### **1.4. Séparation et organisation interne du stockage**

Une organisation rationnelle du stockage permet de prévenir les contaminations croisées et d'optimiser la rotation des stocks.

Les principes généraux à respecter sont les suivants :

- les produits crus doivent être séparés des produits cuits ou prêts à consommer ;
- les denrées périssables doivent être conservées dans des zones réfrigérées distinctes avec contrôle de température ;
- les produits contenant des allergènes doivent être stockés dans des zones clairement identifiées et étiquetées afin d'éviter tout contact avec des produits non allergènes ;
- les produits chimiques et non alimentaires doivent être stockés dans des locaux séparés, ventilés et fermés à clé.

La règle **FEFO (First Expired, First Out)** doit être appliquée pour les produits périssables, afin de garantir l'utilisation prioritaire des lots dont la date limite est la plus proche. Les zones de circulation doivent rester dégagées afin de faciliter la manutention, réduire les risques d'accidents et permettre un nettoyage régulier.

#### **1.5. Hygiène et maintenance des locaux**

Le nettoyage et la désinfection réguliers des zones de stockage constituent une exigence essentielle des Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH). Ces opérations doivent suivre un plan documenté précisant :

- la fréquence des opérations ;
- les produits chimiques utilisés (compatibles avec le contact alimentaire) ;
- les zones ciblées (sols, étagères, équipements) ;
- et le nom du responsable chargé de l'exécution.

L'efficacité du nettoyage peut être vérifiée par :

- des tests microbiologiques de surface (tamponnages) ;
- des analyses rapides de type ATP ;
- ou des inspections visuelles.

L'entretien structurel des locaux (peinture, ventilation, drainage) doit être planifié périodiquement pour garantir un environnement sain, sûr et fonctionnel.

## **1.6. Sécurité et surveillance**

La sécurité des produits stockés repose sur une surveillance continue des conditions physiques et microbiologiques. Il est recommandé de :

- mettre en place des procédures d'accès contrôlé aux zones de stockage ;
- interdire l'entrée aux personnes non autorisées ;
- consigner toute intervention (livraison, inspection, maintenance) dans un registre ;
- et réaliser des audits internes réguliers sur l'état des installations.

La formation du personnel à l'hygiène, à la détection des anomalies (odeurs, fuites, infestations) et à la gestion rapide des non-conformités contribue à maintenir un haut niveau de maîtrise sanitaire dans les zones de stockage.

## **2. Types de stockage selon la nature des produits**

### **a. Stockage des produits secs**

#### **2.1. Définition et caractéristiques générales**

Les produits secs regroupent l'ensemble des denrées à faible activité de l'eau ( $a_w$ ), dont la teneur en humidité est insuffisante pour permettre un développement microbien rapide. Cette catégorie comprend notamment les farines, céréales, légumineuses, sucres, épices, additifs alimentaires, poudres de lait, levures sèches, fruits secs et produits déshydratés. Le stockage de ces produits vise à préserver leurs propriétés physicochimiques et organoleptiques, à éviter la réabsorption d'humidité, et à prévenir toute contamination biologique (microorganismes, insectes, rongeurs) ou chimique (odeurs, vapeurs, produits d'entretien).

Bien que stables à température ambiante, ces produits demeurent sensibles à l'humidité, aux variations thermiques et aux contaminations croisées.

Une gestion rigoureuse de leurs conditions de stockage est donc indispensable pour garantir leur sécurité et leur durée de conservation.

## 2.2. Conditions environnementales de stockage

Les conditions optimales de stockage des produits secs concernent principalement la température, l'humidité et la ventilation du local.

- **Température** : inférieure à 25 °C, afin d'éviter la condensation et la croissance microbienne.
- **Humidité relative** : inférieure à 60 %, pour empêcher la reprise d'eau et la formation de moisissures.
- **Ventilation** : une circulation d'air constante et homogène permet d'éviter la stagnation d'humidité et la prolifération d'insectes de stockage. Une humidité excessive favorise la germination des spores fongiques et la production de mycotoxines. Les conditions humides supérieures à 70 % d'humidité relative peuvent entraîner la formation d'aflatoxines, d'ochratoxines et d'autres métabolites toxiques produits par des champignons du genre *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*. Ces composés représentent un risque majeur pour la santé humaine, en raison de leurs effets hépatotoxiques, néphrotoxiques et cancérigènes. Ainsi, le contrôle de l'humidité ambiante et la prévention de la condensation constituent des éléments essentiels du plan d'hygiène des entrepôts de produits secs.

## 2.3. Aménagement et organisation des zones de stockage

Les zones destinées au stockage des produits secs doivent être propres, bien aérées et exemptes d'humidité.

Elles doivent être construites avec des matériaux non absorbants tels que le béton lisse ou la peinture lavable, et conçues de manière à éviter tout contact direct entre les produits et le sol ou les murs. Les produits doivent être entreposés sur des palettes en plastique ou en bois traité, disposées de manière à :

- maintenir une distance minimale de 15 cm du sol ;
- laisser 20 cm entre les murs et les piles ;
- et garantir un espace suffisant pour la circulation de l'air et les inspections sanitaires.

Ces distances préviennent la capillarité et l'humidité de contact, facilitent le nettoyage et la désinfection, et permettent la détection rapide des infestations d'insectes ou de rongeurs. Les palettes doivent être propres, sèches et désinfectées régulièrement conformément aux Bonnes Pratiques d'Hygiène. L'utilisation de palettes en bois brut non traité est déconseillée, car elles peuvent abriter des insectes ou des spores de moisissures.

## 2.4. Gestion des risques et contrôles préventifs

La prévention des contaminations biologiques et chimiques constitue un élément central du plan de maîtrise sanitaire en stockage. Les opérateurs doivent mettre en œuvre :

- un programme de lutte contre les nuisibles, avec un suivi régulier des pièges et appâts ;
- un système de nettoyage planifié incluant dépoussiérage, lavage et désinfection ;
- et un registre de suivi de la température et de l'humidité.

Des contrôles microbiologiques et visuels doivent être réalisés périodiquement pour détecter :

- la présence d'humidité, de moisissures ou d'insectes ;
- l'état des emballages et des surfaces ;
- ainsi que la conformité des dates de péremption selon la règle **FEFO (First Expired, First Out)**.

Le personnel doit être formé à la reconnaissance des signes de détérioration tels que les odeurs de renfermé, les traces de moisissures ou les fluctuations anormales d'humidité.

## 2.5. Entretien et hygiène des équipements de stockage

Les rayonnages, étagères et conteneurs doivent être conçus pour résister à la corrosion et supporter les charges prévues sans déformation. Les matériaux les plus adaptés sont l'inox, l'acier galvanisé ou le plastique alimentaire. Chaque opération de nettoyage doit être documentée, datée et signée par le responsable, et réalisée avec des produits homologués pour usage alimentaire. Il est déconseillé d'utiliser des pulvérisations de désinfectants à proximité de denrées non emballées ; un rinçage à l'eau potable est obligatoire après chaque application. Une inspection visuelle hebdomadaire est recommandée afin de vérifier la propreté des zones difficiles d'accès, telles que les angles, le dessous des palettes et les conduits de ventilation.

## 2.6. Suivi documentaire et traçabilité

La tenue d'une traçabilité complète des opérations de stockage est une exigence essentielle des systèmes de management de la sécurité des aliments.

Chaque lot doit être identifié par un code interne mentionnant :

- la date d'entrée en stock ;
- la provenance ou le fournisseur ;

- les conditions de conservation (température, humidité) ;
- et la date limite d'utilisation ou de péremption.

Les enregistrements doivent être conservés et disponibles lors des audits internes, des inspections officielles ou des contrôles qualité. Cette documentation garantit la transparence, facilite le suivi des produits et permet une réaction rapide en cas de non-conformité ou d'alerte sanitaire.

## **b. Stockage des produits réfrigérés**

### **2.1. Rôle et finalité du stockage réfrigéré**

Le stockage réfrigéré constitue une étape essentielle de la chaîne du froid, dont la finalité est de ralentir les activités enzymatiques et microbiennes susceptibles d'altérer la qualité sanitaire et organoleptique des aliments. Le maintien des denrées à basse température permet de prolonger leur durée de vie microbiologique, de préserver leurs propriétés nutritionnelles et de réduire le risque de toxi-infections alimentaires. Ce mode de conservation concerne principalement les denrées périssables telles que :

- les viandes et volailles fraîches ;
- les poissons et produits de la mer ;
- les produits laitiers et œufs ;
- ainsi que les fruits et légumes frais à conservation courte.

Ces produits présentent une activité de l'eau élevée ( $a_w > 0,90$ ), créant un environnement favorable à la croissance de microorganismes pathogènes tels que *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp.*, *Pseudomonas spp.* ou *Bacillus cereus*. Le contrôle de la température constitue donc une mesure préventive essentielle pour limiter leur développement.

### **2.2. Conditions thermiques de conservation**

La température optimale de stockage pour les denrées réfrigérées doit être comprise entre 0 °C et 4 °C, sans dépasser +5 °C.

- En dessous de 0 °C, un gel partiel peut se produire, entraînant des modifications irréversibles de la texture (séchage, cristallisation, perte de jus).
- Au-dessus de 4 °C, le risque de prolifération bactérienne augmente considérablement,

notamment pour les microorganismes psychrotrophes comme *Listeria* ou *Yersinia enterocolitica*.

Les chambres froides doivent être :

- équipées de thermomètres calibrés, placés à des points représentatifs du volume ;
- munies de systèmes d'enregistrement automatique pour assurer une surveillance continue de la température et de l'humidité relative ;
- dotées d'un système d'alarme déclenchant une notification en cas de dépassement des seuils critiques.

Les relevés de température doivent être vérifiés et archivés quotidiennement afin de pouvoir être présentés lors des audits internes ou des inspections officielles.

### **2.3. Organisation et disposition des produits**

Une organisation rationnelle du stockage est indispensable pour garantir une distribution homogène du froid et éviter la formation de zones de stagnation d'air. Les produits doivent être disposés de manière à permettre la libre circulation de l'air autour des emballages.

Un espacement de 10 à 15 cm doit être maintenu entre les parois froides et les produits afin d'éviter le gel localisé. Les grilles de ventilation ne doivent jamais être obstruées par les palettes ou les cartons. Les denrées doivent être placées sur des supports ou palettes propres, à une hauteur minimale de 15 cm du sol, pour faciliter le nettoyage et les inspections sanitaires. Les produits crus (viande, poisson) doivent être séparés des produits prêts à consommer (charcuterie, produits laitiers, plats cuisinés) afin d'éviter toute contamination croisée. La rotation **FEFO (First Expired, First Out)** doit être systématiquement appliquée pour assurer la distribution prioritaire des lots à date de péremption la plus proche.

### **2.4. Entretien, nettoyage et dégivrage des installations frigorifiques**

L'entretien préventif des chambres froides est essentiel pour garantir leur performance et la sécurité sanitaire des produits. Les opérations de dégivrage doivent être planifiées régulièrement afin de :

- maintenir l'efficacité thermique des évaporateurs ;
- éviter la formation de glace sur les parois et plafonds ;
- prévenir les contaminations microbiennes liées à l'eau de fonte stagnante.

Les condensats doivent être évacués efficacement et les surfaces internes (murs, plafonds, joints, ventilateurs) nettoyées avec des produits compatibles avec le contact alimentaire. Toutes les procédures de nettoyage et d'entretien doivent être documentées, validées et conformes aux exigences réglementaires. Les surfaces doivent être désinfectées après chaque dégivrage, et l'état des joints d'étanchéité vérifié régulièrement pour éviter l'apparition de moisissures.

Les grilles, rayonnages et palettes doivent être désinfectés avec des produits homologués, puis rincés à l'eau potable.

## **2.5. Surveillance, enregistrements et maintenance technique**

La surveillance continue des paramètres critiques tels que la température, l'humidité et la circulation de l'air est indispensable pour prévenir tout incident susceptible d'altérer les produits stockés

Des capteurs électroniques calibrés doivent enregistrer en permanence les conditions internes. Les courbes de température doivent être vérifiées quotidiennement et toute alarme de dérive thermique doit donner lieu à une fiche d'écart et à une action corrective immédiate. Un programme de maintenance préventive doit être établi, incluant la vérification périodique des capteurs, des alarmes et des équipements de régulation, afin d'assurer la fiabilité du système de réfrigération et la conformité du stockage aux normes de sécurité alimentaire.

## **2.5. Maintenance préventive et suivi des installations frigorifiques**

Les opérations de maintenance préventive, telles que la vérification du fluide frigorigène, le nettoyage des serpentins et l'inspection des ventilateurs ou des joints, doivent être planifiées selon un calendrier documenté. L'objectif principal de cette planification est d'éviter toute panne ou défaillance pouvant entraîner une rupture de la chaîne du froid et compromettre la qualité sanitaire des aliments. Chaque intervention doit être consignée dans un registre de maintenance précisant la date, la nature de l'opération, les observations techniques et les actions correctives éventuelles.

## **2.6. Hygiène du personnel et prévention des contaminations croisées**

Le personnel travaillant dans les chambres froides doit respecter scrupuleusement les Bonnes Pratiques d'Hygiène (BPH). Les règles fondamentales incluent :

- le port obligatoire d'une tenue de travail propre et adaptée (veste isotherme, gants, charlotte) ;
- l'interdiction de tout contact entre produits crus et produits prêts à consommer ;
- la désinfection systématique des outils et chariots après chaque utilisation ;
- et le contrôle strict des allées et venues dans les zones froides.

La formation du personnel doit aborder la reconnaissance des signes de dérive thermique (givre excessif, condensation, température fluctuante) ainsi que la procédure d'alerte en cas d'anomalie.

La sensibilisation continue des opérateurs constitue un facteur déterminant pour maintenir un haut niveau d'hygiène et prévenir les contaminations croisées dans les entrepôts réfrigérés.

### **c. Stockage des produits surgelés**

#### **2.1. Objectifs et principes du stockage à basse température**

Le stockage des produits surgelés vise à stabiliser les denrées périssables en maintenant une température suffisamment basse pour inhiber les activités enzymatiques, chimiques et microbiologiques.

Les produits surgelés doivent être conservés à une température inférieure ou égale à  $-18\text{ °C}$ , seuil garantissant leur stabilité physicochimique tout au long de la conservation et du transport. À cette température, l'eau libre des aliments est presque entièrement solidifiée, ce qui :

- empêche la croissance microbienne ;
- ralentit les réactions enzymatiques responsables des altérations ;
- et préserve la texture, la couleur et les propriétés nutritionnelles des produits.

