

Effet matrice de la viande : déterminants et implications nutritionnelles

Rôle de l'effet matrice de la viande dans la digestion et la biodisponibilité des nutriments

Mots clés : nutrition, digestion, biodisponibilité, mastication, matrice

Auteurs : Laëtitia Théron¹, Marie-Agnès Peyron^{2,3}, Maïa Meurillon¹, Jason Sicard¹, Pierre-Sylvain Mirade¹, Thierry Astruc¹, Didier Rémond²

¹ INRAE, UR370 Qualité des Produits Animaux (QuaPA), F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

² Université Clermont Auvergne, INRAE, UMR 1019 UNH, Unité de Nutrition Humaine, F-63000 Clermont-Ferrand, France

³ Université Clermont Auvergne, CROC EA 4847, F-63000 Clermont-Ferrand, France

Cet article propose une synthèse des connaissances scientifiques sur les enjeux nutritionnels des produits carnés, en abordant l'effet matrice de la viande et son rôle lors de la digestion et dans la biodisponibilité des nutriments.

Résumé

Les produits carnés constituent une source majeure de nutriments essentiels tels que les protéines de haute valeur biologique, le fer, le zinc et certaines vitamines. Leur contribution nutritionnelle dépend toutefois de la composition de la viande, elle-même étant très liée aux pratiques d'élevage, au type de viande (espèce, morceau), aux procédés de transformation et au contexte alimentaire, c'est-à-dire aux aliments ingérés en même temps que la viande : il s'agit de l'effet matrice de la viande. Cette synthèse met en évidence les principaux mécanismes influençant la biodisponibilité des nutriments de la viande et souligne les enjeux associés à leur valorisation nutritionnelle.

Abstract: The matrix effect of meat: determinants and nutritional implications

Meat products provide essential nutrients including high-quality proteins, iron, zinc and vitamins. Their nutritional contribution depends on meat matrix effect: its composition, processing conditions and dietary context. This review highlights the mechanisms influencing nutrient bioavailability and related nutritional challenges.

INTRODUCTION

Le terme "matrice" peut avoir des définitions variées selon les disciplines. Dans le domaine de la nutrition, la matrice alimentaire comprend les composants nutritifs et non nutritifs des aliments ainsi que leurs relations chimiques et microstructurales (Aguilera, 2019). Les nutriments ne sont répartis ni de manière homogène ni sous forme libre, mais intégrés dans des microstructures complexes. La nature de la matrice alimentaire, qui peut être modifiée par les traitements technologiques, influence la perception sensorielle de l'aliment, sa digestion, et la biodisponibilité des nutriments. L'effet matrice, clairement démontré pour les produits laitiers (Thorning *et al.*, 2017), consiste à considérer l'aliment comme une entité complexe dont les effets sur la santé peuvent différer de ceux attribués aux nutriments pris isolément.

La viande occupe une place importante dans l'alimentation humaine en raison de sa richesse en protéines de haute valeur biologique, ainsi qu'en minéraux et vitamines. Ce terme recouvre cependant une grande diversité de produits selon l'espèce animale, la pièce musculaire ou les procédés de transformation, ce qui rend souvent peu clairs les liens entre consommation de viande et santé. Par ailleurs, l'influence des caractéristiques de la matrice carnée sur la digestion et la biodisponibilité des nutriments reste encore relativement peu documentée. La notion d'effet matrice permet ainsi d'appréhender l'influence de la structure de la viande, des procédés de transformation et du contexte de consommation sur la biodisponibilité des nutriments. Cette synthèse bibliographique vise à examiner les principaux travaux ayant étudié l'effet matrice des produits carnés sous l'angle nutritionnel.

I. INTERACTIONS ENTRE LES ETAPES DE LA DIGESTION ET EFFET MATRICE

1.1. Déconstruction lors de la mastication

La déconstruction de la matrice viande débute lors de la mastication, au cours de laquelle la fragmentation mécanique du tissu musculaire et son hydratation par la salive conduisent à la formation d'un bol alimentaire cohésif (Mioche *et al.*, 2003 ; Yven *et al.*, 2005) (Figure 1). Ce processus dépend à la fois des propriétés de la viande et de l'adaptation du comportement masticatoire. La texture de la viande influence directement l'effort de mastication (Tableau 1). Une viande dure nécessite une force masticatoire plus importante et conduit à la formation d'un bol alimentaire plus ferme, tandis qu'une viande plus tendre génère généralement un bol plus mou (Mioche *et al.*, 2003). De même, les muscles riches en collagène ou de texture plus ferme nécessitent un temps de mastication plus long et donnent des bols plus résistants et plus granulaires (Mathonière *et al.*, 2000 ; Mioche *et al.*, 2003).

Les paramètres de mastication s'ajustent continuellement jusqu'à la déglutition. Les mouvements latéraux de la mâchoire, particulièrement efficaces pour fragmenter les matrices fibreuses comme le bœuf, permettent d'adapter la fragmentation à la structure du produit (Jalabert-Malbos *et al.*, 2007).

Cette capacité d'adaptation peut conduire à des bols alimentaires présentant des caractéristiques similaires, même lorsque les viandes initiales présentent des textures différentes (Yven *et al.*, 2005).

Au cours de la mastication, la transformation de la matrice est principalement macroscopique : la viande est fragmentée et sa surface devient plus homogène, tandis que la microstructure des fibres musculaires reste globalement préservée (Wang *et al.*, 2015). Néanmoins, certaines caractéristiques microstructurales influencent la fragmentation. Des fibres musculaires plus fines ou un réseau de collagène plus lâche favorisent ainsi la formation de particules de plus petite taille (Wang *et al.*, 2015).

Enfin, la composition de la viande contribue également aux propriétés du bol alimentaire. Le gras intramusculaire améliore la jutosité et la tendreté perçues (Frank *et al.*, 2016), facilitant la formation d'un bol plus lubrifié. À l'inverse, une viande maigre produit un bol plus sec.

Ainsi, les propriétés du bol alimentaire résultent de l'interaction entre les caractéristiques structurales et compositionnelles du muscle et l'adaptation dynamique du comportement masticatoire.

