



# Le monoxyde de carbone (CO) pour le conditionnement des viandes ? (Partie II°)

**Utilisation du monoxyde de carbone (CO) pour le conditionnement des viandes rouges au 21<sup>ème</sup> siècle. Partie II : Un mythe ou une réalité ?**

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

**Auteurs :** Azem Belasli<sup>‡</sup>, Lidia Aït Ouahioune, et Djamel Djenane<sup>\*‡</sup>

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 les perspectives d'application du monoxyde de carbone dans le domaine de conditionnement des viandes rouges.**

## Résumé :

Dans la plupart des pays, il est strictement interdit de conditionner les viandes sous monoxyde de carbone (CO). Par contre, dans d'autres pays, son usage est autorisé. Connue pour ses effets toxiques voire mortels, le CO pourrait exposer les travailleurs en milieu professionnel au risque d'intoxication. Ce gaz pourrait aussi dissimuler l'altération des viandes, et induire le consommateur en erreur sur la fraîcheur du produit au moment de l'achat et de la consommation. L'effet toxique et la fraude à la fraîcheur causent la controverse voire l'interdiction.

Cette revue a pour objectif de discuter les avantages et les limites de cet emploi, notamment en lien avec les risques pour le consommateur. Des recommandations sur les « bonnes pratiques » d'utilisation du CO sont directement adressées aux industriels, aux consommateurs et aux pouvoirs publics pour promouvoir un cadre réglementaire cohérent, rigoureux et efficace et, selon des normes d'éthiques qui sauront protéger le consommateur et l'intérêt de l'industriel en répondant efficacement aux nouveaux défis.

## Abstract: Carbon monoxide (CO) for packaging of meats? Part II.

The use of carbon monoxide (CO) for meat packaging is forbidden in most countries due to the potential toxic effect and potential fraud of product freshness, while its use is allowed in some countries. The commercial application of CO in food packaging has not then been considered feasible because of possible environmental hazards for workers. CO has previously been reported to mask muscle food spoilage, and this was the primary concern raised for prohibition, since this may mislead consumers.

The purpose of this review is to discuss the advantages of CO and its industrial limits. The most recent literature on consumer safety issues related to the use of CO and consumer acceptance of CO especially in meat packaging systems are also discussed. Recommendations and future prospects are addressed for food industries, consumers and regulators on what would be a "best practice" in the use of CO in food packaging. All this promotes high ethical standards in commercial communications by means of effective regulation, for the benefit of consumers and businesses in the world, and this implies that industrialized countries and members of their regulatory agencies must develop a coherent and robust system of regulation and control that can respond effectively to new challenges.

## INTRODUCTION

En général, l'utilisation du CO pour le conditionnement de la viande fraîche a suscité un grand intérêt concernant la stabilité de la couleur et la réduction des réactions d'oxydations. Tout ceci entraîne une prolongation de la durée de conservation du produit durant la distribution et la vente au détail. Cependant, la concentration à laquelle il est utilisé (< 1%), le CO n'aurait aucun effet antimicrobien, et dans ce cas, l'incorporation de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en concentrations suffisantes pourrait être nécessaire pour retarder la croissance des bactéries d'altération, voire même de celles qui sont pathogènes.

Bièche-Terrier et Legrand (2016) ont étudié l'utilisation de CO (0,4%) pour la conservation des viandes de veau désossée ou avec os pendant 23 jours en Unité de Vente au Consommateur (UVC) : le CO a permis une meilleure stabilité de la couleur pour la viande désossée sans que celle-ci apparaisse "artificielle" à l'œil. Cette atmosphère empêche le développement des microorganismes aérobies stricts (*Pseudomonas* spp.) et, après 23 jours, la qualité sensorielle de ces viandes était similaire à celle de la viande fraîche. En revanche, pendant la même période, les viandes avec os ont posé des problèmes d'odeurs perceptibles très désagréables (développement de bactéries de type *Brochothrix thermosphacta*), sans que les signes d'altération soient apparents sur le produit. Les auteurs ont conclu que le conditionnement sous 0,4% de CO apparaît comme une bonne alternative pour les viandes de veau sans os en UVC.

La Figure 1 explique sommairement les facteurs influençant la vie-utile de la viande rouge. Pour une meilleure compréhension, la vie utile (ou « Shelf-life ») de la viande est définie comme la période séparant l'abattage de l'animal et la présentation de la viande en UVC (en respectant la chaîne de froid), période durant laquelle le produit est encore de qualité acceptable. Elle est objectivement déterminée en se basant sur des critères qualitatifs et quantitatifs (Djenane *et al.*, 2016) : **1.-** critère chimique (Substances Réactives à l'Acide Thiobarbiturique (SR-TBA): < 2 mg Malonaldéhyde (MDA)/kg), **2.-** critère microbiologique (Flore aérobie totale psychrotrophe : < 7 log<sub>10</sub> UFC/cm<sup>2</sup>), **3.-** critères physiques (Metmyoglobine (MetMb) de surface : seuil = 40% ; Indice rouge (CIE a\*) de surface : seuil = 10), **4.-** critères sensoriels (couleur rouge, décoloration de surface et odeur perceptible) : une note sensorielle ≤ 3 pour chaque critère dénote que la viande est jugée acceptable par le panel, soit pour l'achat, soit pour la consommation. Cette définition ne prend pas en compte le fait que le consommateur pourrait encore conserver chez lui le produit acquis pendant quelques jours supplémentaires avant la consommation.

En Norvège, entre 1985 et 2004, environ 60% des viandes bovines, porcines et ovines étaient mises sur le marché conditionnées avec 0,4% de CO combiné à 60-70% de CO<sub>2</sub> et d'azote (N<sub>2</sub>) pour prolonger leur durée de vie en vente à l'étalage (Sørheim *et al.*, 1999). Cependant, au 1<sup>er</sup> juillet 2004 est entrée en application la réglementation alimentaire de l'Union Européenne (UE) interdisant l'utilisation du CO en gaz de conditionnement alimentaire, arrêtant donc son utilisation en Norvège. Certains pays, comme les États-Unis, le Canada, l'Australie et la Nouvelle-Zélande ont autorisé l'utilisation de CO dans le conditionnement des viandes mais à de faibles concentrations, tandis que, et même jusqu'à présent, les états membres de l'UE l'interdisent. Il ressort que le CO pourrait dissimuler la qualité microbiologique réelle de la viande en UVC, ce qui constitue une fraude. L'autre

argument considéré est celui dû à l'exposition des travailleurs aux risques d'inhalation dans le milieu professionnel.

