

République Algérienne Démocratique et
Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la
Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure Vétérinaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
المدرسة الوطنية العليا للبيطرة



POLYCOPIÉ

Option : Hygiène et Sécurité Alimentaires

**Laboratoire Hygiène Alimentaire et Système Assurance Qualité
(HASAQ)**

**Altérations microbiennes et modes de conservation
de la viande bovine**

Dr BOUHAMED Radia

Année universitaire : 2019-2020

Liste des abréviations

AA	Acides aminés
AAH	Amines aromatiques hétérocycliques
AAI	Acides aminés indispensables
Acétyl-CoA	Acétyl-Coenzyme A
ADN	Acide désoxyribonucléique
AGS	Acides gras saturés
ANC	Apports nutritionnels conseillés
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ARN	Acide ribonucléique
ATP	Adénosine triphosphorique
a_w	Water activity
<i>B.</i>	<i>Bacillus</i>
<i>B.</i>	<i>Bacillus</i>
<i>C.</i>	<i>Brochothrix</i>
CAF	<i>Clostridium</i>
DFD	Calcium activated factor
DDM	Dark firm dry
DLC	Date de durabilité minimale
<i>E.</i>	Date limite de consommation
FAD	<i>Escherichia</i>
FAO	Flavine adénine dinucléotide
kGy	Food and agriculture organization of the united nations
kPa	Kilogray
<i>L.</i>	Kilopascal
<i>L.</i>	<i>Lactobacillus</i>
LN	<i>Listeria</i>
MAP	Lipides neutres
NAD	Modified atmosphere packaging
NADH	Nicotinamide adenine dinucleotide
NADP	Nicotinamide adenine dinucleotide (forme réduite)
OCDE	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
OMS	Organisation de coopération et de développement économiques
<i>P.</i>	Organisation mondiale de la santé
pH	<i>Pseudomonas</i>
PL	Potentiel hydrogène
PRE	Phospholipides
PSE	Pouvoir de rétention d'eau
<i>S.</i>	Pale Soft Exsudative
<i>S.</i>	<i>Serratia</i>
spp.	<i>Staphylococcus</i>
TIA	Species plural
TMA	Toxi-infections alimentaires
	Triméthylamine

Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1. Evolution du muscle en viande (tableau réalisé selon les données de	5
Tableau 2. Composition en nutriments de neuf muscles (Bauchart <i>et al.</i> , 2008).....	11
Tableau 3. Inventaire des principales espèces pouvant constituer l'écosystème bactérien de la viande bovine (altérante/bénéfique) (Nychas <i>et al.</i> , 2008)	19
Tableau 4. Effets et mécanismes impliqués dans les différents procédés de conservation des viandes (Frayssé et Darré, 1990).....	58

Liste des figures

Figure 1. Principales modifications intervenant dans le tissu musculaire après abattage (Frayssé et Darré, 1990)	4
Figure 2. Composantes de la qualité de la viande	8
Figure 3. Influence de la composition de l'aliment sur le développement des bactéries : exemple du muscle (Jeantet <i>et al.</i> , 2006).....	21
Figure 4. Vitesses de modification des aliments en fonction de l' a_w (Jeantet <i>et al.</i> , 2006)	22
Figure 5. pH minimum des micro-organismes (Jeantet <i>et al.</i> , 2006)	23
Figure 6. Croissance des micro-organismes psychrophiles et psychrotrophes en fonction de la température (Jeantet <i>et al.</i> , 2006)	25
Figure 7. Croissance de micro-organismes thermotrophes et thermophiles en fonction de la température (Jeantet <i>et al.</i> , 2006)	26
Figure 8. Influence du potentiel d'oxydoréduction sur la croissance (Jeantet <i>et al.</i> , 2006).....	27

Table des matières

Introduction	1
Partie 1 : Evolution <i>post-mortem</i> du muscle et qualités de la viande bovine	
1. Evolution <i>post-mortem</i> du muscle des bovins.....	4
2. Qualités de la viande bovine	7
2.1. Définitions de la viande.....	7
2.2. Définition de la qualité	7
2.3. Qualités de la viande.....	8
2.3.1. Qualité nutritionnelle	8
2.3.2. Qualités sensorielles.....	11
2.3.3. Qualité hygiénique et sanitaire.....	13
2.3.4. Qualité technologique	14
Partie 2 : Flore d'altération de la viande bovine	
1. Principales espèces bactériennes de la viande bovine.....	15
1.1. Bactéries commensales bénéfiques	16
1.2. Bactéries pathogènes	16
1.3. Bactéries d'altération.....	17
2. Evolution de la flore d'altération et dégradation de la viande	20
2.1. Evolution de la flore d'altération.....	20
2.1.1. Structure de l'aliment.....	20
2.1.2. Composition de l'aliment.....	21
2.1.3. Activité de l'eau	22
2.1.4. pH.....	22
2.1.5. Température	23
2.1.6. Potentiel d'oxydoréduction.....	26
2.1.7. Composés antimicrobiens	28
2.2. Dégradation de la viande	28
2.2.1. Dégradations aérobies.....	28
2.2.2. Dégradations anaérobies	29
3. Modifications microbiennes et incidence sur la qualité de la viande.....	31
3.1. Odeur et saveur (flaveur).....	31
3.2. Aspect et couleur	32
3.3. Texture.....	33
4. Principales voies du catabolisme.....	33
4.1. Catabolisme des glucides.....	33
4.1.1. Glycolyse	34
4.1.2. Alternatives de la glycolyse	34
4.1.3. Fermentations bactériennes.....	34
4.1.5. Métabolisme aérobie du pyruvate.....	35
4.1.6. Métabolisme anaérobie du pyruvate	36
4.2. Catabolisme des protéines	38
4.2.1. Protéolyse.....	38
4.2.2. Catabolisme des acides aminés	39
4.2.3. Fermentations putrides.....	41
4.2.4. Dégradation de l'urée.....	41
4.3. Catabolisme des lipides et composés voisins	41

Table des matières

Partie 3: Modes de conservation de la viande bovine	
1. Procédés d'inhibition des micro-organismes	43
1.1. Transformation à basse température.....	43
1.1.1. Généralités	43
1.1.2. Définitions.....	43
1.1.3. Avantages.....	44
1.1.4. Inconvénients	44
1.2. Environnement gazeux modifié.....	45
1.2.1. Généralités	45
1.2.2. Définitions.....	46
1.2.3. Technique.....	46
1.2.4. Avantages et inconvénients.....	46
1.3. Transformations par réduction d'eau.....	47
1.3.1. Salage.....	47
1.3.2. Déshydratation	49
1.4. Additifs conservateurs	51
1.4.1. Définition	51
1.4.2. Technique.....	51
1.4.3. Avantages.....	51
1.4.4. Inconvénients	52
2. Procédés de destruction des micro-organismes.....	52
2.1. Traitement thermique proprement dit	52
2.1.1. Définition.....	53
2.1.2. Technique.....	53
2.1.3. Avantages.....	54
2.1.4. Inconvénients	54
2.2. Fumage	54
2.2.1. Définition	55
2.2.2. Techniques	55
2.2.3. Avantages.....	55
2.2.4. Inconvénients	56
2.3. Ionisation ou irradiation.....	56
2.3.1. Définition	56
2.3.2. Techniques	57
2.3.3. Avantages.....	57
2.3.4. Inconvénients	57
Liste des références bibliographiques	59

Introduction

Bien qu'elles ne soient pas strictement nécessaires dans l'alimentation humaine, les viandes bovines présentent des propriétés nutritionnelles qui en font un aliment important pour une alimentation équilibrée (Rémond *et al.*, 2010). C'est une source privilégiée de protéines bien équilibrées en acides aminés et très digestes chez l'homme, de fer, en particulier de fer héminique, très bien assimilé, de zinc et de vitamines B3 et B6. Elle constitue également une source majeure de sélénium et de vitamine B12. La majorité des muscles apporte moins de 10 % de lipides riches en acides gras saturés et mono-insaturés. Elle reste une source importante d'acides gras polyinsaturés à chaîne longue bien équilibrée pour l'homme entre les séries n-6 et n-3, mais déficitaire en DHA (Bauchart et Gandemer, 2010). De plus, du fait de sa teneur en carnosine (pouvoir tampon, propriété antioxydante, etc.) et la potentialité de ses protéines à libérer des peptides bioactifs, notamment antihypertenseurs, la viande pourrait présenter de nouveaux atouts nutritionnels (Rémond *et al.*, 2010).

Cependant, leur image positive auprès des consommateurs a été fortement dégradée ces dernières années par les crises sanitaires des filières viandes (encéphalite spongiforme bovine, grippe aviaire, dioxine, etc.), et par la mise en avant par des études épidémiologiques de liens potentiels entre le consommateur de viande et l'apparition de certaines pathologies chroniques (Rémond *et al.*, 2010).

De même, la viande bovine peut être également à l'origine de défauts d'hygiène, entraînant risque sanitaire ou pertes économiques supplémentaires en raison de la contamination inévitable de cette denrée fragile par des espèces bactériennes potentiellement pathogènes pour l'homme, et par des flores d'altération (Bauchart et Picard, 2010 ; Guiraud, 2012). Par conséquent, la viande est un substrat favorable au développement des micro-organismes, essentiellement des micro-organismes protéolytiques (flore d'altération) qui entraînent des modifications néfastes sur l'odeur, la couleur, la texture et produisent des substances toxiques. Il s'agit donc d'un produit fragile qui doit être strictement surveillé. Le développement microbien est cependant gêné par la structure compacte, la présence de téguments, et surtout par le stockage au froid (Guiraud, 2012).

Il convient de noter que la viande évolue en dehors de toute action microbienne. Après la mort de l'animal, on observe des modifications physico-chimiques et enzymatiques. Il y a d'abord une phase de pantelance, une phase de rigidité cadavérique, puis une phase de maturation. La contamination des carcasses est issue de l'animal, du manipulateur ou du matériel. La flore de contamination animale provient de la peau (microcoques, *Pseudomonas* dont *P. fluorescens*, *P. fragi*, *P. putida* et autres germes de la flore banale Gram-, staphylocoques dont *S. aureus*, lactobacilles, streptomycètes, *Listeria*), ou bien du tube digestif (coliformes dont *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, streptocoques fécaux, éventuellement Entérobactéries pathogènes telles que *Salmonella* et *Shigella*). La viande peut être également contaminée au cours du stockage et

Introduction

des manipulations ultérieures par de nombreux germes provenant de l'air, du sol, des manipulateurs, éventuellement de l'eau de lavage. Il s'agit le plus souvent de *Pseudomonas* et autres germes Gram-, de bactéries sporulées comme *Bacillus* (dont *B. cereus*), *Clostridium* (dont *C. perfringens* et éventuellement *C. botulinum*), de coliformes et d'Entérobactéries pouvant être pathogènes (*E. coli*, *Salmonella*, *Shigella*), de staphylocoques, de *Listeria*, de levures, de bactéries corynéformes (*Brochothrix thermosphacta*), de spores de moisissures (*Cladosporium*, *Sporotrichum*, *Geotrichum*, *Thamnidium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Monilia*, etc.) (Guiraud, 2012).

Toutefois, d'autres espèces bactériennes, même en nombre élevé, n'auront pas d'impact sur la qualité de la viande. Elles pourront même exercer un rôle positif en influençant l'écosystème bactérien de la viande au détriment d'espèces indésirables. Pour apprécier le niveau d'hygiène de la viande, il est donc important de considérer à la fois l'aspect qualitatif (type de bactéries présentes) et quantitatif (niveau de développement des espèces), en gardant à l'esprit qu'un défaut d'hygiène n'est pas toujours associé à un niveau élevé de population bactérienne (Bauchart et Picard, 2010).

Malgré l'application des règles d'hygiène, la viande sera contaminée par une grande variété d'espèces bactériennes à un taux initial relativement faible. La nature de la matrice viande et les conditions de sa conservation conditionneront par la suite le développement de cet écosystème microbien (Labadie, 1999).

Les différents modes de conservation de la viande vont donc viser à réduire sélectivement les bactéries indésirables pour le produit ou pour la santé, tout en favorisant le développement des bactéries bénéfiques. Au-delà du fait que la viande représente un substrat nutritif qui permet le développement de nombreuses espèces bactériennes, les conditions de conservation qui vont lui être appliquées représenteront autant de conditions stressantes face auxquelles les aptitudes de résistance des différents groupes bactériens seront bien variées. Ces conditions constituent donc des barrières au développement de certaines espèces, tout en représentant des environnements favorables pour d'autres. Les méthodes de conservation devront donc tendre à un bon équilibre de l'écosystème microbien (Champomier-Vergès *et al.*, 2010). La découverte de procédés ancestraux de conservation des aliments, tels que le feu (qui a permis la cuisson et le fumage), le séchage, le salage ou la bioacidification ont représenté les étapes clés de l'histoire de l'humanité (Mescle 2002 cité par Jeantet *et al.*, 2006).

En ce qui concerne la viande bovine fraîche, les deux principales méthodes de conservation sont l'utilisation des basses températures et la modification de l'environnement gazeux. L'utilisation de basses températures est suffisante pour ralentir, voir inhiber le développement des bactéries, mais certaines espèces sont adaptées pour se développer au froid. C'est le cas notamment des

Introduction

espèces psychrotrophes comme les *Pseudomonas* qui, comme on l'a précisé, sont redoutées dans les environnements froids et ventilés comme les abattoirs et les chambres froides de stockage. Du fait de ses limites, la température est donc rarement la seule technique utilisée pour conserver la viande bovine. On lui associe en général un environnement gazeux modifié (Champomier-Vergès *et al.*, 2010).

Enfin, d'une manière générale, les transformations visent à améliorer les qualités sanitaires, technologiques et sensorielles des produits et à augmenter leur durée de conservation. On peut les classer en deux catégories : les transformations à basse et à haute température (Astruc *et al.*, 2010).

Dans ce polycopié, consacré aux altérations d'origine microbienne et aux modes de conservation de la viande bovine, seront abordées les parties suivantes :

- Partie 1 : Evolution *post-mortem* du muscle et qualités de la viande bovine ;
- Partie 2 : Flore d'altération de la viande bovine ;
- Partie 3 : Principaux modes de conservation de la viande bovine.

Partie 1 : Evolution *post-mortem* du muscle et qualités de la viande bovine

Avant d'entamer la partie concernant les viandes altérées, il est primordial de décrire l'évolution *post-mortem* du muscle ainsi que les qualités de la viande bovine.

1. Evolution *post-mortem* du muscle des bovins

Le passage de l'état vivant à un état ultime de maturation de la carcasse comporte un certain nombre de modifications physico-chimiques qui se produisent au cours de phases plus ou moins longues (Frayssé et Darré, 1990).

Le muscle passe par 3 phases afin qu'il devienne consommable :

- Phase de pantelance ;
- Phase de rigidité cadavérique (*rigor mortis*) ;
- Phase de maturation.

La figure 1 schématise les principales modifications intervenant dans le muscle après abattage alors que le tableau 1 regroupe les modifications constatées lors de ces différentes phases.

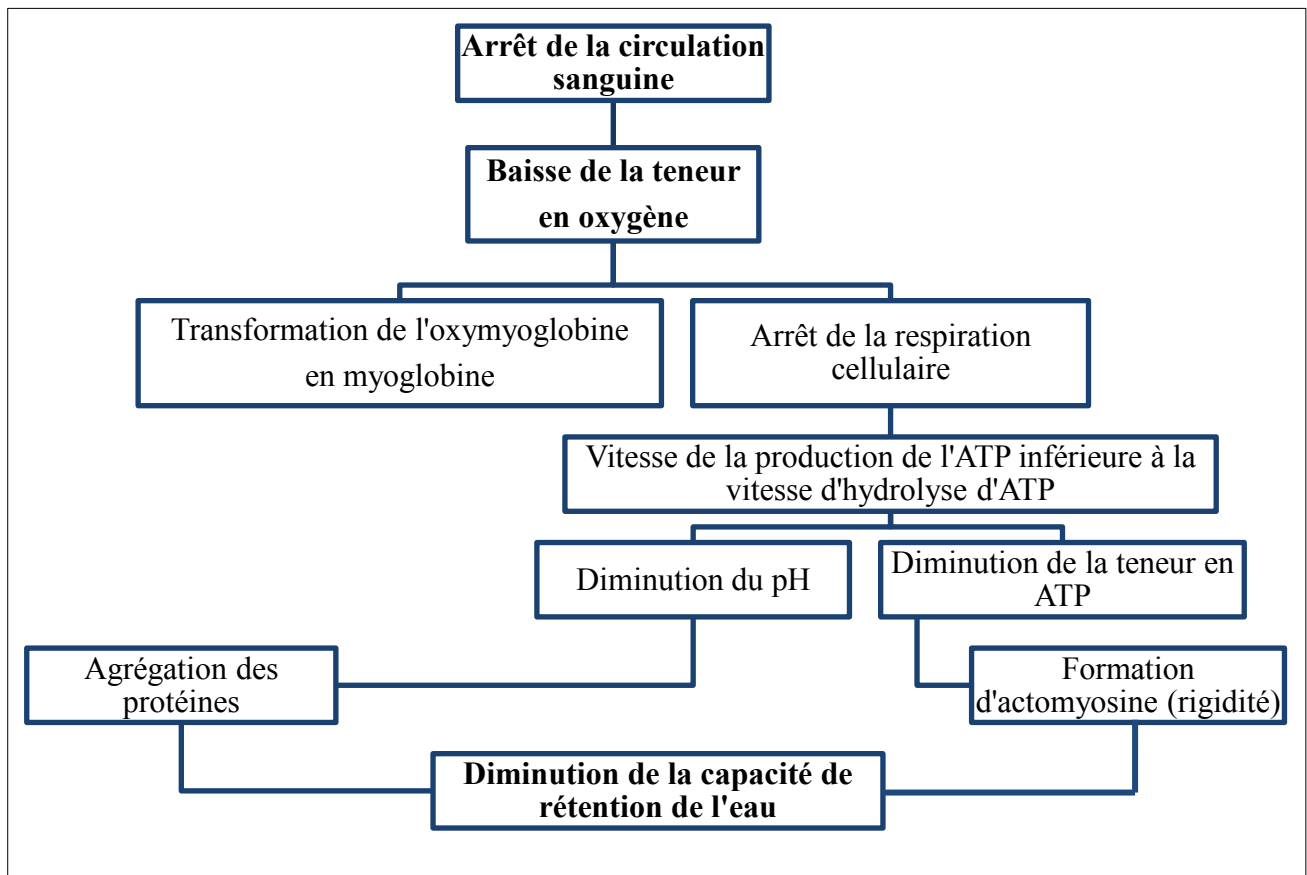


Figure 1. Principales modifications intervenant dans le tissu musculaire après abattage (Frayssé et Darré, 1990)

Tableau 1

. Evolution du muscle en viande (tableau réalisé selon les données de Frayssé et Darré, 1990)

Phase	Etat	Caractéristique
Abattage / Pantelance	Pantelant (carcasse souple, muscles flasques)	-pH (<i>potentiel hydrogène</i>) voisin de 7 puis s'abaisse progressivement au fur et à mesure de la synthèse d'acide lactique à partir du glycogène (voie de la glycolyse anaérobie) -Eau fortement liée aux protéines (fibres musculaires gonflées et le muscle n'exsude pas) -Couleur du muscle relativement foncée (manque d'oxygénation) -Carcasse agitée de frissons -Durée : 3 à 4 heures (bovin). La quantité d'ATP (<i>Adénosine triphosphorique</i>) disponible conditionne la durée de cette phase
	Rigide (carcasse rigide, muscles durs)	-Commence à s'installer dès que le muscle contient 90% du taux normal d'ATP contenu dans le muscle vivant au repos. -Pleinement installée lorsque le taux d'ATP atteint 50% du taux normal -Muscles solidement fixés à l'os et les membres sont difficilement mobilisables (ATP fait défaut pour délier les complexes d'actomyosine) -pH de 5,7 à 5,4 : Epuisement des réserves en glycogène (production d'acide lactique). A ces valeurs, la plupart des réactions enzymatiques sont inhibées -Diminution du pouvoir de rétention d'eau (PRE) -Couleur de la viande s'éclaircit (resserrement des myofibrilles) -Rapidité de l'installation dépend de la quantité de glycogène présente dans le muscle -Température : agit sur les mécanismes d'hydrolyse de l'ATP. Les systèmes enzymatiques mis en jeu sont différents selon les températures
Rigidité cadavérique / <i>rigor mortis</i>		