Tableau 1 : Adaptation de la mastication en fonction des facteurs biologiques du muscle et des traitements technologiques appliqués à la viande

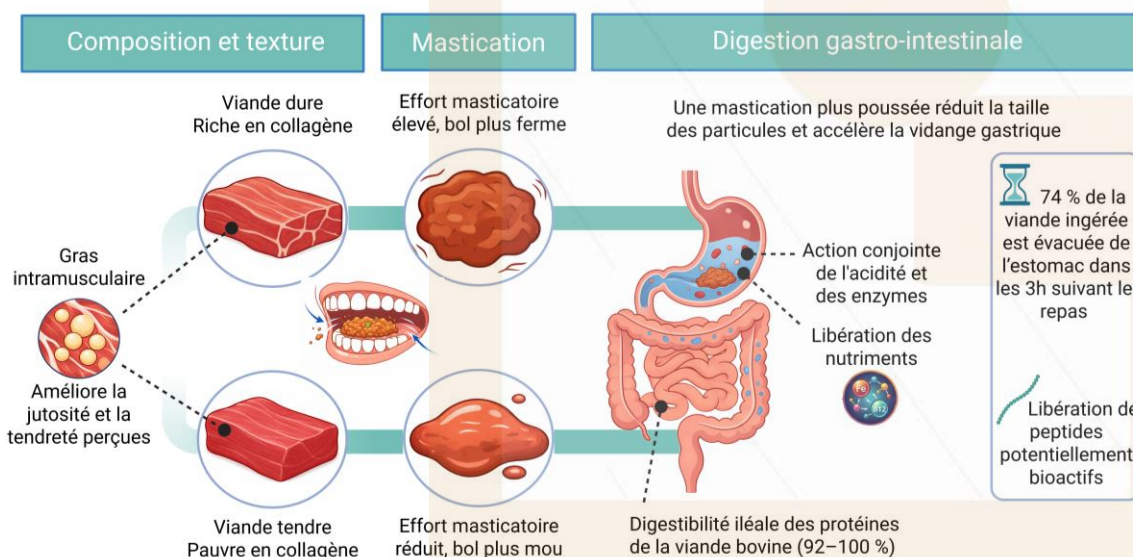
Facteur étudié	Condition / Variation	Effets sur la viande	Effets sur la mastication et le bol alimentaire	Référence
Type d'alimentation	Régime classique vs. enrichi en caméline	Peu d'effet sur la texture	Avec le régime standard, plus de cycles de mastication pour atteindre un bol qu'il est possible de déglutir	Li <i>et al.</i> , 2022
Type de muscle	Semi membraneux vs semi tendineux	Le muscle semi membraneux contient plus de collagène	Mastication plus longue pour le semi-membraneux	Mathoniere <i>et al.</i> , 2000
Teneur en gras intra-musculaire	Augmentation de la marbrure	Augmentation de la jutosité et de la tendreté sensorielle	Bol plus lubrifié, moins de cycles de mastication	Hocquette <i>et al.</i> , 2010
Fibre musculaire	Augmentation des fibres oxydatives	Fibres plus petites, plus riches en myoglobine	Mastication théoriquement demandant moins d'effort	Hocquette <i>et al.</i> , 2010
Maturation post mortem	Maturation longue	Diminution des résidus et augmentation de la tendreté	Mastication plus courte, moins de force requise	Veyrune et Mioche, 2001
Emballage	Sous oxygène vs. sous-vide (viande ovine)	Augmentation des pertes en eau et de la dureté sous oxygène	Diminution de la fréquence de mastication (adaptation à la dureté)	Li <i>et al.</i> , 2022
Température de cuisson	De 45 à 80°C	Augmentation de l'élasticité et de la résistance en compression et en cisaillement	Augmentation de la sensation de dureté et du travail musculaire (mastication plus énergique)	Mathevon <i>et al.</i> , 1995.
Couple temps / température de cuisson	70 °C/30 min, 70 °C/60 min, 90 °C/30 min, 90 °C/60 min	Pas de modification de la cohésion, meilleure tendreté à 90°C	Même nombre de cycles et durée de mastication, meilleure incorporation de salive à 90 °C/60 min	Pematilleke <i>et al.</i> , 2020

ENCADRE 1

Caractérisation du bol alimentaire

Le bol alimentaire "prêt à déglutir" est caractérisé à l'aide de méthodes instrumentales complémentaires (Mathevon *et al.*, 1995). Les propriétés mécaniques sont évaluées par des tests de texture, de cisaillement ou de compression, tandis que l'électromyographie permet d'estimer l'effort masticatoire. La granulométrie est analysée par tamisage, diffraction laser ou analyse d'images, montrant que la taille finale des particules est relativement stable pour un aliment donné (Peyron *et al.*, 2004). Des approches d'imagerie, de rhéologie et des mesures physico-chimiques complètent cette description intégrée du bol alimentaire en lien avec l'effet matrice de la viande.

Figure 1. De la texture initiale de la viande à la digestion : rôle de la mastication et des processus gastro-intestinaux. Créée dans BioRender. Theron, L. (2026) <https://BioRender.com/nyrz4pf>



1.2. Digestibilité dans le tractus gastro-intestinal - Bioaccessibilité et biodisponibilité des nutriments de la viande

1.2.1. Digestion dans l'estomac

La digestion gastrique réduit la taille des particules alimentaires par l'action conjointe du péristaltisme, de l'acidité gastrique et de la dégradation des protéines par l'activité enzymatique (Figure 1). L'acide chlorhydrique, produit dans l'estomac, dénature les protéines de la viande, facilitant l'action de la pepsine qui initie la protéolyse. Le brassage mécanique de l'estomac contribue également à la fragmentation des particules et à l'émulsification partielle des graisses. Cette phase joue un rôle clé dans l'expression de l'effet matrice de la viande, en conditionnant notamment la

libération du fer héminique et de la vitamine B12, détachés de leurs protéines porteuses sous l'effet de l'acide et des enzymes digestives. La durée de comminution gastrique, la réduction en plus petits fragments, augmente lorsque les particules dégluties sont de grande taille. Ainsi, une mastication plus poussée réduit le temps de vidange gastrique, comme montré pour des repas contenant des cubes de jambon (Pera *et al.*, 2002). De même, des études par scintigraphie indiquent un temps de séjour gastrique plus long lorsque la taille des morceaux ingérés est

élevée (Weiner *et al.*, 1981). Si un temps de séjour prolongé peut en partie compenser une mastication insuffisante, il modifie l'exposition aux enzymes gastriques et influence la nature des produits entrant dans le duodénum, ainsi que la cinétique d'absorption des nutriments. La digestion gastrique des protéines de la viande *in vivo* reste peu documentée. Des études chez le mini-porc, basées sur le prélèvement du contenu duodéal après ingestion de viande de bœuf cuite, montrent qu'environ 74% de la viande ingérée est évacuée de l'estomac dans les trois heures suivant le repas (Bauchart *et al.*, 2007). Cette digestion est à la fois rapide et efficace : aucun peptide initialement présent dans la viande cuite n'est retrouvé dans le