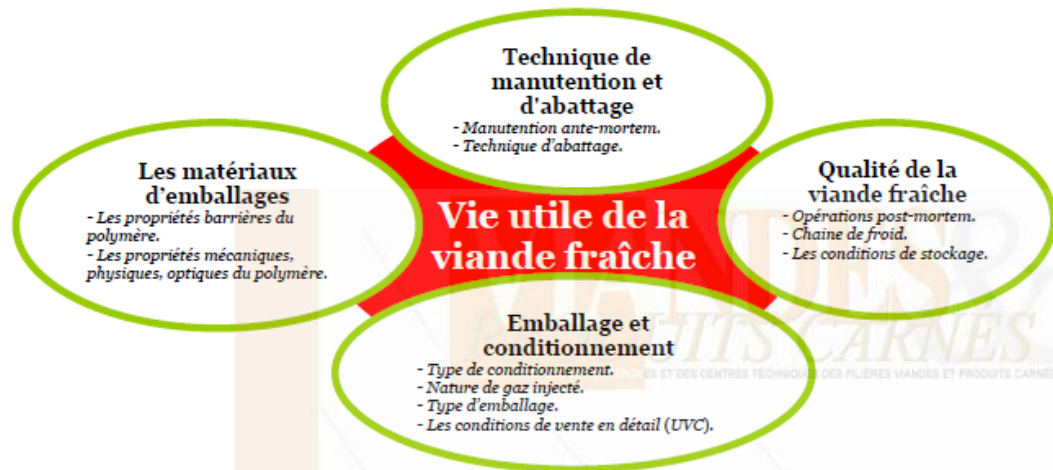
Le conditionnement des viandes rouges sous Atmosphère Modifiée contenant du Monoxyde de Carbone (AM-CO) a suscité un intérêt croissant, mais les débats concernant son utilisation n'ont pas pris sérieusement en compte les avis des consommateurs (Grebitus *et al.*, 2013a). Plusieurs études auprès de consommateurs européens et d'Amérique du Nord ont montré des opinions positives, ce qui laisse prédire son essor dans le futur au sein l'UE. L'accumulation et la diffusion des connaissances scientifiques sur l'emploi du CO dans le conditionnement des viandes rouges contribueraient à l'élaboration de nouvelles politiques assurant la protection des consommateurs. Ainsi, le débat sur l'emploi du CO comme un gaz protecteur dans le conditionnement des viandes dans l'UE pourrait être réévalué.

Ce deuxième article décrit les principales motivations scientifiques et technologiques en vue de l'application de CO dans l'industrie des viandes.

### Abréviations

ACIA	Agence Canadienne d'Inspection des Aliments
AM	Atmosphère Modifiée
AM-surO <sub>2</sub>	Atmosphère Modifiée surOxygénée
AM-CO	AM contenant du Monoxyde de Carbone
BP	Brunissement Prématuré
CEE	Communauté Economique Européenne
CG/DIF	Chromatographie en phase Gazeuse équipée d'un Détecteur à Ionisation de Flamme
CIE a*	Indice rouge
CO / CO <sub>2</sub>	Monoxyde ou Dioxyde de Carbone
COHb / COMb	Carboxyhémoglobine / Carboxymyoglobine
D(L)UO	Date (Limite) d'Utilisation Optimale
EPA	Environmental Protection Agency (Agence de Protection de l'Environnement)
Fe	Atome de Fer
GRAS	Generally Recognized as Safe (Généralement Reconnus Inoffensifs)
CG/SM/ET	Chromatographie en phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse et à un Espace de Tête
LVD	Linéaires de Vente au Détail
MDA	Malonaldéhyde (= issu de l'oxydation des lipides)
Mb / MetMb	Myoglobine / Metmyoglobine
N <sub>2</sub>	Azote
IRND	Infrarouge Non Dispersive
NFCA	Norwegian Food Control Authority (Autorité Norvégienne d'Inspection des Denrées Alimentaires)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (Institut National pour la Sécurité et la Santé au Travail)
O <sub>2</sub>	Oxygène
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
S/V	Sous Vide
SR-TBA	Substances Réactives à l'Acide Thiobarbiturique (celles issues de l'oxydation des lipides)
UE	Union Européenne
UFC	Unité Formant Colonie
USDA	United States Department of Agriculture (Département Américain de l'Agriculture)
USFDA	US Food and Drug Administration (Administration Fédérale Américaine des Produits Alimentaires et Pharmaceutiques)
UVC	Unité de Vente au Consommateur
UV-Vis	Ultraviolet-Visible

Figure 1. Les facteurs influençant la vie-utile de la viande rouge



## I. LES RISQUES SANITAIRES LIES AUX VIANDES CONDITIONNEES SOUS CO

Jusqu'à présent, les informations scientifiques qui existent ne soulèvent pas le danger spécifique lié à la consommation des viandes conditionnées sous AM-CO (Atmosphère Modifiée contenant du Monoxyde de Carbone). Sørheim *et al.* (1997,1999) et Cornfort et Hunt (2008) ont déjà examiné cet aspect et, ils ont conclu que la consommation des viandes conditionnées sous AM (Atmosphère Modifiée) contenant moins de 0,5% CO ne présente aucun danger pour l'homme. Les quantités en carboxyhémoglobine (COHb) sont déclarées négligeables chez l'homme. Depuis 1985 et jusqu'à 2004, l'Autorité Norvégienne d'Inspection des Denrées Alimentaires (« The Norwegian Food Control Authority » : NFCA) n'a enregistré aucun cas sporadique de maladies liées à la consommation de ce type de viandes. Toutefois, l'application de CO pour le conditionnement des viandes rouges n'est pas considérée faisable en raison des risques environnementaux possibles pour le personnel chargé des opérations de conditionnement. Aujourd'hui, l'exposition au CO en milieu industriel est associée à des risques minimes, aussi bien pour les bonnes pratiques sur les lieux de travail que pour la conception des équipements. Et pour des raisons de management des risques, les détecteurs à gaz sont nécessaires dans les ateliers de travail. L'exposition humaine au CO dans l'environnement varie considérablement entre les lieux, niveau de contamination et les personnes. Concernant les risques d'inhalation, Sørheim *et al.* (1997) ont recommandé une concentration maximale de 1,5% en COHb dans le sang humain. Généralement, un taux en COHb < à 5% dans le sang est considéré sans risque pour la santé humaine ; la demi-vie (½) de COHb est d'environ 4,5 h dans l'organisme humain. Par ailleurs, au niveau des restaurations collectives, les travailleurs des grillades au charbon de bois constituent le groupe professionnel le plus concerné. Il est constaté que les niveaux moyens de COHb pour ces personnes dépassent le niveau de 5% recommandé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'institut national pour la sécurité et la santé au travail (« National Institute for Occupational Safety and Health » : NIOSH) (Madani *et al.*, 1992).

