



Le monoxyde de carbone (CO) pour le conditionnement des viandes ? Partie 1.

Utilisation du monoxyde de carbone (CO) pour le conditionnement des viandes rouges au 21^{ème} siècle. Partie I : état des connaissances

Mots-clés : viandes rouges, conditionnement, monoxyde de carbone, interdiction, réévaluation.

Auteurs : Azem Belasli[‡], Lidia Aït Ouahioune, et Djamel Djenane^{*‡}

Laboratoire de Qualité et Sécurité des Aliments. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud MAMMERI, B.P. 17, 15000, Tizi-Ouzou. Algérie.

*E-mail de l'auteur correspondant : djenane6@yahoo.es

‡Contribution équivalente des deux auteurs à ce travail

Cette synthèse est en partie une traduction de la revue publiée dans Foods 2018, 7, 12 ; doi : 10.3390/foods7020012 sur l'état des lieux des avancées récentes réalisées dans le domaine de conditionnement des viandes rouges.

Résumé :

Au cours des dernières décennies, le conditionnement des viandes rouges sous Atmosphères Modifiées (AM) a fait l'objet de plusieurs recherches qui ont abouti à des résultats probants et prometteurs. Le conditionnement sous AM signifie la modification de la composition gazeuse en contact avec l'aliment, en remplaçant l'air soit par un seul gaz, soit par un mélange de gaz (naturellement présents dans l'atmosphère : N₂, O₂, CO₂, Argon). Toutefois, l'usage des gaz non conventionnels tel que le monoxyde de carbone (CO) a soulevé beaucoup de débats en termes de santé publique.

Cette revue a pour objectif de recueillir les avancées récentes réalisées dans le domaine de l'emploi du CO dans le conditionnement des viandes rouges avec des réflexions sur les perspectives d'application.

Abstract: Carbon monoxide (CO) for packaging of red meats?

Over the past few decades, modified atmosphere packaging (MAP) of red meats has been a promising area of research. MAP means modifying the gas composition in contact with the food either by replacing the air with a single gas or a mixture of gases (naturally present in the atmosphere: N₂, O₂, CO₂, Argon). However, the use of carbon monoxide (CO) for meat packaging is not allowed in most countries due to the potential toxic effect and potential fraud of product freshness, while its use is controversial in some countries.

The purpose of this review is to collect the most recent research results on the use of CO in modified atmosphere packaging (MAP) of muscle foods. The advantages of CO and its industrial limits are presented and discussed.

INTRODUCTION

En réponse aux exigences exprimées par les consommateurs envers la qualité des viandes rouges en termes de sécurité sanitaire, de commodité et de la durée de vie allongée, l'industrie de l'emballage et de conditionnement a rapidement évolué.

Pendant, la conservation au froid, la viande fraîche peut subir des modifications physiques, chimiques ou microbiologiques ; notamment dues à la présence d'oxygène (O₂) qui participe aux réactions suivantes :

- 1.- oxydation et photo-oxydation ;
- 2.- croissance de micro-organismes aérobies d'altération.

Toutes ces réactions entraînent des changements indésirables concernant la couleur, l'odeur, la texture et la saveur de la viande conservée (Djenane *et al.*, 2006).

Dans les Linéaires de Vente au Détail (LVD), la couleur de la viande fraîche constitue le principal critère de choix pour le consommateur. Pour ce dernier, la couleur rouge vif à l'étalage est l'indicateur par excellence de la fraîcheur et de la salubrité de la viande. L'altération de la couleur constitue souvent la cause principale du rejet du produit par ce dernier. Pour remédier à ce problème, l'industrie de viande s'est considérablement investie dans le développement de conditionnement innovant. Traditionnellement, dans les systèmes Unités de Vente au Consommateur (UVC), la couleur vif d'une viande rouge lorsqu'elle est emballée sous film perméable à l'O₂ ne pourrait être préservée que pour quelques jours (< 3 jours) à une température de réfrigération positive (Djenane *et al.*, 2001).

Durant ces dernières années et dans plusieurs pays, le recours au conditionnement sous Atmosphères Modifiées (AM) s'est largement répandu. Les principaux gaz conventionnels employés pour le conditionnement de la viande fraîche sous AM sont : le dioxyde de carbone (CO₂), l'azote (N₂) et l'O₂. Selon Mancini et Hunt (2005), le rejet par les consommateurs des viandes altérées de couleur, peut être à l'origine des pertes considérables estimées à plusieurs millions de dollars (\$)/an. Sous atmosphère ambiante ou atmosphère suroxygénée (AM-surO₂), la couleur rouge de la viande est due à l'oxygénation du pigment myoglobine (Mb) en oxymyoglobine (O₂Mb). Cette oxygénation est réversible en fonction de la pression partielle d'O₂ (ppO₂) qui s'exerce en surface du produit (Figure 1). Cependant, le conditionnement sous une AM-surO₂ peut accélérer l'oxydation des lipides et des protéines, et avoir ainsi des effets indésirables sur la flaveur (saveur + arôme) (Jayasingh *et al.*, 2002), la tendreté et la jutosité de la viande (Lindahl *et al.*, 2010). L'autre inconvénient des viandes conditionnées sous AM-surO₂, se manifeste lors de la cuisson, en favorisant le Brunissement précoce ou Préaturé (BP) de la viande avant que la température n'atteigne le seuil légal pour les microorganismes (Hague *et al.*, 1994 ; Killinger *et al.*, 2000 ; Lyon *et al.*, 2000), ce qui augmenterait le risque de ne

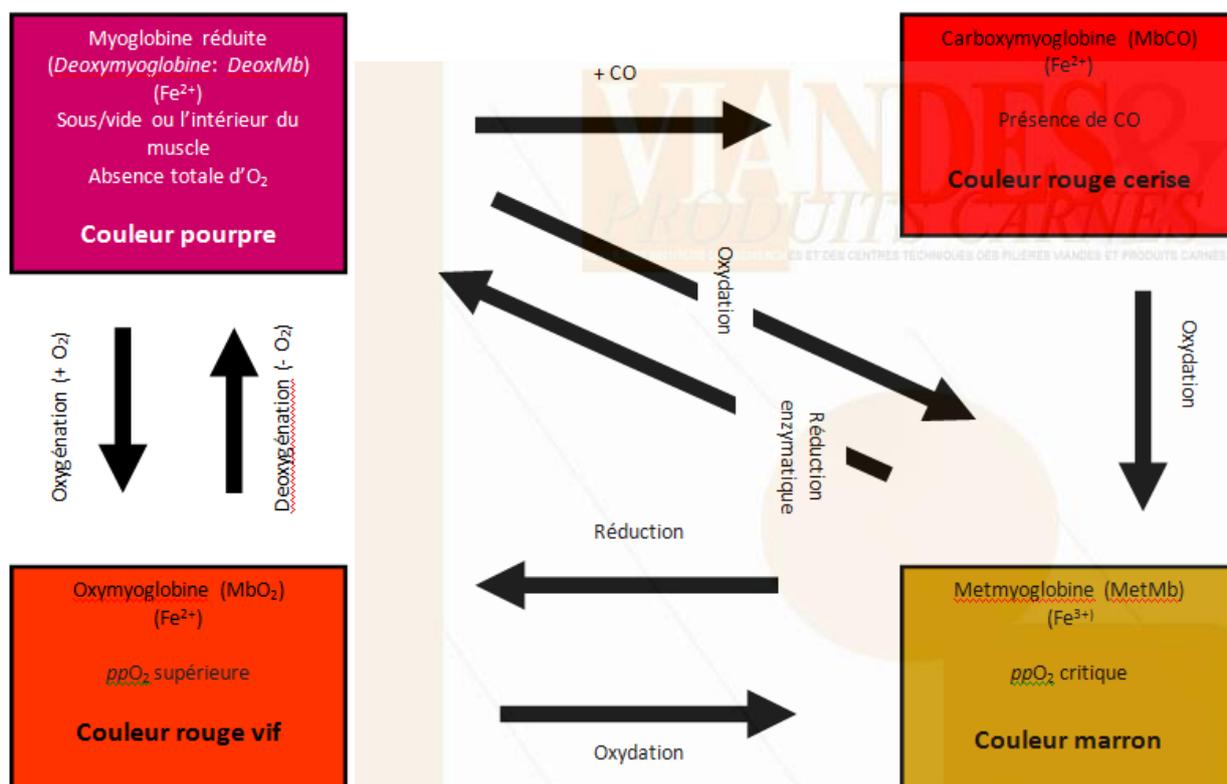
pas inactiver des bactéries pathogènes qui peuvent potentiellement contaminer les viandes. Parallèlement, pour éviter ces inconvénients liés aux AM-surO₂, le conditionnement anoxique en présence de CO a été envisagé (Sørheim *et al.*, 1999 ; Luño *et al.*, 2000 ; Cornforth et Hunt, 2008). Mancini et Hunt (2005) ont indiqué que le CO peut améliorer davantage la stabilité de la couleur rouge du produit grâce à la plus grande stabilité du pigment formé : la carboxymyoglobine (COMb) de couleur rouge cerise. Cette forte stabilité est due à l'affinité et la forte liaison du CO sur le noyau porphyrinique de fer (Fe) de la molécule de la Mb (Lanier *et al.*, 1978). Néanmoins, cette couleur rouge cerise stable peut donner un aspect artificiel à présenter.