1.2.2 Digestion dans l'intestin grêle

Dans l'intestin grêle, les produits de la protéolyse gastrique sont hydrolysés par les enzymes pancréatiques, libérant des acides aminés libres et de petits peptides, ensuite absorbés ou dégradés au niveau des entérocytes. Des études chez le mini-porc montrent que le nombre de peptides d'origine carnée présents dans le jéjunum est supérieur à celui observé à la sortie de l'estomac (Bauchart *et al.*, 2007). Les peptides identifiés de manière reproductible sont enrichis en résidus proline, connus pour leur résistance à l'hydrolyse digestive (Vanhoof *et al.*, 1995). Parmi eux, seuls certains fragments, notamment issus de l'actine et de la Glyceraldehyde-3-Phosphate Dehydrogenase (GAPDH), persistent jusqu'au jéjunum, suggérant une stabilité particulière vis-à-vis des enzymes pancréatiques. Les enzymes de l'intestin grêle ne sont généralement pas limitantes pour l'hydrolyse des protéines alimentaires. La digestion intestinale dépend donc principalement de la structure macroscopique et microscopique de la matrice protéique, ainsi que du temps de transit, *i.e.* des paramètres fortement influencés par la préparation des aliments. L'impact du mode de cuisson de la viande sur la digestion a été étudié chez le mini-porc : malgré des modifications structurales des protéines, le flux iléal de protéines non digérées reste faible (< 6%) et indépendant de la température de cuisson (Bax *et al.*, 2013). Des résultats similaires ont été observés chez l'Homme avec des viandes cuites à différentes

contenu duodéal, indiquant une dégradation rapide dans l'estomac (Bauchart *et al.*, 2006). Les peptides détectés en sortie gastrique sont de petite taille (inférieure à 2 kDa), caractéristiques de l'action de la pepsine, et proviennent principalement de l'actine et de la myosine. Une fraction de ces peptides est retrouvée de manière reproductible entre individus, suggérant que certains fragments sont générés de façon constante au cours de l'hydrolyse gastrique, indépendamment du muscle ou du mode de préparation. Il n'y a actuellement aucune donnée sur l'impact des modifications structurales générées par les traitements technologiques des viandes, sur leur digestion *in vivo* dans l'estomac.

températures (Oberli *et al.*, 2015). En revanche, chez le rongeur, une digestion plus faible a été observée dans le cas d'une viande bouillie, en lien avec une oxydation accrue des protéines (Oberli *et al.*, 2016). De nombreuses études mettent en évidence les effets physiologiques de peptides issus de la digestion des protéines alimentaires, notamment des activités antihypertensives, opioïdes, immunomodulatrices ou anxiolytiques (Lee *et al.*, 2024). Ces peptides bioactifs confèrent à la viande des propriétés fonctionnelles au-delà de son apport en acides aminés, qui doivent être intégrées dans la notion d'effet matrice. Après ingestion de viande bovine ou de poisson, plusieurs peptides libérés de façon reproductible présentent des séquences à activité antihypertensive par inhibition de l'enzyme de conversion de l'angiotensine (Bauchart *et al.*, 2007). Pour exercer un effet systémique, ces peptides doivent toutefois résister à l'hydrolyse intestinale, être absorbés et rester stables dans la circulation. L'absorption de dipeptides antihypertenseurs a été démontrée chez l'Homme (Matsui *et al.*, 2002), bien que son importance nutritionnelle reste à quantifier. Néanmoins, une substitution partielle des glucides par de la viande rouge a été associée à une baisse de la pression artérielle chez des sujets hypertendus (Hodgson *et al.*, 2006).

Bien que certains peptides issus de la viande puissent résister partiellement à l'hydrolyse digestive,

leur contribution au flux d'azote en fin d'intestin grêle reste limitée. En effet, le transit intestinal, d'une durée moyenne de 4 à 6 heures, permet l'absorption de la quasi-totalité des nutriments. Les résidus non digérés atteignant le côlon sont faibles, la viande étant pauvre en fibres, et concernant principalement des tissus conjonctifs ou des protéines résistantes. En revanche,

1.3. Digestibilité des protéines carnées et score de qualité

La digestibilité d'un aliment correspond à la fraction de nutriments absorbés par rapport au flux entrant dans un segment donné du tractus digestif. Au cours de la digestion, les protéines présentes dans le contenu digestif passent d'une origine majoritairement alimentaire à la sortie de l'estomac, à endogène dans l'iléon, puis microbienne dans les fèces, ce qui distingue digestibilité apparente et réelle. L'absorption des acides aminés ayant lieu dans l'intestin grêle, la digestibilité iléale réelle constitue l'indicateur le plus pertinent de leur biodisponibilité. Les données de la littérature montrent une excellente digestibilité iléale

1.4. Relation entre les caractéristiques de la digestion et l'assimilation des protéines de la viande chez l'homme

La cinétique de digestion des protéines alimentaires influence directement l'efficacité de leur assimilation, et la cinétique optimale peut varier selon les individus. Chez les personnes âgées présentant des apports protéiques suboptimaux, il est notamment recommandé de concentrer l'apport protéique sur un seul repas ou de privilégier des protéines rapidement digérées afin de stimuler l'aminoacidémie postprandiale et la synthèse protéique (Dardevet *et al.*, 2021). Ces observations ont conduit au développement de stratégies nutritionnelles visant à limiter la sarcopénie liée à l'âge. Dans ce contexte, la viande apparaît comme un aliment d'intérêt, en raison de sa forte teneur en protéines très digestibles. Les données de la littérature suggèrent ainsi que la viande peut être considérée comme une source de protéines à digestion rapide. La cinétique d'apparition des acides aminés dans le sang après ingestion de viande est comparable à celle observée avec les protéines du lactosérum, avec un décalage d'environ 20 minutes lié au temps de transit gastrique plus long des aliments solides. Les aminoacidémies

une consommation excessive de viande rouge peut accroître l'arrivée de protéines non digérées dans le côlon, favorisant leur fermentation par le microbiote et la production de métabolites de putréfaction potentiellement délétères pour l'équilibre intestinal et la muqueuse colique.

des protéines de la viande bovine (92–100%), quel que soit le mode de mesure (Tableau 2). Celle-ci est peu influencée par la quantité ingérée ou par le mode de cuisson, même si l'augmentation des apports accroît mécaniquement les résidus protéiques entrant dans le côlon (Bax *et al.*, 2013). Enfin, l'équilibre en acides aminés indispensables de la viande est proche des besoins humains, ce qui explique des scores de qualité généralement supérieurs à 100, la valine, sans être limitante, étant le plus souvent l'acide aminé le moins représenté.

maximales sont généralement atteintes entre 90 et 180 minutes après ingestion de viande de bœuf, de volaille ou de poisson (Soucy et Leblanc, 1998). En raison de sa richesse en protéines et de sa digestion rapide, la viande constitue ainsi un aliment pertinent pour stimuler la synthèse protéique et lutter contre la sarcopénie chez les personnes âgées (Symons *et al.*, 2009). Toutefois, une mastication inefficace peut ralentir l'apparition des acides aminés dans le sang, compromettant leur utilisation métabolique, ce qui souligne le rôle clé de la mastication comme étape préparatoire de la digestion des aliments solides (Rémond *et al.*, 2007).