Compte tenu de la stabilité de la couleur rouge attractive de la viande conditionnée sous CO et le faible rôle antimicrobien du CO, il est probable que, dans certaines conditions non hygiéniques, ces viandes peuvent constituer un risque imminent pour la santé du consommateur (Wilkinson *et al.*, 2006). En effet, ces derniers peuvent

acheter une viande apparemment attractive mais qui constitue un danger du point de vue microbiologique. C'est peut-être la raison principale de l'interdiction en Europe de l'utilisation du CO pour le conditionnement des viandes rouges sous AM-CO. La Commission Européenne (2001) a également soulevé une préoccupation pertinente, selon laquelle, si les viandes conditionnées en présence de CO sont entreposées dans des conditions inappropriées (rupture de la chaîne de froid), les symptômes visuels d'altération sur le produit peuvent être dissimulés. Van Rooyen *et al.* (2017) ont étudié les effets avantageux d'un prétraitement et d'un conditionnement S/V de la viande rouge. Le produit obtenu est caractérisé par une couleur rouge cerise et sa décoloration en surface s'est produite en concordance avec la date de péremption (28 jours à 2 °C), même si les conditions d'entreposage sont abusives. Ces auteurs ont estimé qu'un prétraitement = 5% CO/5 h est optimal. Dans le but de déceler si la formation de carboxymyoglobine (COMb) peut prolonger la stabilité de la couleur au-delà du seuil critique microbien, ces auteurs ont signalé que les biftecks de couleur acceptable ont tous une charge microbienne < 7 log<sub>10</sub> ufc/g. Pour plus de concordance, Eilert (2005) a aussi réussi à observer que le CO ne masque pas une possible altération microbienne du produit. Lorsqu'un prétraitement de trois jours avec 1% CO (= 30% saturation de la myoglobine (Mb) en CO) précédé d'une exposition à l'air libre, le CO lié à la viande s'est lentement détaché du complexe COMb. Cependant, une forte perte (= 85%) du CO durant la cuisson de ces viandes a été observé (Watts *et al.*, 1978). Chow et Chu (2004) ont indiqué que la cuisson peut avoir un effet majeur sur la libération du CO lié au muscle de l'animal (Pertes de 58-82%).

Dans les sociétés modernes, la plupart des ménages font des réserves de viande. Ces pratiques peuvent favoriser l'exposition au risque du CO, surtout, dans le cas des viandes traitées (Soni et Andhare, 2015). La concentration de CO détectée dans ces aliments congelés est > 1 µg/g.

Une étude a été menée pour le calcul de la concentration en COMb dans la viande conditionnée sous CO concernant les aspects sanitaires en se basant sur le fait qu'une barquette de viande en AM peut contenir 1,5 litres de volume gazeux dans son espace de tête et en considérant la norme qualitative de l'air ambiant concernant l'inhalation de CO (9 ppm/8 h). Ainsi, une barquette de viande conditionnée peut contenir 0,4% CO dans un volume d'espace de tête de 1,5 litres. L'ouverture d'une seule barquette de viande de telles

caractéristiques dans une salle de 150 m<sup>3</sup> entraîne une concentration de CO dans l'air ambiant de 0,042 ppm (Cornforth et Hunt, 2008). Les auteurs ont tout d'abord supposé qu'aucune quantité de COMb n'était formée. Ainsi, l'ouverture d'une seule barquette de viande conditionnée sous 0,8% CO (le double de la normale) dans un espace de tête de 0,4 litre engendre 0,022 ppm de CO dans l'air ambiant. Après 7 jours de conservation, 9 100 barquettes de viandes de telles caractéristiques doivent être ouvertes dans une pièce de 150 m<sup>3</sup> pour atteindre le maximum de 9 ppm indiqué par l'Agence de Protection de l'Environnement (« Environmental Protection Agency » : EPA). Il ressort que la réduction de l'espace de tête de 1,5 à 0,4 litre et l'augmentation de la concentration de CO de 0,4 à 0,8% ne constituent pas un risque pour la sécurité des consommateurs (Raines et Hunt, 2010). Concernant les viandes conditionnées (0,4% CO, espace de tête de 1,5 litres), 216 barquettes doivent être ouvertes dans la même pièce de 150 m<sup>3</sup> pour pouvoir

dépasser cette norme (9 ppm) correspondante à une l'inhalation humaine de 5 m<sup>3</sup> air/8 h (EPA, 2007a,b). Ces mêmes auteurs ont supposé qu'une consommation journalière de 250 g de viande traitée peut libérer 0,18 mg de CO (= 0,018% COHb). Ils ont aussi considéré que 100% du CO libéré est transféré de l'intestin vers le sang. Dans ces conditions, une quantité négligeable de COHb peut être additionnée à 0,5% de COHb générée de manière endogène par notre organisme et à 1% de COHb formée par inhalation d'un non-fumeur dans une atmosphère contaminée (Sørheim *et al.*, 1997). En réalité, on consomme moins de CO par repas (seulement 15% du CO persistent dans la viande après cuisson) (Chow et Chu, 2004). Notre exposition par inhalation au CO contenu dans l'espace de tête (0,3 à 0,5% de CO), lors de l'ouverture d'une barquette de viande contribue donc d'une manière insignifiante à la formation du COHb dans le sang, comparativement aux autres sources d'inhalation (Sørheim *et al.*, 1997).

## II. PRODUITS DE LA MER ET VOLAILLES

L'industrie alimentaire cherche continuellement à développer de nouvelles technologies visant à prolonger la durée de conservation des produits de la mer sans modifier leurs attributs nutritionnels et sensoriels. Une couleur rouge vif est un paramètre important pour juger la qualité de ces produits, en particulier chez le thon (*Thunnus thynnus*), car souvent sa valeur marchande est basée sur cet attribut (Anderson et Wu, 2005). La fumée du bois filtrée insipide a été utilisée dans les fumoirs à saumon (*Salmo salar*) durant plusieurs décennies générant plusieurs classes de molécules. Cependant, les mauvais composants (phénols) agissant sur le goût et l'odeur, les composés cancérigènes et certains d'autres gaz sont éliminés par lavage et filtration. La fumée de bois contient naturellement entre 15 et 40% de CO. L'utilisation du CO par le procédé de fumage à la fumée de bois filtrée a été appliquée aux produits de la mer pour maintenir leur couleur stable désirée pendant toute la durée de conservation et de distribution (Pivarnik *et al.*, 2011). Aux États-Unis, les AM contenant 0,4% de CO sont utilisées pour le conditionnement de la viande, tandis que la fumaison à l'aide d'une fumée contenant jusqu'à 40% de CO est autorisée pour le prétraitement de certains types de poissons (Sørheim *et al.*, 2006 ; Kristinsson *et al.*, 2006a,b). Mantilla *et al.* (2008a) ont prétraité des filets de tilapia (*Oreochromis*

*niloticus*) avec 100% de CO pendant 30 minutes, puis les ont conditionnés S/V à -20 °C. Le prétraitement avec du CO a permis une meilleure stabilité de la couleur et de la flore microbiologique d'altération durant toute la période de congélation ; le pH et le pouvoir de rétention d'eau sont restés dans les normes après l'opération de congélation. Généralement, le CO est largement utilisé comme supplément dans la glace ou pendant le stockage réfrigéré des produits frais de la mer afin de mieux les conserver (Chow *et al.*, 1998).