Abréviations

AM	Atmosphère Modifiée
AM-surO ₂	Atmosphère Modifiée surOxygénée
AM-CO	Atmosphère Modifiée contenant du Monoxyde de Carbone
BP	Brunissement Préaturé
CIE a*	Indice Rouge
CO	Monoxyde de Carbone
CO ₂	Dioxyde de Carbone
COHb	Carboxyhémoglobine
COMb	Carboxymyoglobine
DeoxMb	Déoxymyoglobine
DLUO	Date Limite d'Utilisation Optimale
Fe	Atome de Fer
Hb	Hémoglobine
LVD	Linéaires de Vente au Détail
Mb	Myoglobine
MetMb	Metmyoglobine
N ₂	Azote
Ngb	Neuroglobine
O ₂	Oxygène
O ₂ Hb	Oxyhémoglobine
O ₂ Mb	Oxymyoglobine
ppO ₂	Pression Partielle d'Oxygène
S/V	Sous Vide
USDA	United States Department of Agriculture (Département Américain de l'Agriculture)
USFDA	US Food and Drug Administration (Administration Américaine Fédérale des Produits Alimentaires et Pharmaceutiques)
UVC	Unité de Vente au Consommateur

Ce premier article décrit les principes du conditionnement des viandes rouges sous Atmosphères Modifiées (AM) avec du monoxyde de carbone (CO) et donne une réflexion sur les perspectives de son application.

Figure 1 : Cycle de la couleur chez la viande rouge



I. QU'EST-CE QUE LE CO ?

Le CO est produit par la combustion incomplète des matières à base de carbone (Sørheim *et al.*, 1997 ; Robert, 2006). Il est inodore, incolore, insipide, non irritant et non suffocant. Sa densité est très proche de celle de l'air (0,967). Il se diffuse très rapidement dans l'environnement ambiant en occupant tout l'espace disponible, ce qui est potentiellement dangereux dans un environnement clos. Dans le milieu biologique, il est facilement lié au fer

bivalent (Fe²⁺) ou au cuivre (Cu²⁺) des hémoprotéines. Une petite quantité de CO est naturellement produite dans l'organisme humain (Ishiwata *et al.*, 1996), et rentre dans la régulation de la fluidité et du flux sanguins (Durante et Schafer, 1998). Le CO peut être aussi généré pendant certains traitements technologiques de la viande comme l'irradiation (Nam et Ahn, 2002).

II. LES EFFETS DU CO SUR LA SANTE HUMAINE

Le CO est qualifié de « tueur silencieux ». Les premières descriptions du CO, et de sa toxicité sont apparues dans la littérature, il y a plus de 100 ans ; identifiées depuis 1895 par Haldane (1895). Les anciens Grecs et Romains utilisaient le CO pour exécuter les prisonniers.

L'action toxique du CO est due au blocage du site de transport de l'O₂ de l'hémoglobine (Hb) à cause de la formation de carboxyhémoglobine (COHb) au lieu de l'oxyhémoglobine (O₂Hb), ce qui prive l'organisme humain d'O₂. Les symptômes d'intoxication apparaissent lorsque la COHb est > 10% (Kao et Nañagas, 2005).

Le fœtus et le nourrisson sont les plus prédisposés aux effets nocifs du CO par rapport aux adultes (Kao et Nañagas, 2004). D'autre part, le risque de développer l'autisme chez les enfants est aussi relié à l'exposition au CO (Jung *et al.*, 2013). L'affinité de l'Hb du sang humain envers le CO est 240 fois > à celle de l'O₂. Une faible quantité de CO (= 0,5%) se forme naturellement dans notre organisme à partir de la dégradation des hémoprotéines (Durante et

Schafer, 1998). Le pourcentage moyen de COHb chez les non-fumeurs est de 1,2 à 1,5% (tant pour le CO endogène que pour le CO environnemental) et de 3 à 4% chez les fumeurs (Sørheim *et al.*, 1997). Des résultats cliniques ont montré que les enfants nés de mères fumeuses présentaient de faibles développements intellectuel et cognitif (Frydman, 1996). L'accroissement de la durée demi-vie de COHb chez le fœtus (= 18-24 h) par rapport à celle de la mère (= 4-6 h) accentue les effets de l'hypoxie sur son fonctionnement cérébral. D'autres connaissances sur les processus physiologiques impliquant le CO sont disponibles, surtout après la découverte de la neuroglobine (Ngb) de la protéine de l'hème dans le cerveau des vertébrés (Brunori et Vallone, 2006). La Ngb agit comme un réservoir d'O₂ en prolongeant l'activité du système nerveux. Elle pourrait aussi participer dans les phénomènes de signalisation biologique (Roderique *et al.*, 2015). Le CO peut avoir une action physiologique sur le fonctionnement du cerveau, il agit comme un signal biologique et, probablement, comme un neurotransmetteur

(Barinaga, 1993 ; Verma *et al.*, 1993). Le CO pourrait se produire de façon endogène en tant que protecteur cellulaire par presque toutes les cellules de notre organisme lorsqu'elles sont soumises au stress oxydant ou à des infections (Foresti *et al.*, 2008 ; Otterbein *et al.*, 2003 ; Cheng *et al.*, 2015). Récemment, le CO s'est révélé être un

agent thérapeutique potentiel pour le traitement de troubles cardiovasculaires (Li *et al.*, 2009 ; Soni *et al.*, 2011). Certains auteurs ont établi que le CO pourrait être utilisé comme un agent pharmacologique cytoprotecteur (protection anti-inflammatoire) contre plusieurs maladies (Onyiah *et al.*, 2013).

III. EMPLOI DU CO POUR LE CONDITIONNEMENT DE LA VIANDE

L'emploi du CO pour le conditionnement de la viande n'est pas autorisé dans la plupart des pays à cause de ses effets potentiellement toxiques, et son utilisation est controversée, même dans certains pays où il est autorisé. En Norvège, le procédé à faible teneur en CO a conquis 60% du marché de la viande rouge vendue au détail (Sørheim *et al.*, 2001). Le succès commercial et l'innocuité dudit procédé dans ce pays nordique ont contribué à son regain dans d'autres pays comme les États-Unis. La plupart des AM contenant du CO sont privées d'O₂, ce qui limite l'oxydation et la croissance des microorganismes aérobies. Le CO peut se lier à la 6^{ème} liaison de coordination de l'hème située au centre de la Mb, donnant naissance à une couleur rouge

cerise vive : carboxymyoglobine (COMb). L'affinité de la déoxymyoglobine (DeoxMb) pour le CO est de 28-51 fois plus grande que celle envers l'O₂ (De Santos *et al.*, 2007).

El-Badawi *et al.* (1964) étaient les premiers à publier un article sur l'utilisation du CO (air + 2% CO) pour le conditionnement de la viande. Ce type de conditionnement est recommandé pour le stockage prolongé de la viande fraîche de sorte que la distribution vers des marchés éloignés puisse être assurée. Le Tableau 1 résume les principales études effectuées, depuis 2010, sur l'utilisation du CO dans le conditionnement des viandes. Les avantages de l'utilisation du CO sont détaillés ci-dessous.

Tableau 1. Résumés des travaux de recherche pendant la dernière décennie sur l'usage de CO dans le conditionnement des viandes rouges