Plusieurs études ont évalué l'impact du mode de préparation de la viande sur l'aminoacidémie postprandiale chez l'Homme. Chez les jeunes adultes, aucune différence significative n'a été observée entre des viandes cuites selon des conditions très différentes, que ce soit grillées ou cuites sous vide, ni entre des cuissons à basse ou haute température (Prodhan *et al.*, 2020).

Tableau 2 : Mesures *in vivo* de la digestibilité iléale des protéines de la viande et score de qualité (DIAAS) rapportés dans la littérature

Pièce de viande	Préparation	Mesure	Chez	Digestibilité iléale	DIAAS (Adultes)	Référence
Filet de veau	Cuisson à cœur 30 min 60 °C 75 °C 95 °C	Viande marquée. Mesure de la digestibilité iléale réelle (TID)	Mini-porc	95% 96% 95%	-	Bax <i>et al.</i> , 2013
Filet de bœuf	Cuisson à cœur 30 min 55 °C 90 °C	Viande marquée. Mesure de la digestibilité iléale réelle (TID)	Homme	94% 90%	-	Oberli <i>et al.</i> , 2015
Steak de bœuf	Cru Température à cœur 71 °C : Bouilli Grillé (gril) Grillé (poêle) Rôti	Alimentation continue, collecte du contenu iléal. Repas sans protéine pour estimer les sécrétions endogènes. Mesure de la digestibilité iléale standardisée (SID)	Rats	97% 98% 97% 98% 98%	97 99 80 98 91	Hodgkinson <i>et al.</i> , 2018
Poulet	40 min, autocuiseur	Viande marquée. Méthode des doubles traceurs	Homme	89%	-	Kashiap <i>et al.</i> , 2018
Steak haché	Cru Bruni	Mesure de la SID	Porc en croissance	100% 100%	121 99	Bailey <i>et al.</i> , 2020
Filet de bœuf	Atteinte température à cœur 56 °C 64 °C 72 °C			100% 100% 100%	111 130 107	
Longe de porc	Atteinte température à cœur 63 °C 68 °C 72 °C			98% 98% 98%	139 118 117	Bailey <i>et al.</i> , 2020
Burger de bœuf 7% MG 20% MG	Atteinte température à cœur 71 °C	Mesure de SID	Porc en croissance	97% 92%	119 110	Fanelli <i>et al.</i> , 2022
Burger de porc 20%MG				98%	119	
Filet de bœuf	75 °C à cœur pendant 30 min	Animal marqué. Mesure de la digestibilité iléale réelle (TID)	Miniporc	96%	112	Le Bourgot <i>et al.</i> , 2023

En revanche, chez les personnes âgées, une viande peu cuite peut entraîner un ralentissement de la digestion des protéines et une moindre efficacité métabolique, du fait probablement d'une déstructuration mécanique moins efficace lors de la mastication (Buffière *et al.*, 2017). L'importance de la structure physique de la viande est également illustrée par l'étude de Pennings *et al.* (2013), montrant que, chez des sujets âgés porteurs de prothèses dentaires, la viande hachée est digérée plus rapidement et ses acides

aminés mieux utilisés que ceux issus de viande consommée en morceaux.

En conclusion, quelle que soit la pièce ou le mode de préparation, la viande constitue une source de protéines de haute qualité, offrant un apport équilibré en acides aminés indispensables digestibles. Les modifications de la matrice liées à la préparation influencent peu cette qualité, mais peuvent moduler la vitesse de digestion et l'apparition des acides aminés dans le sang.

ENCADRE 2

Réactivité chimique au cours de la digestion

La digestion gastro-intestinale crée des conditions favorables à l'oxydation des protéines et des lipides de la viande, notamment en milieu gastrique acide et en présence de fer héminique (Rysman *et al.*, 2016). Une oxydation modérée des protéines peut améliorer leur digestibilité, tandis qu'une oxydation excessive réduit leur sensibilité aux enzymes digestives (Santé-Lhoutellier *et al.*, 2007). L'oxydation lipidique peut conduire à la formation de composés potentiellement nocifs, dont l'ampleur dépend de la composition du bol alimentaire et de l'équilibre entre pro- et antioxydants (Van Hecke *et al.*, 2014).

II. BIOACCESSIBILITE ET BIODISPONIBILITE DES MICRONUTRIMENTS DE LA VIANDE

2.1. Bioaccessibilité et biodisponibilité du fer

Le métabolisme du fer se distingue des autres minéraux car il n'existe aucun mécanisme physiologique d'excrétion ; la régulation se fait uniquement par l'absorption. Environ 90% des besoins quotidiens en fer proviennent de la dégradation des globules rouges. Les pertes obligatoires (peau, intestins, urine, voies respiratoires) et les pertes menstruelles doivent être compensées par l'alimentation. Pour établir les apports recommandés, il faut estimer la biodisponibilité du fer, soit la proportion absorbée et utilisée par l'organisme (pour revue, Sheffield *et al.*, 2024). Il existe deux types de fer alimentaire : le fer non héminique, présent à la fois dans les aliments d'origine végétale et dans les tissus animaux, et le fer héminique, qui provient de l'hémoglobine et de la myoglobine des aliments d'origine animale. Le fer héminique est mieux absorbé (15 à 35%), représentant environ 40% du fer absorbé total, bien qu'il ne représente que 10 à 15% des apports. Le fer non héminique présente une absorption variable selon les inhibiteurs et activateurs. En outre, la viande

apporte du fer non héminique associé à des peptides et acides aminés qui en facilitent l'absorption ; cet élément sera spécifiquement discuté dans la partie concernant le "facteur viande". Globalement, on estime qu'un repas contenant de la viande permet une absorption du fer bien supérieure à celle d'un repas équivalent strictement végétal équivalent sur le plan calorique (Stubbendorff *et al.*, 2025).