Toute élévation de température au-dessus de  $-15\text{ °C}$  provoque une recristallisation de l'eau, générant des cristaux de glace plus gros, responsables de la déshydratation cellulaire et d'une perte de texture.

#### **2.2. Normes et exigences réglementaires**

L'Accord ATP fixe les exigences techniques relatives au transport et au stockage des denrées périssables sous température dirigée

Il impose notamment :

- une température interne constante inférieure ou égale à  $-18\text{ °C}$  ;
- un contrôle thermique permanent via des enregistreurs étalonnés ;
- et une uniformité du froid dans l'ensemble du local de conservation.

La norme ISO 22000:2018 et le Codex Alimentarius exigent la mise en place d'un système de surveillance continue des températures intégré au plan HACCP. Les enregistrements doivent être datés, archivés et vérifiables, afin d'assurer la traçabilité complète de chaque lot. Les réglementations européennes et américaines convergent sur ces principes, en soulignant la nécessité d'une stabilité thermique permanente pour éviter toute décongélation partielle.

### **2.3. Conditions techniques et structurelles des chambres froides**

Les chambres de congélation ou de stockage des produits surgelés doivent garantir une température homogène, stable et mesurable en tout point. Les exigences structurelles minimales comprennent :

- des portes à fermeture hermétique pour éviter les infiltrations d'air chaud ;
- une isolation thermique renforcée à l'aide de panneaux sandwichs isolants ;
- une ventilation homogène assurant la circulation de l'air froid dans l'ensemble du volume ;
- et un enregistreur continu de température pour un suivi ininterrompu.

Les capteurs et thermomètres doivent être calibrés régulièrement et placés à des points critiques tels que les zones proches des portes, les angles et le centre de la chambre. Une variation thermique supérieure à  $\pm 2\text{ °C}$  entre les points de mesure indique un défaut d'uniformité qu'il convient de corriger par ajustement du système de ventilation.

### **2.4. Organisation et manipulation des produits**

Les produits surgelés doivent être disposés de manière à garantir une libre circulation de l'air froid, un accès facile aux lots récents et une inspection rapide sans manipulation excessive. Les emballages doivent être :

- résistants aux basses températures ;
- imperméables à l'humidité et aux graisses ;
- et hermétiquement scellés afin d'éviter la formation de givre interne.

Les produits doivent être manipulés avec soin pour éviter toute rupture de la chaîne du froid, notamment lors du chargement, du déchargement ou des transferts entre zones de stockage.

Les palettes doivent être espacées d'au moins 15 cm du sol et de 20 cm des murs, conformément aux recommandations internationales. Cette disposition favorise la circulation uniforme de l'air froid et limite la condensation sur les parois ou les surfaces d'emballage. Il est strictement interdit de stocker dans la même enceinte :

- des produits crus et des produits cuits ;
- des denrées alimentaires et des substances non alimentaires ;
- ou des produits dégageant des odeurs fortes (poissons, oignons, épices), susceptibles de contaminer d'autres aliments par absorption volatile.

## **2.5. Gestion des remontées de température**

Toute remontée de température au-delà de  $-15\text{ °C}$  constitue une non-conformité critique. Un tel écart provoque la recristallisation partielle de l'eau contenue dans les aliments, entraînant une altération de la texture (ramollissement, déstructuration cellulaire) et une perte d'eau à la décongélation (*drip loss*), indicatrice d'une diminution de la qualité technologique. Ces anomalies doivent être consignées dans un registre de surveillance mentionnant :

- la date et la durée de l'écart ;
- la température maximale atteinte ;
- les lots concernés ;
- et les mesures correctives appliquées (réévaluation, destruction ou reclassement).

Les chambres doivent être équipées d'un système d'alarme sonore et visuelle relié à un dispositif de supervision en temps réel. Les systèmes numériques connectés permettent aujourd'hui une alerte instantanée en cas de défaillance énergétique ou mécanique, garantissant ainsi la continuité de la chaîne du froid.

## **2.6. Entretien, hygiène et sécurité des installations**

Un plan de nettoyage et de désinfection programmé doit être appliqué à toutes les zones de stockage frigorifique

Les opérations doivent être planifiées de manière à éviter une élévation excessive de la température et comporter :

- le dégivrage régulier des évaporateurs et des parois ;
- le nettoyage des sols et des étagères à l'eau chaude (non glacée) ;
- et l'application de désinfectants homologués pour le contact alimentaire.

Les produits chimiques utilisés doivent être stables à basse température et rincés soigneusement à l'eau potable après usage. Le personnel chargé de ces opérations doit être formé à la prévention des chocs thermiques et équipé de protections adéquates (vêtements isothermes, gants, bottes antidérapantes). La maintenance préventive comprend également la vérification des portes, joints d'étanchéité, fluides frigorigènes et capteurs thermiques, afin d'assurer la performance et la sécurité du système de réfrigération.

## **2.7. Contrôle de la qualité et traçabilité**

Chaque lot de produits surgelés doit être accompagné d'une fiche de suivi mentionnant :

- la date d'entrée en stockage ;
- la température de congélation ;
- la température de stockage enregistrée ;
- et la date limite de consommation.

Ces informations doivent être intégrées au système documentaire de traçabilité pour garantir une gestion rapide et efficace des non-conformités éventuelles. Des audits internes réguliers ainsi que des vérifications microbiologiques ponctuelles peuvent être réalisés sur les surfaces et les produits afin de confirmer le maintien de la qualité sanitaire et de la conformité réglementaire.

## **d. Stockage sous atmosphère contrôlée**

### **2.1. Principe général et objectifs**

Le stockage sous atmosphère contrôlée (AC) est une technique avancée de conservation post-récolte destinée à prolonger la durée de vie des produits frais tout en maintenant leur qualité sensorielle et nutritionnelle. Cette méthode repose sur la modification et le maintien constant de la composition gazeuse de l'air ambiant dans les chambres de stockage, par régulation des

concentrations en oxygène (O<sub>2</sub>), dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et azote (N<sub>2</sub>). Elle s'applique particulièrement aux fruits et légumes frais, aux céréales, aux graines oléagineuses et aux produits secs à forte valeur ajoutée (noix, café, épices). Cette technologie permet de ralentir la respiration et la maturation des produits végétaux tout en limitant la croissance microbienne et fongique.

## 2.2. Mécanismes de conservation

Le principe repose sur le contrôle simultané de trois paramètres :

**La teneur en oxygène (O<sub>2</sub>)**, réduite entre 1 et 5 %, afin de diminuer la respiration cellulaire et l'activité enzymatique des produits, retardant ainsi leur vieillissement.

**La teneur en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**, maintenue entre 2 et 10 % selon la nature du produit, qui inhibe la croissance des microorganismes aérobies et limite le développement de certaines moisissures.

**La teneur en azote (N<sub>2</sub>)**, utilisé comme gaz neutre de compensation, remplaçant partiellement l'oxygène et stabilisant l'atmosphère interne.

**2.2. Ajustement de l'équilibre gaz/produit** L'équilibre entre la composition gazeuse et le produit stocké est ajusté en fonction de la nature du produit et de sa sensibilité respiratoire.

Par exemple :

- les pommes et poires se conservent dans une atmosphère contenant 2–3 % d'O<sub>2</sub> et 3–5 % de CO<sub>2</sub> ;
  - les fruits rouges (fraises, framboises) nécessitent une atmosphère plus riche en CO<sub>2</sub> afin de limiter la croissance fongique ;
  - les céréales peuvent être stockées sous atmosphère quasi anoxique (O<sub>2</sub> < 1 %) pour inhiber le développement d'insectes et de moisissures.
- Ces conditions sont surveillées en continu et régulées par des capteurs et régulateurs électroniques reliés à un système automatisé de contrôle.

## 2.3. Avantages technologiques et hygiéniques

Le stockage sous atmosphère contrôlée présente de nombreux avantages :

- **Prolongation de la durée de vie post-récolte** : la réduction de la respiration ralentit la maturation et le flétrissement des fruits et légumes.

- **Préservation des qualités sensorielles** : maintien de la couleur, du croquant, de la jutosité et de la saveur naturelle.

- **Réduction des pertes post-récolte** : cette méthode peut prolonger la durée de conservation de certaines denrées de deux à six mois sans altération notable.

- **Limitation de la flore microbienne** : la diminution de l'oxygène freine le développement de microorganismes aérobies et de moisissures, notamment celles productrices de mycotoxines.

- **Conservation de la valeur nutritionnelle** : les vitamines sensibles à l'oxydation (vitamine C, caroténoïdes, polyphénols) sont mieux préservées qu'en atmosphère ordinaire. De plus, cette méthode ne nécessite pas l'emploi d'additifs chimiques, ce qui la rend conforme aux principes du *Codex Alimentarius* et aux Bonnes Pratiques Agricoles et de Stockage.

#### 2.4. Conditions techniques et infrastructures nécessaires

Les chambres destinées au stockage sous atmosphère contrôlée doivent répondre à des critères techniques stricts :

- **Étanchéité parfaite** : aucune fuite de gaz n'est tolérée ; les portes et joints doivent être hermétiques.

- **Système de régulation automatique** : des capteurs mesurent en continu les concentrations gazeuses (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), la température et l'humidité relative.

- **Ventilation homogène** : elle assure une distribution uniforme des gaz et évite les zones de stagnation.

- **Température contrôlée** : comprise entre 0 et 5 °C pour les fruits et légumes frais, et entre 10 et 20 °C pour les céréales.

- **Enregistrement continu** : les données de température, d'humidité et de composition gazeuse doivent être archivées et datées. Une maintenance périodique est indispensable pour vérifier le calibrage des capteurs, l'état

des soupapes de régulation et la stabilité de la composition gazeuse. Les systèmes modernes intègrent des logiciels HACCP assurant un suivi en temps réel et des alertes automatiques en cas de dérive.

## **2.5. Sécurité et hygiène du stockage**

Bien que le stockage sous atmosphère contrôlée réduise les risques microbiologiques, il exige une hygiène stricte des locaux et du matériel. Les surfaces internes doivent être faciles à nettoyer, résistantes à la corrosion et entretenues selon un plan de nettoyage documenté. Le personnel doit être formé aux risques d'asphyxie liés à la manipulation des gaz, à la gestion des alarmes et au respect des procédures de sécurité.

## **2.6. Applications spécifiques**

Les principales applications du stockage sous atmosphère contrôlée concernent :

- **Les fruits climactériques** (pommes, poires, bananes, mangues) : ralentissement de la maturation et prévention du brunissement enzymatique.
- **Les fruits non climactériques** (fraises, agrumes, raisins) : prévention des moisissures et maintien de la fermeté.
- **Les légumes racines et tubercules** (pommes de terre, carottes, oignons) : réduction du bourgeonnement et limitation de la déshydratation.
- **Les céréales et graines** : prévention du développement des insectes de stockage (*Sitophilus*, *Tribolium*) et des champignons producteurs d'aflatoxines.

Cette technologie est largement utilisée dans les industries agroalimentaires, les entrepôts de fruits et légumes, les coopératives agricoles et les terminaux portuaires, où elle contribue à maintenir la qualité des produits destinés à l'exportation.

## **3. Méthodes de rotation et de suivi des stocks**

### **3.1. Importance de la rotation des stocks dans la gestion de la qualité**

La rotation des stocks représente une composante essentielle du système de gestion de la sécurité alimentaire, puisqu'elle permet de garantir la fraîcheur des produits, de réduire les pertes et d'éviter la mise sur le marché de denrées périmées ou altérées.

D'après le *Codex Alimentarius* (2020) et la FAO (2021), une rotation efficace contribue directement à la traçabilité, à la maîtrise des risques microbiologiques et au respect des réglementations relatives à la durée de conservation. La rotation vise à :

- garantir que les produits les plus anciens soient utilisés ou distribués avant les plus récents ;
- éviter l'accumulation de stocks obsolètes ou périmés ;
- et maintenir une cohérence entre la date de production, la durée de stockage et la qualité sanitaire du produit.

Ces principes s'intègrent dans les procédures HACCP et les exigences de la norme ISO 22000:2018, qui impose un suivi systématique de la chronologie des lots tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

### **3.2. Principes de rotation : FIFO et FEFO**

Deux modèles de rotation des stocks sont universellement reconnus :

#### **a. Le principe FIFO (First In, First Out)**

Le principe FIFO stipule que les premiers produits entrés en entrepôt doivent être les premiers à être utilisés ou distribués. Ce modèle convient particulièrement aux denrées non périssables (farines, conserves, céréales, additifs, etc.), dont la qualité dépend principalement du temps d'entreposage et des conditions environnementales.

#### **b. Le principe FEFO (First Expired, First Out)**

Le principe FEFO est appliqué aux produits périssables tels que les produits laitiers, les viandes, les poissons, les fruits, les légumes ou les produits surgelés. Il garantit que les lots dont la date limite d'utilisation ou de consommation est la plus proche soient écoulés ou utilisés en priorité. Ce système contribue à :

- réduire les pertes post-récolte ;
- minimiser les risques sanitaires liés aux produits altérés ;
- et assurer la conformité lors des inspections de la Commission européenne (2021) ou de la FDA (2022).

Les deux approches, FIFO et FEFO, sont complémentaires et doivent être intégrées dans la stratégie globale de gestion logistique et de qualité des denrées alimentaires.

### **3.3. Identification et codification des lots**

La norme ISO 22000:2018 impose qu'un code unique identifie chaque lot de matières premières ou de produits finis, garantissant une traçabilité ascendante (fournisseur) et descendante (client ou distributeur). Ce code doit inclure :

- la date de réception ou de production ;
- la date limite de consommation (DLC) ou d'utilisation (DLUO) ;
- le numéro de lot ou de série ;
- le nom ou le code du fournisseur ;
- et, le cas échéant, la zone ou chambre de stockage.

L'étiquetage des unités logistiques (palettes, cartons, conteneurs) doit être lisible, indélébile et conforme au plan de traçabilité interne. Les informations correspondantes doivent être saisies dans les registres et mises à jour à chaque mouvement de stock (entrée, transfert, sortie ou destruction). Une codification rigoureuse permet :

- la vérification rapide des non-conformités ;
- le rappel ciblé des produits défectueux ;
- et la démonstration de conformité lors des audits HACCP ou ISO.

### **3.4. Outils modernes de suivi et de gestion numérique des stocks**

Les technologies numériques ont considérablement amélioré la gestion des entrepôts alimentaires.