Maturation	Rassis (carcasse souple, muscles tendres) -Débute dès l'installation de la rigidité cadavérique -Muscle redevient souple, mou, dépressible. Les membres de la carcasse peuvent être mobilisés -Liée à l'évolution physico-chimique et biochimique des éléments intrinsèques du muscle et non à des éléments extérieurs tels que les micro-organismes -Apparition de processus enzymatiques participant au développement des qualités organoleptiques de la viande, notamment la tendreté -Augmentation légère du pH à 5,7-5,8 (libération de quelques acides aminés et éléments de dégradation de l'ATP (Hypoxantine + ribose)). -Augmentation du PRE -Viande juteuse à la coupe et exsude légèrement -Couleur agréable : formation d'oxymyoglobine au contact de l'air -Des précurseurs de la flaveur de la viande qui se développe lors de la cuisson sont représentés par les sucres tels que le ribose ainsi que les nucléotides tels que l'inosine et l'hypoxantine. Le catabolisme du glycogène se poursuit même après l'arrêt de la glycolyse, grâce à l'action d'amylase, d'amylo-1-6-glycosidase et de maltase (glycogène->dextrine->maltose->glucose) -Des enzymes protéolytiques des cellules musculaires (cathepsines) et des protéases libres actives à un pH supérieur à 7 (<i>calcium activated factor</i> ou CAF) permettent l'hydrolyse des protéines -Maturation optimale : 16 jours à 0°C, 14 jours à 2°C, 10 à 20 jours à 4°C, 8 jours à 6°C, 3 à 4 jours à 15°C. Pour les viandes congelées en phase de rigidité cadavérique maintenue à -12°C, la maturation est obtenue que 5 à 8 mois après le début du stockage
-------------------	---

2. Qualités de la viande bovine

2.1. Définitions de la viande

La viande est la matière alimentaire composée de tissu musculaire squelettique (muscles striés) obtenues après la mise à mort des mammifères domestiques (Craplet, 1966). Il est à noter que la viande de bœuf et de veau font partie des viandes rouges. Par ailleurs, l'appellation viande transformée désigne une viande qui a été transformée par salaison, maturation, fermentation, fumaison ou par d'autres processus mis en œuvre afin de rehausser sa saveur ou améliorer sa conservation (OMS, 2015).

2.2. Définition de la qualité

D'après la norme AFNOR NX-X-50-109, la qualité est l'aptitude d'un produit ou d'un service à satisfaire les besoins des utilisateurs. Etant donné que cette définition s'avère extrêmement large, elle doit être précisée pour les viandes. En effet, certaines caractéristiques de qualité tiennent d'abord au fait que la viande est un aliment. Tandis que d'autres sont liées au fait que les utilisateurs consommateurs mais aussi transformateurs ont des exigences diverses et parfois antagonistes (Frayssé et Darré, 1990).

Les composantes de la qualité de la viande sont schématisées par la figure 2.

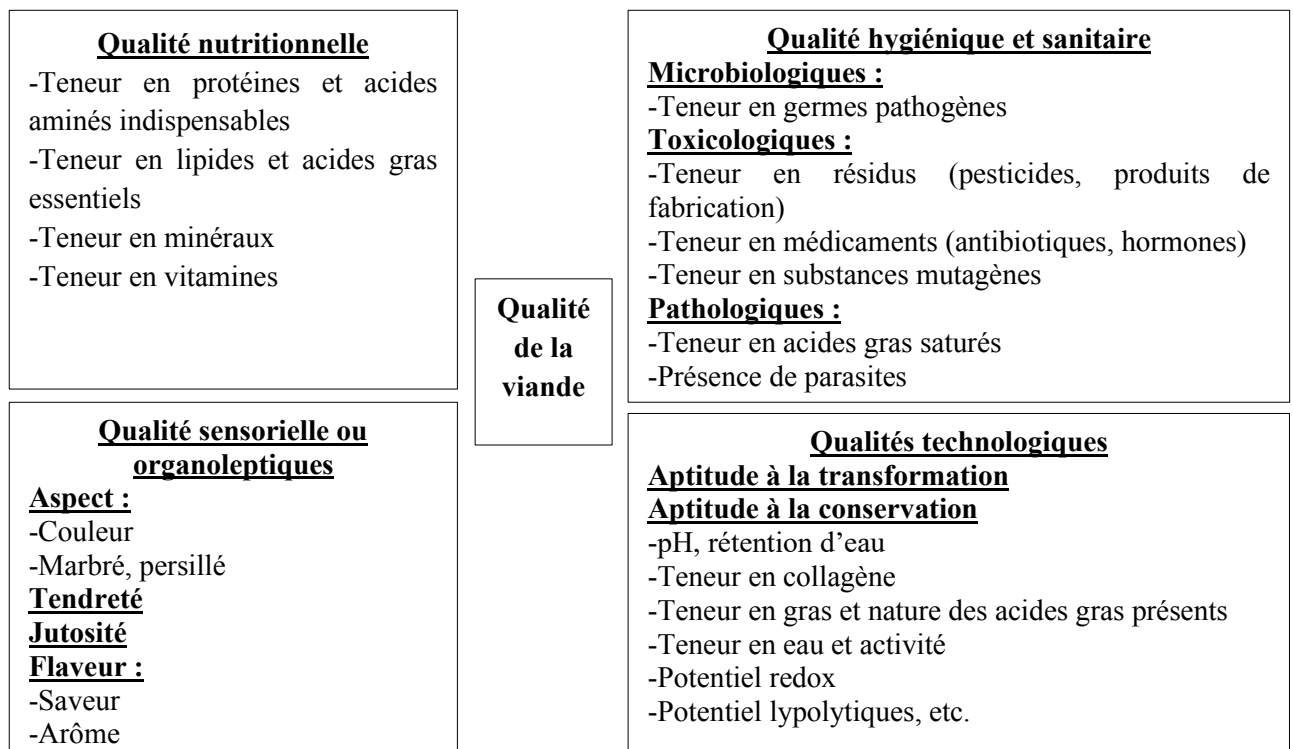


Figure 2. Composantes de la qualité de la viande

2.3. Qualités de la viande

2.3.1. Qualité nutritionnelle

Du point de vue nutritif, la viande est une substance riche en eau, en protéines de haute valeur et en graisses mais elle contient très peu de glucides (glycogène) (Guiraud, 2012).

La viande occupe une place de choix dans notre alimentation en raison de :

- Son niveau de consommation qui reste très important. En 2016, la consommation de la viande bovine a été estimée à près de 10 kg de viande /personne/an dans le monde. En 2026, la consommation de viande bovine devrait s'accroître de près de 6 % dans les pays développés et d'environ 17 % dans les régions en développement (FAO, 2017) ;
- Sa composition, qui permet de couvrir une proportion conséquente des apports nutritionnels conseillés pour certains nutriments (100g de viande bovine couvre environ un tiers des apports recommandés en fer, en zinc et en vitamines B3, B6 et B12) (Bauchart et Gandemer, 2010) ;
- Son rôle structurant de notre prise alimentaire, bon nombre de nos repas étant organisés autour d'un plat principal à base de viande contribuant grandement à notre équilibre alimentaire (Bauchart et Gandemer, 2010).

a. Composants tissulaires majeurs

La teneur en matière sèche des viandes varie en fonction des morceaux (de 25,6 à 29,9 g/100 g de tissu frais cru). Elle est composée essentiellement de protéines (19 à 23 g/100 g) et de lipides (phospholipides et triglycérides). Les teneurs en matière sèche et en protéines sont très dépendantes de celle des lipides totaux. En effet, plus un morceau est riche en lipides, plus il est pauvre en eau et en protéines (Bauchart et Gandemer, 2010).

b. Protéines et acides aminés

Il est possible de classer les protéines constituant la viande en protéines contractiles (myosine, actine) (environ 60 %), protéines sarcoplasmiques (environ 30 %) et protéines du tissu conjonctif (environ 10 %). Parmi les peptides constituant la viande, nous pouvons citer les peptides bioactifs tels que la carnosine (β -alanine-L-histidine) et le glutathion (GSH : L- γ -Glutamyl-L-cysteinyl-glycine) (Bauchart et Gandemer, 2010).

Partie 1 : Evolution *post-mortem* du muscle et qualités de la viande bovine

Hormis le fait que les viandes soient très riches en protéines (50 % à 80 % de l'énergie), la teneur du muscle en collagène influence fortement la composition de la viande en acides aminés (AA) car le collagène est pauvre en AA indispensables (AAI), carencée en tryptophane mais riche en proline, hydroxyproline et glycine. De ce fait, plus la viande est riche en collagène, moins elle contient d'AAI. Il faut cependant, noter que, même pour des teneurs extrêmes en collagène (20 % dans la joue), l'impact sur la composition en AAI reste modéré. Contrairement aux autres sources de protéines alimentaires, les protéines de la viande sont particulièrement riches en lysine, histidine, et leur équilibre en AAI est proche du besoin de l'homme, de l'enfant à l'adulte (Bauchart et Gandemer, 2010).

c. Micronutriments minéraux

Une portion de 100 g de viande de bœuf couvre de 20% à 30% des apports nutritionnels conseillés (ANC) en fer, zinc et sélénium de l'homme et de la femme adultes (ANSES, 2001 cité par Bauchart et Picard, 2010).

La teneur en fer, en particulier le fer héminique, est très dépendante du type métabolique des muscles qui composent le morceau : les muscles glycolytiques (plat de côtes et faux-filet) sont les plus pauvres en fer (2,2 à 2,3 mg/100 g), alors que les muscles les plus oxydatifs (hampe, bavette et joue) en sont les plus riches (3,2 à 3,7 mg/100 g). Concernant les autres muscles, muscles à métabolisme intermédiaire (paleron, entrecôte et macreuse), ils apportent des quantités intermédiaire en fer (2,5 à 2,9 mg/100 g). Cette relation entre teneur en fer et métabolisme énergétique des muscles s'explique par le fait que les muscles oxydatifs utilisent les lipides qu'ils oxydent pour leurs besoins énergétiques. De ce fait, ces muscles ont besoin d'oxygène apporté par la myoglobine contenant du fer héminique et mettent en œuvre, pour oxyder les acides gras, des enzymes dont bon nombre contiennent du fer dans leur site actif (Bouchart et Gandemer, 2010).

d. Micronutriments vitaminiques du groupe B

La viande est une source de vitamine B3 ou niacine (3,7 à 5,8 mg/100 g), B6 ou pyridoxine (0,15 à 0,51 mg/100 g) et B12 (1,2 à 7,2 µg/100 g). Si la race affecte peu le contenu en B3 des morceaux, ce paramètre dépend à parts égales du morceau et de l'individu. Les morceaux composés de muscles glycolytiques tendent à être plus riches en vitamine B3 que ceux composés de muscles oxydatifs. Concernant la teneur de la viande en vitamine B6, elle varie en fonction du muscle et de l'individu même si les morceaux formés de muscles oxydatifs tendent à en contenir plus que ceux composés de muscles glycolytiques. Enfin, pour ce qui est de la vitamine B12, ce paramètre

est étroitement lié au morceau (93% de la variabilité). Les morceaux composés de muscles glycolytiques (faux-filet, tendre de tranche, plat de côtes, entrecôte) en sont les plus pauvres (1 à 3 µg/100 g), alors que ceux découpés dans les muscles oxydatifs (joue, hampe, bavette) en sont plus riches (4,4 à 7,8 µg/100 g) (Bauchart et Gandemer, 2010).

e. Lipides

Les lipides totaux des viandes comprennent les lipides neutres (LN) et les phospholipides (PL). Les lipides neutres des viandes sont essentiellement constitués de triglycérides (94 % des LN) stockés dans les tissus adipeux inter et intramusculaires associés, pour une faible part de cholestérol libre (1,8 %), d'esters de cholestérol (0,7 %), d'acides gras libres (1,5 %) et de glycérides partiels (diglycérides et monoglycérides : 1,3 %) (Habeanu *et al.*, 2008).

Les phospholipides, quant à eux, ils sont constitués dans les viandes par les phosphatidyls choline (lécithine) et éthanolamine (Bauchart *et al.*, 2008), et secondairement par les phosphatidyls inositol et sérine, des cardiolipides et la sphingomyéline, tous localisés dans les membranes cellulaires. Les acides gras (acides gras saturés et mono-insaturés) représentent environ 90 % du poids des triglycérides, alors qu'ils ne représentent que 66 % du poids des phospholipides. La teneur en phospholipides reste relativement constante dans les viandes. Néanmoins, la teneur en lipides des viandes est étroitement liée à la teneur en triglycérides (Bauchart et Gandemer, 2010).

Le tableau 2 présente la composition en nutriments de neuf morceaux de viande bovine.

Tableau 2. Composition en nutriments de neuf muscles (Bauchart *et al.*, 2008)

	Faux-filet	Entrecôte	Tende de tranche	Plat de côte	Paleron	Macreuse	Bavette	Joue	Hampe
Nutriments majeurs									
Matière sèche (g)	29,0-29,9	30,1-31,5	25,6-25,1	28,9-29,2	28,4-26,9	25,6-25,3	26,1-26,5	27,4-26,2	29,9-27,2
Protéines (g)	22,6-22,1	21,5-20,1	23,3-22,8	21,3-21,1	21,4-21,0	22,5-21,2	20,7-20,1	22,7-21,9	19,1-19,0
Lipides (g)	6,2-7,3	7,6-9,8	2,4-2,3	7,4-7,7	7,1-6,0	3,1-3,7	5,1-6,2	4,9-5,2	9,8-7,4
Minéraux majeurs									
Fer total (mg)	2,38-2,16	2,39-2,62	2,74-2,64	2,30-2,04	2,49-2,51	2,72-2,99	3,39-3,21	3,28-3,08	3,59-3,77
Fer héminique (mg)	1,75-1,38	1,83-1,69	1,78-1,71	1,58-1,41	1,89-1,84	1,94-1,86	2,39-2,14	2,09-2,04	2,46-2,33
Zinc (mg)	3,56-2,95	5,23-5,13	3,67-3,25	5,23-4,67	4,45-5,48	4,56-4,62	7,04-6,55	2,87-2,53	4,52-4,49
Sélénium (µg)	10,8-10,5	9,8-10,4	9,8-10,3	10,4-10,5	10,0-10,4	10,5-10,8	11,1-11,1	14,2-14,6	11,5-12,0
Vitamines du groupe B									
B3 (mg)	5,9-5,7	4,6-4,2	5,3-5,1	5,1-4,7	3,7-3,6	4,4-4,4	4,2-4,2	4,6-4,7	4,0-3,9
B6 (mg)	0,44-0,51	0,30-0,38	0,47-0,53	0,31-0,40	0,26-0,26	0,42-0,46	0,24-0,28	0,15-0,15	0,24-0,32
B12 (µg)	1,15-1,23	1,56-1,60	1,02-1,30	1,84-1,77	2,82-2,73	1,81-1,97	3,16-3,08	7,80-6,68	4,38-4,83

2.3.2. Qualités sensorielles

Les propriétés sensorielles d'un aliment regroupent les caractéristiques que le consommateur peut percevoir directement grâce à ses sens.

Elles sont au nombre de trois (Micol *et al.*, 2010) :

- Qualitative, qui est la caractéristique de ce qui est perçu (goût salé, etc.) ;
- Quantitative, qui représente l'intensité de la sensation (peu intense à intense) ;
- Hédonique, qui caractérise le plaisir ressenti par le consommateur.

Pour la viande des ruminants, les principales caractéristiques sensorielles sont représentées par la couleur, la tendreté, la jutosité et la flaveur (Touraille, 1994).

a. Couleur

La couleur est considérée comme étant la première caractéristique qui est perçue par le consommateur. C'est souvent la seule dont il dispose pour choisir la viande au moment de l'achat.

La couleur rouge de la viande lui est procurée par un pigment, la myoglobine, protéine permettant le transport de l'oxygène dans le muscle comme l'hémoglobine dans le sang. Au sein du muscle, la myoglobine se trouve sous forme réduite, de couleur pourpre, en raison de l'absence d'oxygène. Cependant, en surface, elle se trouve sous forme oxygénée car elle est au contact de l'air, ce qui confère la couleur rouge vif de la viande, couleur appréciée lors de l'achat. Après une exposition prolongée à l'air, cette couleur est instable car le pigment s'oxyde en metmyoglobine, de couleur brunâtre, désagréable à l'œil de l'acheteur (Micol *et al.*, 2010).

Par ailleurs, l'évolution du pH après abattage peut également affecter la couleur. Un pH bas entraîne une dégradation partielle de la myoglobine, ce qui induit une décoloration du muscle (viande PSE (*Pale Soft Exsudative*) ou pâles, molles, exsudatives ou « viandes pisseuses »). A l'inverse un pH élevé donne à la viande un aspect sombre (viande DFD (*Dark Firm Dry*) ou sombres, fermes et sèches ou « viandes fiévreuses ») (Frayssé et Darré, 1990).

b. Tendreté

La tendreté peut être définie comme la facilité avec laquelle une viande se laisse trancher et mastiquer, au contraire d'une viande dure, difficile à mastiquer (Frayssé et Darré, 1990 ; Touraille, 1994). C'est la qualité sensorielle la plus déterminante pour le consommateur de viande bovine (Frayssé et Darré, 1990 ; Micol *et al.*, 2010). C'est aussi le critère de qualité d'origine multifactorielle le plus variable, et donc le plus difficile à maîtriser ou à prédire (Micol *et al.*, 2010). La tendreté est surtout déterminée par les constituants protéiques non solubles de la viande (Frayssé et Darré, 1990). En effet, deux facteurs principaux jouent un rôle dans la tendreté de la viande : d'une part, le tissu conjonctif (collagène), par sa quantité et sa nature, et, d'autre part, la structure myofibrillaire, par son état de contraction et son amplitude de maturation au-delà de l'abattage (Frayssé et Darré, 1990 ; Micol *et al.*, 2010). La tendreté est appréciée soit par des méthodes d'analyse sensorielle faisant appel à des jurys entraînés, soit par des méthodes instrumentales qui reposent sur les propriétés physiques ou rhéologiques de la viande (cisaillement, compression) (Micol *et al.*, 2010).

c. Jutosité

La jutosité représente le caractère plus ou moins sec de la viande au cours de la consommation. Nous distinguons la jutosité initiale, perçue au premier coup de dent, de la jutosité soutenue. La première est surtout liée à la quantité d'eau présente et libérée lors de la mastication, la seconde est plutôt en relation avec la teneur en lipides de la viande. Le facteur essentiel qui va jouer sur la

jutosité est la capacité de rétention d'eau du muscle. Le pH de la viande est déterminant pour la jutosité. Une viande à très bas pH a tendance à perdre son eau et à être sèche tandis que les viandes à haut pH ont une très bonne rétention d'eau et présentent une jutosité supérieure (Touraille, 1994 ; Micol *et al.*, 2010). En effet, les accidents de pH qui se produisent dans les heures qui suivent l'abattage (pH élevés ou pH bas) modifient profondément le pouvoir de rétention d'eau (Fraysse et Darré, 1990).

d. Flaveur

La flaveur de la viande peut être définie comme une perception olfacto-gustative résultant de la sollicitation de deux sens, l'odorat et le goût (Fraysse et Darré, 1990 ; Micol *et al.*, 2010). La perception de l'odeur est produite par des composés chimiques volatils de faible poids moléculaire qui stimulent les récepteurs de l'épithélium nasal. Le goût, quant à lui, est généralement sollicité par des substances solubles dans l'eau d'un poids moléculaire plus élevé que les composés volatils. La viande à l'état cru contient très peu de composés aromatiques et n'a que très peu de goût, à l'exception du goût de sang (Micol *et al.*, 2010). Ce n'est qu'au cours de la cuisson que sa saveur typique se développe, et va dépendre des paramètres de cuisson (mode, température, durée, etc.) (Fraysse et Darré, 1990 ; Micol *et al.*, 2010). Certains arômes spécifiques à la viande proviennent de la dégradation des composants cellulaires du muscle (inosine et hypoxantine provenant de l'ATP, peptides en acides aminés produits de dégradation des protéines). Une certaine lipolyse qui se produit en cours de maturation est également favorable à l'épanouissement de la flaveur (Fraysse et Darré, 1990). Les composés aromatiques responsables de la flaveur de la viande cuite sont issus de deux grands types de réaction induits par le chauffage, nous avons d'une part, les réactions de Maillard entre les acides aminés et les sucres et, d'autre part, la dégradation des lipides (composés de triglycérides et de phospholipides) (Micol *et al.*, 2010).