Il est important d'évoquer le risque sanitaire associé à une durée de vie prolongée des aliments d'origine animale et, surtout pour les produits de la mer et en particulier, les poissons riches en histidine tels que le thon, le maquereau, la sardine, le hareng et l'espadon. L'utilisation frauduleuse du CO représente un risque toxicologique supplémentaire puisque l'histamine (décarboxylation oxydative de l'histidine), responsable des effets toxiques, peut se former durant cette période de conservation prolongée. Concernant les volailles, la couleur de la viande de dinde pourrait être améliorée par la présence de 0,5% CO (Fraqueza *et al.*, 2000). Cependant, il se trouve que la viande de poulet n'est pas affectée par le CO pour contenir que de faibles quantités de Mb.

## III. LES ASPECTS REGLEMENTAIRES

Depuis 1985, l'industrie norvégienne a utilisé 0,4% de CO pour le conditionnement des viandes de différentes espèces animales (Sørheim *et al.*, 1999). L'utilisation du CO pour le conditionnement des viandes est trop controversée : certains pays approuvent son application, comme les États-Unis, le Canada, l'Australie et la Nouvelle-Zélande, tandis que les états membres de l'UE l'interdisent. Pour l'UE, les gaz utilisés dans le conditionnement des aliments sont considérés comme des additifs ; le CO ne figure pas dans cette liste. Ce n'est qu'en 2004 que la Norvège a cessé d'utiliser le CO dans le conditionnement des viandes. La Norvège n'est pas membre de l'UE, et en raison des accords commerciaux conclus au sein de l'espace économique européen, la Norvège devait adopter les réglementations alimentaires de l'UE. En 2002, la Norvège a formulé une demande officielle adressée à l'UE pour une éventuelle

approbation de l'usage d'une faible concentration du CO dans le conditionnement des viandes. La proposition a été évaluée positivement par le comité scientifique de la commission européenne, mais finalement, le CO n'a pas été inclus dans la liste positive des additifs. Contre toute attente, l'UE a imposé une interdiction effective de l'utilisation de CO dans le conditionnement des viandes à partir du 1<sup>er</sup> juillet 2004. En revanche, en Amérique du Nord, le département américain de l'agriculture (« United States Department of Agriculture » : USDA) et l'Administration fédérale des produits alimentaires et pharmaceutiques (« US Food and Drug Administration » : FDA) ont conjointement approuvé l'utilisation de 0,4% de CO en combinaison avec 30% de CO<sub>2</sub> et 69,6% de N<sub>2</sub> pour le conditionnement des viandes. En 2004, le CO a obtenu l'autorisation « Généralement Reconnus Inoffensifs » (« Generally Recognized as Safe » :

GRAS) pour son utilisation dans les systèmes de conditionnement primaire, en déclarant de fausses hypothèses, telles que le CO peut masquer l'odeur provenant des phénomènes d'altération de la viande en UVC. Les autorités de Nouvelle-Zélande et d'Australie considèrent le CO comme un auxiliaire technologique, et par conséquent, la mention sur l'étiquette « viande traitée au CO » devient non obligatoire (Onyiah *et al.*, 2013 ; Australia New Zealand Food Standards, 2016). Pour sa part, le Canada autorise l'emploi de mélange gazeux à faible teneur en CO dans les emballages secondaires, conformément aux exigences et aux normes de « Santé Canada » et de l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA). Le Comité scientifique européen des aliments a estimé que l'ajout de 0,3 à 0,5% de CO dans les systèmes d'emballages de viande fraîche ne constitue pas un risque apparent pour la santé humaine. Toutefois, en raison d'un manque d'autorisation légale par

l'UE, l'usage de CO dans tous les pays européens est interdit pour le conditionnement des viandes. Selon Sebranek et Houser (2006) et Sebranek *et al.* (2006), la USFDA a profondément examiné cette question en exigeant que les barquettes de viandes emballées avec de CO doivent mentionner sur leurs étiquettes « utiliser ou congeler avant... ». Des délais de conservation sont fixés par cet organisme : 35 jours pour les steaks et les rôtis et 28 jours pour les viandes hachées mais leur mention sur l'étiquetage est facultative. Par ailleurs, il convient de rappeler que quel que soit le type d'emballage utilisé, la viande est toujours soumise à des processus naturels de détérioration. Il est donc nécessaire de conserver la viande à des températures de réfrigération tout au long de la chaîne de commercialisation. Les ménages doivent prendre soin d'utiliser la viande avant la date indiquée sur l'emballage et de respecter les bonnes pratiques de manipulation du produit.

#### IV. DETECTION DES VIANDES TRAITEES AU CO

Diverses méthodes sont déjà disponibles pour la détection du CO dans les matrices alimentaires et dans certains produits biologiques (Underner *et al.*, 2004 ; Waga *et al.*, 2018). L'analyse du CO peut être utilisée pour vérifier si les produits alimentaires sont traités frauduleusement au CO, bien que cela ne soit pas indiqué sur leur emballage. Ces considérations soulignent la pertinence de pouvoir détecter de très faibles quantités de CO dans les tissus de viande et d'en déceler un usage frauduleux. La méthode officielle qui existe pour le dosage du CO dans les matrices alimentaires présente un problème dans la mesure où une partie du CO peut être perdue lors de la préparation de l'échantillon au laboratoire (Ohtsuki *et al.*, 2011). Les laboratoires officiels de contrôle des denrées alimentaires ont besoin non seulement de méthodes de confirmation, mais aussi de méthodes de dépistage rapides et peu coûteuses pour les contrôles alimentaires au quotidien. En raison des effets potentiellement toxiques du CO, il devient nécessaire de disposer de mesures précises et fiables. Les méthodes spectrophotométriques Ultraviolet-Visible (UV-Vis) sont évaluées en termes de leur performance en utilisant des échantillons du poisson (thon). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par Chromatographie en phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse et à un Espace de Tête (CG/SM/ET). Les niveaux de CO mesurés dans les échantillons du thon par UV-Vis sont nettement inférieurs à ceux révélés par CG/SM/ET (Droghetti *et al.*, 2011). Par conséquent, la méthode CG/SM/ET est considérée plus performante en terme de sensibilité pour ce genre d'analyse (Bartolucci *et al.*, 2010).