Selon la FAO (2021) et la norme ISO 22000:2018, les systèmes informatisés permettent désormais un suivi en temps réel des paramètres critiques (température, humidité, rotation des lots) et une traçabilité intégrale des produits.

#### **a. Logiciels ERP (Enterprise Resource Planning)**

Les systèmes ERP centralisent la gestion des achats, du stockage et de la distribution. Ils assurent :

- la mise à jour automatique des stocks après chaque transaction ;
- la gestion documentaire complète (bons de livraison, certificats d'analyse, fiches techniques) ;
- et la planification des approvisionnements en fonction des délais, de la demande et des capacités de stockage disponibles.

### **b. WMS (Warehouse Management Systems)**

Les *Warehouse Management Systems* (WMS) sont des logiciels spécialisés destinés à optimiser la gestion des entrepôts alimentaires. Ils permettent :

- le repérage en temps réel de la localisation des produits ;
- le contrôle continu des températures selon les zones (sec, réfrigéré, surgelé) ;
- la gestion des alarmes et des non-conformités ;
- ainsi que la génération de rapports automatisés pour les audits internes et externes.

Ces outils contribuent à renforcer la traçabilité, la conformité réglementaire et l'efficacité opérationnelle des installations de stockage.

### **c. Technologies de traçabilité avancée**

L'intégration de technologies numériques telles que :

- les codes-barres et QR codes,
- la radio-identification (RFID),
- et la blockchain alimentaire,

offre une traçabilité plus rapide, transparente et sécurisée tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Ces innovations réduisent les erreurs humaines, améliorent la réactivité en cas de non-conformité et garantissent la conformité aux exigences du *Codex Alimentarius* (2020) et de la norme ISO 22000 (2018).

La blockchain, en particulier, permet un enregistrement infalsifiable et partagé des informations, renforçant la confiance entre les producteurs, les distributeurs et les autorités sanitaires.

## **3.5. Surveillance, vérification et amélioration continue**

La surveillance périodique de la rotation et du suivi des stocks constitue une exigence majeure du plan de maîtrise sanitaire.

Selon la FAO (2021), les contrôles doivent porter sur :

- la cohérence entre les registres et les stocks réels ;
- la correcte application des principes FEFO et FIFO ;
- et la vérification des enregistrements de température dans les zones de stockage.

Les audits internes, tels que prescrits par la norme ISO 22000:2018, permettent d'évaluer la performance du système de gestion et d'identifier les écarts ou les points à améliorer. Les résultats sont consignés dans des rapports de suivi accompagnés d'actions correctives et préventives (CAPA).

Par ailleurs, la formation continue du personnel reste un pilier fondamental pour maintenir un haut niveau de compétence en matière de gestion logistique, de traçabilité et de sécurité sanitaire, conformément aux recommandations du *Codex Alimentarius* (2020) et de la WHO (2006).

#### **4. Prévention des altérations et contrôles périodiques**

##### **4.1. Nature et origine des altérations**

Les altérations des matières premières et des produits stockés peuvent être microbiologiques, chimiques ou physiques. Elles compromettent la qualité sanitaire, nutritionnelle et organoleptique des aliments et constituent un facteur de non-conformité majeure au regard des normes d'hygiène et de sécurité alimentaire.

##### **a. Altérations microbiologiques**

Elles sont causées par la croissance de microorganismes indésirables tels que les moisissures, les bactéries psychrotrophes capables de se multiplier à basse température et certaines levures de contamination. Ces agents peuvent provoquer une dégradation des composants organiques (lipides, protéines, glucides), la production de métabolites toxiques et des modifications organoleptiques telles que des odeurs, des saveurs et des changements de couleur.

## **b. Altérations chimiques**

Elles résultent principalement de l'oxydation des lipides, conduisant au rancissement et à la perte des acides gras essentiels, du brunissement enzymatique fréquent dans les fruits et légumes mal stockés, et des réactions de Maillard favorisées par l'humidité et les températures modérées, entraînant une décoloration et une perte de qualité nutritionnelle.

## **c. Altérations physiques**

Les altérations physiques regroupent la condensation due à des variations de température ou à une ventilation insuffisante, la déshydratation excessive provoquant un dessèchement des surfaces et une perte de masse, ainsi que la contamination particulaire provenant de poussières, fragments d'emballage, métaux ou verre. Ces dégradations compromettent la salubrité et la conformité réglementaire des denrées alimentaires.

## **4.2. Principes de prévention des altérations**

La prévention des altérations repose sur une maîtrise rigoureuse des paramètres de stockage, combinée à une hygiène structurée et vérifiable des zones de conservation.

### **a. Contrôle de la température et de l'humidité**

La stabilité thermique et hygrométrique constitue un facteur déterminant pour le maintien de la qualité. Les produits secs doivent être conservés à une température inférieure à 25 °C et à une humidité relative inférieure à 60 %, tandis que les produits réfrigérés et surgelés doivent être maintenus respectivement entre 0 et 4 °C et à une température inférieure ou égale à -18 °C. Des déviations répétées de température favorisent la condensation et la croissance microbienne. Les systèmes de surveillance doivent donc inclure des thermomètres calibrés, des dispositifs d'enregistrement automatique, des alarmes de dérive thermique et un registre de contrôle journalier.

### **b. Hygiène des zones de stockage**

Les locaux de stockage doivent être secs, ventilés et propres, dotés d'un plan de nettoyage et de désinfection documenté, et entretenus périodiquement pour éviter l'accumulation de poussières ou de débris organiques. L'entretien comprend la désinfection des sols, étagères, palettes et portes, le contrôle des joints d'étanchéité et des grilles de ventilation, ainsi que

la gestion des condensats dans les chambres froides. L'utilisation de produits désinfectants homologués et le rinçage à l'eau potable après nettoyage sont obligatoires.

### **c. Contrôle des nuisibles et des contaminants**

Un programme intégré de lutte contre les nuisibles (Integrated Pest Management, IPM) est requis pour prévenir les infestations d'insectes de stockage et la présence de rongeurs vecteurs de contamination. Les mesures incluent la mise en place d'appâts et de pièges identifiés, des inspections visuelles hebdomadaires et la tenue d'un registre de suivi. L'absence d'activité parasitaire doit être vérifiée à chaque inspection périodique conformément aux exigences réglementaires.

### **4.3. Inspections et contrôles périodiques**

Des inspections périodiques doivent être réalisées pour assurer le respect des conditions optimales de stockage et la détection précoce des anomalies. Ces inspections comprennent la vérification de la propreté des locaux, la mesure de la température et de l'humidité ambiante, le contrôle visuel des emballages et des étiquettes, la recherche de traces de moisissures, d'humidité ou de parasites, ainsi que l'évaluation de l'état des équipements frigorifiques. Chaque inspection doit être consignée dans un rapport daté et signé par le responsable qualité, mentionnant les non-conformités observées, les actions correctives appliquées et le statut de suivi (fermé ou en attente). Ces vérifications contribuent au respect du principe d'amélioration continue inscrit dans les normes internationales de sécurité alimentaire.

### **4.4. Audits internes et conformité réglementaire**

Les audits internes constituent un outil essentiel pour évaluer la conformité des pratiques de stockage aux exigences réglementaires. Ils doivent être planifiés à intervalles réguliers afin de vérifier la mise en œuvre des bonnes pratiques d'hygiène, de contrôler la traçabilité des lots et des opérations, et de s'assurer du respect des normes en vigueur. Les résultats des audits permettent d'identifier les écarts, de mettre en œuvre des actions correctives et de prévenir la récurrence des défaillances. Les rapports d'audit doivent être archivés et présentés lors des inspections officielles ou des évaluations de certification.

#### **4.5. Gestion des non-conformités et actions correctives**

Toute non-conformité détectée, telle qu'une panne frigorifique, une infiltration d'eau, une infestation, une rupture d'emballage ou une dérive thermique, doit être immédiatement signalée au responsable qualité. Un rapport d'anomalie doit être établi, les produits concernés doivent être isolés et une mesure corrective appliquée sans délai, qu'il s'agisse d'une réparation, d'un nettoyage, d'une destruction ou d'un reconditionnement. Les actions correctives doivent être suivies d'une vérification d'efficacité documentée dans le registre des anomalies. La traçabilité complète garantit la possibilité d'un rappel rapide en cas de non-conformité critique.

### **5. Importance de la formation et de la documentation**

#### **5.1. Rôle stratégique de la formation du personnel**

Le personnel chargé du stockage et de la manutention des denrées alimentaires occupe une place centrale dans la mise en œuvre des systèmes de management de la sécurité alimentaire. Une formation adéquate constitue un facteur déterminant pour prévenir les erreurs humaines, lesquelles représentent une cause majeure de non-conformités, de contaminations croisées et d'incidents de sécurité sanitaire. La formation du personnel vise à assurer la compréhension et l'application des Bonnes Pratiques d'Hygiène, à garantir le respect des procédures HACCP, à renforcer la responsabilisation individuelle dans la gestion des risques et à améliorer la réactivité en cas d'anomalie ou de dérive de température. Les employés doivent recevoir une formation adaptée à leurs tâches, responsabilités et niveau de risque, incluant la manipulation sécurisée des produits alimentaires, le nettoyage et la désinfection des zones de stockage, le contrôle et l'enregistrement des paramètres critiques (température, humidité, ventilation) ainsi que la gestion des produits non conformes.

#### **5.2. Contenu et modalités de la formation**

Les programmes de formation doivent être planifiés, documentés et renouvelés périodiquement. Ils doivent couvrir les différents aspects de la gestion de la sécurité alimentaire.

##### **a. Les fondamentaux de l'hygiène alimentaire**

Ils comprennent les principes des Bonnes Pratiques d'Hygiène et de Fabrication, la prévention des contaminations physiques, chimiques et biologiques, l'hygiène personnelle (tenue, lavage

des mains, comportement en zone de stockage), ainsi que la maîtrise des nuisibles et la gestion des déchets.

#### **b. Les procédures HACCP et les points critiques de contrôle (CCP)**

Les opérateurs doivent comprendre les principes du système HACCP, notamment l'analyse des dangers, la détermination des points critiques de contrôle, la surveillance et les actions correctives, ainsi que leur application concrète dans la réception, le stockage et la distribution des produits. Une connaissance pratique de ces procédures permet de détecter précocement les écarts et d'agir efficacement avant qu'ils n'affectent la qualité sanitaire des denrées.

#### **c. La gestion des équipements et infrastructures**

Les formations incluent également l'utilisation correcte des thermomètres, hygromètres et enregistreurs automatiques, la vérification des alarmes de température, le respect des procédures de dégivrage et de maintenance, ainsi que l'application stricte du plan de nettoyage et de désinfection.

#### **d. La communication et la traçabilité**

Le personnel doit être capable de consigner avec précision toutes les opérations réalisées et de communiquer rapidement toute anomalie au responsable qualité. Une culture de transparence et de vigilance est essentielle pour maintenir la conformité continue du système.

### **5.3. Documentation et enregistrements obligatoires**

La documentation constitue le pilier de la traçabilité et de la vérification des activités de stockage. Chaque opération effectuée dans les zones de stockage doit être documentée dans des registres spécifiques et archivée selon les exigences réglementaires. Les documents obligatoires comprennent notamment les fiches de nettoyage et de désinfection, précisant la fréquence, les produits utilisés et le nom de l'opérateur ; les registres de contrôle de température et d'humidité incluant les relevés journaliers et les seuils d'alerte ; les rapports de dégivrage et de maintenance des installations frigorifiques ; les rapports d'inspection et de vérification concernant l'état des emballages, la propreté des zones et la présence éventuelle d'insectes ou de rongeurs ; ainsi que les fiches d'anomalies et d'actions correctives relatives aux pannes, infiltrations, dérives thermiques ou non-conformités. Les enregistrements doivent être datés, signés et validés par un

responsable, conservés pour consultation par les autorités de contrôle sanitaire ou les auditeurs de certification, et intégrés dans le système documentaire global de l'entreprise.

#### **5.4. Suivi et évaluation continue du personnel**

La formation initiale doit être complétée par un suivi régulier et des évaluations périodiques afin de s'assurer que les connaissances sont appliquées correctement. Ces évaluations comprennent des observations pratiques en situation réelle, des tests de connaissances sur les procédures HACCP et les bonnes pratiques d'hygiène, ainsi que des entretiens individuels pour identifier les besoins en formation complémentaire. Des sessions de recyclage sont nécessaires lors de l'arrivée d'un nouveau personnel, après une modification des procédures ou à la suite d'un incident ou d'une non-conformité. L'efficacité de la formation doit être mesurée à l'aide d'indicateurs de performance tels que la réduction du nombre de non-conformités, l'amélioration du respect des procédures et la diminution des erreurs de manipulation ou de saisie documentaire.

#### **5.5. Intégration de la formation et de la documentation dans le système qualité**

Dans le cadre du management de la sécurité des aliments, la formation du personnel et la tenue de la documentation sont deux éléments indissociables du système qualité. La traçabilité des enregistrements et la compétence du personnel conditionnent la fiabilité du système HACCP. Chaque document doit démontrer la conformité réglementaire, assurer la preuve de maîtrise des processus et permettre le suivi des actions correctives et préventives. Ainsi, la formation continue, soutenue par une documentation claire, complète et accessible, renforce la culture de la sécurité alimentaire au sein de l'organisation.

## Chapitre 3 – Maturation des aliments

### Introduction

La maturation, parfois appelée mûrissement, est une phase physiologique cruciale dans le cycle de vie des fruits et autres aliments d'origine végétale. Elle correspond au passage de l'état de fruit « mûr » mais non consommable à un état optimal en termes de qualités sensorielles, nutritionnelles et de digestibilité. Ce processus est marqué par une série de transformations biochimiques, physiologiques et moléculaires visant à rendre l'aliment plus attractif pour les consommateurs ou pour les agents de dispersion des graines. D'un point de vue agroalimentaire, la maîtrise de la maturation est essentielle pour fixer le moment optimal de récolte, prolonger la durée de vie après récolte, optimiser les qualités organoleptiques telles que la texture, la couleur et l'arôme, et éviter les pertes prématurées ou les altérations. Le processus de maturation est irréversible et finement régulé par des mécanismes génétiques et hormonaux. Il correspond parfois à la phase finale du post-récolte pour certains produits et doit être différencié de la phase d'altération qui suit.