2.3.3. Qualité hygiénique et sanitaire

La qualité hygiénique et sanitaire de la viande est primordiale car elle doit être consommée dans des conditions de sécurité quasi absolues.

Cette qualité doit permettre de (Fraysse et Darré, 1990) :

- Limiter la flore microbienne totale et assurer l'absence de la flore pathogène (salmonelles en particulier) ;
- Garantir l'absence de toxicité qui proviendrait de la présence de :
 - Substances résiduelles (pesticides, fongicides) ;

- Substances formées en cours de conservation défectueuse (toxine botulique) ou déposées lors de transformations (fumage, saumurage) ;
- Substances toxiques résultant des traitements thermiques des graisses et de protéines ;
- Produits élaborés au cours de la digestion (carbures cancérigènes, nitrosamines).

2.3.4. Qualité technologique

De nos jours, les viandes sont de plus en plus transformées et conservées avant leur commercialisation finale au consommateur. En dehors des mécanismes naturels d'évolution des viandes (*cf.* figure 2), les opérations de transformation qui font appel à des mécanismes physico-chimiques variés exigent des qualités particulières parfois différentes de celles qui sont requises pour une vente en frais (viandes DFD ou PSE par exemple ne sont pas forcément pénalisées) (Frayssé et Darré, 1990).

a. Qualité pour la transformation

Le pH représente le principal paramètre de qualité du fait de son action sur le PRE. Il détermine les possibilités d'utilisation de la viande comme matière première. D'autres paramètres comme le potentiel redox, le pouvoir émulsifiant, la nature ainsi que la teneur en collagène peuvent avoir une importance dans certaines préparations (Frayssé et Darré, 1990).

b. Qualités pour la conservation

Une fois de plus, le pH représente le paramètre le plus important. Hormis le fait que le développement bactérien se produit préférentiellement en milieu neutre ou basique, notons que l'activité de l'eau et le potentiel redox ont également un rôle dans le développement bactérien. Enfin, un potentiel lipolytique important et une teneur élevée en acides gras insaturés sont des facteurs défavorables à une longue conservation. Il faut toutefois rappeler qu'un élément primordial de bonne conservation est une pollution microbienne initiale la plus faible possible (Frayssé et Darré, 1990).

La nature de la matrice viande et les conditions de sa conservation conditionnent le développement de l'écosystème microbien (Labadie, 1999).

1. Principales espèces bactériennes de la viande bovine

Malgré le fait que les données concernant l'écosystème microbien de la viande soient partielles, il est tout de même possible d'établir une liste relativement exhaustive des espèces bactériennes potentiellement présentes dans cette denrée alimentaire. Les données les plus nombreuses concernent la viande hachée en raison de sa nature très périssable, des cas de toxi-infections alimentaires sévères et du fait qu'elle représente une part significative de la viande bovine consommée. Pour d'autres produits, il est plus difficile d'établir un inventaire, et leur écosystème reste encore bien mal connu (Bauchart et Picard, 2010).

Trois grands types bactériens se partagent la « niche viande » (Bauchart et Picard, 2010) :

- Des bactéries inoffensives pour la santé et pour le produit : ces micro-organismes peuvent même être bénéfiques pour la viande car elles permettent d'améliorer sa conservation ;
- Des espèces potentiellement pathogènes : elles ne provoquent pas d'altération visible du produit mais peuvent être dangereuses pour l'homme, même lorsqu'elles sont présentes en faible nombre. Pour certaines espèces, les règles européennes en vigueur imposent un taux maximal autorisé dans les produits suivant des protocoles et un cahier des charges bien établis ;
- Des espèces altérantes : leur développement excessif ou certaines propriétés métaboliques les rendent délétères pour la viande en provoquant des altérations du goût, de l'odeur, de la couleur ou de la texture. Ces espèces ne présentent en général pas de risque pour la santé du consommateur.

Il faut noter toutefois que la frontière entre les catégories n'est pas toujours très bien délimitée. De ce fait, des espèces peuvent être généralement considérées comme bénéfiques mais, dans le cas de certaines souches particulières ou d'un développement excessif, peuvent passer au statut d'altérantes. C'est le cas notamment des espèces du genre *Carnobacterium* qui peuvent être considérées comme des cultures protectrices dans certains cas, mais également comme des bactéries d'altération, notamment des produits carnés (Leisner *et al.*, 2007). De même, des espèces considérées comme altérantes peuvent dans certains cas, selon les souches ou le niveau de population, s'avérer pathogènes ; elles sont qualifiées de pathogènes opportunistes. Ainsi, *Hafnia alvei*, connue comme altérante de la viande bovine (Gamage *et al.*, 1998), est également référencée comme une bactérie opportuniste pathogène (Janda et abbott, 2006).

Notons, toutefois, que le développement de chacune de ces espèces dépend, en outre de leurs propres caractéristiques, des différents facteurs environnementaux comme la nature de la viande, la température et l'environnement gazeux, mais aussi de la présence d'autres flores (Bauchart et Picard, 2010).

1.1. Bactéries commensales bénéfiques

Les bactéries commensales bénéfiques de la viande comprennent généralement le groupe des bactéries lactiques tel que les espèces *Lactobacillus* (L) *sakei*, *L. curvatus* et *L. plantarum* ainsi que des espèces du genre *Pediococcus*. Cependant, d'autres groupes bactériens comme les espèces *Staphylococcus xylosus*, *Staphylococcus carnosus* et les microcoques peuvent également être retrouvés (Bauchart et Picard, 2010).

En occupant l'espace de la matrice carnée, les bactéries bénéfiques empêchent la prolifération de la flore indésirable car elles constituent une barrière sélective grâce à leur aptitude à se développer en grand nombre sur le produit (Jeantet *et al.*, 2006 ; Bauchart et Picard, 2010). Elles produisent en outre des molécules inhibitrices (bactériocines, peroxyde d'hydrogène), et participent à des phénomènes de compétition pour des substrats énergétiques présents dans la matrice carnée. Certaines de ces espèces sont utilisées comme ferments pour l'élaboration de produits fermentés comme le saucisson sec. Elles sont donc depuis fort longtemps ingérées par l'homme en toute innocuité (Bauchart et Picard, 2010).

1.2. Bactéries pathogènes

Le cas des bactéries pathogènes doit être envisagé de manière différente, car elles ne sont pas systématiquement associées à la viande mais fort heureusement plutôt occasionnellement (Bauchart et Picard, 2010). La chair d'un animal sain vivant est pratiquement stérile, mais chez un animal malade, il peut y avoir contamination directe par le système lymphatique. La viande est donc susceptible de contenir des bactéries pathogènes de l'animal et ces germes seront très souvent pathogènes pour l'homme. La contamination de la viande peut avoir lieu au moment de l'abattage à partir de la flore intestinale, de la peau ou des muqueuses de l'animal (Jeantet *et al.*, 2006 ; Guiraud, 2012).

La flore pathogène emblématique des produits carnés est représentée par *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium* (C) *perfringens*, *C. difficile*, *Salmonella* spp. et *Campylobacter* (Bauchart et Picard, 2010). Etant donné que la population bactérienne pathogène est présente à un faible niveau dans la viande, leur présence n'affecte en général pas l'aspect du produit (Jeantet *et al.*, 2006 ; Bauchart et Picard, 2010). Elles provoquent en revanche des toxi-infections isolées ou collectives, et leur dangerosité dépend le plus souvent de leur capacité à produire, après ingestion par le consommateur, des toxines virulentes pour la santé humaine. Si leur occurrence est connue et leur implication dans les toxi-

infections avérée, leur nombre n'est pas soumis aux mêmes contraintes réglementaires. Toutefois, il est à noter que les toxi-infections alimentaires (TIA) sont essentiellement engendrées par les microorganismes et/ou aux toxines qu'ils produisent, et qui se retrouvent en contact avec les denrées alimentaires. *Salmonella* et *Campylobacter* sont généralement considérés comme les principaux genres responsables de TIA. Cependant, en matière de dangerosité, *Listeria monocytogenes* et *Escherichia coli* sont les espèces les plus redoutées (Bauchart et Picard, 2010).

1.3. Bactéries d'altération

Les bactéries d'altération les plus fréquentes sur la viande bovine sont représentées par des espèces appartenant au genre *Pseudomonas* (*P*) (*Pseudomonas fragi*, *P. fluorescens*, *P. putida*), l'espèce *Brochothrix* (*B*) *thermosphacta* ainsi que des entérobactéries faisant partie des genres *Enterobacter*, *Hafnia*, *Serratia*, *Acinetobacter* ou *Providencia*. Toutefois, plusieurs espèces de *Clostridium* ont également été décrites ainsi que certaines espèces de bactéries lactiques des genres *Leuconostoc*, *Weissella* ou *Carnobacterium* (Bauchart et Picard, 2010).

Le développement en nombre élevé de ces espèces sur la viande peut engendrer une altération de la couleur, de l'odeur, mais aussi du goût. Ces altérations sont souvent visibles, voire spectaculaires, avec un gonflement des emballages et un aspect poisseux de couleur verdâtre, ce qui entraîne donc rapidement l'élimination des lots par les producteurs et représente de lourdes pertes économiques (Bauchart et Picard, 2010).

Dans la majorité des cas, *P. fragi* est la bactérie altérante retrouvée sur la viande bovine conservée au froid et à l'air. Cette espèce, largement présente dans l'environnement (air, eau), est psychrotrophe, c'est-à-dire capable de proliférer au froid en condition aérobie et d'envahir très vite la surface des produits, provoquant ainsi l'apparition d'un aspect poisseux. Les conditions environnementales favorables au développement de cette espèce bactérienne sont celles qui règnent en particulier dans les abattoirs, où ces micro-organismes sont responsables de nombreuses altérations de la viande conservée en l'état (Bauchart et Picard, 2010).

Une autre espèce bactérienne qui n'est autre que *B. thermosphacta* est plus spécifiquement isolée de la viande. Son origine proviendrait du sol et peut provoquer d'importantes altérations caractérisées par une odeur de rance. Cette espèce est, elle aussi, psychrotrophe, voire psychrophile (dont la température optimale de croissance se situe autour de 20°C), ce qui est déterminant pour sa multiplication dans des produits carnés réfrigérés. Son aptitude à se développer en aérobiose et en absence d'oxygène (aéro-anaérobie) fait d'elle un important agent d'altération des viandes conservées sous atmosphère modifiée (Bauchart et Picard, 2010).

Partie 2 : Flore d'altération de la viande bovine

Les espèces du genre *Leuconostoc* sont également capables de conduire à des altérations puisqu'elles ont l'aptitude de se développer à un niveau élevé dans la viande conservée au froid et sous atmosphère protectrice. Nous pouvons citer l'espèce *Leuconostoc gasicomitatum*, qui a particulièrement été étudiée car son développement est caractérisé par la production de gaz, des odeurs acides et un verdissement de la viande rouge (Vihavainen et Björkroth, 2009).

Les espèces *Weissella viridescens* et *Weissella hellenica* sont également décrites comme bactéries d'altération de la viande bovine, de même que celle du genre *Carnobacterium* (Bauchart et Picard, 2010).

Le tableau 3 résume les différentes espèces bactériennes isolées à partir de la viande avec leur incidence, dans la mesure du possible, sur la qualité des produits. Il s'agit des espèces commensales systématiquement ou très fréquemment présentes dans l'écosystème carné et tirant bénéfice de ce substrat pour leur croissance), des espèces bactériennes bénéfiques et altérantes ayant été répertoriées sur la viande bovine.

Partie 2 : Flore d'altération de la viande bovine

Tableau 3. Inventaire des principales espèces pouvant constituer l'écosystème bactérien de la viande bovine (altérante/bénéfique) (Nychas *et al.*, 2008)

Caractéristiques bactériennes	Espèce	Occurrence	Effet identifié
Bactéries lactiques	<i>Lactobacillus sakei</i>	Systématique, conservation sous vide, à froid	Bioprotection, rares cas d'altération
	<i>Lactobacillus fuchuensis</i>	Conservation sous vide, à froid	-
	<i>Lactobacillus curvatus</i>	//	-
	<i>Lactobacillus plantarum</i>	//	-
	<i>Pediococcus pentosaceus</i>		
	<i>Weissella viridescens</i>	Conservation sous atmosphère, sous vide, à froid	Altération (poissage/verdissement)
	<i>Weissella hellenica</i>	Conservation sous atmosphère, sous vide, à froid	-
	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	//	-
	<i>Leuconostoc carnosum</i>	//	-
	<i>Leuconostoc gelidum</i>	//	-
Genre <i>Brochothrix</i>	<i>Carnobacterium maltaromaticum</i>	Conservation sous atmosphère, sous vide, à froid	Altération
	<i>Carnobacterium divergens</i>	//	Altération
Staphylocoques à coagulase négative	<i>Brochothrix thermosphacta</i>	Conservation sous atmosphère, sous vide, à froid	Altération (odeur de rance)
	<i>Staphylococcus carnosus</i>	-	-
	<i>Staphylococcus xylosus</i>	-	-
	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	-	-
Entérobactéries	<i>Moraxella</i>	Conservation au froid, sous atmosphère, sous vide	Altération
	<i>Serratia</i> (ex : <i>S. grimesi</i> , <i>S. proteomaculans</i>)	//	-
	<i>Hafnia alvei</i>	//	-
	<i>Rahnella aquatilis</i>	//	-
	<i>Pseudomonas fragi</i>	Conservation au froid à l'air	Altération (poissage)
<i>Pseudomonas</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	//	Altération (poissage, verdissement)
	<i>Pseudomonas putida</i>	//	Altération (poissage)

// : Même observation ; - : Aucune observation

2. Evolution de la flore d'altération et dégradation de la viande

La viande crue est soumise, d'une part à l'action de ses enzymes propres et, d'autre part, à celle des micro-organismes. Cette action est souhaitable car elle engendre l'attendrissement ou bien le mûrissement de la viande. Toutefois, l'action des enzymes a des conséquences souvent néfastes du point de vue microbiologique étant donné qu'elle favorise le développement des micro-organismes (Guiraud, 2012).

L'invasion des tissus par les micro-organismes dépend de (Guiraud, 2012) :

- L'état de santé et de fatigue de l'animal ;
- La charge microbienne de l'animal et en particulier de ses intestins ;
- La méthode de mort et d'équarrissage ainsi que des conditions d'entreposage de la viande.

Par ailleurs, les germes se développent en fonction des caractères physiques (surface d'exposition à l'air, découpage, etc.) et chimiques (pH, teneur en eau, etc.) de la viande ainsi que des conditions extérieures (aération, température). Ainsi, les dégradations provoquées vont dépendre de ces différents facteurs. Du fait des conditions d'entreposage à basse température, ce sont les germes psychrophiles qui vont être des agents privilégiés de la détérioration des viandes, entraînant surtout des altérations superficielles. A une température plus élevée, ce sont les putréfactions « profondes » qui sont favorisées. Toutefois, il convient de noter que la viande crue peut être commercialisée sous forme hachée. Ainsi, les caractères microbiologiques qui seront décrits immédiatement lui sont également applicables (Jeantet *et al.*, 2006 ; Guiraud, 2012).

2.1. Evolution de la flore d'altération

A chaque aliment correspond un profil microbien qui lui est propre. Ce profil dépend non seulement de la flore présente sur l'aliment et de l'origine de la contamination, mais aussi de nombreux facteurs physico-chimiques intrinsèques à l'aliment (structure, composition, pH, a_w , potentiel d'oxydoréduction, présence de composés inhibiteurs naturels, etc.), et de facteurs environnementaux tels que la température (Jeantet *et al.*, 2006).

2.1.1. Structure de l'aliment

La matière première est généralement protégée de l'attaque des micro-organismes par des structures difficilement dégradables (tissu collagène du muscle). Seules des espèces microbiennes

possédant les enzymes adaptés (protéase) pourront s'attaquer à ces structures. C'est pour cette raison qu'avant leur manipulation, les matières premières ne sont souvent contaminées que de manière superficielle. En revanche, cette protection disparaît et l'aliment devient plus vulnérable au développement des micro-organismes dès que des opérations technologiques sont effectuées sur les matières premières pour élaborer l'aliment. On peut citer par exemple le cas de la viande hachée qui est un substrat beaucoup plus favorable à la croissance microbienne qu'un muscle entier (Jeantet *et al.*, 2006).

2.1.2. Composition de l'aliment

La composition en nutriments des aliments (*cf* partie 1 : 2.3.1. qualité nutritionnelle) influence aussi le développement de l'espèce la plus adaptée (*cf* figure 3). Ainsi, le développement de micro-organismes possédant des protéases ou métabolisant des sucres lors d'une fermentation est favorisé respectivement dans des aliments riches en protéines ou en sucres. Ainsi, de bonnes conditions d'abattage (animal non stressé possédant encore du glycogène) permettent, grâce aux sucres résiduels, le développement de bactéries lactiques dans la viande. Ces bactéries permettent d'inhiber, par légère acidification, le développement de bactéries putréfiantes possédant des protéases à l'instar de *Clostridium* et *Pseudomonas*. A l'inverse, ces bactéries pourront se développer et conduire plus rapidement à une altération de la viande provenant d'un animal abattu en état de stress et possédant peu de glycogène résiduel (Jeantet *et al.*, 2006).