Publications	Résultats/conclusions
Bórnez <i>et al.</i> (2010)	Une atmosphère de 30% CO ₂ et 0,7% de CO favorise une meilleure couleur et permet une meilleure tendreté de la viande d'agneau.
Venturini <i>et al.</i> (2010)	Des biftecks ont été conditionnés sous CO (0,2 et 0,4%) en combinaison avec 21% O ₂ ou sans O ₂ , le reste de l'atmosphère est composé par CO ₂ (30%) et N ₂ (balance). Le meilleur résultat en termes de stabilité de la couleur et d'odeur (vie utile = 21 jours à 2 °C) des steaks est obtenu avec 0,2% de CO et 30% de CO ₂ sans qu'il ait un risque microbiologique du produit. L'augmentation de CO à 0,4% engendre l'effet d'une "couleur artificielle" selon certains membres du panel.
Fontes <i>et al.</i> (2010)	Une saturation du sang frais avec de CO permet d'avoir un produit séché d'une couleur rouge rosâtre attrayante voire même après 12 semaines d'entreposage dans des sacs à faible perméabilité à l'O ₂ . Ce produit peut être utilisé comme un additif dans l'industrie de charcuterie.
Raines et Hunt (2010)	Un niveau élevé en CO dans un petit volume gazeux peut avoir une grande influence sur le développement de COMb. Un volume gazeux réduit + une double concentration de CO (0,8%) peut donner une meilleure taille des barquettes tout en maintenant une bonne apparence du produit. Cela permet d'accroître l'efficacité dans la distribution des viandes prêtes à l'emploi et rend ce système de conditionnement plus rentable.
Jeong et Claus (2011)	La couleur de la viande de bœuf hachée conditionnée sous CO s'est détériorée graduellement après l'ouverture de la barquette en comparaison avec celle conditionnée S/V.
Ramamoorthi <i>et al.</i> (2011)	L'irradiation (= 2 kGy) de la viande rouge combinée au conditionnement sous CO peut engendrer une stabilité de la couleur du produit pendant 28 jours. L'effet négatif de l'irradiation sur la qualité de la viande peut être contourné par la présence de CO.
Bjørlykke <i>et al.</i> (2011)	Le CO peut améliorer le bien-être du saumon ou d'autres poissons lors de l'abattage. L'exposition au CO peut également améliorer la qualité des produits obtenus.
Suman <i>et al.</i> (2011)	L'incorporation de chitosan permet une amélioration de la couleur rouge de la viande de bœuf hachée conditionnée sous atmosphère : 0,4% CO + 19,6% CO ₂ + 80% N ₂ . Cette incorporation limite également le BP lors de la cuisson par rapport aux viandes issues d'un conditionnement sous AM-surO ₂ .
Pivarnik <i>et al.</i> (2011)	La fumée filtrée contenant vraisemblablement un pourcentage élevé de CO est utilisée pour améliorer le goût, la texture et/ou la couleur du thon (<i>Thunnus albacares</i>). Elle peut aussi prolonger la durée de conservation du produit.
Linares <i>et al.</i> (2012)	Les techniques d'étourdissement (électrique ou au gaz) et de conditionnement et de leurs interactions sur la qualité de la viande de l'agneau de la race espagnole "Manchego" ont été évaluées pendant les durées d'entreposage du produit différentes (7, 14 et 21 jours). L'étourdissement au gaz CO permet d'éviter les éventuels effets négatifs d'un étourdissement électrique sur la qualité de la viande. En outre, une atmosphère composée de 30% CO ₂ /69,3% N ₂ /0,7% CO peut conférer à la viande de meilleures qualités en termes de couleur et de tendreté.
Concollato <i>et al.</i> (2014)	Le saumon Atlantique traité au CO (injection dans l'eau d'élevage) a subi une rigidité cadavérique précoce, un pH final musculaire <i>post-mortem</i> plus bas et un bon ressuage après la découpe. L'absorption du CO par le muscle du poisson traité, a légèrement augmenté les indices de couleur (CIE L*) et (CIE b*). Cependant, aucune différence significative n'est constatée concernant l'indice rouge (CIE a*) entre les échantillons traités et le témoin, probablement en raison de la teneur en astaxanthine qui peut minimiser les différences de couleur entre les différents groupes.

Rogers <i>et al.</i> (2014)	Une atmosphère composée de 0,4% CO, 30% CO ₂ , 69,6% N ₂ engendre une meilleure stabilité de couleur la viande hachée bovine exposée pendant 20 jours dans les rayons de vente au détail.
Pereira <i>et al.</i> (2014)	L'ajout de sang traité par le CO peut être utilisé en remplacement aux nitrites pour production de mortadelle de meilleure couleur.
Venturini <i>et al.</i> (2014)	Un conditionnement < 0,2% CO permet la stabilité de la couleur des biftecks et de la viande hachée pendant 28 jours à 1 °C, voir même en présence d'une quantité résiduelle d'O ₂ (proche de 0,1%). Après 28 jours d'entreposage sous CO suivi d'une exposition à l'air/24 h, les biftecks et la viande hachée ont conservé leur apparence acceptable et une couleur visuelle semblable ou plus prononcée que celle de la viande fraîche. Cependant, au-delà de 24 h d'exposition à l'air, l'apparence et l'odeur des deux produits sont considérées "légèrement désagréable" par le panel.
Lavieri <i>et Williams</i> (2014)	Ces auteurs ont étudié les effets de plusieurs systèmes de conditionnement de la viande hachée bovine entreposée à 4 ± 1 °C/25 jours. Dans cette étude, aucun risque potentiel pour la santé et aucune déception de la part des consommateurs n'ont été observés alors que la couleur stable « rouge cerise » est restée persistante.
Liu <i>et al.</i> (2014)	Une atmosphère composée de 0,4% CO/30% CO ₂ /69,6% N ₂ provoque une meilleure stabilité de la couleur chez certains muscles bovins et en particulier le <i>Psoas majeur</i> (PM). Le PM et le <i>Longissimus thoracis</i> (LT) ont présenté une couleur plus attrayante que le <i>Longissimus lumborum</i> (LL). Cependant, une atmosphère suroxygénée (80% O ₂) engendre une couleur moins accentuée de ces muscles. Durant toute la période d'entreposage, les biftecks emballés sous CO ont maintenu une capacité de rétention d'eau plus élevée que ceux emballés sous O ₂ et, après l'ouverture des barquettes, la couleur rouge des steaks emballés sous CO s'est détériorée plus lentement que celle des steaks emballés sous haute concentration en O ₂ .
Fontes <i>et al.</i> (2015)	Le sang de porc saturé en CO (99%) peut substituer la viande jusqu'à 20% dans la préparation de la mortadelle. Par conséquent, d'un point de vue nutritionnel, cette substitution peut être nutritionnellement adéquate pour être utilisée en charcuterie.
Yang <i>et al.</i> (2016)	Les biftecks conditionnés en aérobie gardent leur couleur rouge vif au cours des 4 premiers jours d'entreposage. Cependant, la décoloration et l'oxydation sont les facteurs majeurs qui ont limité leur stabilité (8 jours approximatifs). Le conditionnement S/V prolonge la durée de conservation du produit en optimisant la stabilité de la couleur et en réduisant l'oxydation et la prolifération des bactéries d'altération. Le conditionnement sous une atmosphère 0,4% CO + 30% CO ₂ + 69,6% N ₂ constitue le meilleur moyen de conserver la couleur "rouge cerise" du produit pendant une longue durée.
Sakowska <i>et al.</i> (2016)	La profondeur de pénétration du CO dans les biftecks crus est proportionnelle à la période d'exposition et à la concentration de ce gaz dans l'espace de tête de la barquette contenant la viande. La viande cuite provenant d'un conditionnée sous CO (0,3% et 0,5%) présente une bordure rosée correspondante à la COMb. Les auteurs ont recommandé d'utiliser un prétraitement avec 0,5% CO avant S/V pour une meilleure appréciation du produit.
Lyu <i>et al.</i> (2016)	Le prétraitement par le CO combiné à l'O ₃ peut être une technique prometteuse pour maintenir la qualité de la viande bovine conditionnée sous vide (S/V) pendant l'entreposage.
Sakowska <i>et al.</i> (2017)	Le prétraitement des biftecks avec de CO suivi d'un S/V pendant 21 jours à 2 °C a engendré une meilleure préférence par le panel de dégustation.
Van Rooyen <i>et al.</i> (2017ab)	Un prétraitement de la viande au CO avant le conditionnement S/V peut induire une meilleure couleur tout en permettant une maturation optimale du produit à l'intérieur de l'emballage et par conséquent une meilleure tendreté. Un prétraitement de 5 heures a permis d'obtenir une couleur stable mais qui s'est dégradée coïncidant avec la DLUO.
Van Rooyen <i>et al.</i> (2018a)	Les biftecks exposés à 5% CO, 60% CO ₂ et 35% N ₂ pendant 3, 5 ou 7 h, suivi d'un entreposage de 28 jours à 2 °C (bonnes pratiques) ou 6 °C (abus léger). Cinq (5) h d'exposition est la période optimale car elle induit une couleur désirée quelle que soit la température d'entreposage voire même l'altération du produit n'est pas masquée.
Van Rooyen <i>et al.</i> (2018b)	Les effets des prétraitements au CO sur trois muscles bovins ont été examinés. Les viandes ont été exposées à l'un des quatre prétraitements : 1% CO/5 h, 5% CO/5 h, 1% CO/24 h, puis conditionnées S/V pendant 28 jours à 2 °C. Ce prétraitement améliore la couleur rouge des muscles labiles. Le prétraitement optimal au CO est celui avec 1% de CO pendant 5 h car il induit une couleur rouge de surface dont la décoloration s'est produite à la date limite de consommation (28 jours). Ce prétraitement diminue aussi l'oxydation des protéines. L'application d'un prétraitement de 1% CO/5 h améliore donc efficacement la couleur de divers muscles sans masquer l'altération.
Zhang <i>et al.</i> (2018)	L'usage de CO peut être efficace pour conserver la couleur rouge cerise de la viande de bœuf à coupe sombre.
Yang <i>et al.</i> (2018a)	Un conditionnement de la viande sous 0,4% CO/30% CO ₂ /69,6% N ₂ provoque une meilleure inhibition microbienne par rapport à une atmosphère composée de 80% O ₂ /20% CO ₂ . Les propriétés physicochimiques du produit emballé tout au long de la période d'entreposage (20 jours) sont aussi maintenues.
Yang <i>et al.</i> (2018b)	Les auteurs ont examiné le protéome pour expliquer les variations de stabilité de la couleur de la viande de bœuf conditionnée selon deux méthodes : 80% O ₂ /20% CO ₂ et 0,4% CO/30% CO ₂ /69,6% N ₂ pendant 15 jours. Les résultats ont révélé que l'expression différentielle de protéome sarcoplasmique pendant l'entreposage a contribué aux variations de stabilité de la couleur de la viande entre les deux méthodes de conditionnement. Comparativement aux viandes conditionnées sous AM-surO ₂ , certaines enzymes glycolytiques et métaboliques énergétiques ont joué un rôle important dans les processus antioxydants. La réductase, la peroxiredoxine-2, la peroxiredoxine-6 et la protéine DJ-1 sont plus abondantes dans les viandes conditionnées sous AM-CO. La surexpression de ces protéines peut amener ces viandes à maintenir des niveaux élevés d'activité réductrice de MetMb, produisant ainsi des viandes de meilleure couleur pendant l'entreposage.