### 1. Concepts de maturation, mûrissement et post-récolte

La compréhension des processus de maturation, de mûrissement et de post-récolte constitue un fondement essentiel pour la maîtrise de la qualité et de la durabilité des denrées d'origine végétale. Ces trois phases, bien que souvent confondues, représentent des étapes physiologiques et technologiques distinctes dans le continuum de développement du fruit ou de l'aliment végétal.

#### 1.1. Maturation : développement physiologique préalable

La maturation correspond à la phase de développement progressif du fruit ou de l'organe comestible sur la plante. Elle s'étend depuis la différenciation cellulaire jusqu'à l'atteinte de la maturité physiologique, c'est-à-dire le stade où le fruit a acquis la capacité de mûrir et de développer ses attributs organoleptiques et biochimiques caractéristiques. Cette étape est gouvernée par des régulations moléculaires et hormonales complexes impliquant la synthèse de composés secondaires tels que les caroténoïdes, anthocyanes, sucres et acides organiques, ainsi que la coordination entre divers signaux hormonaux. Ces interactions modulent la texture, la

couleur et le profil aromatique des fruits, assurant leur aptitude à la consommation ou à la transformation. La maturation se déroule sur la plante, dans un environnement physiologiquement actif, au sein duquel les échanges métaboliques et l'activité photosynthétique influencent directement la composition finale du fruit.

## **1.2. Mûrissement : transformations autour ou après la récolte**

Le mûrissement désigne l'ensemble des transformations biochimiques et structurales qui se produisent lors de la transition du fruit de l'état physiologiquement mature vers l'état comestible. Ces transformations se traduisent par le ramollissement des tissus, l'accumulation de sucres solubles, la dégradation des acides organiques et la synthèse d'arômes volatils. Ce processus peut se poursuivre après la récolte, en particulier pour les fruits capables de continuer à mûrir grâce à une production autocatalytique d'éthylène. D'autres fruits, au contraire, nécessitent de rester attachés à la plante pour compléter leur mûrissement, ce qui justifie des stratégies de récolte adaptées selon l'espèce. La dynamique du mûrissement implique aussi des modifications concertées des pigments, tels que les caroténoïdes et les anthocyanines, qui confèrent la coloration typique des fruits mûrs. Le mûrissement, au-delà de sa dimension sensorielle, détermine la valeur nutritionnelle et marchande du produit final, influençant sa teneur en antioxydants, en vitamines et en fibres.

## **1.3. Post-récolte : gestion et maintien de la qualité**

La phase post-récolte englobe toutes les opérations ultérieures à la cueillette, telles que la manipulation, le tri, le conditionnement, le transport, le stockage et la distribution jusqu'à la consommation ou la transformation. Elle vise à ralentir le métabolisme résiduel du produit tout en préservant sa qualité et sa sécurité sanitaire. L'application de technologies post-récolte innovantes, telles que les atmosphères contrôlées, les traitements de surface, les emballages actifs ou la réfrigération intelligente, permet de réduire les pertes et d'allonger la durée de conservation des fruits et légumes frais. La gestion post-récolte repose sur la compréhension du métabolisme résiduel des produits, car les fruits continuent de respirer, de libérer de l'éthylène et de produire des composés volatils, dont la surveillance est essentielle pour prévenir les dégradations. Même certains produits céréaliers, comme les grains de blé, subissent une maturation post-récolte qui influence positivement les propriétés physico-chimiques des protéines et des glucides, améliorant ainsi la qualité technologique des produits finis tels que le pain ou les pâtes.

## **1.4. Intégration des trois stades dans la gestion de la qualité**

L'étude conjointe de la maturation, du mûrissement et de la post-récolte s'inscrit dans une approche intégrée de gestion de la qualité et de la sécurité alimentaire. La qualité finale d'un fruit ou d'un aliment végétal dépend à la fois de la génétique, de l'environnement de culture et des conditions dans lesquelles s'enchaînent ces trois phases. Une maîtrise rigoureuse de chacune d'elles depuis la maturation physiologique jusqu'à la conservation post-récolte garantit la stabilité des caractéristiques sensorielles et nutritionnelles tout en minimisant les pertes et les risques de contamination.

## **2. Catégories de fruits : climactériques et non-climactériques**

L'un des critères biologiques majeurs pour classer les fruits repose sur leur comportement respiratoire et hormonal pendant la maturation. Cette distinction, essentielle en physiologie post-récolte, influence directement les stratégies de récolte, de transport, de stockage et de commercialisation des produits frais. On distingue ainsi deux grands groupes : les fruits climactériques, capables de poursuivre leur mûrissement après la cueillette, et les fruits non-climactériques, dont la maturation s'arrête au moment de la récolte.

### **2.1. Fruits climactériques**

Les fruits climactériques se caractérisent par un comportement physiologique typique marqué par deux phénomènes majeurs : une augmentation transitoire et nette de la respiration, appelée pic climactérique, correspondant à une élévation rapide du taux de consommation d'oxygène et de production de dioxyde de carbone ; et une production endogène accrue d'éthylène, hormone gazeuse clé agissant comme signal déclencheur et amplificateur du mûrissement. Ce processus d'autocatalyse de l'éthylène provoque une série de réactions enzymatiques qui modifient profondément la texture, la couleur, l'arôme et la composition biochimique du fruit. L'éthylène interagit avec d'autres voies hormonales telles que celles de l'acide abscissique, des auxines et des gibbérellines, pour activer des réseaux de gènes régulateurs responsables de la dégradation des parois cellulaires, de la conversion de l'amidon en sucres simples et de la synthèse de composés volatils.

Sur le plan enzymatique, plusieurs hydrolases comme la polygalacturonase, la pectin-méthyl-estérase et la cellulase participent au ramollissement des tissus. Ces modifications structurales, associées à la dégradation contrôlée des pigments chlorophylliens et à la synthèse des

caroténoïdes et anthocyanines, confèrent aux fruits leur aspect et leur saveur caractéristiques de maturité.

Ce comportement climactérique, défini par un pic respiratoire distinct suivi d'une chute progressive et accompagné d'une augmentation parallèle de la production d'éthylène, offre une certaine flexibilité de gestion : les fruits peuvent être récoltés avant la maturation complète, puis mûris artificiellement par exposition contrôlée à l'éthylène ou à des régulateurs de croissance. Les exemples classiques de fruits climactériques incluent la tomate, la banane, la pomme, la poire, la mangue, le kiwi, l'avocat et la papaye. Ils peuvent donc être récoltés à un stade physiologique avancé mais avant leur pleine maturité organoleptique, ce qui facilite la logistique post-récolte et réduit les pertes dues à la surmaturation. À l'échelle cellulaire et moléculaire, l'éthylène agit comme un régulateur transcriptionnel majeur : il contrôle l'expression de gènes codant pour des enzymes de biosynthèse des sucres, des acides organiques et des pigments, orchestrant ainsi les changements métaboliques déterminant la qualité finale du fruit. Le mûrissement climactérique résulte d'une cascade intégrée de signalisations moléculaires où l'éthylène joue un double rôle, à la fois déclencheur et coordinateur des réponses hormonales et enzymatiques.

## **2.2. Fruits non-climactériques**

Les fruits non-climactériques se distinguent par leur comportement métabolique plus stable et l'absence de modifications respiratoires marquées au cours du mûrissement. Contrairement aux fruits climactériques, ils ne présentent ni pic de respiration ni production significative d'éthylène après la récolte. Leur mûrissement est donc limité aux processus se déroulant avant la cueillette et s'interrompt pratiquement dès que le fruit est détaché de la plante. D'un point de vue physiologique, leur métabolisme post-récolte reste faible et non autocatalytique. Leur qualité organoleptique couleur, saveur, texture et arôme est fixée au moment de la récolte et ne peut plus évoluer favorablement par la suite. Toute modification ultérieure est généralement liée à une dégradation ou à un vieillissement, plutôt qu'à une amélioration qualitative. Le mûrissement de ces fruits est principalement régulé par d'autres hormones végétales que l'éthylène, notamment l'acide abscissique, les auxines et parfois les brassinostéroïdes, qui assurent la signalisation de la maturation sans provoquer de pic respiratoire. L'acide abscissique joue un rôle central dans l'initiation de la coloration et l'accumulation des sucres, tout en intervenant dans la régulation de la fermeture stomatique et des réponses au stress hydrique. Le mûrissement des fruits non-climactériques, tels que la

fraise, le raisin ou les agrumes, repose sur une interaction coordonnée entre pigments, sucres et acides organiques. Ces fruits présentent une régulation métabolique fine, où la synthèse des caroténoïdes et des anthocyanines se déroule indépendamment de l'éthylène, mais sous l'influence de la lumière et de l'acide abscissique. Ce mécanisme assure la coloration et l'enrichissement en antioxydants tout en maintenant la stabilité des parois cellulaires, contrairement aux fruits climactériques dont les pectines se dégradent plus intensément. La distinction entre ces deux groupes revêt une importance pratique considérable pour la gestion post-récolte et la commercialisation. Les fruits climactériques peuvent être récoltés à maturité physiologique et mûris artificiellement, tandis que les fruits non-climactériques doivent être cueillis à leur maturité optimale de consommation, toute manipulation ou retard compromettant leur qualité.

Des espèces comme la fraise, le raisin, les agrumes, la cerise et la framboise exigent un suivi rigoureux des paramètres de maturité couleur, fermeté, teneur en sucres et acidité afin de préserver leur valeur marchande et leur stabilité durant le transport. Dans les fruits non-climactériques, les composés volatils jouent un rôle plus limité dans la signalisation de la maturation que dans les fruits climactériques, ce qui explique leur incapacité à poursuivre le mûrissement après la récolte. Cela souligne l'importance d'un conditionnement adapté en termes de température, d'humidité relative et d'atmosphère modifiée pour maintenir leur qualité sensorielle et nutritionnelle. En résumé, le mûrissement des fruits non-climactériques repose sur une régulation hormonale non éthylénique, dominée par l'acide abscissique et d'autres signaux métaboliques internes. Cette différence physiologique fondamentale impose des stratégies spécifiques de récolte et de conservation centrées sur la préservation des attributs acquis avant la cueillette plutôt que sur leur évolution après récolte.

### **3. Mécanismes moléculaires et hormonaux de la maturation**

La maturation des fruits est un processus hautement régulé qui résulte d'une coordination fine entre les voies hormonales, enzymatiques et transcriptionnelles. Ce réseau complexe permet la transition du fruit d'un état physiologique immature vers un état comestible caractérisé par des changements texturaux, biochimiques et sensoriels. D'un point de vue moléculaire, la maturation implique une interaction dynamique entre plusieurs signaux hormonaux, dont l'éthylène, l'acide abscissique, l'auxine, les gibbérellines et, dans certains cas, l'acide jasmonique. Ces hormones agissent de manière intégrée selon des mécanismes de rétrocontrôle

croisé qui assurent l'orchestration temporelle des événements métaboliques et structuraux associés à la maturation.

### **3.1. Voie de l'éthylène et signaux hormonaux associés**

#### **a) Biosynthèse et accumulation de l'éthylène**

L'éthylène constitue le régulateur clé du mûrissement chez les fruits climactériques. Sa biosynthèse repose sur le cycle de Yang, un ensemble d'étapes enzymatiques dont le substrat principal est la méthionine. Celle-ci est d'abord convertie en S-adénosylméthionine, puis en 1-aminocyclopropane-1-carboxylique par l'enzyme ACC synthase. L'ACC est ensuite oxydé en éthylène par l'action de l'ACC oxydase. Ce double contrôle enzymatique, assuré par les gènes ACS et ACO, détermine la vitesse de production d'éthylène et, par conséquent, l'intensité du mûrissement.

Les fruits climactériques présentent une phase de montée rapide de la synthèse d'éthylène, appelée phase autocatalytique, durant laquelle l'éthylène nouvellement formé stimule la transcription de ses propres gènes de biosynthèse. Ce mécanisme crée une boucle de rétroaction positive, déclenchant une cascade d'événements physiologiques tels que l'activation des enzymes de dégradation des parois cellulaires, la conversion de l'amidon en sucres solubles, la biosynthèse de pigments et la production de composés volatils responsables des arômes. Ces transformations confèrent au fruit ses caractéristiques sensorielles finales, notamment le ramollissement, la coloration et l'aromatisation.

#### **b) Intégration hormonale et réseaux de crosstalk**

La régulation du mûrissement par l'éthylène repose sur un réseau hormonal intégré où plusieurs phytohormones interagissent en synergie ou en antagonisme. L'acide abscissique favorise la synthèse des sucres et la dégradation des acides organiques, contribuant à l'amélioration du goût et à la tolérance au stress. L'auxine module la sensibilité des tissus à l'éthylène et influence la croissance cellulaire. Les gibbérellines tendent à retarder certains aspects du mûrissement en maintenant la turgescence et la division cellulaire. L'acide jasmonique intervient dans la modulation du stress oxydatif et la production de composés phénoliques volatils. Ce système hormonal complexe constitue un réseau hiérarchisé de régulations croisées où l'éthylène occupe un rôle central de coordination.

#### **c) Contrôle génétique et facteurs de transcription**

La maturation est également régulée à un niveau transcriptionnel par des gènes régulateurs maîtres codant pour des facteurs de transcription tels que les familles NAC et MADS-box, identifiées comme des intégrateurs clés des signaux hormonaux et développementaux. Ces facteurs contrôlent l'expression coordonnée de gènes cibles impliqués dans la dégradation des parois cellulaires, la biosynthèse de pigments, la production d'arômes volatils et la régulation du métabolisme énergétique. Les gènes RIN, NOR et CNR sont parmi les plus étudiés, notamment chez la tomate, où leur mutation empêche le mûrissement normal du fruit. Ces gènes orchestrent l'expression coordonnée des enzymes effectrices, assurant la progression ordonnée du mûrissement à l'échelle cellulaire et métabolique. Ainsi, la voie de l'éthylène, en interaction avec les autres régulateurs hormonaux, constitue le cœur du réseau moléculaire qui pilote la maturation des fruits. Ce système dynamique illustre la complexité du contrôle hormonal intégré et son impact déterminant sur la qualité finale des aliments d'origine végétale.

### **3.2. Transformations biochimiques**

La maturation des fruits est un processus dynamique au cours duquel s'opèrent de profondes transformations biochimiques et physiologiques qui modifient la texture, la couleur, la saveur et l'arôme des tissus végétaux. Ces changements déterminent la qualité organoleptique finale du fruit et reflètent la coordination étroite entre les voies métaboliques enzymatiques, les signaux hormonaux et la régulation génétique du développement.