Plusieurs composants peuvent réduire la biodisponibilité du fer : (i) les phytates, présents dans les céréales/légumineuses qui ont un fort effet inhibiteur pouvant être réduit par fermentation, germination ou ajout de phytase (Hurrell, 2004) ; (ii) les polyphénols, contenus dans le thé, café, vin, et légumes, dont le type et la quantité influencent l'absorption du fer (Brune *et al.*, 1989) ; (iii) le calcium qui inhibe l'absorption du fer héminique et non héminique, avec un effet plus marqué dans les études à repas unique (Lynch, 2000) ; et enfin (iv) certaines protéines de lait, œuf et soja qui peuvent former des

complexes avec le fer non héminique et inhiber sa biodisponibilité (Cook et Monsen, 1976).

À l'inverse, certaines molécules favorisent l'absorption du fer. C'est notamment le cas de la vitamine C, qui facilite l'absorption du fer non héminique en le maintenant sous une forme plus disponible. Cependant, elle est sensible à la cuisson et peut être remplacée par l'érythorbate (Lynch et Cook, 1980). Les tissus musculaires, comme la viande et le poisson, améliorent également l'absorption du fer non héminique : cet effet, appelé « facteur viande », sera présenté dans la section suivante. L'absorption du fer varie selon l'état nutritionnel et physiologique : les déficits en riboflavine ou en vitamine A modulent son métabolisme (Powers, 2003), et les infections réduisent sa biodisponibilité.

Au-delà de la composition initiale de la matrice carnée, les procédés de transformation peuvent également modifier les quantités et les formes

chimiques du fer. La cuisson, le salage, la fermentation, le séchage ou encore l'ajout d'ingrédients antioxydants peuvent influencer la stabilité du fer héminique, favoriser sa libération depuis la myoglobine ou au contraire modifier son environnement moléculaire. Ces transformations peuvent ainsi conduire à une redistribution entre fer héminique et fer non héminique, mais aussi modifier la réactivité du fer au sein de la matrice alimentaire, notamment vis-à-vis des phénomènes d'oxydation lipidique et protéique. La prise en compte de ces effets technologiques est donc essentielle pour mieux comprendre la biodisponibilité du fer dans les produits carnés transformés. Elle constitue également un enjeu important pour les approches de modélisation, qui doivent intégrer non seulement la teneur totale en fer, mais aussi sa forme chimique, son accessibilité digestive et son interaction avec les autres constituants de la matrice.

ENCADRE 3

Carence en fer : un enjeu majeur de santé publique

La carence en fer est un problème multifactoriel aux conséquences durables sur la santé physique et mentale, notamment chez les enfants. Une stratégie intégrée, combinant supplémentation, recommandation nutritionnelle, fortification et lutte contre les infections est essentielle pour éradiquer cette carence à l'échelle mondiale. En cela, élucider les mécanismes modulant le « facteur viande » contribuerait à améliorer les connaissances du domaine.

2.2. Bioaccessibilité et biodisponibilité des autres nutriments de la viande

La viande fournit du zinc sous une forme hautement biodisponible et, consommée avec des aliments végétaux, elle améliore également l'absorption du zinc non héminique (Consalez *et al.*, 2022). Elle constitue par ailleurs une excellente source de vitamine B12 facilement absorbable (Watanabe, 2007), ainsi que de vitamines liposolubles telles que la vitamine A et, dans une moindre mesure, la vitamine D, dont l'assimilation est favorisée par la matrice animale (Sheffield *et al.*, 2024). La viande apporte également du sélénium, du phosphore, d'autres vitamines du groupe B et des peptides bioactifs, ce qui explique sa haute densité nutritionnelle et sa contribution notable aux apports en micronutriments essentiels (Ruxton et Gordon, 2024).

Le mode de cuisson influence toutefois la biodisponibilité des micronutriments. La dénaturation thermique des protéines s'accompagne de pertes de jus pouvant entraîner la fuite de composés hydrosolubles, dont certains peptides bioactifs comme la carnosine et l'ansérine (Peiretti *et al.*, 2012). De même, une partie du fer héminique est convertie en fer non héminique, réduisant ainsi sa biodisponibilité (Gandemer *et al.*, 2020). De plus, les vitamines thermosensibles du groupe B, notamment B1 et B6, peuvent être partiellement dégradées lors de cuissons prolongées (Kondjoyan *et al.*, 2018). Ainsi, le choix du procédé thermique joue un rôle déterminant dans la préservation de la qualité nutritionnelle de la viande (Tableau 3).

Tableau 3 : Effet des modes de cuisson sur les teneurs en nutriments de la viande