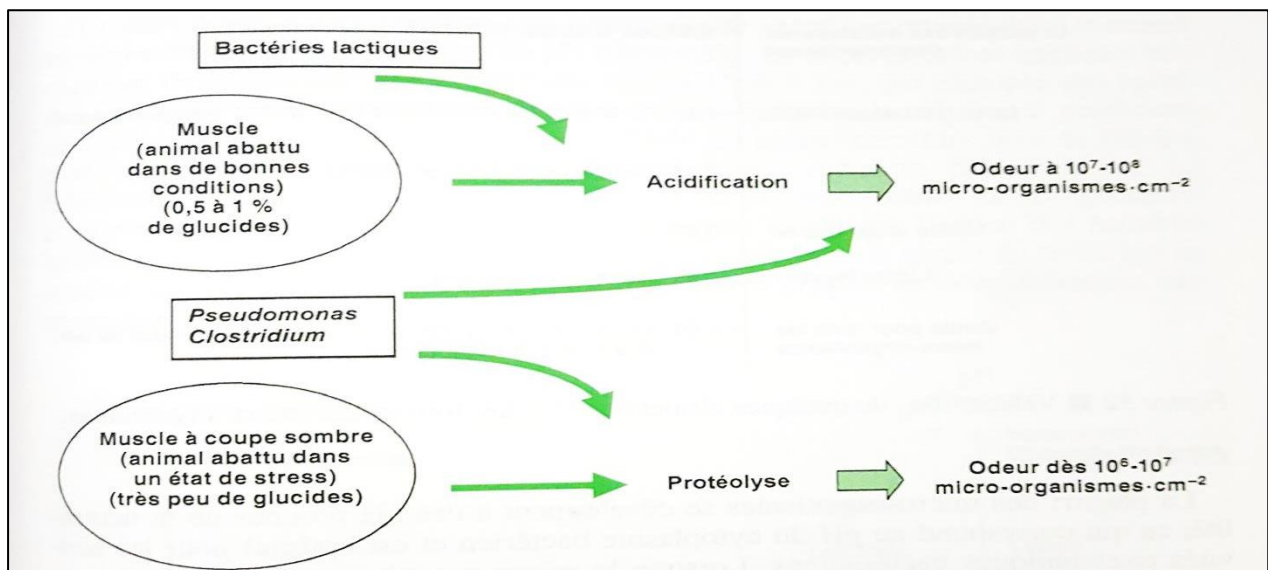


Figure 3. Influence de la composition de l'aliment sur le développement des bactéries : exemple du muscle (Jeantet *et al.*, 2006)

2.1.3. Activité de l'eau

L'activité de l'eau est un facteur essentiel à la croissance des micro-organismes car l'eau lui est indispensable pour les réactions d'hydrolyse permettant la production d'énergie et de métabolites variés, pour le transfert des nutriments et pour l'excrétion des métabolites. Lorsqu'une bactérie se trouve dans un milieu dépourvu d'eau, il y a plasmolyse de la cellule. Cette perte en eau limite considérablement son développement bactérien, et peut même conduire, dans certains cas, à la mort de la cellule. La quantité d'eau disponible pour les micro-organismes est très variable suivant les aliments (*cf* figure 4). Les micro-organismes sont inégaux quant à leur capacité à se développer ou à survivre à de faibles a_w (*activity of water*) (Strong *et al.*, 1970 ; Beuchat, 1983 ; Chirife et Fontan, 1982). D'une manière générale, les bactéries se développent à des a_w se situant autour de 0,9 tandis que les moisissures et les levures sont inhibées à des a_w de 0,7 et 0,8 respectivement. Notons que certaines levures et moisissures peuvent se développer jusqu'à des a_w de 0,6 (Jeantet *et al.*, 2006).

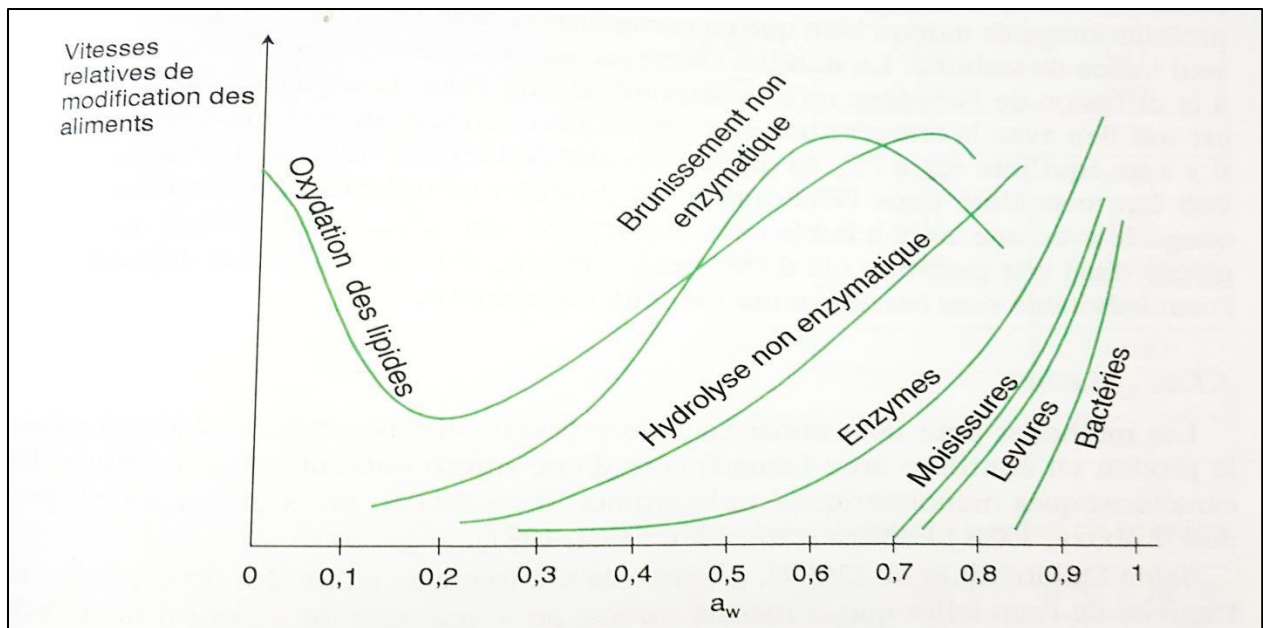


Figure 4. Vitesses de modification des aliments en fonction de l' a_w (Jeantet *et al.*, 2006)

2.1.4. pH

La plupart des micro-organismes se développent à des pH proches de la neutralité, ce qui correspond au pH du cytoplasme bactérien et est optimal pour les activités enzymatiques bactériennes. Lorsque le micro-organisme est confronté à un environnement trop acide ou trop basique, il régule son pH intracellulaire jusqu'à un certain point. Une acidification ou une

Partie 2 : Flore d'altération de la viande bovine

alcalinisation importante du milieu a pour effet de ralentir de façon considérable la croissance bactérienne, voire d'engendrer la mort cellulaire lorsque de l'inhibition d'enzymes indispensables. De même, certaines enzymes produites et excrétées par la bactérie dans le milieu environnemental dans le but d'induire la dégradation et l'assimilation de macromolécules ne pourront plus rester actives si le pH s'éloigne de la neutralité. Certaines molécules (acides faibles par exemple) produites par d'autres micro-organismes peuvent, en entrant dans la cellule, modifier de manière importante le pH interne. Comme pour l' a_w , on constate une hétérogénéité assez importante dans le monde bactérien vis-à-vis des variations de pH (*cf* figure 5). En effet, certaines bactéries sont capables de se développer à des pH très acides, ce qui est le cas des bactéries lactiques qui produisent de l'acide lactique. Cette propriété peut être considérée comme un atout, en raison de son utilisation en agroalimentaire pour la fabrication de nombreux aliments fermentés (charcuterie, etc.). Un autre effet du pH est d'induire la complexation de certains éléments nutritifs présents dans le milieu de culture ou dans l'aliment. C'est le cas de certains ions qui sont chélatés à pH acide ou basique (Jeantet *et al.*, 2006).

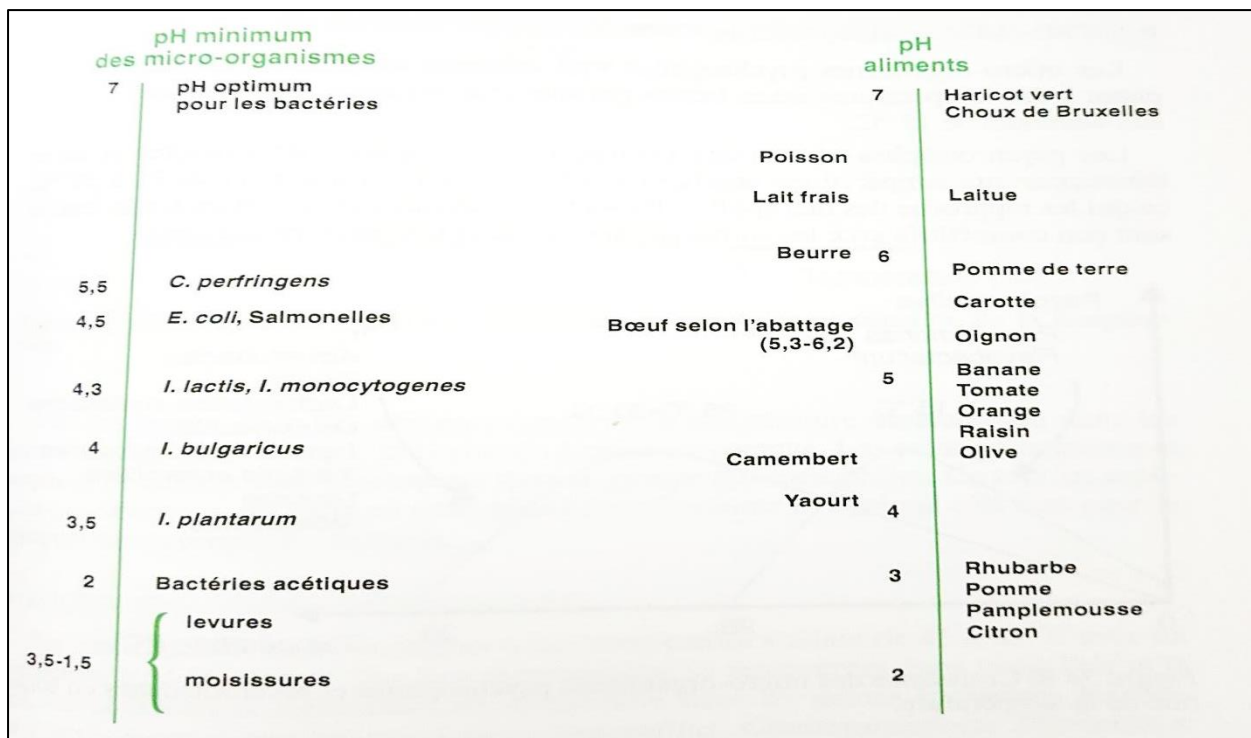


Figure 5. pH minimum des micro-organismes (Jeantet *et al.*, 2006)

2.1.5. Température

La température exerce un effet aussi bien sur la croissance que sur la survie des micro-organismes.

En fonction de leur croissance, les micro-organismes peuvent être classés en psychrophiles, mésophiles et thermophiles. Etant donné qu'il existe un continuum dans le monde bactérien quant aux capacités des micro-organismes à se développer à différentes températures, cette classification est considérée comme arbitraire. En effet, certains micro-organismes sont capables de se développer sur une très large plage de température, et peuvent être à la fois mésophiles et thermophiles, ou psychrophiles et mésophiles (Jeantet *et al.*, 2006).

-Micro-organismes psychrophiles et psychrotrophes

- *Micro-organismes psychrophiles*

Les micro-organismes psychrophiles sont vraiment adaptés au froid et se multiplient à des températures assez basses avec un optimum se situant aux alentours de 15°C à 20°C (Bonnefoy *et al.*, 2002 ; Jeantet *et al.*, 2006). Parmi les bactéries psychrophiles à Gram négatif, on peut citer : *Pseudomonas*, *Serratia* et *Acinetobacter*. Ces bactéries dont l'habitat normal est l'eau, sont souvent apportées au cours des opérations de lavage des matières premières (carcasses de viande) et du matériel. Les bactéries psychrophiles à Gram positif, quant à elles, comprennent, entre autres, des germes appartenant à *Bacillus*, *Micrococcus*, *Brochotrix thermosphacta* et *Lactobacillus viridescens* (cf figure 6) (Bonnefoy *et al.*, 2002).

- *Micro-organismes psychrotrophes*

Les micro-organismes psychrotrophes sont mieux connus. Ils sont capables de s'adapter et de se développer aux températures proches de 0°C (températures de réfrigération) mais leur optimum de croissance est de 25°C à 30°C, ce qui les rapproche des mésophiles (Bonnefoy *et al.*, 2002 ; Jeantet *et al.*, 2006). Dans les viandes réfrigérées, les psychrotrophes sont dominants. Les principaux genres bactériens sont *Pseudomonas*, *Flavobacterium* ou *Lactobacillus*. On peut également trouver les levures ainsi que les moisissures (Jeantet *et al.*, 2006). Ils sont caractérisés par un métabolisme lent, et sont peu compétitifs avec les autres germes lors d'une augmentation de la température. Leur vitesse de croissance lente leur permet d'envahir les milieux alimentaires en 1 à 3 semaines avec un temps de génération de l'ordre de 24 h à 0°C. Leur métabolisme reste très actif à ces températures, notamment grâce à la production d'hydrolases (lipases ou protéases), ce qui pose des problèmes technologiques (modification de couleur) et organoleptiques (rancissement, flaveur et goût désagréable) (cf figure 6) (Bonnefoy *et al.*, 2002 ; Jeantet *et al.*, 2006).

-Micro-organismes mésophiles

Les principaux genres et espèces de micro-organismes sont compris dans le groupe des mésophiles (espèces communes et pathogènes). Ces micro-organismes se multiplient à des températures allant de 20°C à 45°C avec un optimum de 37°C. On les retrouve dans les aliments conservés à température ambiante ou à température de réfrigération lorsque la chaîne du froid est rompue.

-Micro-organismes thermophiles

Les micro-organismes thermophiles sont capables de se multiplier à des températures allant de 45°C à 65°C avec un optimum de 55°C (cf figure 7). Les thermophiles se rencontrent dans l'eau, l'air et le sol. Ils sont surtout représentés en alimentaire par les genres bactériens *Bacillus* et *Clostridium* ainsi que par les moisissures comme *Cladosporium* (Hochstein, 1976).

-Micro-organismes thermotrophes

Parmi les thermophiles, on distingue les germes dits thermotrophes qui sont des mésophiles susceptibles de se développer à des températures élevées (45°C ou 50°C). On peut donner l'exemple des bactéries lactiques telles que *Streptococcus* ou *Lactobacillus* (cf figure 7) (Jeantet *et al.*, 2006).

Chez de nombreux micro-organismes, un traitement thermique subléthal s'accompagne d'une augmentation de la thermotolérance qui est généralement reliée à la synthèse concomitante de protéines spécifiques appelées « protéines de choc thermique ». Ces protéines protégeraient les protéines cellulaires des effets toxiques du stress en s'y fixant pour les empêcher de coaguler. En protégeant les cellules contre un nouveau choc thermique, ces protéines seraient donc responsables de l'augmentation de la thermorésistance (Jeantet *et al.*, 2006).

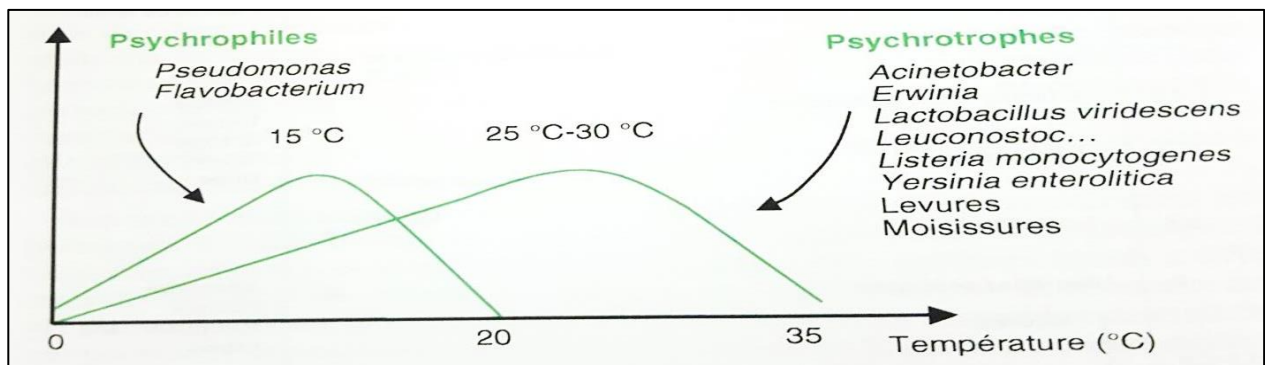


Figure 6. Croissance des micro-organismes psychrophiles et psychrotrophes en fonction de la température (Jeantet *et al.*, 2006)

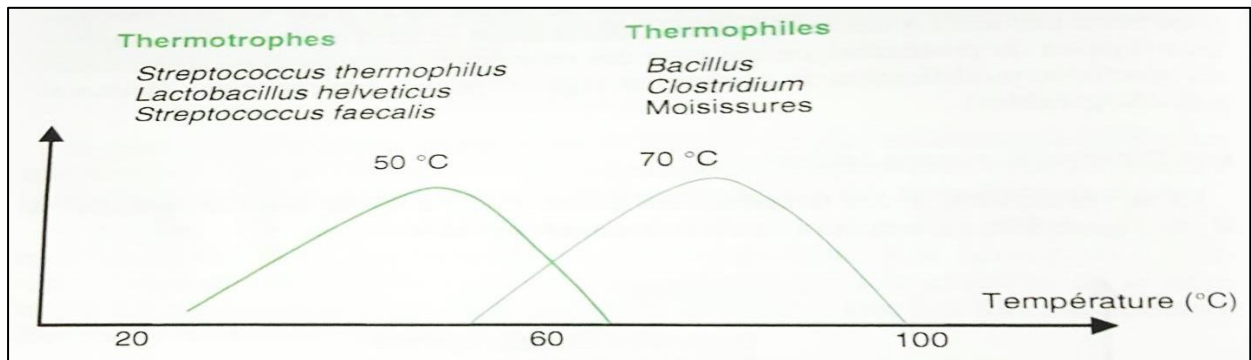


Figure 7. Croissance de micro-organismes thermotrophes et thermophiles en fonction de la température (Jeantet *et al.*, 2006)

2.1.6. Potentiel d'oxydoréduction

L'oxygène moléculaire (O_2) peut donner des radicaux qui sont très réactifs vis-à-vis d'autres molécules telles que le superoxyde (O_2^-), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle ($OH^\bullet$). Ces derniers peuvent engendrer des modifications au niveau de l'ADN (*Acide désoxyribonucléique*), de l'ARN (*Acide ribonucléique*) et des protéines (Farr et Komoga, 1991). Il semble que la molécule la plus toxique soit le superoxyde car elle peut oxyder de nombreux composés (thiols, ascorbate, catécholamines) et modifier l'état d'oxydation du fer, ce qui altère le fonctionnement des cytochromes. Le peroxyde d'hydrogène réagit avec de nombreuses molécules mais surtout avec le fer et le cuivre pour générer des radicaux hydroxyles (Jeantet *et al.*, 2006).

On distingue plusieurs types de bactéries en fonction de leur aptitude à se défendre contre ces oxydants (*cf* figure 8) (Jeantet *et al.*, 2006).

-Micro-organismes aérobies

Les micro-organismes se développent exclusivement en présence d'oxygène. Ils possèdent des enzymes comme la catalase et la superoxyde dismutase qui permettent de détruire les composés oxydants. Ces micro-organismes qui se développent en surface des aliments se multiplient en général très rapidement. Il s'agit par exemple des bactéries du genre *Pseudomonas* qui prolifèrent au froid sur les carcasses de viande, ou de celles du genre *Micrococcus* et *Bacillus*. A quelques exceptions près, les moisissures sont aérobies strictes.

-Micro-organismes anaérobies

Ces bactéries possèdent une chaîne respiratoire leur permettant de se développer en présence d'oxygène, mais aussi en l'absence d'oxygène grâce aux voies fermentaires. Cette catégorie

comprend de très nombreux micro-organismes utilisés dans la fermentation (bactéries lactiques) ainsi que des espèces composant la flore d'altération des aliments.