#### **a) Modification de la paroi cellulaire et ramollissement**

L'un des signes les plus visibles de la maturation est le ramollissement des tissus, conséquence directe de la dégradation progressive des composants de la paroi cellulaire. Ce phénomène résulte d'une activité enzymatique coordonnée impliquant plusieurs hydrolases telles que la polygalacturonase, la pectine-méthyl-estérase, la pectine-lyase et les expansines, qui participent au relâchement des réseaux de pectine et de cellulose. Ces enzymes provoquent une dépolymérisation partielle des pectines et une diminution de la cohésion intercellulaire, entraînant une perte de fermeté du fruit. Cette déstructuration contrôlée de la paroi cellulaire facilite également la libération des sucres et des composés aromatiques, contribuant à l'attrait sensoriel du fruit mûr. Chez les fruits climactériques, la synthèse de ces enzymes est induite par l'éthylène via l'activation de gènes spécifiques régulés par les facteurs de transcription MADS-box et NAC.

## **b) Dégradation de l'amidon et accumulation de sucres solubles**

La conversion de l'amidon en sucres simples constitue une autre caractéristique majeure de la maturation. Les enzymes  $\alpha$ -amylase et  $\beta$ -amylase hydrolysent l'amidon en maltose et en glucose, tandis que la saccharose synthase et l'invertase participent à la production de fructose et de saccharose. Ce processus entraîne une augmentation progressive de la douceur et une amélioration de la perception gustative du fruit. La teneur en sucres solubles devient ainsi un indicateur clé de maturité, utilisé dans le contrôle de qualité post-récolte. Cette conversion est régulée par l'éthylène et modulée par d'autres hormones, notamment l'acide abscissique, qui influence la répartition du carbone entre amidon et sucres libres.

## **c) Modifications des pigments et évolution de la couleur**

Le changement de couleur constitue l'un des aspects les plus perceptibles du mûrissement. Ce phénomène résulte de la dégradation de la chlorophylle, provoquant la disparition de la teinte verte, et de la synthèse de pigments secondaires tels que les caroténoïdes et les anthocyanines. Ces transformations chromatiques sont contrôlées par des voies métaboliques intégrées faisant intervenir les gènes de biosynthèse des caroténoïdes et des anthocyanines. Ces pigments jouent un rôle essentiel non seulement dans l'attractivité visuelle du fruit, mais également dans ses propriétés antioxydantes et photoprotectrices. Chez les fruits non-climactériques, les changements pigmentaires sont davantage influencés par l'acide abscissique et la lumière que par l'éthylène.

## **d) Développement des arômes et composés volatils**

Le développement des arômes au cours de la maturation résulte de la production de composés volatils issus du métabolisme des lipides, des acides aminés et des sucres. Les principales classes identifiées sont les aldéhydes, alcools, esters et terpènes, responsables des notes fruitées caractéristiques. La synthèse de ces composés est étroitement liée à l'activité respiratoire et à la production d'éthylène, particulièrement chez les fruits climactériques. Les enzymes clés impliquées comprennent la lipoxigénase, l'alcool déshydrogénase et l'alcool acyl-transférase. Ces réactions confèrent au fruit sa signature olfactive et participent également à sa défense contre le stress oxydatif et les pathogènes post-récolte.

## **e) Activité des phénoloxydases et modifications antioxydantes**

En phase terminale de maturation, les tissus subissent des modifications liées à l'activité des phénoloxydases telles que la tyrosinase, la polyphénol oxydase et les peroxydases, qui catalysent l'oxydation des polyphénols en quinones. Ces composés peuvent se polymériser pour former des pigments bruns responsables du brunissement enzymatique observé sur certains fruits à maturité avancée ou en post-récolte. Ces réactions contribuent néanmoins à la défense antioxydante du fruit en neutralisant les radicaux libres générés par le stress oxydatif. Cette activité enzymatique représente un compromis physiologique puisqu'elle protège les tissus contre les dommages oxydatifs tout en signalant le début du déclin métabolique. L'accumulation de composés phénoliques antioxydants tels que les flavonoïdes et acides phénoliques au cours du mûrissement renforce la résistance du fruit aux agents oxydants et aux pathogènes, améliorant ainsi sa stabilité post-récolte.

#### **4. Maturation post-récolte et pratiques technologiques**

##### **4.1. Processus de mûrissement contrôlé**

Après la récolte, les fruits poursuivent des processus métaboliques résiduels dont la maîtrise conditionne directement la qualité finale, la durée de vie commerciale et la sécurité alimentaire. Chez les fruits climactériques, le mûrissement post-récolte peut être stimulé, modulé ou retardé par des interventions technologiques précises visant à contrôler la respiration, la production d'éthylène et les réactions biochimiques associées.

##### **a) Stimulation du mûrissement par l'injection contrôlée d'éthylène**

L'injection contrôlée d'éthylène est une pratique courante utilisée pour déclencher ou uniformiser le mûrissement des fruits climactériques récoltés avant leur pleine maturité organoleptique. Cette technique repose sur la capacité de l'éthylène à activer les gènes de la voie de biosynthèse du mûrissement et à stimuler la production des enzymes responsables des transformations physiologiques. Une exposition des fruits à de faibles concentrations d'éthylène dans des chambres hermétiques provoque l'induction rapide des enzymes clés telles que la polygalacturonase, la pectine-méthyl-estérase et les amylases, ce qui accélère les processus de ramollissement, de conversion de l'amidon en sucres et de développement des arômes. Cette méthode est largement utilisée pour des fruits comme la banane, la tomate, la mangue ou l'avocat, afin d'obtenir un mûrissement homogène avant la mise en marché. L'efficacité du procédé dépend de plusieurs paramètres, notamment la température, l'humidité

relative et la durée d'exposition à l'éthylène. Une exposition excessive peut cependant provoquer un mûrissement trop rapide ou une perte prématurée de fermeté.

#### **b) Retardement du mûrissement : inhibition de l'action de l'éthylène (1-MCP, SmartFresh)**

Pour prolonger la durée de conservation des fruits, une approche efficace consiste à bloquer l'action de l'éthylène au niveau cellulaire. Le 1-méthylcyclopropène, commercialisé sous le nom de SmartFresh, agit comme inhibiteur compétitif des récepteurs de l'éthylène présents dans les tissus végétaux. En se liant à ces récepteurs, il empêche l'éthylène d'initier la cascade enzymatique responsable du mûrissement. Ce traitement ralentit la dégradation des parois cellulaires, maintient la fermeté, préserve la couleur verte et retarde la synthèse des composés volatils. Il est particulièrement appliqué aux pommes, poires, kiwis et tomates, où il permet de prolonger considérablement la durée de conservation tout en préservant la qualité sensorielle. Le 1-MCP agit comme régulateur transitoire du signal éthylénique sans laisser de résidus chimiques dans le fruit. Ses effets disparaissent dès que le produit est replacé dans des conditions atmosphériques normales.

#### **c) Stockage en atmosphères contrôlées ou modifiées**

Le stockage en atmosphère contrôlée ou modifiée constitue une stratégie essentielle de maîtrise du mûrissement post-récolte. Ce procédé repose sur la régulation des concentrations en oxygène et en dioxyde de carbone afin de ralentir la respiration et de limiter la production d'éthylène. En général, la teneur en oxygène est réduite de 21 % à environ 2 à 5 %, tandis que la concentration en dioxyde de carbone est augmentée jusqu'à 5 à 10 %, ce qui diminue l'activité métabolique du fruit. Ce type de stockage permet de ralentir les réactions enzymatiques, de limiter la dégradation des pigments et de préserver les sucres réducteurs et les composés volatils responsables de la qualité sensorielle. Les systèmes modernes combinent souvent plusieurs paramètres, tels que la régulation de la température, la réduction de la teneur en oxygène et l'absorption de l'éthylène résiduel par des matériaux spécifiques. Ces technologies sont désormais indispensables dans la filière agroalimentaire pour prolonger la durée de vie post-récolte tout en maintenant la qualité nutritionnelle et organoleptique des fruits frais.

#### **d) Vers une gestion intégrée du mûrissement**

Les avancées récentes dans la compréhension des mécanismes hormonaux et moléculaires de la maturation ont permis de concevoir des stratégies post-récolte plus précises et durables. L'association de traitements physiologiques tels que l'application du 1-MCP, de l'acide abscissique ou de la réfrigération douce avec des technologies de stockage intelligent basées sur des atmosphères dynamiques et des capteurs d'éthylène offre une approche intégrée du mûrissement. Cette gestion combinée permet de concilier la préservation des qualités sensorielles et nutritionnelles des fruits avec la réduction du gaspillage alimentaire, tout en répondant aux exigences de durabilité de la chaîne de distribution.

#### **4.2. Influences environnementales**

Les facteurs environnementaux jouent un rôle déterminant dans la régulation de la maturation et du mûrissement post-récolte. La température, l'humidité relative, la composition gazeuse de l'atmosphère et la lumière influencent directement les processus enzymatiques, respiratoires et hormonaux qui conditionnent l'évolution physiologique du fruit.

##### **a) Température : accélération ou inhibition des processus métaboliques**

La température constitue le paramètre le plus critique dans la régulation de la maturation et de la conservation des produits végétaux. Une élévation modérée de la température au-delà de la valeur optimale du fruit provoque une accélération du métabolisme respiratoire, une augmentation de la production d'éthylène et une activation des enzymes de maturation telles que la polygalacturonase, l'amylase et la pectine-lyase. Ces réactions, bien qu'elles favorisent temporairement le mûrissement, entraînent à terme une sénescence prématurée et une dégradation de la texture, de la couleur et de la saveur. À l'inverse, une température trop basse ralentit ou inhibe certaines voies enzymatiques essentielles, notamment celles impliquées dans la dégradation de l'amidon, la synthèse des pigments ou la formation des arômes. Une baisse excessive provoque des désordres physiologiques connus sous le nom de chilling injury, observés principalement chez les fruits tropicaux tels que la banane, la mangue ou l'avocat. Ces altérations se traduisent par des brunissements internes, une perte de couleur, une fragilisation des membranes cellulaires et une diminution de la qualité gustative. Chaque espèce présente donc une plage thermique optimale de maturation et de stockage, généralement comprise entre 10 et 25 °C pour les fruits tempérés et entre 12 et 30 °C pour les fruits tropicaux.

### **b) Humidité relative : maintien de la turgescence et prévention des pertes d'eau**

L'humidité relative de l'air ambiant influence directement la teneur en eau des tissus végétaux et la vitalité cellulaire. Un air trop sec provoque une transpiration excessive entraînant un flétrissement, une perte de masse fraîche et une altération de la texture. À l'inverse, une humidité trop élevée favorise la condensation, la croissance microbienne et le développement de moisissures en surface. Le maintien d'une humidité relative optimale, généralement comprise entre 85 et 90 %, permet de préserver la fermeté des fruits tout en limitant les pertes hydriques et les dégradations post-récolte. L'humidité agit également sur le taux respiratoire : un air sec augmente la respiration et accélère la consommation des réserves énergétiques, tandis qu'un environnement modérément humide stabilise l'activité métabolique et prolonge la durée de conservation.

### **c) Composition gazeuse : rôle de l'O<sub>2</sub>, du CO<sub>2</sub> et de l'éthylène résiduel**

La composition atmosphérique entourant le fruit joue un rôle déterminant dans la modulation du métabolisme post-récolte. Une diminution du taux d'oxygène dans l'air environnant ralentit la respiration cellulaire et retarde les réactions enzymatiques liées au mûrissement. Parallèlement, une augmentation contrôlée du dioxyde de carbone permet d'inhiber la production d'éthylène et certaines enzymes de dégradation des parois cellulaires. Ce principe est à la base des technologies d'atmosphères contrôlées utilisées pour prolonger la durée de vie commerciale des fruits tout en maintenant leur qualité organoleptique. En revanche, la présence d'éthylène résiduel dans l'environnement de stockage peut accélérer la maturation, même à très faible concentration. Il est donc nécessaire d'éliminer ou de neutraliser cet éthylène à l'aide d'absorbants spécifiques tels que le permanganate de potassium, le charbon actif ou des filtres catalytiques.

### **d) Lumière et photorégulation**

La lumière influence principalement la coloration et la synthèse des pigments au cours de la maturation. Chez certains fruits comme la tomate, la fraise ou les agrumes, la lumière visible stimule la production de caroténoïdes et d'anthocyanines, renforçant ainsi l'intensité de la couleur et la teneur en antioxydants. Ce phénomène de photorégulation s'exerce par l'intermédiaire de récepteurs spécifiques, notamment les phytochromes et les cryptochromes, qui activent l'expression des gènes responsables de la biosynthèse pigmentaire. Toutefois, une exposition lumineuse excessive, surtout lorsqu'elle s'accompagne d'une température élevée,

peut induire un stress photo-oxydatif entraînant la dégradation prématurée des pigments et des membranes cellulaires.

#### **e) Interaction entre facteurs environnementaux**

Les effets de la température, de l'humidité, de la composition gazeuse et de la lumière interagissent de manière complexe et interdépendante. Par exemple, une faible température associée à un taux élevé de dioxyde de carbone réduit fortement la respiration mais peut inhiber la synthèse des arômes, tandis qu'une exposition lumineuse en atmosphère pauvre en oxygène favorise la coloration tout en préservant les sucres. La gestion intégrée de ces paramètres environnementaux constitue un élément essentiel des pratiques post-récolte modernes. Elle permet d'optimiser la qualité sensorielle, la valeur nutritionnelle et la durabilité des fruits frais, tout en réduisant les pertes économiques liées à la détérioration.

### **4.3. Maturation et qualité finale**

La maîtrise du stade de maturité représente un facteur déterminant de la qualité finale des fruits et légumes, influençant leur texture, leur couleur, leur valeur nutritionnelle et leur aptitude à la conservation. Chaque paramètre physiologique évolue selon une dynamique propre durant la maturation, et l'équilibre entre les transformations biochimiques et physiques doit être atteint avant la mise en marché. Une récolte trop précoce ou trop tardive compromet à la fois la qualité organoleptique et la stabilité du produit.