Modes de cuisson (repères T°)	Protéines & texture	Fer & zinc	Vitamines B (B1/B2/B3/B6/B12)	Autres composés (créatine / taurine / carnosine)	Néoformés / remarques
Sous-vide basse T° (50-65°C à cœur, longue durée)	Dépliage modéré des protéines entraîne une amélioration de la tendreté ; perte à la cuisson minimale.	Minéraux stables (90-100%, si jus consommés).	Très bonne rétention des vitamines B (souvent >80-90%) par rapport aux cuissons « dures ».	Créatine/taurine/carnosine mieux préservées (pas d'eau de cuisson).	Pas d'AAH/HAP (températures modérées).
Vapeur (environ 100°C)	Peu d'oxydation ; la tendreté dépend du temps de cuisson.	Peu de pertes (pas d'eau d'immersion).	B1/B6 modérément sensibles ; B12 mieux préservée qu'à l'ébullition prolongée.	Peu de pertes des composés hydrosolubles.	Pas d'AAH/HAP.
Bouillage (95-100°C, dans l'eau)	Dénaturation + pertes de jus conduit à une texture plus ferme, si prolongé.	Fer/zinc globalement stables, mais une part migre dans le jus de cuisson.	B1 (thiamine) : pertes fréquentes (30-60%) ; B6 et B12 en baisse si cuisson prolongée.	Taurine et carnosine : fortes pertes dans le jus ; conversion partielle de la créatine en créatinine.	Pas d'AAH/HAP.
Braisage / mijotage (90-95°C longue durée)	Collagène en gélatine (tendreté augmentée) ; pertes hydrosolubles dans le jus.	Minéraux : surtout transfert dans le jus de cuisson.	B1/B6 : pertes importantes, si longues durées ; B12 sensible aux temps prolongés.	Diminution de carnosine/taurine par lessivage ; créatine partiellement convertie en créatinine.	Pas d'AAH/HAP.
Rôtissage / caisson au four (160-200°C air sec)	Déshydratation qui concentre les nutriments ; structure plus ferme si trop cuit.	Fer/zinc par 100 g peuvent paraître augmentés par concentration ; fer héminique diminue partiellement (conversion en non-héminique).	Vitamines B : baisse modérée (B1 la plus sensible) ; B12 : pertes possibles selon la durée.	Créatine convertie en créatinine sous l'effet de la chaleur.	Peu d'AAH/HAP négligeables (pas de flamme).
Poêlage / sautage (≈160-200°C à la surface)	Déshydratation rapide ; bon compromis si cuisson brève.	Minéraux inchangés (pas d'eau) ; fer héminique peut baisser si cuisson poussée.	B1/B6 : pertes faibles à modérées si cuisson courte.	Conversion de la créatine en créatinine avec cuisson forte/longue.	AAH possibles si surface très brunie / « bien cuit » ; limiter temps & température.
Grillage / barbecue (surface >220°C ; flamme)	Saisie forte ; risque de dessèchement, si prolongé.	Minéraux stables ; fer héminique : conversion partielle, si cuisson très poussée.	B12 et B1 sensibles aux hautes températures/durées (pertes élevées si cuisson prolongée).	Conversion de créatine en AAH via réaction créatine-AA-sucres à haute T°.	AAH/HAP augmentent (contact flamme, fumée, graisse qui goutte).
Micro-ondes (chauffage volumique)	Chauffage parfois hétérogène.	Pas d'effet direct sur les minéraux.	B12 : pertes marquées ; autres vitamines B variables selon la durée.	Carnosine : pertes moindres que lors du bouillage.	Pas de HAP ; éviter une cuisson prolongée localisée.
Friture (huile 170-190°C)	Déshydratation/prise de gras.	Minéraux : pas d'eau donc rétention élevée.	Vitamines B : pertes modérées si temps court ; les longues fritures augmentent les pertes.	Carnosine/taurine mieux retenues que lors du bouillage (pas d'eau).	AAH possibles si brunissement intense ; HAP moindres qu'au barbecue (sans fumée).

AAH : Amines Aromatiques Hétérocycliques, HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

2.3. Etude de l'effet matrice de la viande sur la biodisponibilité d'autres nutriments issus d'autres aliments : le "facteur viande" ou "meat factor"

Le terme de "facteur viande", ou "meat factor" ou encore "MFP factor" pour "meats, fish and poultry", désigne le phénomène par lequel la présence de viande dans un repas, ou plus largement d'un aliment d'origine animale musculaire (viande rouge, volaille ou poisson), augmente l'absorption de certains micronutriments provenant des autres aliments du repas (Figure 2). Cet effet matrice de la viande a d'abord été mis en évidence pour le fer non héminique. Dès la fin des années 1960, Layrisse et al. (1968) ont observé que l'ajout de 60 g de muscle de veau ou de poisson à un plat de maïs multipliait par deux ou plus l'absorption du fer non héminique du maïs. Cet effet a ensuite été confirmé et étendu à d'autres viandes et à d'autres micronutriments, notamment le zinc. On parle "d'effet matrice" car la viande, par sa composition et les interactions entre ses composants lors de la digestion, agit comme un facteur facilitateur de l'absorption de micronutriments issus d'aliments végétaux consommés conjointement. Il est important de souligner que le facteur viande n'est pas lié uniquement à l'apport de fer héminique de la viande. Bien que la viande fournisse du fer héminique hautement assimilable, ce fer héminique est absorbé par un mécanisme spécifique indépendant (absorption sous forme de porphyrine intacte) et n'augmente pas l'absorption du fer végétal.

Le facteur viande renvoie spécifiquement à d'autres composants de la viande qui améliorent l'assimilation du fer non héminique végétal et du zinc lors d'un repas. Historiquement, on a d'abord parlé d'"effet viande" sur l'absorption du fer non héminique, identifié comme un élément justifiant les meilleures réserves en fer des diètes omnivores comparées aux diètes végétariennes. Malgré les études, la nature précise du facteur viande n'a pas encore été entièrement élucidée. Il est probable qu'il s'agisse d'un effet multifactoriel faisant intervenir plusieurs composés de la matrice carnée. Parmi les mécanismes proposés, le plus documenté concerne le rôle des protéines de la viande et de leurs produits de digestion. En effet, lors de la digestion gastrique, puis intestinale, les protéines musculaires sont partiellement hydrolysées en peptides de différentes tailles. Ces

peptides, en particulier ceux contenant des résidus cystéine et histidine, pourraient former des complexes avec le fer non héminique et le maintenir soluble dans la lumière intestinale (Hurrell *et al.*, 2006). De plus, les peptides contenant un résidu cystéine pourraient également réduire les ions Fe^{3+} en Fe^{2+} (Kapsokefalou et Miller, 1991). Des expériences ont montré que des mélanges d'acides aminés simulant la composition d'une protéine de poisson reproduisaient l'effet amplificateur du poisson entier sur l'absorption du fer (Martinez-Torres et Layrisse, 1970). De même, l'ajout de cystéine libre ou de glutathion (tripeptide riche en cystéine) à un repas végétal augmente significativement l'absorption du fer, de manière comparable à celui de la viande de bœuf (Layrisse *et al.*, 1984). Inversement, l'oxydation des groupements sulfhydryle (-SH) des cystéines dans un bouillon de viande inhibe l'effet stimulant de ce bouillon sur l'absorption du fer (Seth et Mahoney, 2001). Ces résultats suggèrent fortement que les peptides soufrés issus de la digestion de la viande jouent un rôle central, en réduisant le fer ferrique (Fe^{3+}) en fer ferreux (Fe^{2+}) plus absorbable (Kapsokefalou et Miller, 1991). Cette réduction prévient sa précipitation ou sa chélation par les inhibiteurs, comme les phytates. En effet, le fer ferreux se complexant aux peptides reste en solution et peut traverser la barrière intestinale plus aisément.