1.1. Stabilisation de la couleur

La myoglobine, couramment symbolisée par Mb, est une métalloprotéine contenant du fer à l'état ferreux (Fe^{2+}), présente particulièrement dans les muscles des mammifères. Elle est apparentée structurellement à l'Hb, mais a pour fonction de stocker l' O_2 plutôt que de le transporter. La Mb est le principal pigment qui colore la viande puisque l'Hb du sang résiduel ne représente qu'environ 5 à 10% des pigments totaux dans des conditions correctes de saignée de l'animal. Vue sa composition biologique, la viande fraîche est considérée une denrée très périssable. La couleur de la viande est souvent utilisée comme indicateur de fraîcheur et de salubrité. C'est la première caractéristique influençant la décision d'achat dans les rayons de vente au détail et conduit beaucoup de consommateurs mal informés à utiliser la décoloration comme un indicateur de dégradation du produit.

Sous atmosphère ambiante ou suroxygénée, la couleur rouge de la viande est due à l'oxygénation du pigment Mb en O_2Mb . Cette oxygénation est réversible en fonction de la pression partielle d' O_2 (ppO_2) qui s'exerce en surface du produit. La décoloration voire le brunissement de la surface de la viande résulte de l'oxydation de ce pigment en metmyoglobine (MetMb) de couleur brune. L'oxydation du pigment est difficilement réversible et ne peut se faire qu'aux premiers stades de l'oxydation par le phénomène de réduction enzymatique de la MetMb. Lorsque l' O_2 est présent à environ 4-6 mmHg à 0 °C (équivalent à 0,0053 bar ou atmosphère), la forme MetMb prédomine (Ledward, 1970).

L'oxydation du pigment et le brunissement qui en découle sont les principaux facteurs de rejet. La couleur de la viande dépend de la concentration en O_2 qui l'entoure et de l'état d'oxydation de l'atome de fer (Fe). La cinétique d'oxydation de la DeoxMb et de l' O_2Mb en metmyoglobine (MetMb) pour laquelle le Fe^{2+} passe à l'état ferrique (Fe^{3+}) est influencée par plusieurs facteurs tels que le type du muscle, la vitesse de chute du pH post-mortem, le matériau de conditionnement, la concentration en O_2 , la lumière et la température dans les étalages, l'activité réductrice enzymatique intrinsèque de MetMb du muscle. Généralement, quand le pigment en surface de la viande contient environ 20% de MetMb, un consommateur sur deux (1/2) la rejette.

Jayasingh *et al.* (2001) ont étudié la capacité de pénétration du CO en profondeur de la viande (morceau entier et viande hachée) en fonction de la durée d'exposition. Ces auteurs ont mesuré la couche de COMb formée lors de ce traitement. En présence de 0,5% CO/10 h d'exposition, des couches de COMb de 2 à 9 mm sont respectivement formées. Pour un traitement avec 10% CO, Woodruff et Silliker (1985) ont rapporté des couches de 0,63 à 0,94 cm, formant ainsi un aspect rouge brillant pendant une longue période. Raines et Hunt (2010) ont étudié l'effet combiné d'une variation de volume gazeux dans l'espace de tête de la barquette et la concentration en CO sur le développement de la couche COMb des biftecks conditionnés. Ils ont constaté que la concentration du CO dans un espace de tête réduit engendre une couche de COMb plus épaisse par rapport à la présence d'une faible concentration en CO dans un volume d'espace de tête supérieur.

De nombreuses études ont rapporté les effets avantageux du CO dans le conditionnement des viandes. El-Badawi *et al.* (1964) ont mené l'un des premiers travaux utilisant le CO comme gaz de conditionnement de la viande du bœuf fraîche (2% CO + 98% air) et, ont constaté que la couleur rouge de

la viande peut être stabilisée pendant 15 jours à une température comprise entre 2 et 3 °C. Sept ans plus tard, les mêmes résultats furent confirmés par Clydesdale et Francis (1971). Jayasingh *et al.* (2001) ont mené une étude comparative et, ont rapporté que les biftecks conditionnés en présence de CO ont conservé leur couleur rouge stable pendant deux mois, par rapport à ceux conditionnés sous AM-sur O_2 . Krause *et al.* (2003) ont constaté que l'indice rouge (CIE a^*) de la viande du porc est plus élevé en présence de 0,4% CO ; la couleur rouge attractive s'est maintenue pendant 36 jours. Luño *et al.* (2000) ont rapporté que les viandes hachées et les biftecks conditionnés sous AM contenant < 1% CO ont conservé une couleur rouge stable pendant 29 jours. De même, Sakowska *et al.* (2017) ont observé une meilleure stabilité de la couleur des biftecks emballés sous CO pendant 21 jours.

La viande porcine emballée en présence de CO préserve une meilleure stabilité de la couleur rouge que celle conditionnée sous AM-sur O_2 . Cette viande persiste rose pendant toute la cuisson à 70 °C (température interne). Elle a également connu moins de perte d'eau, ce qui peut contribuer à une meilleure perception de la jutosité par le panel de dégustation (Wicklund *et al.*, 2006). Des biftecks ont été marinés dans une solution de sodium de phosphate et emballés sous 0,4% CO/30% CO_2 /69,6% N_2 , affinés dans l'obscurité pendant 26 jours et après mises en UVC. La présence de CO n'a exercé aucun effet sur la saveur et l'acceptabilité générale de la viande après cuisson et, peu d'effets ont été signalés par le panel concernant les autres critères (couleur, la brillance et la jutosité) (Stetzer *et al.*, 2007). De même, Mancini *et al.* (2009) ont constaté que des biftecks conditionnés sous CO (0,4% CO/30% CO_2 /69,6% N_2) ont présenté un aspect assombrissant dû au lactate. Néanmoins, cette atmosphère a amélioré la stabilité de la couleur du produit par rapport à une AM sur- O_2 (80% O_2 /20% CO_2).

En présence de CO et de l' O_2 ensemble dans la même atmosphère, ce dernier n'interfère pas dans la formation de COMb car l'affinité de la Mb envers le CO est de 30 à 50 fois plus grande que son affinité envers l' O_2 (Grant et Clay, 2002). Liu *et al.* (2014) ont rapporté que le CO peut favoriser une meilleure activité réductrice de MetMb et par conséquent, une forte stabilité de la couleur en UVC. Cependant, la présence de 20-80% O_2 interfère négativement avec cette propriété réductrice dans plusieurs muscles du bœuf (Seyfert *et al.*, 2007).

Pendant l'ouverture des barquettes en présence de la lumière, les saucisses conditionnées sous CO se sont décolorées rapidement contrairement à celles traitées au nitrite. Cependant, ce phénomène de décoloration a été réduit en anaérobie et en absence de la lumière (Sørheim *et al.*, 2006). De même, des biftecks conditionnés dans une atmosphère anoxique contenant 0,4% CO ont préservé leur couleur attractive durant 21 jours comparativement à ceux conditionnés sous une AM-sur O_2 (80% O_2) (John *et al.*, 2005 ; Stetzer *et al.*, 2007). Cependant, certains auteurs ont constaté un point négatif concernant l'usage de cette technique, en effet, des viandes hachées bovines conditionnées initialement sous CO (1%), puis exposées à l'air après ouvertures des barquettes, la couleur rouge vif s'altère en quelques jours (Jeong et Claus, 2010, 2011). Le phénomène de BP se manifeste lors de la cuisson des steaks conditionnés sous AM-sur O_2 (John *et al.*, 2005). Néanmoins, le conditionnement sous AM-CO peut permettre d'éviter ce phénomène. Un traitement avec 100% CO/3h avant la congélation, permet à la viande bovine de conserver

sa couleur rouge vif pendant 3 mois (Lentz, 1979). Généralement, les produits carnés sont préparés avec du nitrite (NO_2^-) ou du nitrate (NO_3^-) dont leur fonction principale est de procurer à ces produits une couleur rose stable. L'inconvénient de ces ingrédients réside dans leur rôle cancérigène chez le consommateur par la formation de nitrosamines (Tricker et Preussmann, 1991). Sørheim *et al.* (2006) ont suggéré que l'utilisation de CO peut être une bonne alternative pour remplacer ces substances toxiques.