#### **a) Texture et consistance**

La texture du fruit, élément central de la perception sensorielle, dépend directement de la dégradation progressive de la paroi cellulaire et des pectines. Une maturation maîtrisée permet d'obtenir une texture équilibrée, ni trop ferme ni trop molle, garantissant une bonne qualité gustative et une résistance adaptée à la manipulation. Une récolte prématurée entraîne une texture trop ferme, souvent associée à un goût fade et à un arôme peu développé, tandis qu'une récolte tardive provoque un ramollissement excessif dû à une activité accrue des enzymes responsables de la dégradation pectique. Le contrôle du degré de ramollissement est donc essentiel, notamment pour les fruits destinés à l'exportation ou à la transformation. L'utilisation de technologies telles que le 1-MCP permet de ralentir la dégradation des parois cellulaires, de préserver la fermeté et d'améliorer la conservation sans altérer la qualité sensorielle.

## **b) Couleur et attrait visuel**

La couleur constitue l'un des indicateurs les plus perceptibles du degré de maturité des fruits. Elle résulte de la dégradation progressive de la chlorophylle et de la synthèse de pigments secondaires tels que les caroténoïdes et les anthocyanines, sous l'influence combinée des signaux hormonaux et des facteurs environnementaux. Une récolte effectuée au stade de maturation optimale assure un développement complet des pigments et confère au fruit une coloration vive, homogène et attractive. À l'inverse, une récolte prématurée conduit à des fruits verdâtres et peu attrayants, tandis qu'une récolte trop tardive favorise la dégradation oxydative des pigments et l'altération visuelle. La stabilité de ces pigments est également influencée par la température et la lumière, qui modulent directement la perception de la fraîcheur et de la qualité.

## **c) Valeur nutritionnelle et préservation des nutriments**

La maturation physiologique exerce une influence déterminante sur la valeur nutritionnelle des fruits, notamment sur leur teneur en vitamines C, E et provitamine A, ainsi qu'en polyphénols et autres composés antioxydants. La synthèse et l'accumulation de ces métabolites secondaires atteignent leur maximum à un stade de maturité spécifique correspondant à la transition entre la phase de croissance active et celle de maturation complète. Une récolte trop précoce limite la concentration de ces composés bioactifs, tandis qu'une surmaturation entraîne leur dégradation oxydative sous l'action d'enzymes telles que la polyphénol oxydase et la peroxydase. Le maintien de la qualité nutritionnelle repose sur un compromis entre maturité optimale et durée de conservation. Des conditions post-récolte maîtrisées, comme la réfrigération modérée ou le stockage sous atmosphère contrôlée, permettent de ralentir les réactions d'oxydation et de préserver les antioxydants sur le long terme.

## **d) Durée de conservation et aptitude au stockage**

La durée de conservation d'un fruit dépend étroitement du stade de maturité au moment de la récolte. Les fruits cueillis trop tôt présentent une faible aptitude au mûrissement et une sensibilité accrue au stress mécanique ou au froid, tandis que ceux récoltés trop mûrs se détériorent rapidement sous l'effet d'une respiration intense et d'une activité enzymatique élevée. Une maturation contrôlée assure une résistance physiologique optimale pendant le transport et le stockage. La combinaison d'une récolte à maturité physiologique idéale avec

l'application de technologies post-récolte adaptées, telles que la réduction de la teneur en oxygène, l'enrichissement en dioxyde de carbone ou l'utilisation du 1-MCP, permet de prolonger efficacement la durée de vie commerciale tout en préservant les qualités organoleptiques et nutritionnelles.

#### **e) Conséquences d'une mauvaise synchronisation**

Une mauvaise synchronisation de la récolte ou un contrôle inadéquat des conditions de maturation peut avoir des répercussions économiques et qualitatives importantes. Un fruit récolté trop tôt présente souvent une saveur fade, une acidité excessive et un arôme insuffisant, tandis qu'un fruit récolté trop tard devient trop mou, perd sa fermeté et est plus sujet au pourrissement. La maîtrise du moment de récolte doit reposer sur des indicateurs physiologiques précis tels que la fermeté, la couleur et la teneur en sucres plutôt que sur des critères purement calendaires. Une gestion inadéquate du mûrissement conduit à des pertes post-récolte considérables, pouvant dépasser 30 % dans certaines filières fruitières tropicales, soulignant ainsi l'importance d'une approche intégrée associant connaissances physiologiques et pratiques technologiques pour assurer la qualité finale.

#### **f) Qualité intégrée et satisfaction du consommateur**

La qualité finale d'un fruit ne se limite pas à ses caractéristiques visuelles ou texturales. Elle repose sur une approche intégrée combinant qualité sensorielle, valeur nutritionnelle et sécurité sanitaire. La compréhension des interactions entre mécanismes hormonaux, transformations biochimiques et facteurs environnementaux permet d'optimiser la récolte, la conservation et la distribution, garantissant ainsi la satisfaction du consommateur. L'objectif d'une maturation bien maîtrisée est double : préserver les caractéristiques intrinsèques du fruit, telles que le goût, l'arôme, la texture et la couleur, et maintenir sa stabilité physiologique tout au long de la chaîne logistique, depuis la récolte jusqu'à la consommation.

### **5. Applications et exemples dans l'industrie alimentaire**

Le mûrissement contrôlé de la banane repose sur une cueillette au stade de maturité verte suivie d'un traitement à l'éthylène pour homogénéiser la couleur et la texture avant la commercialisation. Les pommes de stockage de haute qualité sont conservées grâce à l'utilisation du 1-MCP et d'atmosphères contrôlées, permettant leur stockage jusqu'à douze mois sans altération notable. Les mangues font l'objet d'une maturation post-récolte sous

atmosphère enrichie en éthylène, avec un suivi des composés volatils comme l'éthanol et l'éthylène pour déterminer le point optimal de consommation. Des recherches récentes ont également montré que la maturation post-récolte des grains de blé améliore certaines propriétés technologiques du pain, confirmant que le concept de maturation postharvest s'étend bien au-delà des fruits.

## **Chapitre 4 – Altérations des aliments**

### **Introduction**

L'altération des aliments regroupe l'ensemble des transformations physiques, chimiques et biologiques qui entraînent une dégradation des qualités initiales d'un produit, qu'il s'agisse du goût, de l'odeur, de la texture, de la couleur, de la valeur nutritionnelle ou de la sécurité sanitaire. Ces changements peuvent résulter de réactions naturelles, telles que les processus enzymatiques ou oxydatifs, ou être provoqués par des micro-organismes et des facteurs environnementaux comme la température, l'humidité, la lumière ou l'oxygène. Les altérations alimentaires représentent une source majeure de pertes de denrées périssables avant consommation, ce qui souligne la nécessité de comprendre leurs mécanismes afin de renforcer la sécurité alimentaire, prolonger la durée de conservation et limiter le gaspillage.

### **1. Définition et classification des altérations**

Les altérations alimentaires désignent l'ensemble des phénomènes biologiques, chimiques ou physiques susceptibles de détériorer la qualité, la valeur nutritionnelle, la sécurité ou l'aspect des denrées. Elles peuvent survenir à toutes les étapes du processus de production, de transformation, de transport ou de stockage et résultent souvent de l'interaction entre plusieurs mécanismes simultanés. La classification la plus couramment adoptée distingue trois grandes catégories d'altérations : biologiques, chimiques et physiques.

#### **1.1. Altérations d'origine biologique**

Les altérations biologiques proviennent principalement de l'activité des micro-organismes ou des enzymes qui dégradent les constituants de l'aliment. Elles se traduisent par des modifications sensorielles perceptibles, comme des changements d'odeur, de goût ou de texture, et peuvent parfois engendrer des risques sanitaires.

##### **a) Activité microbienne**

Les bactéries, levures et moisissures sont à l'origine d'un grand nombre de dégradations alimentaires. Elles provoquent la putréfaction par dégradation des protéines en amines volatiles, la fermentation indésirable des sucres, la formation de gaz et de mucilage dans les produits

emballés, ainsi que la production de mycotoxines par certaines moisissures. Le développement de ces micro-organismes dépend des conditions de température, de pH, d'activité de l'eau et de la disponibilité en oxygène. La maîtrise de ces paramètres constitue une mesure essentielle de prévention des altérations microbiennes.

### **b) Activité enzymatique**

Les enzymes naturelles présentes dans les tissus ou produites par les micro-organismes accélèrent la dégradation des macromolécules alimentaires. Les lipases hydrolysent les graisses en acides gras libres, les protéases fragmentent les protéines en peptides et acides aminés, les amylases transforment l'amidon en sucres simples et les polyphénol oxydases catalysent le brunissement enzymatique observé sur les fruits et légumes. Ces réactions enzymatiques constituent des mécanismes typiques d'altération biologique et peuvent être amplifiées par la croissance microbienne. La prévention repose sur l'application rigoureuse des Bonnes Pratiques d'Hygiène et du système HACCP, visant à limiter la charge microbienne et l'activité enzymatique indésirable.

## **1.2. Altérations d'origine chimique**

Les altérations chimiques résultent de réactions non enzymatiques affectant la composition, la stabilité et la valeur nutritionnelle des aliments. Elles surviennent souvent sous l'effet de la lumière, de la chaleur ou de l'exposition à l'oxygène et peuvent modifier profondément les propriétés organoleptiques des produits.

### **a) Oxydation lipidique et rancidité**

L'oxydation des lipides conduit à la formation de composés volatils responsables d'odeurs et de saveurs désagréables. Ce phénomène, connu sous le nom de rancidité, est favorisé par la présence d'oxygène, de lumière ou de températures élevées. Il entraîne la perte des vitamines liposolubles et réduit la stabilité des produits gras. L'utilisation d'emballages à barrière protectrice limitant l'exposition à l'oxygène et à la lumière constitue une méthode efficace pour ralentir ce processus et préserver la qualité des produits.

## **b) Réaction de Maillard et brunissement non enzymatique**

La réaction de Maillard correspond à une interaction entre les sucres réducteurs et les acides aminés, produisant des composés colorés et aromatiques. Si cette réaction est recherchée dans certaines préparations alimentaires, comme la cuisson du pain ou la torréfaction du café, elle devient indésirable lors du stockage prolongé des denrées. Elle provoque un brunissement non enzymatique et une altération de la valeur nutritionnelle. L'intensité de la réaction dépend de la température, du pH et de l'humidité du produit, des paramètres qu'il convient de maîtriser pour préserver la qualité.

## **c) Hydrolyse non enzymatique**

L'hydrolyse non enzymatique est une réaction purement chimique provoquée par l'action combinée de l'eau, de la chaleur ou d'un pH extrême, sans intervention enzymatique. Elle peut se produire dans certains produits alimentaires soumis à des traitements thermiques intensifs. Bien qu'elle reste moins fréquente que les autres formes d'altération, elle peut modifier la structure et la stabilité de certains constituants et altérer la qualité finale du produit.

### **1.3. Altérations d'origine physique**

Les altérations physiques concernent les modifications structurelles des aliments, notamment la déshydratation qui provoque une perte d'eau et un flétrissement, la migration d'humidité entre les différentes couches d'un produit ou entre le produit et son emballage, le brunissement dû à la chaleur ainsi que les dommages mécaniques survenant durant le transport. Ces phénomènes sont aggravés par des conditions de stockage inadaptées, comme des variations excessives de température ou une humidité non contrôlée. Le recours à un conditionnement conforme aux normes internationales et à des matériaux adaptés permet de préserver la texture, la couleur et l'apparence générale des produits tout au long de leur durée de conservation.

### **1.4. Interactions entre les types d'altérations**

Les différents types d'altération interagissent souvent entre eux. Une oxydation lipidique peut fragiliser les membranes cellulaires, favorisant ainsi la contamination microbienne, tandis qu'une élévation de la température accélère simultanément la réaction de Maillard et l'activité enzymatique. La vitesse de dégradation des constituants alimentaires augmente de façon exponentielle avec la température, selon la relation décrite par la loi d'Arrhenius. La maîtrise

conjointe de la température, de l'humidité, de la composition gazeuse et du conditionnement demeure donc un facteur essentiel pour prévenir les dégradations et préserver la qualité globale des aliments.

## **2. Mécanismes d'oxydation et de dégradation**

Les mécanismes d'oxydation et de dégradation regroupent un ensemble de réactions chimiques et physiques complexes qui entraînent la détérioration progressive des aliments. Ces réactions affectent principalement les lipides, les protéines, les glucides et certaines vitamines, provoquant des modifications du goût, de l'odeur, de la couleur et de la valeur nutritionnelle. L'oxydation lipidique représente l'un des phénomènes les plus importants dans le vieillissement des denrées alimentaires, tandis que d'autres processus, tels que la réaction de Maillard ou la dégradation thermique, contribuent également à la perte de qualité globale des produits.

### **2.1. Oxydation lipidique**

L'oxydation des lipides est une réaction en chaîne qui se déroule en trois étapes successives : initiation, propagation et terminaison.

#### **a) Étape d'initiation**

Au cours de cette première phase, les radicaux libres se forment à partir des acides gras insaturés sous l'effet de la lumière, de la chaleur ou de la présence de métaux tels que le fer ou le cuivre. Ces radicaux réagissent avec l'oxygène pour générer des radicaux peroxytes très réactifs. Cette étape est favorisée par une exposition prolongée à l'air et à la lumière, ce qui souligne l'importance de l'emploi d'emballages protecteurs.

#### **b) Étape de propagation**

Les radicaux peroxytes produits attaquent d'autres molécules lipidiques, créant ainsi de nouveaux radicaux et des hydroperoxydes instables. Ces composés se décomposent en substances volatiles, telles que les aldéhydes et les cétones, responsables des goûts et des odeurs caractéristiques du rancissement. Cette phase est auto-entretenu, car chaque radical initial peut provoquer l'oxydation de nombreuses molécules lipidiques, ce qui explique la rapidité de la dégradation.

### **c) Étape de terminaison**

La terminaison correspond à la recombinaison des radicaux libres pour former des produits stables non réactifs. Toutefois, certains produits secondaires issus de cette réaction, tels que le malondialdéhyde ou l'hexanal, altèrent la couleur et la saveur et contribuent à la dégradation des vitamines liposolubles. Ils peuvent également compromettre la stabilité nutritionnelle et sensorielle de l'aliment.

### **d) Facteurs aggravants et prévention**

Les principaux facteurs favorisant l'oxydation lipidique sont la présence d'oxygène, la lumière, les métaux traces et la chaleur excessive. Pour ralentir ces réactions, plusieurs stratégies sont utilisées, notamment l'emploi d'antioxydants naturels comme les tocophérols et l'acide ascorbique, la limitation de l'exposition à la lumière, la réduction de la teneur en oxygène dans l'environnement de stockage et l'utilisation d'emballages barrière adaptés. Les emballages actifs et la maîtrise des conditions thermiques constituent aujourd'hui des moyens essentiels pour maintenir la stabilité des aliments pendant le stockage.