Au cours des dernières années, la Chromatographie Gazeuse liée à la Spectrométrie de Masse (CG/SM) a été

développée pour l'évaluation quantitative du CO dans les tissus du thon et de mahi-mahi (*Coryphaena hippurus*) traités par le CO (Anderson et Wu, 2005). Parallèlement, le développement de la Chromatographie phase Gazeuse équipée d'un Détecteur d'Ionisation à Flamme (CG/DIF) s'est révélée plus efficace pour ses faibles limites de détection et de sa grande précision (Mantilla *et al.*, 2008b).

Le développement de la technique Infra-Rouge Non Dispersive (IRND) a permis de mesurer en continu le niveau de CO dans les échantillons biologiques. Elle est basée sur l'absorption spécifique du rayonnement infrarouge par la molécule de CO (4600 nm). Cette technique intègre un filtre à gaz afin de réduire les interférences avec d'autres gaz. Elle fonctionne à la pression atmosphérique et est capable de détecter des concentrations en CO de 0,05 mg/ m<sup>3</sup> (WHO, 1999).

La mesure du niveau d'exposition du consommateur au CO suite à la consommation de viandes traitées est fondée sur des normes nationales de qualité de l'air ambiant (U.S. « Environmental Protection Agency ») qui supposent que le métabolisme humain du CO sera le même durant les processus digestifs et les réactions métaboliques suite à l'inhalation. Ces normes exigent que l'exposition humaine ne doit pas dépasser 9 ppm pendant 8 h (EPA, 2007a,b), pour un volume d'air respiré de 5 m<sup>3</sup> air/8 h. Lavieri et Williams (2014) ont détecté une concentration < 9 ppm dans la viande traitée au CO. Droghetti *et al.* (2011) ont révélé que la méthode spectrophotométrique UV-Vis détecte exclusivement le CO lié à l'atome de fer (Fe) de la protéine héminique et non le CO dissout en solution. Ainsi, cette technique sous-estime probablement le CO total contenu dans une solution.

#### V. LES OPINIONS DES CONSOMMATEURS AMERICAINS ET EUROPEENS ENVERS CETTE TECHNOLOGIE

##### V.1. Information et comportement des consommateurs

Certains auteurs proclament que le choix des consommateurs au moment de l'achat de la viande dans les grandes surfaces se base uniquement sur la couleur comme indicateur de qualité. Ce fondement exclusif est probablement exagéré. En effet, il a été souvent observé

qu'au niveau des Linéaires de Vente au Détail (LVD), les consommateurs achètent des barquettes en UVC contenant des morceaux de viande décolorés et pour lesquelles un rabais a été appliqué. Cela signifie que la couleur n'est pas un indicateur exclusif de fraîcheur de la viande, et par conséquent ne constitue pas un facteur de choix décisif au moment de l'achat.

Au cours de ces dernières années, l'utilisation de CO dans la filière viande a été sérieusement débattue par des associations de protection des consommateurs, des scientifiques et divers organismes publics et privés. Cornforth et Hunt (2008) ont conclu que les inconvénients de cette technique sont dus principalement à l'image négative que les consommateurs ont vis-à-vis de ce gaz, en raison de sa toxicité. Certaines études récentes indiquent que les décisions d'achat des viandes par les consommateurs sont de plus en plus influencées par des considérations nutritionnelles et sanitaires. Une étude menée dans certains pays Scandinaves (Danemark, Norvège et Suède) sur les préférences sensorielles des consommateurs a montré que ces derniers préfèrent les biftecks conditionnés sous faible teneur en CO (0,4%) (Aaslyng *et al.*, 2010). En revanche, ceux conditionnés sous atmosphère modifiée suroxygénée (AM-surO<sub>2</sub>) ont été décrits suffisamment cuits avant terme, en raison de l'effet du brunissement prématuré (BP) pendant la cuisson (Hunt *et al.*, 1999). Généralement, dans les LVD, les consommateurs ne sont pas informés via l'étiquetage sur la nature des gaz se trouvant dans l'espace de tête des barquettes de viandes. En raison de ce manque d'information et de mauvaise compréhension vis-à-vis de cette technologie de la part des consommateurs, la communication doit être améliorée pour permettre une meilleure compréhension de cette technologie. Grebitus *et al.* (2013b) ont mené une étude sur les attitudes des consommateurs Américains et Allemands à l'égard des viandes hachées conditionnées sous CO. Les résultats de cette étude ont montré que les consommateurs des deux pays ont des préférences évidentes pour la couleur rouge cerise de la viande. De leur côté, les consommateurs américains ont exprimé leur préférence pour une durée de vie plus longue, à condition que la technologie utilisée soit connue. Toutefois, lorsque des informations sont fournies sur l'utilisation du CO via étiquetage, la volonté d'achat des consommateurs américains baisse et celle des consommateurs allemands augmente. Il est donc clair qu'une fois que les consommateurs sont préalablement informés, les préférences deviennent hétérogènes.

L'acquisition de connaissances personnelles par les individus et la forte exposition médiatique ont eu toujours un impact négatif envers cette technologie utilisant le CO. Toutes ces informations peuvent être utiles pour le secteur viande afin de prendre des décisions convenables en vue d'éventuels investissements dans ce type de conditionnement. A l'égard de toute nouvelle technologie, les différents pays développés diffèrent sur le plan réglementaire, et surtout selon l'attitude des consommateurs. Deux études récentes ont été réalisées pour évaluer l'opinion des consommateurs Polonais envers l'usage du CO pour le conditionnement des viandes rouges. L'étude a montré que ces consommateurs ont une préférence et un engouement envers ces viandes en raison de leur couleur attractive (Sakowska *et al.*, 2016). Par conséquent, les résultats de toutes ces études citées ci-dessus peuvent constituer un fondement solide pour une éventuelle réévaluation de l'interdiction d'utiliser le CO au sein de l'UE. En outre, un grand pourcentage des consommateurs a manifesté leur refus envers les viandes rouges attractives par leur couleur mais dont la Date Limite d'Utilisation Optimale (DLUO) est dépassée (se traduisant par le dégagement d'une odeur désagréable pendant l'ouverture des barquettes en cuisine). Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle l'utilisation de CO n'est pas trompeuse. Les dates de péremptions figurant sur l'emballage et la perception chez-

soi des autres attributs sensoriels contribueront sans nul doute à la prise de décision par le consommateur. De même, il est très intéressant de confirmer que le risque microbien sera écarté si ces viandes sont manipulées et cuites correctement.