-Micro-organismes anaérobies stricts

Ces micro-organismes sont caractérisés par le fait qu'ils ne possèdent en général pas d'enzymes capables de détruire les composés oxydants. Ainsi, ils utilisent des voies fermentaires pour se multiplier. Ils sont sensibles à l'oxygène et ne peuvent donc se développer qu'en conditions d'anaérobiose strictes (*Clostridium botulinum*).

-Micro-organismes anaérobies aérotolestants

Ces micro-organismes utilisent des voies fermentaires obligatoires en raison de leur sensibilité à l'oxygène mais peuvent tout de même supporter des pressions partielles d'oxygène (*Clostridium perfringens*). Contrairement aux anaérobies stricts, ils sont souvent incriminés dans les toxi-infections alimentaires.

-Micro-organismes micro-aérophiles

Ces micro-organismes nécessitent des quantités d'oxygène de 2 à 10 kPa (Kilopascal), mais peuvent être altérés au-delà.

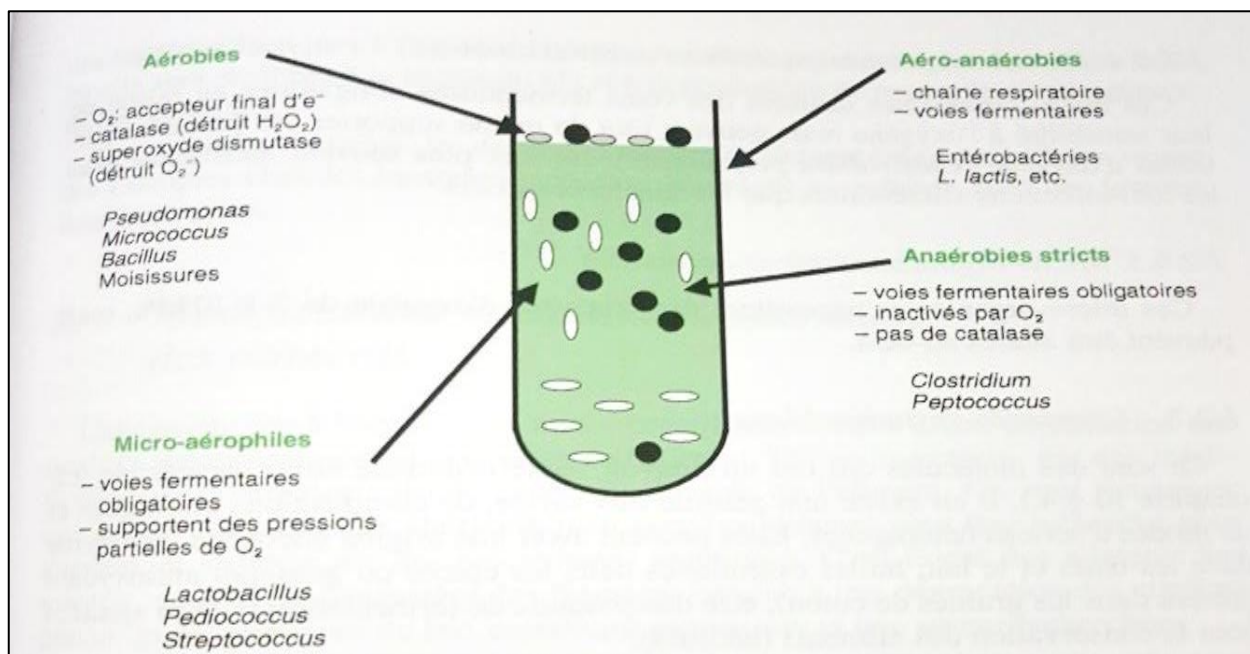


Figure 8. Influence du potentiel d'oxydoréduction sur la croissance (Jeantet *et al.*, 2006)

2.1.7. Composés antimicrobiens

Les composés antimicrobiens sont des molécules qui ont un pouvoir bactériostatique et/ou bactéricide. Il en existe une très grande gamme dont les compositions chimiques et les modes d'actions sont hétérogènes. Ils peuvent avoir une origine endogène (huiles essentielles dans les épices), être des produits de fermentation ou être ajoutés pour la conservation des aliments (additifs).

Généralement, les bactéries à coloration de Gram+ sont sensibles à de nombreuses molécules comme le citrate, la nisine, les butylhydroxyanisole ou butylhydroxytoluène, ainsi qu'à des molécules plus connues pour leur action antifongique comme les sorbates ou les benzoates. Les bactéries à coloration de Gram- sont plus résistantes que les bactéries à coloration de Gram+. Cependant, elles sont néanmoins sensibles aux additifs à large spectre ainsi qu'au dioxyde de soufre (SO₂).

Les acides lactique et acétique, très largement produits lors des fermentations, peuvent être utilisés comme additifs à activité antibactérienne assez large. Toutefois, l'acide propionique et la pimaricine sont plutôt antifongiques (Jeantet *et al.*, 2006).

2.2. Dégradation de la viande

2.2.1. Dégradations aérobies

Il s'agit de dégradation ou d'altération survenant essentiellement en surface (Jeantet *et al.*, 2006 ; Guiraud, 2012).

Lorsque la surface de l'aliment est suffisamment humide pour permettre la croissance des micro-organismes, et que les paramètres environnementaux (température, pH, etc.) s'y prêtent, il y a développement d'un biofilm colonisant la surface de l'aliment appelé limon, et ce, au bout d'un certain temps. Les polysaccharides jouent également un rôle dans l'adhésion des micro-organismes aux surfaces pour former ce limon bactérien. Les odeurs désagréables trouvent leur origine dans le catabolisme des acides aminés qui a lieu suite à la dégradation des protéines en surface de l'aliment par les enzymes des micro-organismes.

Le limon peut être éliminé, dans certains cas, par action mécanique. En effet, ce procédé est quelquefois utilisé en boucherie pour le traitement de surface des carcasses. Le développement de moisissures en surface de l'aliment quant à lui représente en général une altération irréversible. De ce fait, il est quasiment impossible de détacher les filaments de mycélium d'une surface, qui est de ce fait marquée d'une couleur résiduelle persistante (Jeantet *et al.*, 2006).

Ces dégradations regroupent les points suivants (Bonnefoy *et al.*, 2002 ; Guiraud, 2012) :

- **Viscosité (ou poissage) :** elle résulte le plus souvent au développement de bactéries (*Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Bacillus*, *Micrococcus* et *Lactobacillus*), plus rarement de levures ou de moisissures.
- **Décoloration et verdissement :** la décoloration est la conséquence d'une oxydation sous l'action de lactobacilles, de *Leuconostoc* et de levures. Le verdissement est lié quant à lui à la modification de la myoglobine par des bactéries (lactobacilles, *Brochothrix*, etc.) productrices d' H_2O_2 et d' H_2S . Par exemple, *Lactobacillus viridescens* est responsable du verdissement des viandes, saucissons crus conservés sous vide. Ce verdissement provient de l'oxydation des pigments héminiques de la viande par le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), produit du métabolisme de *Lactobacillus*.
- **Pigmentations :** elles sont dues à des bactéries colorées ou à pigments diffusibles (*Photobacterium*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Serratia*, etc.), à des levures (*Rhodotorula*, etc.), mais aussi à des moisissures (*Cladosporium herbarum*, *Sporotrichum carnis*, *Penicillium*, etc.).
- **Modifications des caractères organoleptiques :** elles interviennent par rancissement des graisses (*Pseudomonas*, levures, moisissures), libération de composés responsables de goûts et d'odeurs indésirables (bactéries lactiques agents de surissement, levures, actinomycètes). *Brochothrix thermosphacta* est une bactérie psychrophile est souvent impliquée dans la modification des caractères organoleptiques du fait qu'elle libère des acides gras volatils à odeur désagréable.
- **Moisissement :** il est dû à des moisissures (*Thamnidium*, *Mucor*, *Rhizopus*, etc.) qui sont parfois associées à des levures. Il est surtout rencontré en atmosphère sèche et les dégradations de surface qu'il engendre ne s'étendent généralement pas vers l'intérieur sauf si la viande est atteinte physiquement (viande attendrie mécaniquement ou viande hachée). Le moisissement n'a généralement pas une grande incidence du point de vue sanitaire, sauf si l'atteinte est très importante.
- **Putréfaction :** une putréfaction de surface peut être occasionnée par certaines espèces de *Pseudomonas* ainsi que d'Entérobactéries.

2.2.2. Dégradations anaérobies

Les dégradations anaérobies se développent lorsque la viande a été hachée, désossée, découpée en profondeur, conditionnée sous film plastique et dans tous les cas où des conditions anaérobies sont présentes. Du fait de la nature des bactéries responsables des dégradations causées (substances libérées) et d'une éventuelle prolifération importante de germes, les détériorations anaérobies

peuvent être néfastes du point de vue sanitaire et entraîner des troubles plus ou moins graves chez le consommateur (Entérobactéries pathogènes, *Clostridium perfringens*, *Clostridium botulinum*, *Bacillus cereus*, staphylocoques, etc.) (Guiraud, 2012). Par ailleurs, ce type d'altération modifie considérablement la structure et la texture de l'aliment car il conduit à la production de gaz et de déchirures irréversibles et extrêmement préjudiciables. Il est fonction de l'espèce microbienne et par conséquent de son métabolisme (production de protéases capables de dégrader les protéines, production de gaz résultant de différentes voies métaboliques) (Jeantet *et al.*, 2006).

Ces dégradations peuvent se manifester par l'apparition de (Bonnefoy *et al.*, 2002 ; Guiraud, 2012) :

- **Surissement** : il est causé par des bactéries à métabolisme libérant des acides organiques (acide formique, acétique, lactique, butyrique, propionique, etc.) ou par des bactéries ayant une activité protéolytique non putréfiante. Les principaux agents du surissement sont des bactéries lactiques, des coliformes, des *Clostridium* butyriques, des *Bacillus* aéro-anaérobie dont *Bacillus cereus* et des staphylocoques, etc.
- « **Puanteur d'os** » : elle est liée à la présence des genres *Bacillus* et *Clostridium* et intervient dans les carcasses dont la réfrigération est trop lente. L'action microbienne couplée à des modifications enzymatiques génère des composés malodorants.
- **Putréfaction** : elle est occasionnée par la présence de *Clostridium* protéolytiques, putrides et sulfito-réducteurs, de certaines espèces de *Proteus* et d'autres germes Gram- aéro-anaérobies et protéolytiques de la flore banale (fermentation putride) et de bactéries protéolytiques qui libèrent des composés soufrés, de l'ammoniac, des amines, du scatol et de l'indole. Pour des carcasses de viande non réfrigérées ou mal réfrigérées, une putréfaction profonde, due à la présence de *Clostridium*, apparaît. Dans les cas de l'abattage d'animaux fatigués ou stressés, n'ayant donc pas assez de réserve de glycogène, le pH des viandes n'a pas été suffisamment abaissé. Il reste supérieur à 6,2 et favorise le développement des bactéries responsables de putréfaction. *Clostridium perfringens* dégrade les glucides avec production de gaz, ce qui rend la viande molle et spongieuse. Puis la libération de substances malodorantes (hydrogène sulfuré, mercaptans, indole, ammoniac, etc.) se produit, accompagnée du développement d'espèces très protéolytiques telles que *Clostridium sporogenes*, *Clostridium bifermentans*, *Clostridium hystolyticum*. La couleur de la viande est anormale, grise ou verdâtre.

3. Modifications microbiennes et incidence sur la qualité de la viande

L'activité microbienne se manifeste souvent au travers de réactions enzymatiques affectant les caractères physico-chimiques, nutritifs et organoleptiques de l'aliment. Les micro-organismes peuvent intervenir au moment de la formation de la matière alimentaire brute. Ainsi, la maladie d'un animal aura des conséquences néfastes sur la qualité de sa viande (teneur en protéines, lipides, glycogène, etc.) même si celle-ci reste stérile. Par ailleurs, il existe des réactions de dégradation affectant les aliments impliquant les propres enzymes du produit sans qu'elles soient pour autant d'origine microbienne (Guiraud, 2012).

Qu'elle soit favorable ou pas, la prolifération microbienne entraîne de nombreuses modifications affectant l'odeur, la saveur, l'aspect, la couleur, la texture mais aussi la valeur alimentaire ou hygiénique de la viande ((Jeantet *et al.*, 2006 ; Guiraud, 2012). Il se produit souvent des successions de flores, chacune étant responsable de transformations qui modifient l'aliment et permettent à la suivante de se développer. Les modifications en question sont énormément tributaires de la composition de l'aliment, notamment de sa teneur en glucides, protéines et lipides. Ainsi, les produits formés sont issus du catabolisme de ces trois grandes familles de composés. L'environnement physico-chimique (pH, aération, température) joue en outre un grand rôle. De ce fait, il est assez facile de prévoir les incidences majeures des modifications d'origine microbienne selon la nature du produit en son environnement (Guiraud, 2012).

3.1. Odeur et saveur (flaveur)

Les seuils de perception olfactive et gustative varient beaucoup en fonction des produits. Par ailleurs, il convient de noter que les modifications d'odeur et de saveur ne sont pas toujours forcément néfastes.

De nombreux métabolismes d'origine microbienne volatils ou non sont susceptibles d'engendrer des modifications d'odeur et de saveur. Ces altérations primaires apparaissent à partir d'une population microbienne de l'ordre de $10^6/10^7$ germes/g (Guiraud, 2012). En effet, le développement des micro-organismes peut modifier en profondeur les caractéristiques de l'aliment, par la production de molécules ayant un effet direct sur la flaveur ou un effet indirect en se recombinant avec d'autres molécules présentes. Il s'agit préférentiellement d'acides organiques et de molécules issues du catabolisme des lipides et des acides aminés (Jeantet *et al.*, 2006).

Les modifications d'odeurs sont généralement, les premières modifications à apparaître suite à un développement de micro-organismes dans un produit. Ceci est sans doute lié à la grande sensibilité

olfactive de l'homme. La limite de détection est de l'ordre de 10^{-9} g et peut atteindre 10^{-12} g dans certains cas (pyrazine). L'odeur générée peut provenir du produit prépondérant d'une fermentation ou être lié à la production de composés secondaires. Ceci dépend de la nature de l'odeur et son contexte. Les produits incriminés sont des acides (acétique, butyrique, etc.), des alcools, des esters et cétones, l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré, la triméthylamine et d'autres amines, les mercaptans, etc. les odeurs peuvent être complexes : odeur fruitée, de sol, de limon, de linge humide, d'urine, de graisse rance, de putréfaction, de moisi, etc.

Les modifications de goût, quant à elles, sont associées à la production de produits plus abondants. La plus courante est liée à une acidification appelée, selon le cas, piquûre, aigrissement ou surissement se traduisant par une baisse du pH. Dans les aliments de pH neutre, riches en sucres, l'acide lactique est le composé le plus souvent impliqué. Cependant, d'autres acides peuvent également intervenir (acide acétique, propionique, butyrique, etc.). Les autres substances modifiant le goût sont les alcools (aliments sucrés acides), le diacétyl, les amines, etc. Comme pour les odeurs, il existe des saveurs complexes (moisi, rance, etc.). La modification peut être indirecte et résulter d'une réaction chimique entre un métabolite microbien et le substrat. Il faut signaler aussi que la production de gaz entraînera parfois un goût piquant ou pétillant.

Un même produit peut générer des odeurs différentes en fonction de l'environnement, ce qui traduit en fait l'intervention d'une flore différente. Par exemple, l'altération des viandes entreposées au froid ou à température ambiante est totalement différente (odeur douceâtre à froid vs odeur ammoniacale ou d' H_2S à température plus élevée). Des produits sont plus fragiles que d'autres (Guiraud, 2012).

3.2. Aspect et couleur

Les modifications d'aspect et de couleur apparaissent dans la majorité des cas plus tardivement car elles supposent une prolifération abondante. Concernant la couleur, il peut y avoir apparition de couleurs nouvelles dues aux métabolites microbiens ou bien disparition ou atténuation d'une couleur existante par dégradation enzymatique de pigments ou colorants de la viande tels que l'hémoglobine.

Lors d'une prolifération microbienne de surface, il apparaît de petites zones de forme (ronde, irrégulière, plates, bombées), d'aspect (opaque, translucide, mat, brillant) ou de couleur (blanc, vert, bleu, noir, jaune, rouge, violet, etc.) divers car les colonies microbiennes sont souvent colorées (*Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Chromobacterium*, *Serratia*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Rhodotorula*, moisissures, etc.). Des sécrétions muqueuses peuvent en outre former à la surface de la viande un revêtement gluant, visqueux ou poisseux (poissage). Par ailleurs, la prolifération de

moisissures à la surface de l'aliment est caractérisée par l'apparition de zones colorées d'aspects variés (taches, feutrage).

Les modifications de la couleur peuvent provenir de la libération de pigments diffusibles donnant naissance à des taches plus ou moins diffuses de couleurs variées pouvant être fluorescentes. Par ailleurs, des altérations affectant des structures cellulaires permettent à des enzymes endogènes d'entrer en contact avec leur substrat. Enfin, la coloration peut résulter d'une réaction chimique entre un produit microbien et un composé présent dans l'aliment. L' H_2S produit par diverses bactéries peut entraîner l'apparition de sulfures qui provoquent un noircissement (Guiraud, 2012).

3.3. Texture

Les modifications de texture sont fréquemment observées et ont des répercussions sur l'aspect et la forme du produit (Jeantet *et al.*, 2006 ; Guiraud, 2012). Elles sont liées à la destruction de macromolécules du substrat ou à la production de métabolites microbiens. Ces modifications sont d'autant plus grandes que la charge microbienne est importante et constituée de micro-organismes riches en enzymes exo-cellulaires. La destruction des polymères (protéines, lipides, etc.) correspondant à des réactions d'hydrolyse, se traduit par des changements de structure ou de texture de l'aliment contrairement à celle des petites molécules qui a surtout une incidence organoleptique. Ces phénomènes d'hydrolyse sont parfois recherchés quand ils produisent une amélioration de texture ou d'aspect. Ils sont toutefois souvent considérés comme défavorables (perte de forme des viandes sous l'effet des protéases) (Guiraud, 2012).

4. Principales voies du catabolisme

Les modifications observées lors de l'altération d'un aliment dépendent beaucoup de sa composition, notamment de sa teneur en glucides, protéines et lipides. Ainsi, les produits formés sont issus généralement du catabolisme de ces grandes familles de composés.

4.1. Catabolisme des glucides

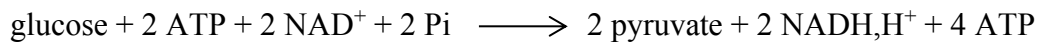
Les glucides des aliments susceptibles d'être dégradés par les micro-organismes sont nombreux et variés. Les produits de dégradation pénètrent ensuite dans la cellule. La transformation des polymères glucidiques, des sucres et de diverses autres substances organiques aboutit souvent à la formation de glucose ou de molécules voisines, parfois de pentoses et autres dérivés (Guiraud, 2012). Les micro-organismes aérobies vivant à la surface de la viande oxydent les sucres afin de

produire du CO₂ et de l'H₂O. S'il y a un manque d'oxygène ou bien si l'oxydation est incomplète, il y a apparition d'acides organiques qui ont peu d'effet sur l'odeur et la saveur de la viande. Toutefois, ils sont à l'origine du développement d'un voile à la surface du produit. Le métabolisme anaérobie donne naissance à une grande variété de produits de fermentation tributaires du germe en cause. Cependant, de nombreux micro-organismes produisant de l'acide lactique peuvent vivre dans ou sur la viande (Craplet, 1966).