La durée de vie de la viande fraîche en conditions d'aérobies est limitée principalement par deux facteurs principaux : l'effet chimique de l' O_2 atmosphérique et la croissance microbienne. La conservation au froid ralentira ces facteurs indésirables, mais ne prolongera pas suffisamment la durée de vie du produit durant toute la chaîne commerciale (distribution et dans les linéaires de vente au détail). Plusieurs études sont menées pour évaluer l'effet d'un conditionnement sous AM- CO_2/CO sur la durée de vie de la viande fraîche et des produits carnés. En effet, Krause *et al.* (2003) ont observé une durée de vie allant jusqu'à 36 jours pour les côtelettes du porc emballées sous une AM- CO_2/CO . Par contre, seulement 28 jours de vie utile sont observés chez les viandes emballées sous AM-sur O_2 , 23 jours dans le cas d'un conditionnement S/V et 7 jours pendant la conservation à l'air libre. Parallèlement, les durées de vie des viandes hachées, biftecks et côtelettes porcines conditionnées sous 0,4% CO , 60% CO_2 et 40% N_2 , qui ont été exposées dans une vitrine frigorifique à 4 °C étaient respectivement de 11, 14 et 21 jours (Sørheim *et al.*, 1999). Une concentration supérieure en CO_2 (> 60%) pour le conditionnement des saucisses fraîches de porc provoque l'oxydation de la Mb et des lipides, probablement en raison d'abaissement du pH. Cependant, ces deux attributs sont mieux préservés en présence de faibles concentrations en CO_2 (20%). Le conditionnement de cette saucisse sous une atmosphère de 0,3% CO + 30% CO_2 permet une préservation de la couleur rouge pendant 20 jours (Martínez *et al.*, 2005). L'utilisation de ce mélange gazeux dans le conditionnement de la viande fraîche pourrait être prometteuse en raison de ses effets positifs sur la couleur et sur l'inhibition de la croissance des micro-organismes d'altération, ceci permettra d'augmenter la durée de conservation lors de la distribution des produits frais à des longues distances et encore dans les linéaires de vente au détail.

1.2. Effets antimicrobiens

De grandes controverses sont signalées concernant le pouvoir antimicrobien du CO. Gee et Brown (1981) ont constaté l'effet bactériostatique exercé par le CO (25-30%) sur certaines bactéries. En effet, le CO prolonge la phase de latence et ralentit le taux de croissance d'*Escherichia coli*, d'*Achromobacter* et de *Pseudomonas fluorescens*. Contrairement au *Pseudomonas aeruginosa* qui a montré une certaine résistance. Gee et Brown (1978) ont testé le complexe gazeux CO/CO_2 et, après six jours d'entreposage, les viandes hachées du bœuf qui sont conditionnées dans une atmosphère contenant 1% CO , 50% CO_2 et 49% d'air ont présenté une charge microbienne < 2 \log_{10} cfu/ g. Clark *et al.* (1976) ont montré que le taux d'inhibition des bactéries psychrotrophes sur des biftecks est proportionnel à la concentration de CO. Ces auteurs ont conclu que le CO peut avoir la capacité d'augmenter la phase de latence et de réduire la phase logarithmique de la flore d'altération psychrotrophe. Luño *et al.* (2000) ont indiqué que le CO peut exercer une activité antibactérienne vis-à-vis de la flore

d'altération psychrotrophe de la viande (*Brochotrix thermosphacta*) ; cependant, les bactéries lactiques ne semblent pas être affectées par ce gaz. Viana *et al.* (2005) ont rapporté que la croissance de *Pseudomonas* sp. dans la viande du porc conditionnée sous 99% $\text{CO}_2/1\%$ CO et trop limitée, et le seuil d'altération microbienne (= 7 \log_{10} ufc/ g) n'est enregistré qu'après 20 jours de stockage. Jayasing *et al.* (2001) et Hunt *et al.* (2004) ont réalisé le même travail et ont indiqué que la charge microbienne s'est maintenue < au seuil d'altération pendant 1 mois de stockage dans la viande du bœuf conditionnée sous MA-CO, alors qu'une apparence rouge acceptable est maintenue pendant au moins 2 mois pour cette viande d'où l'importance de la mention « utiliser ou congeler avant... » déjà préconisée par le Département américain de l'agriculture (United States Department of Agriculture : USDA). Woodruff et Silliker (1985) ont rapporté que les mauvaises odeurs et l'état poisseux perceptibles dans les produits d'origine animale conditionnés, dues au développement de la flore d'altération ont été prévenues par la présence de 10% CO . Gee et Brown (1978) ont étudié les effets de différentes concentrations de CO vis-à-vis de *Pseudomonas*, *Achromobacter* et *Esherichia coli* dans les viandes hachées du bœuf. Ils ont conclu que 15 à 30% du CO peut avoir un effet inhibiteur vis-à-vis de toutes ces bactéries. Néanmoins, ce niveau de concentration de CO dépasse largement celui autorisé par l'US Food and Drug Administration pour le conditionnement des produits carnés (US Food and Drug Administration : USFDA, 2004).

Lors d'un entreposage de la viande hachée bovine conditionnée sous CO à une température abusive (> 10 °C), *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes* et *Esherichia coli* O157 : H7 ont montré une certaine inhibition ; contrairement au *Salmonella* (Nissen *et al.*, 2000). Ces résultats expliquent la nécessité du respect de la chaîne du froid indépendamment du mode de conditionnement. Dans un travail similaire, Cornforth et Hunt (2008) ont rapporté que le conditionnement des viandes fraîches avec CO permet l'inhibition d'*Esherichia coli* O157 : H7. Contrairement, Bórnez *et al.* (2009, 2010) ont constaté que l'utilisation d'une faible teneur en CO (69,3% $\text{N}_2/30\%$ $\text{CO}_2/0,7\%$ CO) pour le conditionnement de la viande du mouton n'a montré aucun effet antibactérien. Il serait donc probable qu'à des concentrations raisonnables (< 1%), le CO en tant que tel n'exerce aucun effet antimicrobien. Dans ces conditions, l'accompagnement avec du CO_2 pour son rôle antimicrobien devient nécessaire pour la sécurité du produit de point de vue sanitaire.

1.3. Les opérations de prétraitements

Le prétraitement des viandes rouges avec de CO avant le S/V peut être une bonne alternative pour le secteur des viandes. En outre d'une couleur désirable de ces produits, il permet un meilleur attendrissage de la viande à l'intérieur de l'emballage en optimisant la durée de maturation. En parallèle, cette technique minimise le risque lié au CO, car ce dernier est complètement absent de l'entourage du produit durant la période de stockage, et par conséquent, le risque sera réduit au minimum lorsque les barquettes seront ouvertes au niveau du ménage. De nombreuses études ont déjà rapportées cette technologie (Lyu *et al.*, 2016 ; Van Rooyen *et al.*, 2017a,b). Le prétraitement a permis une stabilité de la couleur des biftecks conditionnés S/V = 2 mois (Rozbeh *et al.*, 1993 ; Brewer *et al.*, 1994). Une étude menée par Jayasingh *et al.* (2001) sur la synchronisation entre le prolongement de la durée de vie du produit, sa qualité microbiologique et la stabilité de la couleur pendant

la conservation. Il en découle qu'un prétraitement avec 5% CO/24 heures est nécessaire pour une durée de conservation S/V > 21 jours ; idéale pour une application à grande échelle. Les mêmes résultats ont été corroborés par Aspé *et al.* (2008), qui ont testé un prétraitement avec 5% CO/95% N₂ sur des côtelettes du bœuf. La couleur rouge attractive est nettement améliorée durant toute la phase de stockage S/V. Néanmoins, cette viande se décolore progressivement et devient brune lorsqu'elle est exposée à l'air ambiant.

I.4. Autres effets

La tendreté de la viande est l'un des critères le plus couramment utilisé pour l'estimation de la qualité de la viande au niveau de ménage. Les viandes issues d'un conditionnement sous AM sur-O₂ se sont déclarées moins tendres à cause de phénomène d'oxydation des protéines (Kim *et al.*, 2010 ; Djenane *et al.*, 2016). De même, Grobbel *et al.* (2008) ont observé que la viande bovine stockée S/V ou en présence de 0,4% de CO est plus tendre par rapport à celles conditionnées sous AM sur-O₂. La diminution de la tendreté du produit est l'un des principaux effets négatifs des AM sur-O₂ en raison de la réticulation (Cross-linking) des protéines myofibrillaires ; responsable de durcissement de la structure myofibrillaire de la viande.