## **2.2. Réaction de Maillard et dégradation thermique**

La réaction de Maillard représente un autre mécanisme majeur de dégradation non enzymatique. Elle résulte de la condensation entre un sucre réducteur et un acide aminé, suivie de réarrangements chimiques qui aboutissent à la formation de pigments bruns appelés mélanoidines. Cette réaction joue un double rôle dans les systèmes alimentaires. D'une part, elle est responsable du développement des arômes et de la coloration recherchés dans les produits cuits ou grillés. D'autre part, elle peut engendrer une perte de qualité nutritionnelle et une altération de la couleur lorsqu'elle se produit durant le stockage. La perte de lysine, acide aminé essentiel, réduit la valeur biologique des protéines, tandis que la formation de produits néoformés, tels que les composés carbonylés et certaines amines hétérocycliques, peut présenter un risque sanitaire. La vitesse de la réaction augmente avec la température et atteint un maximum pour une humidité intermédiaire, où la mobilité des réactifs est la plus élevée. La maîtrise de la température et de l'humidité relative demeure donc indispensable pour limiter ce type de brunissement et préserver la qualité organoleptique et nutritionnelle des produits.

### **2.3. Dégradation oxydative des protéines et des vitamines**

Les protéines peuvent subir une oxydation directe ou indirecte sous l'action des radicaux libres issus des lipides. Ce phénomène entraîne la fragmentation des chaînes polypeptidiques, la perte d'acides aminés soufrés tels que la méthionine et la cystéine, ainsi qu'une diminution de la digestibilité. Les vitamines sensibles à l'oxygène et à la lumière, notamment les vitamines C, A, E et B1, se dégradent rapidement selon une cinétique similaire à celle observée pour les lipides. L'utilisation d'emballages opaques et d'atmosphères appauvries en oxygène permet de ralentir efficacement ces réactions et de préserver la valeur nutritionnelle des produits.

### **2.4. Dégradation catalysée par la chaleur et la lumière**

La chaleur et la lumière agissent comme des catalyseurs universels des réactions de dégradation. La chaleur accélère les processus d'oxydation, de réaction de Maillard et d'hydrolyse chimique, tandis que la lumière, en particulier les rayonnements ultraviolets, induit la photo-oxydation des pigments et des lipides. Ces effets sont particulièrement marqués dans les produits riches en chlorophylle ou en caroténoïdes, comme les jus et les huiles végétales. Pour limiter ces dégradations, il est essentiel de restreindre l'exposition des produits à la lumière et à la chaleur en utilisant des matériaux d'emballage opaques et en maintenant des températures de stockage contrôlées.

### **2.5. Conséquences globales sur la qualité**

Les réactions d'oxydation et de dégradation entraînent une détérioration cumulative des caractéristiques sensorielles et nutritionnelles des aliments. Elles provoquent l'apparition de rancidité, la perte de couleur et de vitamines, la modification des arômes et la réduction de la durée de conservation. Ces altérations représentent une cause importante de pertes post-récolte dans la chaîne alimentaire mondiale. Leur maîtrise repose sur une approche intégrée combinant des mesures de formulation, comme l'incorporation d'antioxydants, des stratégies d'emballage limitant l'exposition à l'oxygène et à la lumière, ainsi qu'un contrôle rigoureux des paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité et la composition gazeuse.

## **3. Réactions enzymatiques et non enzymatiques dans les produits transformés**

Les produits transformés sont soumis à divers processus biochimiques au cours de la fabrication, du stockage et de la distribution. Ces réactions, qu'elles soient enzymatiques,

impliquant des catalyseurs biologiques, ou non enzymatiques, purement chimiques, déterminent la stabilité, la qualité sensorielle et la valeur nutritionnelle des aliments finis. Distinguer ces deux catégories de réactions permet de mieux comprendre les mécanismes d'altération et d'adapter les stratégies technologiques de prévention.

### **3.1. Réactions enzymatiques**

Les réactions enzymatiques constituent une cause importante d'altération dans les produits alimentaires peu ou modérément transformés, où les enzymes naturelles ou microbiennes conservent leur activité. Ces réactions peuvent être recherchées lorsqu'elles améliorent certaines qualités du produit, comme dans le cas de l'affinage des fromages ou des fermentations contrôlées, mais elles deviennent indésirables lorsqu'elles dégradent la qualité sensorielle ou nutritionnelle.

#### **a) Oxydation enzymatique des composés phénoliques**

La polyphénol-oxydase et la peroxydase catalysent l'oxydation des polyphénols en quinones, lesquelles se polymérisent ensuite pour former des pigments bruns. Ce phénomène, connu sous le nom de brunissement enzymatique, est fréquent dans les fruits et légumes frais exposés à l'air après une coupe ou un choc mécanique. Il dépend de la présence d'oxygène, du pH et de la température. Le blanchiment thermique ou l'ajout d'agents antioxydants tels que l'acide ascorbique ou les sulfites constituent des moyens efficaces pour l'inhiber.

#### **b) Hydrolyse enzymatique**

Les enzymes hydrolytiques, comme les lipases, les protéases et les amylases, dégradent les macromolécules alimentaires en provoquant différentes formes d'altération. Les lipases hydrolysent les triglycérides en acides gras libres, responsables du rancissement enzymatique et de la modification de la flaveur. Les protéases fragmentent les chaînes protéiques, modifiant la texture des produits et générant parfois des peptides au goût amer. Les amylases transforment l'amidon en sucres réducteurs, augmentant la sensibilité du produit à la réaction de Maillard lors du stockage ou de la cuisson. Ces réactions sont particulièrement préoccupantes dans les produits à forte activité enzymatique initiale, tels que les jus, les céréales, les viandes ou les produits laitiers. Leur prévention repose sur la maîtrise de la température et du pH ainsi que sur la désactivation thermique des enzymes lors de la transformation, notamment par pasteurisation ou blanchiment.

### **c) Enzymes microbiennes et altération post-process**

Dans certains produits transformés conservés à température ambiante, des micro-organismes résiduels ou contaminants peuvent sécréter des enzymes extracellulaires telles que des lipases, amylases ou protéases. Ces enzymes provoquent une dégradation progressive des produits malgré les traitements thermiques appliqués lors de la fabrication. La prévention de ces altérations repose sur le contrôle strict des conditions de stockage, la réduction de la charge microbienne et la mise en œuvre d'un suivi régulier de la stabilité des produits finis afin de garantir leur sécurité et leur qualité au cours du temps.

### **3.2. Réactions non enzymatiques**

Les réactions non enzymatiques sont de nature purement chimique. Elles se produisent indépendamment de la présence d'enzymes ou de micro-organismes et sont souvent accélérées par la chaleur, la lumière ou l'oxygène. Ces réactions jouent un rôle déterminant dans la stabilité des produits transformés à longue durée de conservation et influencent directement leurs propriétés sensorielles et nutritionnelles.

#### **a) Oxydation non enzymatique**

L'oxydation des lipides et des pigments tels que les caroténoïdes et la chlorophylle entraîne une perte de couleur, une altération des arômes et une diminution de la valeur nutritionnelle. Ce phénomène est principalement causé par la formation de radicaux libres dans les matrices lipidiques, ce qui constitue un facteur majeur du vieillissement des produits gras. La maîtrise de l'exposition à l'oxygène, à la lumière et à la chaleur est donc essentielle pour retarder ces processus et préserver la stabilité du produit.

#### **b) Réaction de Maillard**

La réaction de Maillard joue un double rôle dans les produits transformés. Elle peut être bénéfique lorsqu'elle contribue au développement de la couleur et des arômes, comme dans le cas du café, du pain ou des viandes grillées. Cependant, lorsqu'elle se poursuit pendant le stockage, elle devient indésirable, provoquant un assombrissement excessif et la dégradation d'acides aminés essentiels comme la lysine. Le contrôle de l'humidité, du pH et de la température permet de limiter cette réaction, en particulier dans les produits déshydratés tels que les poudres laitières, les céréales et les biscuits.

### **c) Hydrolyse non enzymatique**

L'hydrolyse non enzymatique, bien que moins fréquente, peut se produire dans certains produits soumis à des conditions extrêmes, notamment un pH acide ou une température élevée. Elle conduit à la fragmentation des protéines et à la décomposition partielle des lipides, altérant ainsi la texture et la stabilité des produits. Cette forme d'hydrolyse reste toutefois limitée aux traitements thermiques intenses ou à un stockage prolongé dans des conditions inappropriées.

### **3.3. Interaction entre réactions enzymatiques et non enzymatiques**

Les réactions enzymatiques et non enzymatiques peuvent coexister et se renforcer mutuellement dans les produits transformés. L'activité enzymatique résiduelle peut libérer des composés réactifs, comme les sucres ou les acides gras libres, qui alimentent ensuite des réactions non enzymatiques telles que l'oxydation ou la réaction de Maillard. Inversement, les produits de l'oxydation lipidique, notamment les radicaux libres et les hydroperoxydes, peuvent inactiver ou dénaturer certaines enzymes, modifiant ainsi la vitesse et la nature des altérations. La compréhension de ces interactions est essentielle pour concevoir des procédés de stabilisation efficaces, notamment par le blanchiment, l'utilisation d'atmosphères contrôlées et le recours à des emballages barrière adaptés.

### **3.4. Conséquences technologiques et préventives**

Dans les produits transformés, les réactions enzymatiques et non enzymatiques déterminent la stabilité de la couleur et des arômes, la conservation des nutriments et la sécurité sanitaire. Les normes internationales insistent sur la nécessité de contrôler les températures de procédé, de sélectionner des matériaux d'emballage adaptés capables de bloquer l'oxygène et la lumière, et de former le personnel aux Bonnes Pratiques d'Hygiène afin de prévenir les contaminations enzymatiques et oxydatives. La maîtrise de ces réactions constitue un élément central de la qualité technologique et de la durabilité des produits alimentaires transformés, en cohérence avec les objectifs mondiaux de réduction des pertes alimentaires.

## **4. Facteurs influençant la vitesse des altérations**

La vitesse d'altération d'un aliment dépend de plusieurs facteurs intrinsèques, tels que la composition chimique, l'activité de l'eau et le pH, ainsi que de facteurs extrinsèques, notamment la température, l'humidité relative, l'exposition à l'oxygène, la lumière et le type

de conditionnement. Ces paramètres déterminent la cinétique de dégradation des constituants majeurs comme les lipides, les protéines, les glucides et les vitamines, et influencent directement la durée de conservation. La maîtrise de ces facteurs constitue un pilier fondamental du contrôle de la qualité et de la sécurité alimentaire.

#### **4.1. Température**

La température représente le facteur le plus déterminant dans la vitesse des réactions d'altération. Une élévation de dix degrés Celsius peut doubler ou tripler la vitesse d'oxydation ou de dégradation enzymatique. À température élevée, les réactions d'oxydation des lipides, de Maillard et d'hydrolyse sont fortement accélérées, tandis qu'un refroidissement efficace ralentit les processus enzymatiques et microbiens, prolongeant ainsi la durée de conservation. Cependant, une température trop basse peut engendrer des dégradations physiques telles que la cristallisation des graisses, le flétrissement ou la perte de texture. Une gestion rigoureuse de la chaîne du froid et l'utilisation d'emballages thermo-régulés permettent de maintenir les produits dans leur plage optimale de stabilité. Dans le cas des aliments secs ou transformés, la stabilité thermique dépend également de l'humidité du milieu, car la combinaison de chaleur et d'humidité favorise la réaction de Maillard et la dégradation des vitamines.

#### **4.2. Humidité et activité de l'eau**

L'activité de l'eau constitue un paramètre fondamental de la stabilité microbiologique et chimique des aliments. Une activité de l'eau élevée favorise la croissance bactérienne, tandis qu'une activité intermédiaire accroît la vitesse des réactions chimiques non enzymatiques, notamment la réaction de Maillard et l'oxydation. Lorsque l'activité de l'eau est faible, la majorité des réactions sont fortement ralenties, bien que certains phénomènes de migration d'humidité puissent se produire dans les produits composites tels que les biscuits, les poudres ou les confiseries. Le contrôle de l'humidité relative dans les zones de stockage est essentiel pour maintenir un équilibre hygroscopique entre le produit et son environnement. Des variations excessives d'humidité entraînent des changements texturaux tels que le ramollissement ou le dessèchement, tout en favorisant les altérations microbiologiques.

#### **4.3. Présence d'oxygène et composition de l'atmosphère**

L'oxygène joue un rôle déterminant dans la dégradation des lipides, des pigments et des vitamines sensibles. Il initie et entretient la formation de radicaux libres responsables de la

rancidité et du vieillissement oxydatif. De plus, il stimule la respiration des micro-organismes aérobies et favorise la croissance fongique. Les technologies de conditionnement modernes, notamment les atmosphères modifiées et contrôlées, permettent de limiter ces effets en remplaçant partiellement l'oxygène par du dioxyde de carbone ou de l'azote. Associées à des films barrière adaptés, ces méthodes améliorent la stabilité oxydative et prolongent la durée de conservation. L'élimination ou la neutralisation de l'oxygène résiduel à l'intérieur des emballages constitue une pratique normalisée pour la protection des produits sensibles.

#### **4.4. Lumière et rayonnement**

La lumière, en particulier les rayonnements ultraviolets et bleus, accélère la photo-oxydation des lipides et des pigments. Elle provoque la dégradation des caroténoïdes, de la chlorophylle et des vitamines A, C et E, entraînant ainsi des altérations de couleur et une perte de valeur nutritionnelle. L'exposition lumineuse favorise également la formation de radicaux libres, même en l'absence de chaleur marquée. L'utilisation d'emballages opaques ou teintés constitue une mesure efficace pour prévenir ces réactions, et les conditions d'éclairage dans les zones de stockage et de vente doivent être adaptées à la nature des produits afin de limiter les effets photochimiques.

#### **4.5. pH et composition chimique du milieu**

Le pH influence directement la stabilité chimique et biologique des aliments. Un pH acide inhibe la plupart des bactéries pathogènes mais peut accélérer certaines réactions d'hydrolyse et la dégradation de la vitamine C. À l'inverse, un pH neutre ou légèrement alcalin favorise la croissance microbienne et la réaction de Maillard. Les produits riches en lipides et en protéines sont particulièrement sensibles aux variations de pH, qui modifient la disponibilité des ions métalliques catalytiques tels que le fer et le cuivre, intensifiant ainsi les phénomènes d'oxydation lipidique.