4.1.1. Glycolyse

La glycolyse ou voie d'oxydation des hexoses, plus particulièrement du glucose, est largement répandue parmi les micro-organismes. Elle mène au pyruvate qui est une plaque tournante du métabolisme (Guiraud, 2012).

Le bilan est :



4.1.2. Alternatives de la glycolyse

Une grande variété de micro-organismes, aérobies ou anaérobies (bactéries, levures, moisissures) peuvent dégrader le glucose par d'autres voies. Ces voies sont caractérisées par le fait que le glucose est oxydé en acide phosphogluconique préalablement au clivage de la molécule. Parmi ces voies, nous pouvons citer la voie *d'Entner-Doudoroff* qui possède des étapes communes avec la glycolyse et conduit au pyruvate qui est le point de départ d'autres voies. On la rencontre chez des micro-organismes aérobies tels que *Pseudomonas*, plus rarement anaérobies (Guiraud, 2012).

4.1.3. Fermentations bactériennes

Les fermentations bactériennes regroupent les fermentations homo et hétérofermentaires. Les micro-organismes homofermentaires qui transforment les glucides principalement en acide lactique (streptocoques, microbactéries, lactobacilles, etc.) induisent une diminution du pH et un goût sûr d'où leur utilisation dans les procédés de fermentation (charcuterie). Les micro-organismes hétérofermentaires (*Leuconostoc* et lactobacilles) transforment les glucides en acide lactique, alcool éthylique et en CO₂. Ainsi, ce type de fermentation est non seulement à l'origine de l'apparition d'une certaine l'acidité, mais aussi de la production d'une quantité considérable de gaz qui détériore le produit carné et induit le gonflement des emballages plastiques sous-vide. D'autres micro-organismes interviennent dans d'autres types de fermentation, et parmi lesquels

on peut citer les bacilles sporulants tels que les *Clostridium*. Ces derniers produisent d'importantes quantités de gaz (CO_2 et H_2) ainsi que des produits finaux variés (acide acétique et butyrique, acétone, butanol, etc.) d'où apparition d'un gonflement et d'une altération du produit (Craplet, 1966).

a. Fermentation hétérolactique bactérienne

Les bactéries hétérolactiques (*Leuconostoc*, certains *Lactobacillus*) possèdent le système glycéraldéhyde-P déshydrogénase, mais sont en général dépourvues des autres enzymes de la glycolyse et en particulier de fructose-6P kinase. Par contre, elles possèdent une phosphocétolase. Ces micro-organismes empruntent généralement une voie qui produit du lactate et un mélange d'autres produits, à savoir l'acétate, l'éthanol et le CO_2 . L'absence de production d'acide acétique est fréquente en raison des conditions anaérobies. Parmi les *lactobacillus* hétérofermentaires, certains sont dits « obligatoires » car ils fermentent le gluconate et les pentoses, ce qui permet la production de 50 % d'acide lactique à partir du glucose. D'autres sont dits « facultatifs » étant donné qu'ils ne fermentent pas le gluconate et les pentoses, et arrivent à produire jusqu'à 85 % d'acide lactique (Guiraud, 2012).

b. Fermentations oxydatives du glucose

Certains micro-organismes aérobies sont capables d'oxyder directement le glucose sans avoir recours à une phosphorylation préalable. L'oxydation est incomplète et il s'agit d'une fermentation aérobie.

Divers micro-organismes aérobies stricts comme les *Pseudomonas* oxydent le glucose en gluconate. Le glucose est transformé en gluconolactone grâce à une oxydation directe par l'oxygène (catalysée par la glucose oxydase, enzyme à FAD (*Flavine adénine dinucléotide*)). Le gluconolactone est ensuite hydratée en acide gluconique. Le produit de la fermentation est en fait constitué par un mélange d'acide gluconique et de lactones (Guiraud, 2012).

4.1.5. Métabolisme aérobie du pyruvate

a. Cycle de Krebs

En présence d'air, les micro-organismes aérobies stricts ou facultatifs oxydent complètement le glucose. Le pyruvate est oxydé *via* le cycle de Krebs qui fournit aussi les composés de départ des

réactions de synthèse. Le pyruvate est décarboxylé et conduit à l'acétyl-CoA (*Acétyl-Coenzyme A*). Chaque tour du cycle produit deux molécules de CO_2 , $2\text{NADH}, \text{H}^+$ et 1FADH_2 . Les électrons sont le plus souvent transportés vers l'oxygène par la chaîne respiratoire (Guiraud, 2012).

b. Shunt du glyoxylate

Un certain nombre de micro-organismes (*E. coli*, nombreuses espèces de moisissures, *Pseudomonas*) sont capables de se développer à partir de l'acétate comme seule source de carbone et d'énergie. Hormis le fait que ces micro-organismes aient tous les enzymes du cycle de Krebs, ils ont en plus deux enzymes, l'isocitritase et la malate synthétase. Lors de la croissance sur acétate, les cellules décarboxylent l'oxaloacétate pour fournir du phosphoénolpyruvate, point de départ de la biosynthèse des hexoses et des pentoses (Guiraud, 2012).

c. Fermentations oxydatives issues du cycle de Krebs

Le cycle de Krebs permet la réalisation de plusieurs fermentations aérobies principalement effectuées par des moisissures. Le point de départ de la synthèse des acides organiques est l'oxaloacétate qui est formé par carboxylation du pyruvate ou par la carboxylation de phosphoénolpyruvate précurseur du pyruvate. Elles aboutissent à la formation de divers acides organiques qui sont des métabolites directement issus du cycle ou du shunt glyoxylique (acides citrique, cis aconitique, fumarique, etc.) ou des produits de leur transformation (acide oxalique, itaconique, itatartarique, etc.). Ces produits s'accumulent lorsque le fonctionnement du cycle de Krebs est interrompu à la suite d'une variation des conditions du milieu (pH, présence d'inhibiteurs des enzymes transformant le produit formé) ou par une mutation portant sur les gènes contrôlant ces enzymes (Guiraud, 2012).

4.1.6. Métabolisme anaérobie du pyruvate

Le pyruvate est métabolisé en anaérobiose grâce aux fermentations par de nombreux micro-organismes, anaérobies stricts ou facultatifs (Guiraud, 2012).

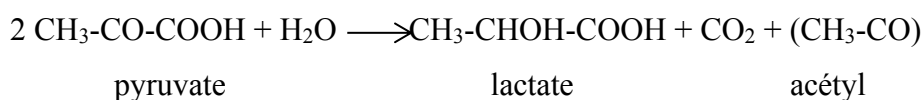
a. Fermentation lactique

Les bactéries lactiques n'ayant pas de pouvoir pathogène, n'ont pas de signification défavorable pour la qualité sanitaire de l'aliment. Outre le rôle organoleptique de la fermentation lactique, ce

type de fermentation joue également un rôle de stabilisation et influe favorablement sur la qualité alimentaire. En effet, la fermentation lactique est une étape importante dans la fabrication de nombreux produits comme la charcuterie. Cependant, les micro-organismes à l'origine de cette fermentation peuvent être des agents d'altération à l'origine de difficultés pour certaines industries (Bonnefoy *et al.*, 2002 ; Guiraud, 2012).

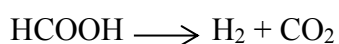
Dans la fermentation homolactique, le produit abondant est l'acide lactique (95 % ou plus) ; résultat de la réduction de l'acide pyruvique catalysée par la lactico-déshydrogénase. Cette fermentation est effectuée par tous les membres des genres bactériens *Streptococcus* et *Pediococcus*, par beaucoup de *Lactobacillus*, par certains *Bacillus* et certaines moisissures (Phycomycètes) (Guiraud, 2012).

En aérobiose, la réaction se traduit par :

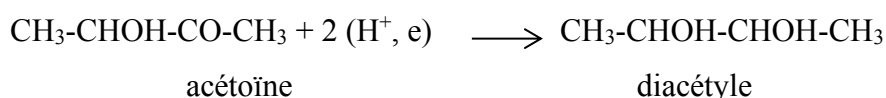


b. Fermentations des Entérobactéries

Les fermentations des Entérobactéries se caractérisent par la production de diverses substances. La fermentation dite « acide mixte » est effectuée par *Escherichia*, *Salmonella*, *Proteus*, *Shigella*, etc. Elle produit de l'éthanol ainsi que plusieurs acides organiques, à savoir les acides lactique, acétique, succinique et formique. Certaines espèces comme *Escherichia coli* sont très gazogènes car elles possèdent l'hydrogène lyase formique permettant de décomposer immédiatement l'acide formique en hydrogène et gaz carbonique :



La fermentation butylène-glycolique est produite par les Entérobactéries (*Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*), mais aussi par *Aeromonas*, *Bacillus*, etc. Il y a formation de 2-3 butanediol (ou butylène-glycol) qui est avec l'éthanol, la substance la plus prépondérante. En anaérobiose, le 2-3 butanediol provient de la réduction de l'acétylméthylcarbinol (ou acétoïne) qui est en fait le produit issu du pyruvate par l'intermédiaire de l'acéto-lactate. Des composés voisins du 2-3 butanediol sont souvent présents (acétoïne et diacétyle). Ils sont formés en aérobiose. La nature enzymatique de la transformation acétoïne-diacétyle n'a pas été démontrée : il s'agit probablement d'une réaction de type chimique



En général, les acides sont produits en faible quantité bien que *Serratia* génère beaucoup d'acide formique. Chez les autres Entérobactéries à fermentation butylène-glycolique, la présence

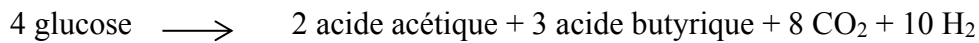
d'hydrogène lyase formique entraîne également la formation de gaz. Cependant, le CO₂ est plus abondant que l'H₂ car il est également formé au cours de la synthèse du 2-3-butanediol.

Chez les *Bacillus*, il y a très peu d'acide formique et d'éthanol formés mais il y a production de glycérol (Guiraud, 2012).

c. Fermentations butyriques

Certaines bactéries anaérobies comme *Clostridium* produisent de l'acide butyrique, de l'acide acétique, du CO₂ et de l'hydrogène. L'acide butyrique est formé par condensation de deux molécules d'acétyl-CoA en acéto-acétate, lequel est ensuite réduit en β-hydroxybutyrate puis en butyrate. Une partie de l'acétyl-CoA conduit à la formation d'ATP et d'acide acétique.

Chez *Clostridium butyricum* le bilan est :



Quelques Clostridies peuvent produire en plus de l'acétone et des alcools (butanol, éthanol, isopropanol). Dans ce cas-là, la réduction du butyrate est poursuivie jusqu'à l'alcool butylique (Guiraud, 2012).

d. Fermentations propioniques

Des bactéries anaérobies strictes ou facultatives (certains *Clostridium*) produisent par fermentation de l'acide propionique, de l'acide acétique, du CO₂ et éventuellement de l'acide succinique. L'acide propionique est formé par réduction de pyruvate, l'acide lactique étant l'intermédiaire (Guiraud, 2012).

4.2. Catabolisme des protéines

4.2.1. Protéolyse

Les protéines sont constituées d'acides aminés liés entre eux par des liaisons peptidiques dont la dégradation nécessite la présence de protéases. Les acides aminés et certains peptides pénètrent dans la cellule. Les acides aminés libres ou provenant des peptides sont dégradés ou utilisés pour la synthèse protéique.

La plupart des protéases microbiennes sont spécifiques (hydrolyse de la gélatine et du collagène), et il s'agit souvent d'enzymes extracellulaires. Elles agissent aussi bien sur les protéines que sur les oligopeptides. Les espèces protéolytiques les plus connues sont les *Clostridium*, les *Bacillus*,

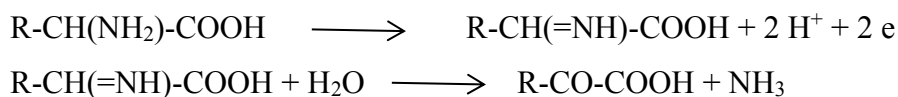
les *Proteus* et les *Pseudomonas*. La formation des enzymes protéolytiques est souvent réprimée par l'adjonction au milieu d'hydrolysats de protéines ou d'un mélange d'acides aminés. Les peptidases hydrolysent les polypeptides et les transforment en leurs sous-unités constitutives, les acides aminés (Craplet, 1966 ; Guiraud, 2012). La majorité des enzymes bactériennes sont des hydrolases et le seul changement du produit est la solubilisation de la protéine. Cependant, certains micro-organismes sont à l'origine de l'attaque enzymatique des amino-acides avec apparition de produits tels que les mercaptans, amines et acides gras, ce qui constitue la putréfaction que l'on évite par un refroidissement rapide des carcasses après l'habillage. Par ailleurs, il existe un grand nombre de bactéries qui ne peuvent pas attaquer les protéines mais peuvent cependant métaboliser les amino-acides et les petits peptides par désamination ou décarboxylation. En outre, certains micro-organismes agissent sur les pigments de la viande, soit par action enzymatique directe, soit par réaction avec les produits du métabolisme microbien, ou bien par modification du potentiel d'oxydo-réduction. Enfin, de nombreux facteurs influent sur le type de dégradation microbienne (température, pH, tension d'oxygène, présence de sucres métabolisables, etc.) (Craplet, 1966).

4.2.2. Catabolisme des acides aminés

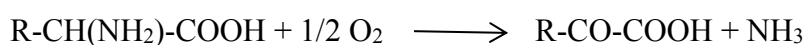
Les acides aminés sont soit désaminés, soit décarboxylés ou bien subissent parfois des transformations spécifiques (Guiraud, 2012).

-Désamination et transamination

Les amino-acides désaminases des micro-organismes peuvent être oxydatives ou non oxydatives. La désamination oxydative conduit à la formation transitoire d'un aminoacide qui est ensuite hydrolysé en ammoniac et en acide α -cétonique :

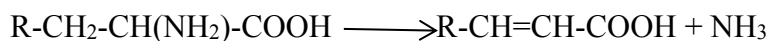


La désamination oxydative peut être liée à l'action d'une déshydrogénase NADP-dépendante (*Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate*) qui transfère les électrons à la chaîne respiratoire via un coenzyme flavinique. Le bilan est alors :

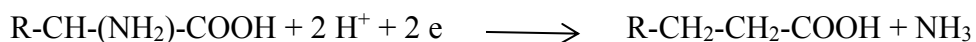


La désamination non oxydative peut être de 3 types :

-*Désamination désaturante* : elle conduit à la formation d'ammoniac et d'un acide insaturé.



-*Désamination réductive* : elle donne l'acide saturé correspondant avec formation d'ammoniac.



-*Désamination par déshydratation* : ce mécanisme est particulier aux amino-acides hydroxylés comme la sérine déshydratase.

Il existe des réactions de transamination : le groupement NH_2 est transféré entre 2 molécules. Une désamination couplée (réaction de Stickland) est réalisée par un grand nombre de bactéries anaérobies strictes sporulées (*Clostridium*) et met en jeu deux acides aminés :



-Décarboxylation

La décarboxylation d'un acide aminé conduit à la libération de CO_2 et à la formation d'une amine :



Cette réaction est réalisée par un nombre important de micro-organismes protéolytiques ou non tel que les Entérobactéries (*Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, etc.) ou certains *Clostridium*, etc. L'amine formée peut être à son tour transformée en une autre amine. Les réactions les plus importantes sont :

Histidine $\longrightarrow$ histamine ; Lysine $\longrightarrow$ cadavérine ; Arginine $\longrightarrow$ putrescine $\longrightarrow$ spermidine $\longrightarrow$ spermine ; Tyrosine $\longrightarrow$ tyramine $\longrightarrow$ dopamine $\longrightarrow$ noradrénaline ; Tryptophane $\longrightarrow$ tryptamine, etc.

Il y a également souvent formation de triméthylamine (TMA). Les amines ont une toxicité propre et peuvent participer à la formation de nitrosamines. La manière dont un micro-organisme dégrade les acides aminés est contrôlée en partie par le pH du milieu. Ainsi, un milieu acide provoque la formation de décarboxylases alors qu'un milieu alcalin stimule la formation de désaminases (Guiraud, 2012).

-Dégradations spécifiques

Quelques acides aminés empruntent d'autres voies de dégradation. Il existe chez les micro-organismes deux voies principales de dégradation du L-tryptophane. La première rencontrée chez *E. coli* forme de l'indole, du pyruvate et de l'ammoniac, tandis que la seconde, de nature oxydative, est rencontrée chez les *Pseudomonas* (Guiraud, 2012).

4.2.3. Fermentations putrides

Il s'agit de fermentations peu gazogènes produites par des micro-organismes protéolytiques. Ces fermentations sont caractérisées par la formation à la fois d'amines, de NH_3 , d'acides organiques et d'alcools. De nombreuses bactéries anaérobies, notamment divers *Clostridium*, effectuent cette fermentation (Guiraud, 2012).

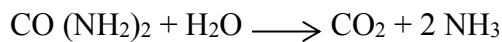
Chez *Clostridium sporogenes*, le bilan est :

Tryptophane $\longrightarrow$ indole propionate ou indole + pyruvate

Thrénine $\longrightarrow$ cétoglutarate butyrate

4.2.4. Dégradation de l'urée

La dégradation de l'urée est généralement due à des uréases (Entérobactéries) (Guiraud, 2012).

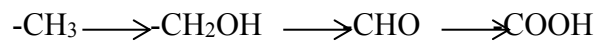


4.3. Catabolisme des lipides et composés voisins

Les graisses sont attaquées par les micro-organismes soit par hydrolyse des glycérides grâce à une lipase, soit par oxydation des acides gras par des oxydases. Les produits qui en résultent sont responsables des odeurs et des saveurs caractéristiques de la rancidité. Toutefois, la plupart des problèmes de rancidité des produits carnés ne sont pas d'origine microbienne (Craplet, 1966). Les lipases sont des enzymes exo ou endo-cellulaires responsables de l'hydrolyse des triglycérides en glycérol et en acides gras. On les rencontre chez les moisissures (*Rhizopus*), les levures (*Candida*) et les bactéries (*Serratia*, *Bacillus*, *Clostridium*, etc.). Le glycérol s'introduit dans la voie de la glycolyse au niveau de la dihydroxyacétone-P. En outre, la β oxydation permet la dégradation des acides gras chez les micro-organismes aérobies et aéro-anaérobies (*Pseudomonas*, Entérobactéries, levures, moisissures, etc.). Du fait de la longueur de la chaîne, les réactions d'oxydation se poursuivent autant qu'il est nécessaire. L'acétyl-CoA formé peut être incorporé dans le cycle de Krebs et le shunt glyoxylique.

Beaucoup de *Pseudomonas*, d'autres groupes bactériens (*Micrococcus*, Actinomycètes), des levures ainsi que des moisissures ont la capacité d'utiliser comme seule source de carbone la quasi-totalité des hydrocarbures paraffiniques et aromatiques. Les alcanes sont dégradés en passant par les voies du catabolisme des acides gras après intervention d'une monooxygénase, d'une alcool et d'une aldéhyde deshydrogénase (Guiraud, 2012).

Le bilan est :



Les acides gras libérés par hydrolyse ont un pouvoir inhibiteur sur les micro-organismes si bien que la population microbienne diminue au fur et à mesure que la rancidité se développe. Les peroxydes produits pendant l'oxydation des acides gras insaturés sont toxiques pour les microbes, mais tout système microbien qui produit des peroxydes catalyse l'oxydation chimique des acides gras insaturés de la viande (Craplet, 1966).