Il est bien établi que l'élimination des agents pathogènes par l'irradiation, permet d'améliorer la sécurité sanitaire et la durée de conservation des viandes. Cependant, les doses appliquées (KGray) pour éliminer les agents pathogènes peuvent provoquer des modifications indésirables sur la couleur, la saveur et l'odeur de la viande. Kusmider *et al.* (2002) ; Ramamoorthi *et al.* (2009, 2011) et Kudra *et al.*, (2012) ont suggéré qu'une combinaison CO/ irradiation pourrait diminuer tous ces effets négatifs et permet de préserver la viande pendant une longue durée.

CONCLUSION

Il découle de toutes les informations collectées dans cette revue bibliographique, un état des lieux des avancées récentes réalisées dans le domaine de conditionnement des viandes. Il s'avère que ce dernier peut être utilisé à différentes étapes de la filière viande rouge, depuis la distribution, le prétraitement avant stockage, la transformation et dans les LVD. L'emploi du CO pour le conditionnement de la viande fraîche a donné des résultats très satisfaisants en raison de ses effets positifs sur la qualité de la viande et, la présence de CO₂ en concentrations suffisantes est vraiment nécessaire pour minimiser tout risque microbien. Le conditionnement S/V de la viande est une autre méthode courante utilisée pour sa distribution et son exposition dans les étalages pour la vente au détail. Ce type de conditionnement confère au produit une couleur pourpre due à la formation de DeoxMb. L'environnement anaérobie retarde la croissance des micro-organismes aérobies psychrotrophes et par conséquent, une prolongation de la durée de conservation. Cependant, pour la viande

L'industrie de viande a souvent recours à l'usage des lactates comme des ingrédients dans certains produits carnés (Seyfert *et al.*, 2004). Néanmoins, ces derniers peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité des produits pour leur rôle prooxydant. La présence de CO dans le conditionnement de tels produits peut compenser l'effet négatif d'un brunissement oxydatif du produit dû au lactate.

Le BP durant la cuisson des viandes rouges peut se produire en engendrant des surfaces internes grises/ brunes qui semblent bien cuites même à une température de cuisson < à 60 °C, ce qui entraîne le risque de pouvoir consommer de la viande contaminée par des bactéries pathogènes insuffisamment cuite. Ce phénomène est associé aux AM sur-O₂. Cependant, un conditionnement anoxique S/V ou sous AM-CO peut empêcher ce phénomène (John *et al.*, 2005 ; Grobbel *et al.*, 2008). Généralement, pour les viandes non désossées, la présence de la moelle contenant de traces d'Hb constitue un véritable facteur limitant due à l'oxydation de ce pigment durant la conservation. Le stockage de ce genre de viandes sous AM-CO peut constituer une alternative pour freiner ce phénomène (Mancini et Hunt, 2005). Afin de minimiser les problèmes de brunissement dus à l'utilisation du sang comme ingrédient dans les différentes formulations agroalimentaires ; diverses solutions sont proposées. Fontes *et al.* (2010, 2015) ont montré que le sang préalablement saturé en CO garde sa couleur stable et désirable pendant une longue période, ce qui permettra de l'incorporer dans les produits carnés sans risque de brunissement. En remplacement des nitrites, l'usage d'un conditionnement sous 1% CO est utilisé pour le cas des viandes fraîches destinées à la fabrication des saucisses salées sèches (Sørheim *et al.*, 2006). Les produits finaux obtenus ont montré une couleur rouge semblable ou meilleure que celle obtenue chez les produits traités avec des nitrites.

rouge, les consommateurs préfèrent toujours une viande avec une couleur rouge vif par rapport à celle d'une couleur pourpre (sombre et foncée). Il serait possible qu'un prétraitement de la viande par le CO, permette d'éviter cette couleur indésirable et de maintenir par contre une viande avec une couleur rouge attractive tout au long de son exposition en UVC; en plus, cette méthode de prétraitement permettrait aussi d'assurer une maturation optimale durant cette période et d'obtenir par conséquent une viande plus tendre.

Le phénomène de BP durant la cuisson qui est associé aux viandes conditionnées sous AM sur-O₂ peut entraîner le risque de pouvoir consommer de la viande contaminée par des bactéries pathogènes insuffisamment cuite. Cependant, un conditionnement anoxique S/V ou sous AM-CO peut empêcher ce phénomène.

Tout cela favorisera un prolongement de la durée de vie du produit emballé avec moins de risque pour la santé du consommateur.

Références bibliographiques :

- Aspé E., Roeckel M., Martí M.C., Jiménez R. (2008). Effect of pre-treatment with carbon monoxide and film properties on the quality of vacuum packaging of beef chops. *Packaging Technology and Science*, 21, 395–404.
- Barinaga M. (1993). Carbon monoxide: Killer to brain messenger in one step. *Science*, 15, 259–309.
- Bjørlykke G.A., Roth B., Sørheim O., Kvamme B.O., Slinde E. (2011). Effects of carbon monoxide on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Food Chemistry*, 127, 1706–1711.