## V. 2. L'interdiction du CO en Europe pourrait-elle être réévaluée ?

Dans les pays industrialisés, d'énormes pertes économiques sont enregistrées chaque année au niveau des LVD dues aux viandes décolorées qui sont souvent rejetées par les consommateurs pour une possible insalubrité. Afin de réduire ces pertes et de satisfaire les attentes légitimes des consommateurs vis-à-vis de la qualité du produit, des innovations technologiques en matière de conditionnement deviennent alors nécessaires. L'aspect réglementaire concernant l'utilisation du CO pour le conditionnement de la viande dans les pays développés a fait l'objet d'une vive controverse au cours des dernières années. En effet, l'UE a interdit son utilisation, principalement par crainte de masquer la détérioration du produit conditionné et d'exposer ainsi les consommateurs à un vrai risque microbiologique. Ces divergences ont créé des obstacles au commerce international et ont limité les possibilités d'exportation entre les différents pays (Grebitus *et al.*, 2013a). Un éventuel masquage de la détérioration microbiologique sur une viande conditionnée est donc l'un des arguments pour son interdiction. Cependant, sa combinaison avec du CO<sub>2</sub> serait une bonne alternative pour résoudre cet inconvénient.

Un prétraitement suivi d'un conditionnement sous vide (S/V) est une technologie très prometteuse car elle permet une meilleure stabilité de la couleur durant toute la phase de stockage tout en permettant que les symptômes de décoloration se produisent à la limite de la Date d'Utilisation Optimale (DUO).

La première fois que l'usage du CO a été réglementé pour le conditionnement des viandes aux États-Unis a été en 2002 (USFDA, 2002). Deux ans après, le même organisme fédéral Américain a autorisé l'utilisation de 0,4% de CO pour le conditionnement des viandes prêtes-à-cuire et considère cette pratique saine et sans risque pour la santé du consommateur (USFDA, 2004).

Durant presque 20 ans, la Norvège avait employé de faibles teneurs en CO dans le conditionnement des viandes. Toutefois, en 2004, le gouvernement Norvégien a suspendu son utilisation en raison de l'adoption de la réglementation européenne.

Plusieurs études concernant l'attitude des consommateurs européens à l'égard de l'utilisation du CO pour le conditionnement de la viande ont fait état de perceptions positives. Les consommateurs européens ont manifesté une grande préférence envers les biftecks conditionnés sous faible teneur en CO, malgré son interdiction (Sakowska *et al.*, 2017).

La Commission Européenne a rapporté que le taux de COHb formé dans le sang lors d'une possible inhalation de CO provoqué par l'ouverture des barquettes de viande contenant 0,3 à 0,5% CO dans leur espace de tête est insignifiant en comparaison avec d'autres sources d'inhalation (European Commission, 2001). Le rapport indique également que la quantité de CO présent dans la viande traitée peut être similaire à celle du CO généré d'une manière endogène chez l'homme. Il est également important de signaler qu'au cours de la cuisson, une quantité considérable de CO lié aux COMb et probablement au

COHb résiduelle de la viande sera perdue (de l'ordre de 85%).

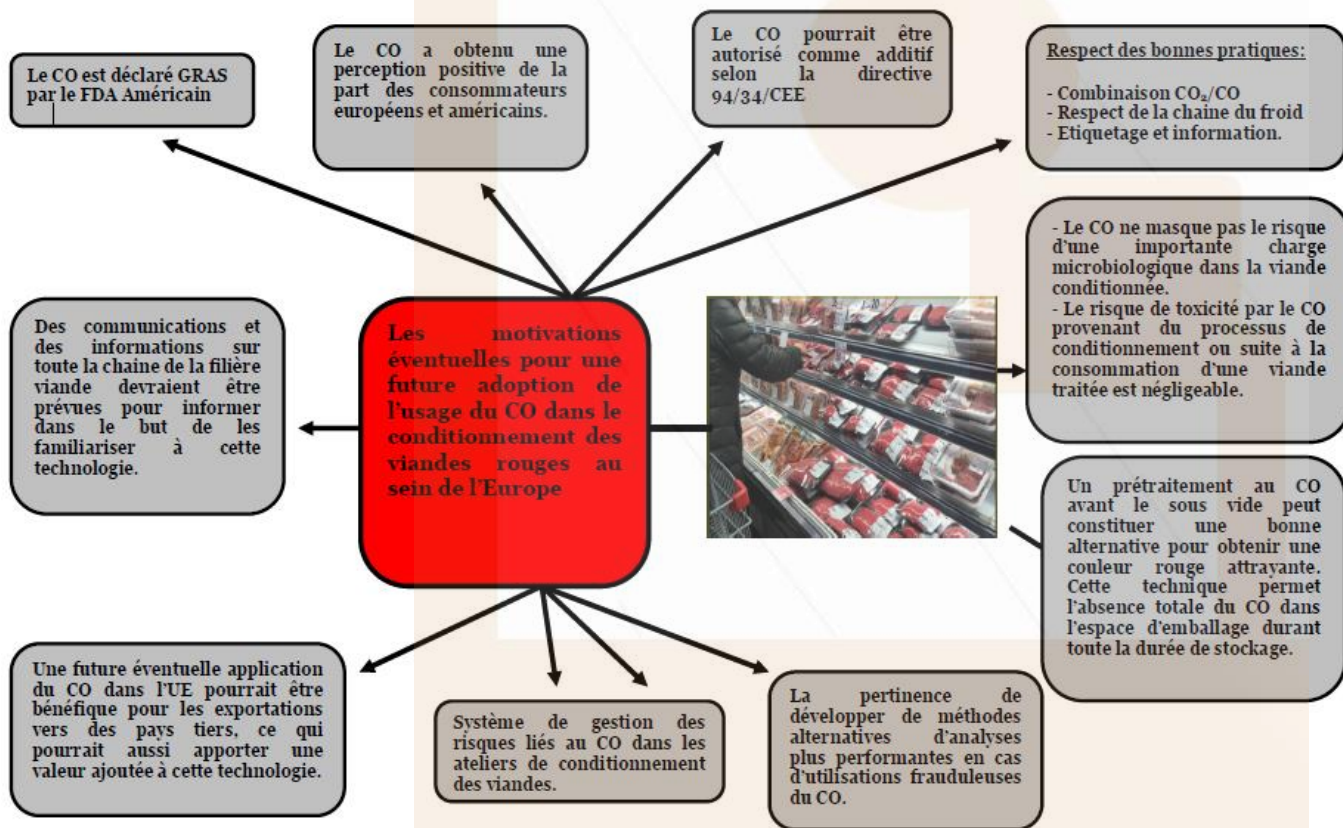
Au regard de l'UE, les gaz utilisés dans le conditionnement des viandes sont considérés comme des additifs, et pour que le CO soit autorisé comme tel, il doit répondre à certains critères conformément à la directive européenne (94/34/ Communauté Economique Européenne : CEE). Toutefois, le consensus à ce sujet pourrait prendre plusieurs années avant de parvenir à un accord commun. La viande conditionnée sous CO doit être correctement étiquetée afin que les consommateurs soient bien informés. En outre, sur l'étiquetage on doit pouvoir lire « la couleur de la viande ne constitue en aucun cas un indicateur fiable de signe de fraîcheur ».