Comme il a été décrit précédemment, la viande est un écosystème complexe regroupant diverses espèces bactériennes. Outre la nature biochimique de la matrice viande, les conditions de stockage sont des paramètres environnementaux qui vont conditionner l'évolution de cet écosystème. Les différents modes de conservation de la viande vont donc viser à réduire sélectivement les bactéries indésirables pour le produit ou pour la santé, tout en favorisant le développement des bactéries bénéfiques. En ce qui concerne la viande bovine fraîche, les deux principales méthodes de conservation sont l'utilisation des basses températures et la modification de l'environnement gazeux (Bauchart et Picard, 2010).

1. Procédés d'inhibition des micro-organismes

1.1. Transformation à basse température

1.1.1. Généralités

La conservation par le froid est divisée en deux groupes principaux, à savoir la réfrigération et la congélation. Ce sont des procédés qui permettent de prolonger dans le temps la conservation des produits carnés en ralentissant ou en stoppant le développement bactérien (Jeantet *et al.*, 2006 ; Bauchart et Picard, 2010).

1.1.2. Définitions

a. Réfrigération

La réfrigération est un procédé qui est utilisé pour des températures de stockage basses (« froid positif ») mais supérieures à 0°C (0°C à 3°C) (Roux, 1994 ; Jeantet *et al.*, 2006) . Elle a pour effet de ralentir les réactions enzymatiques et chimiques, et par conséquent la multiplication et le métabolisme des micro-organismes, mais elle ne permet qu'une conservation de quelques jours, ce qui est relativement court (Jeantet *et al.*, 2006).

b. Congélation

La congélation est un procédé qui désigne le changement d'état d'eau liquide en glace avec le maintien du produit à une température négative (– 1,5°C à – 5°C). La congélation combine donc les effets de la diminution de la température et de celle de l' a_w , puisqu'une partie de l'eau est sous

forme cristallisée. La combinaison de ces deux effets permet de conserver les aliments durant plusieurs mois à une température négative (Jeantet *et al.*, 2006 ; Bauchart et Picard, 2010 ; Champomier-Vergès *et al.*, 2010).

Le terme surgélation quant à lui garantit que le produit est congelé le plus rapidement possible à une température égale ou inférieure à -18°C, puis maintenu à cette température pendant toute la durée de stockage (Jeantet *et al.*, 2006).

1.1.3. Avantages

Une diminution de la température entraîne (Jeantet *et al.*, 2006) :

- Un ralentissement de l'ensemble des processus d'altération biochimiques, enzymatiques et chimiques ayant lieu dans l'aliment ;
- Une incapacité à la reproduction de la plupart des bactéries pathogènes en dessous de 5°C. Ces micro-organismes ont besoin de conditions de températures supérieures ou égales à cette valeur pour être en mesure de produire leur toxine ;
- Une mort progressive éventuelle des micro-organismes (déformations, lésions et destructions des structures cellulaires) selon une allure généralement logarithmique, et ce, à des températures de congélation. Cette mortalité reste cependant très marginale ; il est essentiel de garder à l'esprit que la stabilisation obtenue par congélation se fonde essentiellement sur une inhibition des flores et non sur leur destruction.

1.1.4. Inconvénients

La conservation par le froid présente quelques inconvénients. Parmi lesquels, on peut citer :

- Le développement de certains micro-organismes pathogènes (*Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica* et les salmonelles) et d'altération (*Pseudomonas*, certaines levures et moisissures) reste possible à 6°C, et seul le type E de *Clostridium botulinum* est encore capable de produire sa neurotoxine au-dessous de 10°C (Jeantet *et al.*, 2006) ;
- Les micro-organismes psychrotrophes peuvent se multiplier de manière active aux températures de réfrigération couramment utilisées (6°C). Les micro-organismes psychrophiles, peuvent continuer à se développer en dessous de -5°C, voire même jusqu'à des températures aussi basses que -10°C. La plupart des moisissures et des levures appartiennent au groupe des micro-organismes psychrotrophes, peuvent donc se développer aux températures habituelles de

réfrigération. Les coliformes peuvent également se développer dans la plage de température de 5°C à 0°C (Jeantet *et al.*, 2006) ;

- La résistance de la plupart des micro-organismes au traitement de congélation rapide. Ceci est à relier à la formation de microcristaux intracellulaires altérant beaucoup moins les cellules que de gros cristaux formés lors d'une congélation lente (Jeantet *et al.*, 2006) ;
- La formation de cristaux de glace dans le tissu lors de la congélation conduit à des modifications structurales qui s'accompagnent de perforations membranaires fréquentes. Ce phénomène réduit le pouvoir de rétention d'eau qui se traduit par d'importantes exsudations lors de la décongélation contrairement à la congélation rapide (Ngapo *et al.*, 1999 ; Jeantet *et al.*, 2006) et favorise de ce fait la prolifération bactérienne (Bauchart et Picard, 2010).

En conséquence, les objectifs de la filière viande (réfrigération des carcasses aussitôt après abattage) visent à allonger les durées de conservation des viandes réfrigérées en limitant au maximum la prolifération bactérienne (Frayssé et Darré, 1990 ; Bauchart et Picard, 2010). Dans cette optique, la réfrigération s'accompagne souvent d'un conditionnement « sous vide » ou « sous atmosphère modifiée » (Bauchart et Picard, 2010). Par ailleurs, pour la congélation, la qualité du produit final dépend de celle du produit avant congélation, de la vitesse de refroidissement et de la congélation et du maintien du froid négatif au cours de son stockage. Après un stockage à basse température, les micro-organismes doivent être exposés à une température favorable pendant un temps suffisamment long avant de pouvoir recommencer à se reproduire et à se développer du fait du stress subi (Jeantet *et al.*, 2006).

1.2. Environnement gazeux modifié

1.2.1. Généralités

Du fait de ses limites, la température est rarement la seule technique utilisée pour conserver la viande bovine. On lui associe en général un environnement gazeux modifié pouvant être représenté soit par la conservation sous atmosphère modifiée ou MAP (*Modified atmosphere packaging*), soit par la conservation sous vide (Bauchart et Picard, 2010).

1.2.2. Définitions

a. Conservation sous atmosphère modifiée

La conservation sous atmosphère modifiée consiste à remplacer l'atmosphère ambiante par un mélange gazeux permettant de stabiliser les qualités organoleptiques et de limiter l'évolution microbologique du produit (Bauchart et Picard, 2010).

b. Conservation sous vide

La conservation sous vide vise quant à elle à retirer totalement l'environnement gazeux. Ce sont ces conditions de conservation sous vide d'air qui permettent en général la plus longue conservation (Bauchart et Picard, 2010).

1.2.3. Technique

En Europe, plusieurs mélanges gazeux peuvent être employés pour la conservation de la viande. En France, deux familles de mélanges gazeux sont utilisées. La première famille est destinée aux circuits de distribution hors foyer (cantines, hôpitaux, restaurants). Elle est dépourvue d'oxygène et constituée de 50 % à 70 % d'azote et de 50 % à 30 % de CO₂. La seconde famille quant à elle est utilisée pour la viande hachée conditionnée en barquette. Elle contient 70 % d'oxygène, ce qui permet de maintenir intacte la myoglobine, pigment rouge vif de la viande, et jusqu'à 30 % de CO₂, ce qui permet de limiter le développement bactérien.

Afin de prolonger la durée de vie de la viande bovine conservée à basse température de plusieurs semaines, il est nécessaire de la conserver également en atmosphère modifiée ou bien sous vide (Bauchart et Picard, 2010).

1.2.4. Avantages et inconvénients

La composition du mélange gazeux a un impact différent sur la croissance de différentes espèces bactériennes composant la flore initiale de la viande (Nissen *et al.*, 2000).

Des études évoluant l'influence de différents mélanges gazeux sur la flore de la viande bovine ont montré que :

- Au bout de 7 jours de conservation au froid, les genres *Pseudomonas* et *Rahnella* et l'espèce *Carnobacterium divergens* dominaient en présence d'air, tandis qu'en présence de 60 % d'O₂ et 40% de CO₂, *L. sakei* et les *Pseudomonas* constituaient la flore principale (Ercolini *et al.*, 2006) ;
- Dans le cas d'un mélange moins riche en oxygène (20 % d'O₂, 40 % de CO₂, 40 % de N₂), *L. sakei* ainsi que *Rahnella* devenaient les principales espèces (Tsigarida *et al.*, 2000) ;
- Le développement de la flore endogène, mais aussi celui de l'espèce pathogène *L. monocytogenes* dans la viande conservée sous vide ou sous atmosphère modifiée dépendait de la perméabilité aux gaz du film d'emballage (Tsigarida *et al.*, 2000) ;
- Dans les conditions sous vide, une flore spécifique composée de lactobacilles est généralement sélectionnée, et c'est le plus souvent l'espèce *L. sakei* qui devient dominante.

1.3. Transformations par réduction d'eau

1.3.1. Salage

a. Généralités

Le salage vise à atteindre un équilibre salin entre le produit et la solution saline en temps suffisamment court pour empêcher la prolifération bactérienne et prolonger la durée de conservation. Le chlorure de sodium (NaCl), bien que considéré plutôt comme ingrédient alimentaire que comme additif, est sans doute le premier ou l'un des premiers conservateurs chimiques qui ait été utilisé en alimentation (Jeantet *et al.*, 2006).

b. Définition

Le salage se définit comme l'action d'imprégner de sel une denrée périssable telle que la viande afin de favoriser sa conservation (Roux, 1994).

c. Techniques

Les techniques de salage comprennent le salage au sec et le salage en saumure (saumurage).

c.1. Salage à sec

Le salage à sec représente un entourage du produit par du sel fin épuré et séché avec un stockage entre 12°C et 15°C (Roux, 1994). Les filets de viande sont posés à plat sur un lit de sel fin et recouverts d'une fine couche sur l'autre face (Jeantet *et al.*, 2006).

c.2. Salage en saumure (saumurage)

Le salage en saumure ou saumurage représente une immersion des produits dans des solutions plus ou moins concentrées en sel. L'emploi d'une saumure saturée permet de maintenir la saturation en sel de la solution, en fonction de sa température, au cours du procédé (Jeantet *et al.*, 2006). L'immersion s'effectue dans une solution aqueuse, claire, avec un pH qui se situe entre 5,6 et 6,2 et une température $\leq 10^{\circ}\text{C}$ pouvant être épicée (poivre, girofle, etc.). Il existe des échelles de degrés de salinité en chlorure de sodium (NaCl), de 0 à 24,5 ou de 0 à 100 en fonction des pays. Les temps d'immersion sont variables selon la concentration en sel, l'épaisseur des produits et la température du bain. Ils peuvent varier de 30 minutes à 3 jours. Le rinçage s'effectue de même par trempage. La saumure doit être renouvelée souvent, notamment dès l'apparition d'odeurs (Roux, 1994).

c.3. Salage par injection

Le salage par injection se définit comme l'utilisation d'une machine munie d'aiguilles creuses permettant d'injecter la saumure sur les produits qui défilent. Ce procédé donne un meilleur rendement que le saumurage, et la répartition de la saumure est homogène dans les muscles (Roux, 1994).

d. Avantages

Le salage a différents rôles (Roux, 1994 ; Jeantet *et al.*, 2006) :

- Rôle antimicrobien qui s'exerce uniquement par son effet dépressur sur l' a_w . Le sel sélectionne les flores en fonction de l'activité de l'eau, inhibe la multiplication de la plupart des bactéries intervenant dans l'altération, mais favorise la croissance des halophiles. Son pouvoir bactéricide est faible :

- À partir de 5 % : il inhibe la croissance des *Pseudomonas* ainsi que la plupart des bactéries anaérobies, et ralentit la croissance des aérobies,

- À partir de 10 % : il inhibe la croissance de nombreux micro-organismes, ce qui constitue son pouvoir conservateur,
- Pour une protection efficace, il faut abaisser l' a_w à des valeurs inférieures à 0,95 (2 à 3 % de sel) pour des produits frais réfrigérés à durée de vie limitée, ou même inférieures à 0,91 (5 à 6 % après séchage partiel) pour une stabilité en dehors de la chaîne du froid.
- Rôle d'agent de sapidité (apport du goût salé). Ce goût a évolué chez le consommateur, notamment pour la viande ;
- Rôle sur l' a_w (baisse de l'activité de l'eau) ;
- Rôle sur le pH des protéines, entraînant un accroissement du pouvoir de rétention d'eau de la viande ;
- Rôle bénéfique sur les protéines par augmentation de leur solubilité (protéines musculaires) ;
- Rôle néfaste sur les corps gras (oxydation et rancissement).

e. Inconvénients

Les inconvénients du salage sont représentés par les points suivants:

- Les machines de saumurage en continu, à recyclage, peuvent présenter des risques de contamination (contamination par une pièce contaminée). Dans ce cas, il faut un séchage approprié, surtout si l'on procède ensuite au fumage (Roux, 1994) ;
- La concentration de 10% ne peut être appliquée aux denrées alimentaires. On est passé de 7 à 8 % naguère avec des DLC (*date limite de consommation*) assez longues à moins de 3 % aujourd'hui mais avec un maintien au froid positif (3°C) (Roux, 1994) ;
- L'effet non recherché par le consommateur aussi bien d'un point de vue nutritionnel que sensoriel ; il est donc indispensable de procéder à un dessalage avant consommation (Jeantet *et al.*, 2006).

1.3.2. Déshydratation

a. Définitions

La déshydratation permet non seulement d'assurer une bonne stabilité des produits alimentaires par abaissement de l' a_w , mais aussi de réduire les coûts de transport et de stockage (Bimbenet et Loncin, 1995 cité par Jeantet *et al.*, 2006).

Elle peut se faire par (Jeantet *et al.*, 2006) :

- Séchage par automatisation par entraînement sous l'action couplée d'un transfert de chaleur de l'air chaud vers le produit et d'un transfert d'eau du produit vers l'air chaud et sec;
- Lyophilisation par sublimation de la glace à des pressions partielles d'eau inférieures à celle du point triple.

b. Techniques

b.1. Séchage par automatisation ou par entraînement

Le séchage par automatisation ou par entraînement consiste à placer un corps humide dans un courant d'air (ou un autre gaz) suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre ce corps et le gaz un écart de température et de pression partielle d'eau. C'est sans conteste le moyen de séchage le plus universel, tous produits et secteurs alimentaires confondus (charcuterie) (Jeantet *et al.*, 2006).

b.2. Lyophilisation

La lyophilisation ou la cryodessiccation comporte 5 phases (congélation, mise sous vide, sublimation, désorption et cassage du vide). C'est un procédé d'élimination d'eau dont le principe consiste pour l'essentiel à sublimer l'eau d'un produit préalablement congelé. L'eau du produit passe directement de l'état solide à l'état vapeur sans passer par l'état liquide. La sublimation ne peut se faire que si la température et la pression partielle de vapeur sont inférieures à celle du point triple (Jeantet *et al.*, 2006).

c. Avantages et inconvénients

La déshydratation notamment la lyophilisation constitue un procédé de choix pour les produits thermosensibles car elle permet une excellente restitution des qualités organoleptiques des produits traités. Cependant, son caractère cyclique et son coût énergétique élevé sont des facteurs limitants au développement de son utilisation (Jeantet *et al.*, 2006).

1.4. Additifs conservateurs

L'usage des conservateurs fait partie de la panoplie des techniques qui permettent de limiter les altérations par les micro-organismes, d'allonger la durée de vie des produits alimentaires et d'assurer la sécurité du consommateur. Les conservateurs chimiques permettent en outre de diminuer l'intensité des traitements physiques, ce qui limite les modifications organoleptiques et nutritionnelles (Mescle 2002 cité par Jeantet *et al.*, 2006).

Les conservateurs chimiques doivent assurer (Jeantet *et al.*, 2006) :

- La stabilité organoleptique de l'aliment, par l'inhibition des micro-organismes d'altération ;
- La sécurité du consommateur, en inhibant le développement des micro-organismes pathogènes éventuellement présents (salmonelles, *Clostridium*, staphylocoques, moisissures diverses) et en limitant la production des toxines microbiennes.

1.4.1. Définition

Un additif conservateur peut être défini comme toute substance incorporée à un aliment en vue d'accroître sa stabilité chimique, sa stabilité microbiologique et sa sécurité. Sont exclus de cette catégorie, tous les produits utilisés traditionnellement en tant qu'ingrédients alimentaires et possédant en outre des propriétés conservatrices (vinaigre, chlorure de sodium, alcool éthylique et huiles alimentaires) (Jeantet *et al.*, 2006).

1.4.2. Technique

Afin de renforcer leur action, les conservateurs sont le plus souvent utilisés en mélange ou associés avec d'autres substances comme les antioxydants. Ces associations créent des effets synergiques, car chaque famille d'additifs agit préférentiellement sur un groupe de micro-organismes ou sur certaines voies métaboliques. Les conditions de milieu, notamment le pH, sont très importantes pour l'efficacité des traitements. Il est donc indispensable de connaître la composition et les caractéristiques physico-chimiques du produit, ainsi que sa microflore avant de formuler un mélange d'additifs. Par ailleurs, l'utilisation de conservateurs ne peut s'envisager sans tenir compte des autres traitements, en particulier physiques opérés sur un produit (Jeantet *et al.*, 2006) .

1.4.3. Avantages

Les additifs conservateurs ont pour rôle de (Jeantet *et al.*, 2006) :

- Se substituer à des traitements physiques coûteux et difficiles à mettre en œuvre. Ceci est vrai dans des régions où la diffusion du progrès technique est limitée par manque de formation ou de moyens financiers ;
- Présenter une alternative à la chaîne du froid ;
- Conserver les aliments à l'état frais et de modifier peu ou pas leurs qualités organoleptiques. Les aliments traités par les conservateurs gardent donc mieux et plus longtemps leurs caractéristiques originelles, ce qui est recherché par le consommateur ;
- Exercer un effet essentiellement bactériostatique. Leur effet létal est lent et limité.

1.4.4. Inconvénients

Les additifs conservateurs peuvent (Jeantet *et al.*, 2006) :

- S'altérer au cours du temps par oxydation ou sous l'action des enzymes microbiennes et perdre ainsi toute efficacité ;
- Souffrir d'une mauvaise image auprès des consommateurs, qui remettent en cause leur utilisation. En effet, certaines de ces substances peuvent être toxiques lorsqu'elles sont consommées à forte dose ou sont soupçonnées d'être cancérogènes sur le long terme.

2. Procédés de destruction des micro-organismes

2.1. Traitement thermique proprement dit

Exposés à une température suffisamment élevée pendant un temps suffisamment long, les micro-organismes sont détruits (Bonnefoy *et al.*, 2002). Les caractéristiques physico-chimiques du milieu (pH, a_w , composition) modifient la thermorésistance des micro-organismes. Parmi ces caractéristiques, le pH est de loin le paramètre qui a la plus grande influence sur celle-ci. La résistance de la plupart des formes végétatives ou sporulées des micro-organismes est maximale aux pH proches de la neutralité, et décroît autour de cette plage (Jeantet *et al.*, 2006). Ainsi, dans de nombreux cas, le pH des produits alimentaires est abaissé par ajout d'un liquide ou d'une sauce de couverture acide (Jeantet *et al.*, 2006).

En plus du pH, l' a_w influence la thermorésistance des micro-organismes. Bimbenet et Loncin (1995) (cité par Jeantet *et al.*, 2006) précisent que la thermorésistance des formes sporulées est maximale pour une a_w de l'ordre de 0,3. Enfin la composition physico-chimique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , matière grasse) de l'aliment peut également augmenter la thermorésistance des micro-organismes (Jeantet *et al.*, 2006).