- Bórnez R., Linares M.B., Vergara H. (2009). Microbial quality and lipid oxidation of Manchega breed suckling lamb meat: Effect of stunning method and modified atmosphere packaging. *Meat Science*, 83, 383–389.
- Bórnez R., Linares M.B., Vergara H. (2010). Effect of different gas stunning methods on *Manchega suckling* lamb meat packed under different modified atmospheres. *Meat Science*, 84, 727–734.
- Brewer M.S., Wu S., Field R.A., Ray B. (1994). Carbon monoxide effects on color and microbial counts of vacuum packaged beef steaks in refrigerated storage. *Journal of Food Quality*, 17, 231–236.
- Brunori M., Vallone B. (2006). A globin for the brain. *FASEB Journal*, 20, 2192–2197.
- Cheng Y., Mitchell-Flack M.J., Wang A., Levy R.J. (2015). Carbon monoxide modulates cytochrome oxidase activity and oxidative stress in the developing murine brain during isoflurane exposure. *Free Radical Biology Medicine*, 86, 191–199.
- Clark D.S., Lentz C.P., Roth L.A. (1976). Use of carbon monoxide for extending shelf-life of prepackaged fresh beef. *Canadian Institute Food Science and Technology Journal*, 9, 114–117.
- Clydesdale F.M., Francis F.J. (1971). The chemistry of meat color. *Food Product Development*, 15, 581–584.
- Concollato A., Parisi G., Olsen R.E., Kvamme B.O., Slinde E., Dalle Zotte A. (2014). Effect of carbon monoxide for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) slaughtering on stress response and fillet shelf life. *Aquaculture*, 433, 13–18.
- Cornforth D.P., Hunt M.C. (2008). Low-oxygen packaging of fresh meat with carbon monoxide: Meat quality, microbiology, and safety. In *The American Meat Science Association (AMSA) White Paper Series Number 2*; American Meat Science Association: Savoy, IL, USA.
- De Santos F., Rojas M., Lockhorn G., Brewer M.S. (2007). Effect of carbon monoxide in modified atmosphere packaging, storage time and endpoint cooking temperature on the internal color of enhanced pork. *Meat Science*, 77, 520–528.
- Djenane D., Sánchez A., Beltrán J.A., Roncalés P. (2001). Extension of the retail display life of fresh beef Packaged in modified atmosphere by varying lighting conditions. *Journal of Food Science*, 66, 181–185.
- Djenane D., Meddahi A., Roncalés P. (2006). Les systèmes antioxydants et antimicrobiens pour la préservation de la viande. *Sciences des Aliments*, 26, 37–73.
- Djenane D., Beltrán J.A., Camo J., Roncalés P. (2016). Influence of vacuum at different ageing times and subsequent retail display on shelf life of beef cuts packaged with active film under high O₂. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 4244–4257.
- Durante W., Schafer A.I. (1998). Carbon monoxide and vascular cell function. *International Journal Molecular Medicine*, 2, 255–262.
- El-Badawi A.A., Cain R.F., Samuels C.E., Anglemeier A.F. (1964). Color and pigment stability of Packaged refrigerated beef. *Food Technology*, 18, 159–163.
- Fontes P.R., Gomide L.A.M., Fontes E.A.F., Ramos E.M., Ramos A.L.S. (2010). Composition and color stability of carbon monoxide treated dried porcine blood. *Meat Science*, 85, 472–480.
- Fontes P.R., Gomide L.A.M., Costa N.M.B., Peternelli L.A., Fontes E.A.F., Ramos E.M. (2015). Chemical composition and protein quality of mortadella formulated with carbon monoxide-treated porcine blood. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 926–931.
- Foresti R., Bani-Hani M.G., Motterlini R. (2008). Use of carbon monoxide as a therapeutic agent: Promises and challenges. *Intensive Care Medicine*, 34, 649–658.
- Frydman M. (1996). The smoking addiction of pregnant women and the consequences on their offspring's intellectual development. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, 15, 169–172.
- Gee D.L., Brown W.D. (1978). Extension of shelf life in refrigerated ground beef stored under an atmosphere containing carbon dioxide and carbon monoxide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 26, 274–276.
- Gee D.L., Brown W.D. (1981). The effect of carbon monoxide on bacterial growth. *Meat Science*, 5, 215–222.
- Grant M., Clay B. (2002). Accidental carbon monoxide poisoning with severe cardiorespiratory compromise in 2 children. *American Journal of Critical Care*, 11, 128–131.
- Grobbel J.P., Dikemen M.E., Hunt M.C., Milliken G.A. (2008). Effects of different packaging atmospheres and injection-enhancement on beef tenderness, sensory attributes, desmin degradation, and display color. *Journal of Animal Science*, 86, 2697–2710.
- Hague M.A., Warren K.E., Hunt M.C., Kropf D.H., Kastner C.L., Stroda S.L., Johnson D.E. (1994). Endpoint temperature, internal cooked color, and expressible juice color relationships in ground beef patties. *Journal of Food Science*, 59, 465–470.
- Haldane J. (1895). The relation of the action of carbonic oxide to oxygen tension. *Journal of Physiology*, 18, 201–217.
- Hunt M.C., Mancini R.A., Hachmeister K.A., Kropf D.H., Merriman M., DelDuca G., Milliken G. (2004). Carbon monoxide in modified atmosphere packaging affects color, shelf life, and microorganisms of beef steaks and ground beef. *Journal of Food Science*, 69, C45–C52.
- Ishiwata H., Takeda Y., Kawasaki Y., Yoshida R., Sugita T., Sakamoto S. (1996). Concentration of carbon monoxide in commercial fish flesh exposed to carbon monoxide gas for colour fixing. *Journal of Food Hygienic of Society of Japan*, 37, 83–90.
- Jayasingh P., Cornforth D.P., Carpenter C.E., Whittier D. (2001). Evaluation of carbon monoxide treatment in modified atmosphere packaging or vacuum packaging to increase color stability of fresh beef. *Meat Science*, 59, 317–324.
- Jayasingh P., Cornforth D.P., Brennan C.P., Carpenter C.E., Whittier D.R. (2002). Sensory evaluation of ground beef stored in high-oxygen modified atmosphere packaging. *Journal of Food Science*, 67, 3493–3496.
- Jeong J.Y., Claus J.R. (2010). Color stability and reversion in carbon monoxide packaged ground beef. *Meat Science*, 85, 525–530.
- Jeong J.Y., Claus J.R. (2011). Color stability of ground beef packaged in a low carbon monoxide atmosphere or vacuum. *Meat Science*, 87, 1–6.
- John L., Cornforth J., Carpenter C.E., Sørheim O., Pettee B.C., Whittier D.R. (2005). Color and thiobarbituric acid values of cooked top sirloin steaks packaged in modified atmospheres of 80% oxygen, or 0.4% carbon monoxide, or vacuum. *Meat Science*, 69, 441–449.
- Jung C.R., Lin Y.T., Hwang B.F. (2013). Air pollution and newly diagnostic autism spectrum disorders: A population-based cohort study in Taiwan. *PLoS One*, 8, 75510.
- Kao L.W., Nañagas K.A. (2004). Carbon monoxide poisoning. *Emergency Medicine Clinics of North America*, 22, 985–1018.
- Kao L.W., Nañagas K.A. (2005). Carbon monoxide poisoning. *Medical Clinics of North America*, 89, 1161–1194.
- Killinger K.M., Hunt M.C., Campbell R.E., Kropf D.H. (2000). Factors affecting premature browning during cooking of store-purchased ground beef. *Journal of Food Science*, 65, 585–587.

- Kim Y.H., Huff-Lonergan E., Sebranek J.G., Lonergan S.M. (2010). High-oxygen modified atmosphere packaging system induces lipid and myoglobin oxidation and protein polymerization. *Meat Science*, 85, 759–767.
- Krause T.R., Sebranek J.G., Rust R.E., Honeyman M.S. (2003). Use of carbon monoxide packaging for improving the shelf life of pork. *Journal of Food Science*, 68, 2596–2603.
- Kudra L.L., Sebranek J.G., Dickson J.S., Mendonca A.F., Zhang Q., Jackson-Davis A., Prusa K.J. (2012). Control of *Campylobacter jejuni* in chicken breast meat by irradiation combined with modified atmosphere packaging including carbon monoxide. *Journal of Food Protection*, 75, 1728–1733.
- Kusmider E.A., Sebranek J.G., Lonergan S.M., Honeyman M.S. (2002). Effects of carbon monoxide packaging on color and lipid stability of irradiated ground beef. *Journal of Food Science*, 67, 3463–3468.
- Lanier T.C., Carpenter I.A., Toledo R.T., Reagan J.O. (1978). Transportation and color maintenance of hanging beef. *Journal of Food Science*, 43, 168.
- Lavieri N., Williams S.K. (2014). Effects of packaging systems and fat concentrations on microbiology, sensory and physical properties of ground beef stored at 4 °C for 25 days. *Meat Science*, 97, 534–541.
- Ledward D.A. (1970). Metmyoglobin formation in beef stored in carbon dioxide enriched and oxygen depleted atmospheres. *Journal of Food Science*, 35, 33–37.
- Lentz C.P. (1979). Effect of light intensity and other factors on the color of frozen prepackaged beef. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 12, 47–50.
- Li L., Hsu A., Moore P.K. (2009). Actions and interactions of nitric oxide, carbon monoxide and hydrogen sulphide in the cardiovascular system and in inflammation—A tale of three gases! *Pharmacology and Therapeutics*, 123, 386–400.
- Linares M.B., Vergara H. (2012). Effect of gas stunning and modified-atmosphere packaging on the quality of meat from Spanish Manchego light lamb. *Small Ruminant Research*, 108, 87–94.
- Lindahl G., Lagerstedt A., Ertbjerg P., Sampels S., Lundström K. (2010). Ageing of large cuts of beef loin in vacuum or high oxygen modified atmosphere, effect on shear force, calpain activity, desmin degradation and protein oxidation. *Meat Science*, 85, 160–166.
- Liu C., Zhang Y., Yang X., Liang R., Mao Y., Hou X., Lu X., Luo X. (2014). Potential mechanisms of carbon monoxide and high oxygen packaging in maintaining color stability of different bovine muscles. *Meat Science*, 97, 189–196.
- Luño M., Roncalés P., Djenane D., Beltrán J.A. (2000). Beef shelf life in low O₂ and high CO₂ atmospheres containing different low CO concentrations. *Meat Science*, 55, 413–419.
- Lyon B.G., Berry B.W., Soderberg D., Clinch N. (2000). Visual color and doneness indicators and the incidence of premature brown color in beef patties cooked to four end point temperatures. *Journal of Food Protection*, 63, 1389–1398.
- Lyu F., Shen K., Ding Y., Ma X. (2016). Effect of pretreatment with carbon monoxide and ozone on the quality of vacuum packaged beef meats. *Meat Science*, 117, 137–146.
- Mancini R.A., Hunt M.C. (2005). Current research in meat color. *Meat Science*, 71, 100–121.
- Mancini R.A., Suman S.P., Konda M.K.R., Ramanathan R. (2009). Effect of carbon monoxide packaging and lactate enhancement on the color stability of beef steaks stored at 1 °C for 9 days. *Meat Science*, 81, 71–76.
- Martínez L., Djenane D., Cilla I., Beltrán J.A., Roncalés P. (2005). Effect of different concentrations of carbon dioxide and low concentration of carbon monoxide on the shelf-life of fresh pork sausages packaged in modified atmosphere. *Meat Science*, 71, 563–570.
- Nam K.C., Ahn D.U. (2002). Carbon monoxide-heme pigment is responsible for the pink color in irradiated raw turkey breast meat. *Meat Science*, 60, 25–33.
- Nissen H., Alvsøe O., Bredholt S., Hoick A., Nesbakken T. (2000). Comparison between the growth of *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in ground beef packaged by three commercially used packaging techniques. *International Journal of Food Microbiology*, 59, 211–220.
- Onyiah J.C., Sheikh S.Z., Maharshak N., Steinbach E.C., Russo S.M., Kobayashi T., Mackey L.C., Hansen J.J., Moeser A.J., Rawls J.F., et al. (2013). Carbon monoxide and heme oxygenase-1 prevent intestinal inflammation in mice by promoting bacterial clearance. *Gastroenterology*, 144, 789–798.
- Otterbein L.E., Zuckerbraun B.S., Haga M., Liu F., Song R., Usheva A., Stachulak C., Bodyak N., Smith R.N., Csizmadia E., et al. (2003). Carbon monoxide suppresses arteriosclerotic lesions associated with chronic graft rejection and with balloon injury. *Natural Medicine*, 9, 183–190.
- Pereira A.D., Gomide L.A.M., Cecon P.R., Fontes E.A.F., Ramos E.M., Vidigal J.G. (2014). Evaluation of mortadella formulated with carbon monoxide-treated porcine blood. *Meat Science*, 97, 164–173.
- Pivarnik L.F., Faustman C., Rossi S., Suman S.P., Palmer C., Richard N.L., Ellis P.C., DiLiberti M. (2011). Quality Assessment of Filtered Smoked Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) Steaks. *Journal of Food Science*, 76, S369–S379.
- Raines C.R., Hunt M.C. (2010). Headspace Volume and Percentage of Carbon Monoxide Affects Carboxymyoglobin Layer Development of Modified Atmosphere Packaged Beef Steaks. *Journal of Food Science*, 75, 62–65.
- Ramamoorthi L., Toshkov S., Brewer M.S. (2009). Effects of carbon monoxide-modified atmosphere packaging and irradiation on *E. coli* K12 survival and raw beef quality. *Meat Science*, 83, 358–365.
- Ramamoorthi L., Toshkov S., Brewer M.S. (2011). Effects of irradiation on color and sensory characteristics of carbon monoxide-modified atmosphere packaged beef. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 701–707.
- Robert L. (2006). Caractérisation des émissions issues de la combustion du bois dans deux appareils indépendants. *Pollution Atmosphérique*, 189, 65–77.
- Roderique J.D., Josef C.S., Feldman M.J., Spiess B.D. (2015). A modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. *Toxicology*, 334, 45–58.
- Rogers H.B., Brooks J.C., Martin J.N., Tittor A., Miller M.F., Brashears M.M. (2014). The impact of packaging system and temperature abuse on the shelf life characteristics of ground beef. *Meat Science*, 97, 1–10.
- Rozbeh M., Kalchayanand N., Field R.A., Johnson M.C., Ray B. (1993). The influence of biopreservatives on the bacterial level of refrigerated vacuum packaged beef. *Journal of Food Safety*, 13, 99–111.
- Sakowska A., Guzek D., Głabska D., Wierzbicka A. (2016). Carbon monoxide concentration and exposure time effects on the depth of CO penetration and surface color of raw and cooked beef *Longissimus lumborum* steaks. *Meat Science*, 121, 182–188.