#### **4.6. Conditionnement et barrière protectrice**

Le conditionnement constitue une barrière essentielle contre les altérations physiques, chimiques et microbiologiques. Un emballage efficace doit assurer une protection mécanique contre les chocs, une barrière sélective à l'oxygène, à l'humidité et à la lumière, ainsi qu'une stabilité thermique durant le transport et le stockage. Les emballages dits actifs, intégrant des absorbants d'oxygène ou des capteurs d'humidité, permettent d'améliorer significativement la

durée de conservation. La maîtrise du conditionnement est aujourd'hui considérée comme un élément clé des stratégies visant à réduire les pertes et le gaspillage alimentaire à l'échelle mondiale.

#### **4.7. Interactions entre les facteurs**

Les différents facteurs physiques et chimiques d'altération interagissent fréquemment entre eux. La combinaison de la chaleur et de l'humidité accélère la réaction de Maillard, tandis que la lumière et l'oxygène favorisent la photo-oxydation. Une température élevée renforce en outre l'effet catalytique des métaux sur la rancidité lipidique. Ces interactions entraînent une dégradation accélérée de la qualité des aliments. C'est pourquoi une approche intégrée combinant le contrôle thermique, la régulation de l'atmosphère et l'utilisation d'emballages protecteurs s'avère indispensable pour préserver la stabilité et la qualité des denrées alimentaires.

#### **4.8. Conséquences sur la stabilité et la durée de vie**

La maîtrise des facteurs environnementaux conditionne directement la stabilité globale des aliments. Une gestion inadéquate de ces paramètres constitue l'une des principales causes de pertes post-récolte et industrielles à l'échelle mondiale. Le contrôle simultané de la température, de l'humidité, de la lumière et de la composition gazeuse demeure essentiel pour préserver la qualité sensorielle, la valeur nutritionnelle et la sécurité sanitaire des produits alimentaires jusqu'à leur consommation. Une approche intégrée de ces paramètres garantit la prolongation de la durée de conservation et contribue à la réduction du gaspillage alimentaire.

### **5. Conséquences technologiques et économiques des altérations alimentaires**

Les altérations biologiques, chimiques et physiques exercent un impact majeur sur la qualité technologique, la valeur nutritionnelle et la durabilité économique des denrées alimentaires. Elles entraînent des pertes considérables au cours du stockage et de la distribution, compromettent la rentabilité industrielle et peuvent affecter la confiance du consommateur. La maîtrise de ces phénomènes constitue une priorité stratégique pour la sécurité sanitaire et la durabilité du système alimentaire mondial.

### **5.1. Conséquences technologiques**

Les altérations affectent directement les propriétés technologiques et sensorielles des produits. Les réactions d'oxydation et d'hydrolyse modifient la texture, la couleur, l'odeur et le goût, provoquant souvent une perte d'attrait et de valeur marchande. L'oxydation lipidique conduit à la formation de composés volatils responsables de la rancidité et de goûts indésirables. Les réactions de brunissement, qu'elles soient enzymatiques ou non enzymatiques, altèrent la coloration et la structure, rendant les produits moins attractifs. Dans les denrées céréalieres ou déshydratées, ces réactions peuvent diminuer la solubilité des protéines et la biodisponibilité des acides aminés essentiels

Les procédés technologiques tels que le blanchiment, la pasteurisation ou le conditionnement sous atmosphère modifiée visent à limiter ces dégradations, mais ils impliquent souvent une consommation énergétique élevée et peuvent altérer partiellement certains nutriments.

### **5.2. Instabilité durant le stockage et la distribution**

Une maîtrise insuffisante des conditions de conservation, notamment de la température, de l'humidité et de l'oxygène, provoque une perte prématurée de stabilité. La vitesse de dégradation des nutriments augmente de manière exponentielle avec la température, réduisant parfois de moitié la durée de vie d'un produit mal stocké. Les aliments riches en lipides, comme les huiles, les noix ou les produits carnés, sont particulièrement vulnérables à la photo-oxydation et à la rancidité, tandis que les produits sucrés subissent un brunissement accéléré. L'application de systèmes d'emballage isothermes et de barrières à l'oxygène est indispensable pour préserver la qualité technologique tout au long de la chaîne logistique.

### **5.3. Conséquences nutritionnelles et sanitaires**

Les réactions d'altération provoquent des pertes importantes en nutriments essentiels tels que les vitamines, les acides aminés et les acides gras polyinsaturés. Les vitamines C et E sont particulièrement sensibles à l'oxydation en présence d'oxygène ou de lumière, tandis que la réaction de Maillard réduit la disponibilité de la lysine, acide aminé essentiel dans les protéines végétales.

Sur le plan sanitaire, certaines altérations biologiques favorisent la croissance de micro-organismes pathogènes ou la production de toxines, surtout lorsque les conditions d'hygiène ou de température ne sont pas correctement contrôlées. L'application rigoureuse des Bonnes

Pratiques d'Hygiène et du système HACCP constitue un moyen essentiel de prévention contre ces risques. Ces démarches garantissent la maîtrise des points critiques durant la transformation, le conditionnement et le stockage.

#### **5.4. Conséquences économiques**

Les altérations alimentaires engendrent d'importantes pertes économiques pour les filières agricoles et agroalimentaires. Les pertes post-récolte peuvent atteindre plusieurs dizaines de pour cent de la production mondiale, principalement à cause de la dégradation des produits périssables. Ces pertes incluent la réduction de la valeur marchande liée à l'altération de l'apparence ou de l'odeur, le retrait de lots non conformes aux normes de qualité, ainsi que les coûts de retraitement, de destruction ou de gestion des déchets. Au-delà de l'impact financier direct, la détérioration prématurée d'un produit peut nuire à la réputation commerciale d'une marque et réduire la fidélité du consommateur. La mise en œuvre des normes internationales de qualité et des systèmes de traçabilité contribue à minimiser ces pertes et à garantir la stabilité des produits tout au long de la chaîne de distribution.

#### **5.5. Conséquences environnementales et sociétales**

Les pertes liées aux altérations alimentaires exercent un impact environnemental considérable. Le gaspillage de denrées contribue à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, à la surconsommation des ressources naturelles et à la génération de déchets organiques difficilement valorisables. Les stratégies de prévention, fondées sur le contrôle rigoureux des conditions de stockage, le développement d'emballages innovants et la valorisation des sous-produits, s'inscrivent pleinement dans une approche de durabilité conforme aux objectifs de développement durable des Nations Unies. Sur le plan sociétal, la lutte contre les altérations contribue à renforcer la sécurité alimentaire, à accroître la confiance des consommateurs et à améliorer la compétitivité du secteur agroalimentaire. Les initiatives conjointes de la FAO et de l'OMS, à travers le Codex Alimentarius, encouragent la mise en place de politiques visant à réduire les pertes post-récolte par la formation du personnel, l'amélioration des infrastructures et la normalisation des pratiques d'hygiène. Cette démarche renforce la résilience des systèmes alimentaires tout en soutenant la durabilité économique et sociale des filières de production.

## **5.6. Importance de la prévention et de la maîtrise technologique**

La prévention des altérations repose sur une approche intégrée combinant la maîtrise des paramètres environnementaux, le choix des matériaux d'emballage, l'application des bonnes pratiques d'hygiène et la formation continue du personnel. Le contrôle de la température, de l'humidité, de la lumière et de l'oxygène permet de limiter les réactions d'oxydation, de brunissement et de dégradation enzymatique. Le choix de matériaux d'emballage adaptés constitue une barrière physique et chimique contre ces altérations, tandis que les normes de fabrication et d'hygiène assurent la conformité sanitaire et la stabilité des produits. L'anticipation des processus de dégradation par modélisation cinétique permet d'optimiser la formulation et les conditions de conservation, réduisant ainsi les pertes économiques, énergétiques et environnementales. Cette approche scientifique et technologique contribue à instaurer une gestion préventive de la qualité, fondée sur la connaissance des mécanismes d'altération et sur leur maîtrise tout au long de la chaîne alimentaire.

## Conclusion générale

L'approvisionnement et le stockage des matières premières et des ingrédients constituent des étapes déterminantes du système de production agroalimentaire. Leur maîtrise conditionne directement la qualité, la sécurité sanitaire et la traçabilité des produits finis. Une gestion rigoureuse de ces opérations garantit la conformité des intrants, la prévention des risques de contamination et la continuité des processus de fabrication dans le respect des exigences réglementaires et normatives.

L'efficacité d'un système d'approvisionnement repose sur la sélection rigoureuse des fournisseurs, la fiabilité des circuits logistiques et le respect strict des conditions d'hygiène à chaque étape, depuis la réception jusqu'au stockage. De même, un stockage approprié, répondant aux exigences thermiques, microbiologiques et organisationnelles, contribue à préserver la stabilité physique, chimique et biologique des produits.

La mise en œuvre d'un dispositif de traçabilité performant, associée à la formation continue du personnel et à l'application des Bonnes Pratiques d'Hygiène (GHP) et de Fabrication (GMP), constitue un levier essentiel pour assurer un haut niveau de qualité et de sécurité alimentaire. Ces éléments participent également à la consolidation d'une culture de la qualité partagée au sein de l'entreprise et à la réduction des pertes post-récolte.

Enfin, la recherche d'une approche durable et intégrée, conciliant sécurité alimentaire, performance économique et responsabilité environnementale, s'inscrit pleinement dans les objectifs du développement durable définis par la FAO et le Codex Alimentarius. En intégrant la prévention des altérations, la valorisation des ressources et la réduction du gaspillage, le secteur agroalimentaire contribue à la construction d'un système de production plus sûr, plus équitable et plus résilient.

Ainsi, la réussite de l'approvisionnement et du stockage repose sur une organisation cohérente, une vigilance continue et une vision globale de la qualité, de la sécurité et de la durabilité tout au long de la chaîne alimentaire.

## Références bibliographie

**Bratu, A. M., et al.** (2020). *Monitoring of post-harvest maturation processes inside fruit: The role of volatiles and ethylene*. *Materials*, 13(12), 2694. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/12/2694>

**Busatto, N., & Herrera, R.** (2025). *Fruit Development and Ripening—A Molecular and Physiological View Modulating and Enhancing Fruit Quality*. *Journal of Plant Growth Regulation*. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11643-5>

**Codex Alimentarius.** (2020). *General Principles of Food Hygiene CXC 1-1969 (Rev. 2020)*. FAO/WHO. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>

**European Commission.** (2004). *Regulation (EC) No 853/2004 on the hygiene of foodstuffs (consolidated version)*. [https://food.ec.europa.eu/hygiene/legislation\\_en](https://food.ec.europa.eu/hygiene/legislation_en)

**FAO.** (2019). *Good Hygienic Practices in the Preparation and Sale of Street Food in Africa*. FAO Regional Office for Africa. <https://www.fao.org/publications>

**FAO.** (2021). *Selection and Purchasing of Raw Materials and Ingredients*. *Food Safety and Quality Series*. <https://www.fao.org/food-safety/>

**FAO.** (2021). *Food Loss and Waste Database*. <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/en/>

**FDA.** (2022). *Food Code 2022*. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/food/fda-food-code>

**Frankel, E. N.** (2005). *Lipid Oxidation* (2<sup>e</sup> éd.). Bridgwater, UK: The Oily Press. ISBN 9780953194988.

**Galić, K., Ščetar, M., & Kurek, M.** (2011). *The benefits of processing and packaging*. *Trends in Food Science & Technology*, 22(2–3), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.001>

- ICMSF (International Commission on Microbiological Specifications for Foods).** (2011). *Microorganisms in Foods 8: Use of Data for Assessing Process Control and Product Acceptance*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9374-8>
- ISO.** (2018). *ISO 22000:2018 – Food Safety Management Systems – Requirements for Any Organization in the Food Chain*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/65464.html>
- ISO.** (2020). *ISO 23412:2020 – Individually Delivered Temperature-Controlled Packages – General Requirements*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/76576.html>
- Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A.** (2005). *Modern Food Microbiology* (7<sup>e</sup> éd.). Springer Science + Business Media. <https://link.springer.com/book/10.1007/b100840>
- Kapoor, L., Simkin, A. J., Priya Doss, C. G., et al.** (2022). *Fruit ripening: dynamics and integrated analysis of carotenoids and anthocyanins*. *BMC Plant Biology*, 22, 27. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03411-w>
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlüter, O., & Schoessler, K.** (2011). *Emerging technologies in food processing*. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 203–235. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124129>
- Labuza, T. P., & Riboh, D.** (1982). *Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods*. *Food Technology*, 36(10), 66–74.
- Mahajan, P. V., et al.** (2014). *Postharvest treatments of fresh produce: Emerging technologies*. *Frontiers in Plant Science*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4006172/>
- Martins, S. I. F. S., Jongen, W. M. F., & van Boekel, M. A. J. S.** (2000). *A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling*. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9–10), 364–373. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00022-X)
- Niu, X. Y., Zhu, K. X., Guo, X. N., et al.** (2025). *Wheat grains post-harvest maturation improving the quality of dough and steamed bread: Insights into physicochemical characteristics of protein and carbohydrates*. *Food Hydrocolloids*, 164, 111161. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111161>

**Osorio, S., et al.** (2013). *Molecular regulation of fruit ripening*. *Frontiers in Plant Science*.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3682129/>

**Prasanna, V., et al.** (2007). *Fruit ripening phenomena — an overview*. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 47(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10408390600976841>

**Priyadarshini, A., Rajauria, G., O'Donnell, C. P., & Tiwari, B. K.** (2019). *Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3082–3101.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890>

**Shahidi, F., & Zhong, Y.** (2010). *Lipid oxidation and improving the oxidative stability*. *Chemical Society Reviews*, 39(11), 4067–4079. <https://doi.org/10.1039/B922183M>

**Tipu, M. M. H., et al.** (2024). *Ethylene and its crosstalk with hormonal pathways in fruit ripening*. *Frontiers in Plant Science*.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2024.1475496/full>

**UNECE (United Nations Economic Commission for Europe).** (2016). *Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be Used for such Carriage (ATP)*. <https://unece.org/transport/standards/transport/agr-ATP>

**Whitaker, J. R.** (1994). *Principles of Enzymology for the Food Sciences* (2<sup>e</sup> éd.). CRC Press.

**WHO.** (2006). *Five Keys to Safer Food Manual*. World Health Organization, Geneva.  
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241594639>