2.1.1. Définitions

On distingue fondamentalement deux catégories de traitement (Jeantet *et al.*, 2006) :

- La pasteurisation qui correspond à l'emploi de températures comprises entre 60°C et 100°C pour la destruction des seules formes végétatives des micro-organismes incluant la flore banale et certains pathogènes (*Salmonella*, *Brucella*, *Listeria*, etc.). Elle permet d'allonger la durée de vie des produits stockés en froid positif de quelques jours à quelques semaines ; on parle dans ce cas de DLC (date limite de consommation). Pour le cas de la viande, une pasteurisation basse (15-30 min/ 60 à 65°C) est plus appropriée ;
- La stérilisation qui correspond à l'utilisation de températures supérieures à 100°C (15-20 min/ 115°C-125°C) pour la destruction de l'ensemble des micro-organismes susceptibles de se développer dans le produit, y compris des formes sporulées. Les produits obtenus ont une DDM (*date de durabilité minimale*) comprise entre plusieurs mois et plusieurs années à température ambiante.

2.1.2. Technique

La résistance à la chaleur varie considérablement d'une espèce à l'autre. La présence ou non-présence de spores est plus importante. Leur résistance est bien supérieure à celle des formes végétatives, et les espèces thermorésistantes sont généralement sporulées. Ainsi, l'évaluation de l'effet des traitements thermiques permet d'adapter ces traitements à la nature de la flore à détruire et aux caractéristiques du produit à fabriquer. Un traitement thermique modéré va éliminer la plupart des micro-organismes sporulés, ne laissant survivre que les plus résistantes. Seules les spores d'espèces très thermorésistantes vont résister au chauffage intense (Bonnefoy *et al.*, 2002). L'élévation de la température d'un milieu engendre la rupture de liaisons de faible énergie (liaisons hydrogènes ou ioniques), ce qui induit des changements de conformation d'un certain nombre de macromolécules (ADN, enzymes endocellulaires, protéines de paroi, etc.). Il en résulte une perte d'activité biologique entraînant l'inactivation enzymatique et la mort cellulaire. Ainsi, le traitement thermique permet d'allonger la durée de vie des produits de quelques jours à quelques années consommation.

Prenant l'exemple du traitement après conditionnement (conserves) où la plupart des aliments peuvent être traités après conditionnement en autoclave (appertisation) de façon discontinue ou continue. Le risque de contamination du produit est très limité (altération du contenant lors du traitement ou sertissage défectueux), puisque le conditionnement précède le traitement thermique (Jeantet *et al.*, 2006).

2.1.3. Avantages

La stabilisation des aliments par la chaleur est un moyen largement répandu dans le secteur alimentaire et permet de (Jeantet *et al.*, 2006) :

- Détruire partiellement ou totalement les flores d'altération (*Micrococcus*, *Bacillus*, flore psychrotrophe, flore lactique, etc.) et les flores pathogènes ou toxigènes (*Salmonella*, *Staphylococcus*, *Clostridium perfringens* ou *botulinum*) pour améliorer la qualité hygiénique du produit ;
- Inactiver certaines enzymes, endogènes (plasmine, lipoxigénase, polyphénoloxydase) ou provenant des micro-organismes présents (lipases microbiennes), pour améliorer la stabilité du produit au cours de leur stockage.

2.1.4. Inconvénients

Les traitements thermiques peuvent permettre de :

- Changer les caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques des aliments (Roux, 1994) ;
- Modifier la structure de certaines molécules, telles que les protéines, et en conséquence leurs caractéristiques physico-chimiques et fonctionnelles (Jeantet *et al.*, 2006) ;
- Générer des produits de la réaction de Maillard pouvant conduire à la formation d'amines aromatiques hétérocycliques (AAH) dès que la température du produit est supérieure à 90-100°C (Skog *et al.*, 1998). Il a été démontré que les AAH ont un pouvoir mutagène important et qu'elles peuvent être responsables de cancers du sein, de la prostate et du côlon, et même causer des dommages cardiaques (Felton *et al.*, 2004 ; Gaubatz, 1997 ; Skog *et al.*, 1998) ;
- Augmenter la thermotolérance chez de nombreux micro-organismes lors d'un traitement thermique sublétal. Cette capacité à résister à des températures habituellement létales persiste plus ou moins longtemps (Jeantet *et al.*, 2006). Ainsi, la flore d'altération peut être sélectionnée par résistance à un traitement thermique (Bonnefoy *et al.*, 2002).

2.2. Fumage

Le fumage est avec le salage une des plus anciennes façons de conserver des aliments (Jeantet *et al.*, 2006).

2.2.1. Définition

Le fumage est l'action de soumettre la chair de la viande, préalablement salées et séchées ou non, à l'action des composés de la fumée issue de la combustion lente de bois (coupeaux ou sciure) afin d'assurer leur conservation et leur aromatisation (Roux, 1994 ; Jeantet *et al.*, 2006). En effet, la combustion de certaines essences de bois permet de former des composés aux propriétés bactériostatiques, organoleptiques (couleur, saveur) et antioxydantes (Jeantet *et al.*, 2006).

2.2.2. Techniques

Il existe deux types de fumage, à savoir le fumage à froid et le fumage à chaud.

a. Fumage à froid

Le fumage à froid est un procédé assez long qui est utilisé pour les produits sensibles à la chaleur comme le poisson à l'inverse de la viande bovine. La température de fumée est inférieure à 30°C (20°C à 28°C). Ainsi, le produit reste cru et se conserve 4 semaines à +2°C lorsqu'il est emballé sou vide (Roux, 1994). Cette méthode de fumage conduit à une texture de chair molle et tendre (Jeantet *et al.*, 2006).

b. Fumage à chaud

Le fumage à chaud est un procédé qui consiste à cuire le produit en le fumant en atteignant par paliers successifs 30-35°C puis 50-55°C jusqu'à 75-80 °C. Le produit (bœuf fumé de Hambourg) se conserve 8 à 10 jours à +2°C (emballé sou vide) (Roux, 1994). Contrairement au fumage à froid, cette méthode de fumage donne des produits de texture plus dure et sèche (Jeantet *et al.*, 2006).

2.2.3. Avantages

Le fumage a plusieurs rôles (Jeantet *et al.*, 2006) :

-Rôle organoleptique (saveur, couleur, texture)

Bien que les responsables de la saveur soient encore mal connus, les arômes typiques semblent être dus aux phénols (odeur de fumé). Toutefois, les composés carbonylés et les acides sont à l'origine de différence de saveurs. Ainsi, le syringol est typiquement à l'origine de l'odeur de fumé, alors que le gäïacol et l'eugénol sont surtout responsables du goût de fumé. La couleur de

la viande fumée est essentiellement due à des produits issus de la réaction de Maillard. Les modifications de texture sont quant à elles surtout dues à l'action combinée du sel, de la chaleur et de certains constituants de la fumée sur la coagulation des protéines (gélatinisation de la couche sous-cutanée).

-Rôle antioxydant

L'effet antioxydant de la fumée est dû aux phénols (syringol, gaïacol, vaniline, etc.) ayant la capacité de former des radicaux libres stables, ce qui limite l'apparition du goût rance.

-Rôle bactériologique

Dans le fumage à chaud, c'est surtout la chaleur qui a un rôle déterminant dans la destruction des micro-organismes tandis que dans le fumage à froid, c'est la fumée qui joue un rôle essentiel. La fumée peut en effet avoir un rôle antiseptique grâce aux composés phénoliques qui s'en dégagent. La bonne stabilité microbiologique des produits fumés est due à l'action combinée de la fumée, de la chaleur et du sel, qui permettent d'abaisser l' a_w .

2.2.4. Inconvénients

Durant le fumage, la déshydratation du produit se poursuit en parallèle de son imprégnation en composés volatils de la fumée et d'hydrocarbures condensés indésirables tels que le benzopyrène, produit classé cancérigène pour l'homme (Jeantet *et al.*, 2006).

2.3. Ionisation ou irradiation

L'ionisation des aliments est un procédé qui trouve son application dans le cas des produits crus ou thermosensibles. En effet, bien qu'elle se soit développée il y a une trentaine d'années, son domaine d'application reste limité. Ce procédé n'est pas destiné à remplacer les traitements de stabilisation basés sur la déstructuration thermique ou sur la réduction de l' a_w (Jeantet *et al.*, 2006).

2.3.1. Définition

Le traitement ionisant consiste à soumettre l'aliment (ionisation des viandes de bœuf, agneau fraîches ou congelées) soit à un rayonnement électromagnétique γ , soit à des rayons X dans le but de les assainir et/ou d'augmenter leur durée de vie par destruction des activités microbiennes (Jeantet *et al.*, 2006).

2.3.2. Techniques

Les éléments constitutifs des cellules, dont l'ADN, subissent des modifications soit sous l'action directe des rayonnements ou des électrons, soit par interaction avec les produits issus de la radiolyse. Ces modifications structurales de l'ADN entraînent la destruction des micro-organismes. Pour limiter ces effets, l'ionisation est parfois réalisée à l'état congelé, ce qui permet de ralentir les transferts des produits de réaction dans la masse du produit. L'effet des traitements ionisants sur l'inactivation des enzymes et des toxines d'origine microbienne est assez limité (Jeantet *et al.*, 2006).

L'intensité des traitements dépend des objectifs fixés (Jeantet *et al.*, 2006) :

- Inhibition de la germination : 0,04 à 0,10 kGy (*KiloGray*) ;
- Destruction partielles des micro-organismes : 1 à 4 kGy ;
- Destruction des germes pathogènes : 1 à 10 kGy ;
- Destruction totale des micro-organismes : 15 à 50 kGy.

2.3.3. Avantages

Le principal avantage du traitement ionisant est qu'il peut être mis en œuvre sur des produits congelés et des produits préemballés (Jeantet *et al.*, 2006).

2.3.4. Inconvénients

Parmi les inconvénients de l'ionisation, on peut citer (Jeantet *et al.*, 2006) :

- Le risque pour l'environnement, les opérateurs et les consommateurs ;
- Les pertes de nutriments, notamment de certaines vitamines ;
- La génération de produits volatils qui altèrent la qualité sensorielle de l'aliment par dégradation d'acides aminés soufrés et de lipides.

Le tableau 4 regroupe les effets ainsi que les mécanismes impliqués dans différents procédés de conservation des viandes.

Partie 3 : Modes de conservation de la viande bovine

Tableau 4. Effets et mécanismes impliqués dans les différents procédés de conservation des viandes (Frayssé et Darré, 1990)

Mode de conservation	Effets recherchés				Mécanismes impliqués
	Ralentir réactions enzymatiques	Antioxydant	Bactério et fongistatique	Bactéricide Fongicide	
Réfrigération	+	+	+	/	Ralentissement de la vitesse des réactions
Congélation	+	+	+	/	Immobilisation d'eau
Lyophilisation	+	+ /	+	/	Déshydratation par sublimation
Irradiation	+ -	-	/	+	Stérilisation par rayons ionisants
Séchage	+	+ /	+	/	Déshydratation par évaporation
Appertisation	+	/	/	+	Stérilisation par chauffage
Fumage	+	+	+	+	Baisse de l'activité de l'eau (phénols)
Salaison	+	+ -	+	/ +	Baisse de l'activité de l'eau (saumure)

+ : effet positif ; - : effet négatif ; / : sans effet

Liste des références bibliographiques

A

- ANSES, (2001).** Apports nutritionnels conseillés pour la population française. 3ème édition. Tec & Doc Lavoisier. AFSSA Editions, Paris, France, 605 p. *In* : "Muscle et Viande de Ruminant". Bauchart, D., Picard, B., (2010). 1^{ère} édition. Editions Quae. Versailles. France.
- Astruc, T., Portanguen, S., Oillic, S., Kondjoyan, A., (2010).** Effet des traitements technologiques sur les qualités des viandes. *In* : "Muscle et Viande de Ruminant". Bauchart, D., Picard, B., (2010). 1^{ère} édition. Editions Quae. Versailles. France. 209-212 p.

B

- Bauchart, D., Chantelot, F., Gandemer, G., (2008).** Qualités nutritionnelles de la viande et des abats chez le bovin : données récentes sur les principaux constituants d'intérêt nutritionnel. *Cah. Nutr. Diét.* 43 (HS1), 1S29-1S39.
- Bauchart, D., Gandemer, G., (2010).** Qualité nutritionnelle des viandes et abats de bovin. *In* : "Muscle et Viande de Ruminant". Bauchart, D., Picard, B., (2010). 1^{ère} édition. Editions Quae. Versailles. France. 115-130 p.
- Bauchart, D., Picard, B., (2010).** Muscle et Viande de Ruminant. 1^{ère} édition. Editions Quae, Versailles, France. 292 p.
- Beuchat, L.R., (1983).** Influence of a_w on growth, metabolic activities and survival of yeasts and moulds. *J Food Protect.* 46 : 135.
- Bimbenet, J.J., Loncin, M., (1995).** Bases du génie des procédés alimentaires. Editions Masson. Paris. *In* : "Science des aliments". Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brulé, G., (2006). Science des aliments. Volume 1 : Stabilisation biologique et physico-chimique. 1^{ère} édition. Lavoisier. Paris. France. Tec & Doc. Lavoisier. 383 p.
- Bonnefoy C., Guillet F., Leyral G., Verne-Bourdaïs E., (2002).** Microbiologie et qualité dans les industries agroalimentaires. 1^{ère} édition. Doin. CRDP d'aquitaine. France. 245 p.

C

- Champomier-Vergès, M., Anba, J., Chaillou, S., Zagorec, M., (2010).** Sécurité microbiologique de la viande bovine. *In* : "Muscle et Viande de Ruminant". Bauchart, D., Picard, B., (2010). 1^{ère} édition. Editions Quae. Versailles. France. 221-230 p.
- Chirife, J., Fontan, CF, (1982).** Water activity of fresh food. *J Food Sci.* 47 : 661.
- Craplet, C., (1966).** La viande de bovins. Livre I. Chapitre 11 à 22 : La croissance – Préparation de la viande – Carcasse – Animal de boucherie. 1^{ère} édition. Vigot frères. Paris. France. 486 p.

E

- Ercolini, D., Russo, F., Torrieri E., Masi, P., Vilani, F., (2006).** Changes in the spoilage-related microbiota of beef during refrigerated storage under different packaging conditions. *Appl Environ Microbiol.* 72 (7) : 4663-4671.

F

- FAO, (2017).** Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2017-2026 © OCDE/FAO 2017. 13 p.
- Farr, S.B., Komoga, T., (1991).** Oxydative stress responses in *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium*. *Microbiol Reviews.* 55 (4) : 561-585.
- Felton, J.S. Knize, M.G., Bennett, L.M., Malfatti, M.A., Colvin, M.E., Kulp, K.S., (2004).** Impact of environmental exposures on the mutagenicity/ carcinogenicity of heterocyclic amines. *Toxicology.* 198 : 135-145.
- Fraysse, J.L., Darré, A., (1990).** Produire des viandes. Volume 1 : Sur quelles bases économiques et biologiques ?. 1^{ère} édition. Lavoisier. Paris. France. Tec & Doc. 374 p.

Liste des références bibliographiques

G

Gamage, S.D., Luchansky, J.B., Ingham S.C., (1998). Pulsed-field gel electrophoresis typing of *Hafnia alvei* isolated from chub-packed and retail ground beef. *Lett Appl Microbiol.* **26** (2) : 105-9.

Gaubatz, J.W., (1997). Heart damage associated with cooked meat mutagens. *J. Nutr. Biochem.* **8** :490-496.

Guiraud, J.L., (2012). Microbiologie alimentaire. 3^{ème} édition. Dunod. Paris. France. 651 p.

H

Habeanu, M., Durand, D., Gobert, M., Bauchart, D., (1994). Lipids and fatty acid composition of Longissimus thoracis and Semitendinosus muscles in finishing Normand cows (fat breed) given unsaturated lipid supplements. *In* : Proceedings of the 54th International Congress of Meat Science and Technology (ICOMIST). Le Cape, Afrique du Sud. 2B5.

Hochstein, L.I., (1976). Extreme environments mechanisms of microbial adaptation. *Academic press.* Inc.

J

Janda, J.M., Abbott S.L., (2006). The genus *Hafnia* : from soup to nuts. *Clin Microbiol rev.* **19** (1) : 49-57.

Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brulé, G., (2006). Science des aliments. Volume 1 : Stabilisation biologique et physico-chimique. 1^{ère} édition. Lavoisier. Paris. France. Tec & Doc. Lavoisier. 383 p.

L

Labadie, J., (1999). Consequences of packaging on bacterial growth. *Meat Science.* **52**(3): 299-305.

Leisner, J.L., Lauren, B.G., Presvost, H., Drider, D., Dalgaard, P., (2007). *Carnobacterium* : positive and negative effects in the environments and foods. *FEMS Microbiol. Rev.* **31** : 592-613.

M

Mescle, J.F., (2002). Additifs conservateurs (antibactériens, antifongiques). *In* : "Multon J.L.". Additifs et auxiliaires de fabrication dans les industries agroalimentaires. Tec & Doc. Lavoisier. Paris. France. 191-205. de *In* : "Science des aliments". Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brulé, G., (2006). Science des aliments. Volume 1 : Stabilisation biologique et physico-chimique. 1^{ère} édition. Lavoisier. Paris. France. Tec & Doc. Lavoisier. 383 p.

Micol, D., Jurie, C., Hocquette J.F., (2010). Viande bovine en France. Quels types de production pour quels produits ? *In* : "Muscle et Viande de Ruminant". Bauchart, D., Picard, B., (2010). 1^{ère} édition. Editions Quae. Versailles. France. 163-171 p.

N

Ngapo, T.M., Babare, I.H., Reynolds, J., Mawson, R.F., (1999). Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of porks. *Meat Science.* **53** : 159-168.

Nissen, H., Alvseike O., Bredholt, S., Holck, A., Nesbakken, T., (2000). Comparison between the growth of *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in ground beef packed by three commercially used packaging techniques. *Int. J. Food Microbiol.* **59** (3) : 211-220.

Nychas, G.J.E., Skandamis, P.N., Tassou, C.C., Koutsoumanis, K.P., (2008). Meat spoilage during distribution. *Meat Science.* **78** (1-2) : 77-89.

Liste des références bibliographiques

O

OMS, (2015). Cancérogénicité de la consommation de viande rouge et de viande transformée. Octobre 2015. Lien consulté le 09-02-2020. <https://www.who.int/features/qa/cancer-red-meat/fr/>

R

Rémond, D., Peyron, M.A., Savary-Auzeloux, I., (2010). Viande et nutrition protéique. *In* : "Muscle et Viande de Ruminant". Bauchart, D., Picard, B., (2010). 1^{ère} édition. Editions Quae. Versailles. France. 131-142 p.

Roux, J.L., (1994). Conserver les aliments : comparaison des méthodes et des technologies. 1^{ère} édition. Lavoisier. Paris. France. Tec & Doc. 705 p.

S

Skog, K.I., Johansson M.A.E., Jagerstad, M.I., (1998). Carcinogenic heterocyclic amines in model systems and cooked foods : a review on formation, occurrence and intake. *Food Chem Toxicol.* 36 : 879-896.

Strong, D.H., Foster, E.M., Duncan, C.L., (1970). Influence of a_w on the growth of *Clostridium perfringens*. *Appl Microbiol.* 19 : 980.

T

Touraille, C., (1994). Incidence des caractéristiques musculaires sur les qualités organoleptiques des viandes. *Rencontres Recherches Ruminants*, 1 : 169-176.

Tsigarida, E., Skandamis, P., Nychas, G.J., (2000). Behaviour of *Listeria monocytogenes* and autochthonous flora on meat stored under aerobic, vacuum and modified atmosphere packaging conditions with or without the presence of oregano essential oil at 5°C. *J. Appl. Microbiol.* **89** (6) : 901-909.

V

Vihavainen, E.J., Björkroth, K.J., (2009). Diversity of *Leuconostoc gasicomitatum* associated with meat spoilage. *Int. J. Food Microbiol.* **56** (2-3) : 219-225.