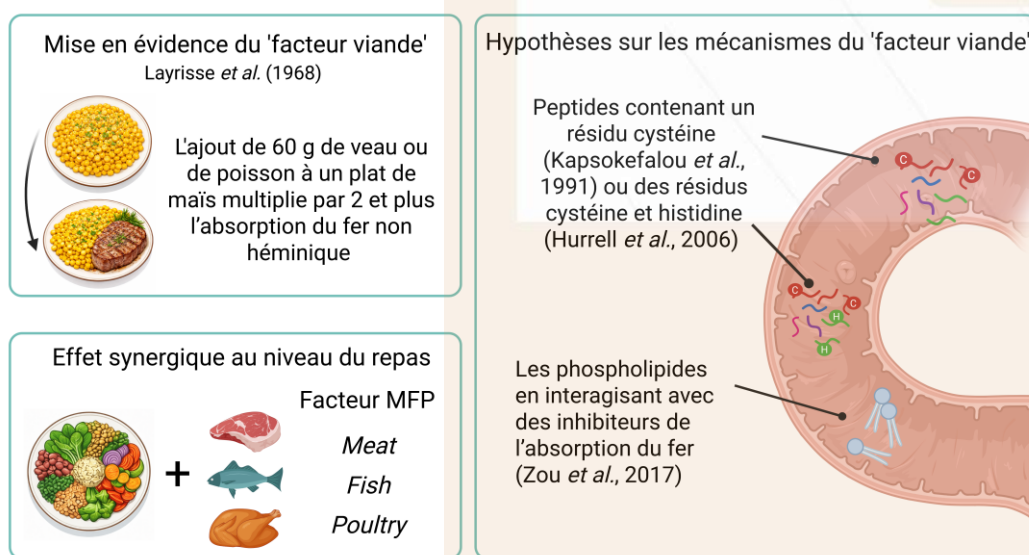
Plusieurs études *in vitro* appuient l'hypothèse que les peptides de digestion de la viande constituent le principal facteur viande, mais également ceux issus du poumon de bœuf (O'Flaherty *et al.*, 2019) et du foie de veau (Martinez-Torres *et al.*, 1974). Par exemple, des hydrolysats de muscle de bœuf digérés *in vitro* ont révélé que les fractions peptidiques riches en résidus cystéine et histidine chélaient efficacement le fer et amélioreraient son absorption dans des modèles cellulaires (Glahn et van Campen, 1997). De même, l'ajout de protéines myofibrillaires isolées (principalement actine-myosine) de viande augmente la capacité de transfert du fer dans un système *in vitro* ; cet effet étant attribué à la richesse en cystéine de ces protéines (Seth et Mahoney, 2000 ; Vatterm *et al.*, 2001). Il apparaît que les peptides partiellement digérés

de la viande, plutôt que les acides aminés libres, sont responsables du facteur viande (Martinez-Torres et Layrisse, 1970), car une protéine animale comme l'ovalbumine d'œuf, qui a un profil en acides aminés proche de celui de la viande, ne reproduit pas le facteur viande, sans doute faute de libérer les mêmes peptides lors de sa digestion (Hurrell *et al.*, 2006). Cela illustre l'importance de la structure des protéines musculaires et de leurs produits de dégradation spécifiques, présentés dans les parties relatives à la digestion gastro-intestinale de cette étude bibliographique.

Outre les peptides, d'autres composants de la matrice carnée ont été envisagés pour expliquer le "facteur viande". Certains travaux suggèrent un rôle

possible des phospholipides ou de mucopolysaccharides du tissu conjonctif tels que des fragments de chondroïtine sulfate, qui pourraient améliorer la solubilité du fer ou interagir avec des inhibiteurs de l'absorption (Zou *et al.*, 2017). Toutefois, les données restent limitées et aucun composé unique n'a été identifié comme facteur explicatif exclusif (Consalez *et al.*, 2022). La vitamine C n'étant présente qu'à l'état de traces dans la viande, elle ne peut être responsable de cet effet. Bien que la viande stimule la sécrétion d'acide gastrique, ce mécanisme ne semble pas déterminant : l'effet positif persiste même chez des patients achlorhydriques (Björn-Rasmussen et Hallberg, 1979).

Figure 2 : Le facteur viande : effet synergique sur l'absorption du fer non héminique et hypothèses mécanistiques. Créée dans BioRender. Theron, L. (2026) <https://BioRender.com/jc16jmm>



2.4. Viande et biodisponibilité du fer et du zinc : régimes mixtes vs. régimes végétariens

Dans un régime omnivore, la consommation régulière de viande améliore l'absorption du fer et le statut martial, avec des réserves (ferritine) plus élevées qu'en l'absence de viande (Mc Arthur *et al.*, 2012 ; Chang *et al.*, 2023). La viande fournit à la fois du fer héminique bien absorbé et, *via* le facteur viande,

améliore l'assimilation du fer non héminique, comme l'illustrent les travaux d'Evcan et Gulec (2000).

À l'inverse, les régimes végétariens et végétaliens reposent essentiellement sur du fer non héminique, sensible aux inhibiteurs (phytates, polyphénols). Malgré des apports parfois similaires, la biodisponibilité est plus faible : les études montrent des

ferritinémies réduites chez les végétariens et une prévalence plus élevée de déficit martial, notamment chez les femmes (Kristensen *et al.*, 2005 ; Ruxton et Gordon, 2024). Les stratégies compensatoires (vitamine C, fermentation, fortification) peuvent améliorer l'absorption, sans toutefois atteindre les niveaux observés en régime omnivore (Consalez *et al.*, 2022).

Le facteur viande semble commun aux tissus musculaires de diverses espèces, sans différence notable entre viande rouge, volaille et poisson (Consalez *et al.*, 2022). En revanche, les produits laitiers et les œufs n'exercent pas cet effet et peuvent même inhiber l'absorption du fer, notamment en raison

du calcium (Gleerup *et al.*, 1993 ; Ishikawa *et al.*, 2007).

Pour le zinc, la viande contribue également à une meilleure biodisponibilité. Les végétaux riches en zinc contiennent aussi des phytates qui en limitent l'absorption, alors que les peptides issus de la digestion des protéines carnées peuvent faciliter la disponibilité du zinc (Sandström et Cederblad, 1980 ; Hunt *et al.*, 1998). L'adaptation physiologique observée chez les végétariens ne compense qu'en partie une absorption plus faible. C'est pourquoi certaines recommandations suggèrent d'augmenter de 50% les apports en zinc lorsque les régimes sont riches en phytates (Hunt, 2002).

III. IMPLICATIONS DE L'EFFET MATRICE DE LA VIANDE POUR LA SANTE

La relation effet matrice / biodisponibilité des nutriments affecte la santé publique et la nutrition individuelle. Des données quantitatives sur la teneur en

micronutriments des aliments, et en regard de différents types de viandes cuites, sont disponibles dans les tables CIQUAL (<https://ciqual.anses.fr/>).