Les résultats scientifiques pertinents doivent être accompagnés par des communications transparentes et rapides afin de s'assurer que les gouvernements, les

consommateurs et les medias disposent des informations dont ils ont besoin. Cela peut contribuer aussi à l'élaboration des politiques futures visant à assurer la protection des consommateurs. Tous ces éléments constituent des arguments solides pour une éventuelle réévaluation de l'interdiction de CO dans le conditionnement des viandes au sein d l'UE. En outre, cet éventuel recours au CO pour le conditionnement des viandes à l'échelle internationale pourrait être très rentable concernant les exportations et dans les systèmes UVC. Dans ce contexte, cette nouvelle technologie peut se révéler très efficace pour transformer les résultats émanant de la recherche scientifique en applications pratiques dans le secteur des viandes.

La Figure 2 explique sommairement les motivations pour un éventuel usage du CO dans l'industrie alimentaire.

Figure 2. Les motivations pour un éventuel usage du CO dans le conditionnement des viandes rouges



## VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Afin d'assurer un meilleur consensus pour une éventuelle application du CO dans le conditionnement des viandes ; nous pouvons dégager le bilan suivant :

- Il est impératif de mettre en œuvre dans les ateliers de conditionnement des viandes un système de gestion des risques liés au CO. Les grandes surfaces, les ménages à domicile doivent manipuler la viande selon les règles d'hygiène en respectant strictement la chaîne du froid.
- A une concentration < 1%, le CO en tant que tel n'exerce aucun effet antimicrobien. Dans ces conditions, l'accompagnement avec du CO<sub>2</sub> devient nécessaire pour inhiber la croissance bactérienne.
- La mention de la DLUO sur les barquettes de viandes traitées au CO est obligatoire.

- L'UE considère que les gaz utilisés pour le conditionnement des aliments sont des additifs, cependant le CO ne figure pas sur cette liste. Pour que ce dernier soit autorisé comme additif, les critères suivants doivent être en accord avec la directive 94/34/CEE : « Le CO ne doit pas présenter un danger pour la santé du consommateur à la concentration employée et, compte tenu des preuves scientifiques disponibles, il doit servir d'aide dans la fabrication, la transformation, la préparation, le traitement, le conditionnement, le transport ou l'entreposage des viandes, à condition qu'il ne soit pas utilisé pour masquer les effets d'une utilisation de matières premières défectueuses ou des pratiques et des techniques inappropriées (notamment peu hygiéniques) au cours de toutes ces opérations. Il faut également mesurer ses éventuels effets nocifs par

l'évaluation d'un possible effet additionnel et synergique. Et aussi, il faut évaluer ses effets potentiels d'intolérance, similaire à une substance étrangère au corps humain ».

- Le développement et la mise en place des techniques d'analyses plus performantes pour des cas d'utilisations frauduleuses du CO dans le conditionnement des viandes doivent être favorisés.

## CONCLUSION

L'utilisation du CO est particulièrement controversée. Certains pays approuvent son application, comme les États-Unis, tandis que les États membres de l'UE l'interdisent. L'application commerciale du CO dans le conditionnement des viandes n'est pas considéré comme faisable en raison des risques possibles sur la santé des personnes se trouvant dans les ateliers de conditionnement. Il est déjà indiqué que le CO peut masquer l'état réel d'une viande déjà altérée, et ceci est le principal argument soulevé pour son interdiction dans le conditionnement de la viande puisqu'il pourrait induire le consommateur en erreur.

Le risque de toxicité par le CO dû au processus de conditionnement ou à la suite d'une consommation de viandes traitées peut être négligeable. Un prétraitement au CO avant le S/V peut constituer une bonne alternative pour obtenir une couleur rouge attirante tout en permettant une meilleure maturation, et par conséquent une meilleure tendreté. De plus, l'avantage de cette technique permet une absence totale du CO dans l'espace de tête de la barquette UVC durant toute la durée de conservation.

Les différents pays se distinguent non seulement par leurs textes réglementaires, mais aussi concernant l'attitude

Tout cela favorisera les communications commerciales selon l'éthique grâce à la mise en place d'un cadre réglementaire efficace au bénéfice des consommateurs et des entreprises internationales. Les pays industrialisés à travers leurs agences de régulation doivent développer des normes cohérentes et des systèmes de réglementations robustes qui pourront répondre efficacement aux nouveaux défis.

de leurs consommateurs à l'égard des nouvelles technologies agro-alimentaires. Les récentes études européennes ont montré que les consommateurs européens sont favorables à la technique de conditionnement des viandes utilisant le CO. Il est donc intéressant de prévoir une bonne communication et une bonne information sur toute la chaîne de la filière viande pour informer les consommateurs et les familiariser avec cette technologie. En outre, une éventuelle autorisation de l'utilisation du CO dans l'UE pourrait être bénéfique pour les exportations vers des pays tiers, ce qui pourrait aussi apporter une valeur ajoutée à cette technologie. La capacité de détection des viandes traitées frauduleusement pourrait être confrontée à la justesse des méthodes utilisées. Il s'agit là d'une question pertinente en vue de garantir une concurrence loyale et d'instaurer un terrain de confiance entre partenaires. À la lumière de toutes les données citées dans cet article, il est possible de dire que l'application du CO pour le conditionnement des viandes peut être réévaluée. Cette technologie a démontré son efficacité, ce qui laisse prévoir un éventuel transfert des résultats académiques vers une application pratiques dans le secteur des viandes.