- Sakowska A., Guzek D., Sun D.-W., Wierzbicka A. (2017). Effects of 0.5% carbon monoxide in modified atmosphere packagings on selected quality attributes of *M. Longissimus dorsi* beef steaks. *Journal of Food Processing Engineering*, 40, 12517–12527.
- Seyfert M., Mancini R.A., Hunt M.C. (2004). Internal premature browning in cooked steaks from enhanced beef round muscles packaged in high oxygen and ultra-low oxygen modified atmospheres. *Journal of Food Science*, 69, 721–725.
- Seyfert M., Mancini R.A., Hunt M.C., Tang J., Faustman C. (2007). Influence of carbon monoxide in Packaged atmospheres containing oxygen on colour, reducing activity, and oxygen consumption of five bovine muscles. *Meat Science*, 75, 432–442.
- Soni, H., Pandya, G., Patel, P., Acharya, A., Jain, M., Mehta, A.A. (2011). Beneficial effects of carbon monoxide-releasing molecule-2 (CORM-2) on acute doxorubicin cardiotoxicity in mice: Role of oxidative stress and apoptosis. *Toxicology Applied Pharmacology*, 253, 70–80.
- Sørheim O., Aune T., Nesbakken T. (1997). Technological, hygienic and toxicological aspects of carbon monoxide used in modified-atmosphere packaging of meat. *Trends in Food Science and Technology*, 8, 307–312.
- Sørheim O., Nissen H., Nesbakken T. (1999). The storage life of beef and pork packaged in an atmosphere with low carbon monoxide and high carbon dioxide. *Meat Science*, 52, 157–164.
- Sørheim O., Nissen H., Aune T., Nesbakken T. (2001). Use of carbon monoxide in retail meat packaging. In *Proceedings of the 54th Reciprocal Meat Conference*, Indianapolis, IN, USA, 24–28 July 2001; pp. 47–51.
- Sørheim O., Langsrud Ø., Cornforth D.P., Johannessen T.C., Slinde E., Berg P., Nesbakken T. (2006). Carbon Monoxide as a Colorant in Cooked or Fermented Sausages. *Journal of Food Science*, 71, 549–555.
- Stetzer A.J., Wicklund R.A., Paulson D.D., Tucker E.M., Macfarlane B.J., Brewer M.S. (2007). Effect of carbon monoxide and high oxygen modified atmosphere packaging (MAP) on quality characteristics of beef strip steaks. *Journal of Muscle Foods*, 18, 56–66.
- Suman S.P., Mancini R.A., Joseph P., Ramanathan R., Konda M.K.R., Dady G., Yinb S. (2011). Chitosan inhibits premature browning in ground beef. *Meat Science*, 88, 512–516.
- Tricker A.R., Preussmann R. (1991). Carcinogenic N-nitrosamines in the diet: Occurrence, formation, mechanisms and carcinogenic potential. *Mutation Research and Genetic Toxicology*, 259, 277–289.
- USFDA. (2004). GRAS Notice Number GRN 000143; United States Food and Drug Administration: Washington, DC, USA.
- Van Rooyen L.A., Allen P., Crawley S.M., O'Connor D.I. (2017a). The effect of carbon monoxide pretreatment exposure time on the colour stability and quality attributes of vacuum packaged beef steaks. *Meat Science*, 129, 74–80.
- Van Rooyen L.A., Allen P., O'Connor D.I. (2017b). The application of carbon monoxide in meat packaging needs to be re-evaluated within the EU: An overview. *Meat Science*, 132, 179–188.
- Van Rooyen L.A., Allen P., Gallagher E.I., O'Connor D.I. (2018a). The effect of temperature during retail display on the colour stability of CO pretreated vacuum packaged beef steaks. *Meat Science*, 145, 16–22.
- Van Rooyen L.A., Allen P., O'Connor D.I. (2018b). Effect of muscle type and CO-pretreatment combinations on the colour stability, protein oxidation and shelf-life of vacuum packaged beef steaks. *Meat Science*, 145, 407–414.
- Verma A., Hirsch D.J., Glatt C.E., Ronnett G.V., Snyder S.H. (1993). Carbon monoxide: A putative neural messenger. *Science*, 259, 381–384.
- Venturini A.C., Contreras-Castillo C.J., Fonseca Faria J.A., Gallo C.R., Zago Silva T., Shirahigue L.D. (2010). Microbiological, colour and sensory properties of fresh beef steaks in low carbon monoxide concentration. *Packaging Technology and Science*, 23, 327–338.
- Venturini A.C., Faria, J.F., Olinda, R.A., Contreras C.J.C. (2014). Shelf life of fresh beef stored in master packages with carbon monoxide and high levels of carbon dioxide. *Packaging Technology and Science*, 27, 29–35.
- Viana E., Comide L., Vanetti M. (2005). Effect of modified atmospheres on microbiological, color and sensory properties of refrigerated pork. *Meat Science*, 71, 696–705.
- Wicklund R.A., Paulson D.D., Tucker E.M., Stetzer A.J., De Santos F., Rojas M., MacFarlane B.J., Brewer M.S. (2006). Effect of carbon monoxide and high oxygen modified atmosphere packaging and phosphate enhanced, case-ready pork chops. *Meat Science*, 74, 704–709.
- Woodruff R., Silliker J. (1985). Process and Composition for Producing and Maintaining Good Color in Fresh Meat, Fresh Poultry and Fresh Fish. U.S. Patent No. 4,522,835, 11 June 1985. Available online: <http://www.google.com/patents?vid=USPAT4522835> (accessed on 23 January 2008).
- Yang X., Zhang Y., Zhu L., Han M., Gao S., Luo X. (2016). Effect of packaging atmospheres on storage quality characteristics of heavily marbled beef *Longissimus* steaks. *Meat Science*, 117, 50–56.
- Yang X., Zhu L., Zhang Y., Liang R., Luo X. (2018a). Microbial community dynamics analysis by high-throughput sequencing in chilled beef *Longissimus* steaks packaged under modified atmospheres. *Meat Science*, 141, 94–102.
- Yang X., Wu S., Hopkins D.L., Liang R., Zhu L., Zhang Y., Luo X. (2018b). Proteomic analysis to investigate color changes of chilled beef *Longissimus* steaks held under carbon monoxide and high oxygen packaging. *Meat Science*, 142, 23–31.
- Zhang Y., Qin L., Mao Y., Hopkins D.L., Han G., Zhu L., Luo X. (2018). Carbon monoxide packaging shows the same color improvement for dark cutting beef as high oxygen packaging. *Meat Science*, 137, 153–159.