## Références bibliographiques :

- Aaslyng M.D., Tornngren M.A., Madsen N.T. (2010). Scandinavian consumer preference for beef steaks packed with or without oxygen. *Meat Science*, 85, 519–524.
- Anderson C.R., Wu W.-H. (2005). Analysis of carbon monoxide in commercially treated tuna (*Thunnus* spp.) and mahi-mahi (*Coryphaena hippurus*) by gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 7019–7023.
- Australia New Zealand Food Standards (2016). Code—Standard 1.3.3—Processing Aids. Available online on 1 March 2016: <http://www.foodstandards.gov.au/code/Documents/1.3.3%20Processing%20aids%20v157.pdf>
- Bièche-Terrier C., Legrand I. (2016). Conservation de viandes de veau conditionnées en UVCI avec du monoxyde de carbone. *Viandes & Produits Carnés*. 32, 3–3.
- Bartolucci G., Droghetti E., Focardi C., Bambagiotti-Alberti M., Nocentini M., Smulevich G. (2010). High throughput headspace GC-MS quantitative method to measure the amount of carbon monoxide in treated tuna fish. *Journal of Mass Spectrometry*, 45, 1041–1045.
- Chow C.-J., Chu Y.-J. (2004). Effect of heating on residual carbon monoxide content in co-treated tuna and myoglobin. *Journal of Food Biochemistry*, 28, 476–487.
- Chow C.-J., Hsieh P.-P., Tsai M.-L., Chu Y.-J. (1998). Quality changes during iced and frozen storage of tuna flesh treated with carbon monoxide gas. *Journal of Food and Drug Analysis*, 6, 622–623.
- 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.
- Djenane D., Beltrán J.A., Camo J., Roncalés P. (2016). Influence of vacuum-ageing duration of whole beef on retail shelf life of steaks packaged with oregano (*Origanum vulgare* L.) active film under high O<sub>2</sub>. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 4244–4257.
- Droghetti E., Bartolucci G.L., Focardi C., Bambagiotti-Alberti M., Nocentini M., Smulevich G. (2011). Development and validation of a quantitative spectrophotometric method to detect the amount of carbon monoxide in treated tuna fish. *Food Chemistry*, 128, 1143–1151.
- Eilert E.J. (2005). New packaging technologies for the 21<sup>st</sup> Century. *Meat Science*, 71, 122–127.
- EPA. (2007a). Air Trends—Carbon Monoxide—National Trends in CO Levels. Available online on 7 December 2007a: <http://www.epa.gov/airtrends/carbon.htm>
- EPA. (2007b). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Available online on 9 December 2007b: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>



- European Commission (EC). (2001). Health & Consumer Protection Directorate-General. Opinion of the Scientific Committee on Food on the Use of Carbon Monoxide as Component of Packaging Gases IN Modified Atmosphere Packaging. 13 December 2001. Available online on 18 December 2001: [http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scf/index_en.html)
- Fraqueza M.J., Ferreira M.F., Ouakinin J.S., Barreto A.S. (2000). Effect of carbon monoxide and argon in sliced turkey meat under modified atmosphere packaging (preliminary assays). In Proceedings of the 46<sup>th</sup> International Congress of Meat Science and Technology, Buenos Aires, Argentina, 27 August–1 September 2000; pp. 760–761.
- Grebitus C., Jensen H., Roosen J., Sebranek J. (2013a). Fresh meat packaging: Consumer acceptance of modified atmosphere packaging including carbon monoxide. *Journal of Food Protection*, 76, 99–107.
- Grebitus C., Jensen H.H., Roosen J. (2013b). US and German consumer preferences for ground beef packaged under a modified atmosphere—Different regulations, different behaviour? *Food Policy*. 40, 109–118.
- Hunt M.C., Sørheim O., Slinde E. (1999). Color and heat denaturation of myoglobin forms in ground beef. *Journal of Food Science*, 64, 847–851.
- Kristinsson H., Balaban M., Otwell W.S. (2006a). Microbial and quality consequences of aquatic foods treated with carbon monoxide or filtered wood smoke. In *Modified Atmospheric Processing and Packaging of Fish; Filtered Smokes, Carbon Monoxide Reduced Oxygen Packaging*; Otwell W.S., Kristinsson H.G., Balaban M.O., Eds., Blackwell: Ames, IA, USA, 2006a; pp. 65–86.
- Kristinsson H., Balaban M., Otwell W.S. (2006b). The influence of carbon monoxide and filtered smoke on fish muscle colour. In *Modified Atmospheric Processing and Packaging of Fish; Filtered Smokes, Carbon Monoxide Reduced Oxygen Packaging*; Otwell W.S., Kristinsson H.G., Balaban M.O., Eds., Blackwell: Ames, IA, USA, 2006b; pp. 29–52.
- 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 ± 1 °C for 25 days. *Meat Science*, 97, 534–541.
- Madani I.M., Khalfan S., Khalfan H., Jidah J., Aladin M.N. (1992). Occupational exposure to carbon monoxide during charcoal meat grilling. *Science of the Total Environment*, 114, 141–147.
- Mantilla D., Kristinsson H.G., Balaban M.O., Otwell W.S., Chapman F.A., Raghavan S. (2008a). Carbon monoxide treatments to impart and retain muscle colour in tilapia filets. *Journal of Food Science*, 73, C390–C399.
- Mantilla D., Kristinsson H.G., Balaban M.O., Otwell W.S., Chapman F.A., Raghavan S. (2008b). Color stability of frozen whole tilapia exposed to pre-mortem treatment with carbon monoxide. *Journal of Science and Food Agriculture*, 88, 1394–1399.
- Ohtsuki T., Kawasaki Y., Kubota H., Namiki T., Iizuka T., Shionoya N., Yoshii N., Ohara R., Tanaka M., Kobayashi H., et al. (2011). Improvement of carbon monoxide analysis in fish meat. *Journal of Food Hygienic Society of Japan*, 52, 130–134.
- 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., 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.
- 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.
- Sebranek J., Houser T. (2006). Use of CO for red meats: Current research and recent regulatory approvals. In *Modified Atmospheric Processing and Packaging of Fish*; Otwell, W.S., Ed., Blackwell Publishing: Ames, IA, USA.
- Sebranek J., Hunt M.C., Cornforth D.P., Brewer M.S. (2006). Perspective—Carbon monoxide packaging of fresh meat. *Food Technology*, 60, 184.
- Soni S., Andhare V.V. (2015). Quantitative Analysis of Carbon Monoxide in Frozen Foods. *Research Journal of Recent Sciences*, 4, 76–80.
- 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., 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.
- Underner M., Ingrand P., Favreau M., Mura P., Meurice J.-C. (2004). Intérêt des principaux indicateurs du tabagisme lors de la première consultation de sevrage tabagique. *Revue des Maladies Respiratoires*, 21, 705–710.
- USFDA. (2002). GRAS Notice Number GRN 000083; United States Food and Drug Administration: Washington, DC, USA.
- 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. (2017). 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.
- Waga M., Takeda S., Sakata R. (2018). A method for extracting carboxy-myoglobin from beef. *Animal Science Journal*, 89, 467–473.
- Watts D.A., Wolfe S.K., Brown W.D. (1978). Fate of <sup>14</sup>C carbon monoxide in cooked or stored ground beef samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 26, 210–214.
- Wilkinson B.H.P., Janz J.A.M., Morel P.C.H., Purchas R.W., Hendriks W.H. (2006). The effect of modified atmosphere packaging with carbon monoxide on the storage quality of master-packaged fresh pork. *Meat Science*, 73, 605–610.
- World Health Organization (WHO) (1999). Carbon monoxide. In *Environmental Health Criteria*, 213; World Health Organization: Geneva, Switzerland.