3.1. Maintien de la masse musculaire et santé musculosquelettique

La viande contribue au maintien de la masse musculaire grâce à ses protéines de haute qualité et à sa richesse en leucine, un acide aminé clé pour activer la voie mTOR et stimuler l'anabolisme musculaire (Dardevet *et al.*, 2000 ; Katsanos *et al.*, 2006). Une portion de 100 g fournit environ 25 g de protéines et 2-3 g de leucine, quantité suffisante pour maximiser la synthèse protéique post-prandiale chez l'adulte (Moore *et al.*, 2009). Chez les personnes âgées, la viande aide à compenser la résistance anabolique : intégrée dans un régime adapté et associée à l'exercice de résistance, elle améliore la synthèse protéique et la force musculaire (Park *et al.*, 2021). Après un effort, les protéines carnées stimulent davantage l'anabolisme par rapport à des protéines végétales, du fait d'un meilleur apport en acides aminés indispensables (Pinckaers *et*

al., 2024). La viande participe aussi à la santé osseuse : un apport protéique suffisant (>1-1,2 g/kg/j) favorise la densité minérale osseuse lorsqu'il s'accompagne de calcium et de vitamine D (de Souza Genaro et Araujo Martini, 2010). Elle fournit en outre du zinc, essentiel à la synthèse du collagène, et de la vitamine B12, indispensable au métabolisme osseux. Une carence en vitamine B12, nutriment absent des régimes strictement végétaux, est associée à une diminution de la densité osseuse et à un risque accru de fractures (Neufingerl et Eilander, 2021). Une portion de 100 g de viande de bœuf apporte environ 2 µg de vitamine B12, soit près de 50% des Références Nutritionnelles pour la Population (RNP) et 80 % des besoins quotidiens.

3.2. Prévention des carences en fer et en vitamine B12

La viande contribue fortement à la prévention des carences en minéraux et vitamines. Elle représente

notamment une source élevée de fer : la fraction héminique, absorbable à 20-30% (Zhang *et al.*, 1989).

Une portion de 100 g de bœuf, contenant environ 2,5 mg de fer, dont près de la moitié sous forme hémique, peuvent couvrir environ 20% des besoins quotidiens d'une femme adulte. Les études épidémiologiques montrent d'ailleurs que l'anémie ferriprive diminue avec la consommation de viande rouge (Mc Arthur *et al.*, 2012), tandis que les régimes végétariens ou végétaliens non supplémentés s'accompagnent souvent d'un risque accru de déficit (Neufingerl et Eilander, 2021). Le rôle de la viande dans l'amélioration de l'absorption du fer non hémique est détaillé dans la section « facteur viande ». La viande est également essentielle pour prévenir la carence en vitamine B12, nutriment exclusivement fourni par les produits animaux. Les omnivores présentent généralement un

3.3. Santé métabolique générale

L'effet de la viande sur la santé métabolique résulte d'un équilibre entre ses atouts nutritionnels et certains composés potentiellement défavorables. Les protéines carnées, notamment celles de la viande maigre, stimulent l'insuline, en particulier les protéines rapidement digestibles riches en acides aminés possédant un effet insulinothéropique (leucine et lysine), et peuvent ainsi améliorer la glycémie post-prandiale. Plusieurs études ont montré qu'un régime modérément hyperprotéiné incluant de la viande maigre améliorait la gestion de la glycémie et la sensibilité à l'insuline chez les sujets obèses ou diabétiques de type 2 (McKnight *et al.*, 2010 ; Dillon, 2013). Sur les lipides sanguins, la viande maigre a généralement un effet neutre, parfois favorable, d'autant qu'elle apporte du potassium et peu de glucides rapides. Une méta-analyse récente rapporte qu'une consommation modérée de viande rouge maigre n'altère ni le taux de cholestérol ni la tension artérielle (Ruxton et Gordon, 2024). À l'inverse, de nombreuses études

3.4. Régulation de l'appétit et gestion du poids

Les protéines sont le macronutriment le plus satiétogène, ce qui confère à la viande un rôle favorable dans la régulation de l'appétit et du poids. À apport énergétique équivalent, les repas riches en protéines réduisent davantage la faim dans les heures suivant

statut satisfaisant, tandis que 30 à 50% des végétaliens non supplémentés peuvent devenir déficitaires, voire carencés en vitamine B12 (Kwok *et al.*, 2012 ; Nebl *et al.*, 2019 ; Gallego-Narbon *et al.*, 2019). La déficience en vitamine B12 entraîne une anémie mégalo-blastique et des troubles neurologiques, soulignant l'importance d'un apport régulier via la viande ou via une supplémentation adaptée. Enfin, la viande est une source importante de zinc facilement absorbable (4–5 mg/100 g de bœuf maigre). À l'inverse, les végétariens doivent compenser la complexation du zinc végétal par les phytates en augmentant leurs apports. La viande apporte également des quantités significatives de vitamines B3 et B6, de sélénium et de phosphore.

épidémiologiques associent une forte consommation de viande rouge, surtout transformée, à un risque accru de diabète de type 2, de maladies cardiovasculaires et de certains cancers. Toutefois, ces associations sont souvent influencées par des facteurs de confusion (qualité globale de la diète, mode de vie). Les analyses récentes convergent vers un constat : ce sont principalement les viandes transformées, riches en sel, nitrites et graisses saturées, qui portent la majeure part du risque. La viande rouge non transformée consommée en quantité modérée semble avoir un impact neutre ou très limité. L'étude internationale PURE confirme qu'une petite portion quotidienne d'environ 55 g de viande rouge peut s'inscrire dans un régime sain, sans augmenter le risque cardiovasculaire (Mente *et al.*, 2023). Ces résultats soulignent l'importance d'évaluer les effets métaboliques de la viande sans se limiter à sa stricte composition en nutriments, et en prenant en compte son "effet matrice" dans le cadre de repas complets.

l'ingestion qu'un repas glucidique ou lipidique (Vandewater et Vickers, 1996). Cet effet repose sur plusieurs mécanismes :

✓ Réponse hormonale : la digestion des protéines stimule la libération d'hormones anorexigènes (PYY, GLP-1, CCK) signalant la satiété (Tomé *et al.*, 2009).

✓ Thermogénèse élevée : la digestion des protéines augmente la dépense énergétique post-prandiale, 20 à 30 % des calories protéiques étant dissipées en chaleur, contre 5 à 10 % pour les glucides (Hursel *et al.*, 2010 ; Turgeon et Rioux, 2011).

IV. LIMITES ET MODERATION

Malgré ses atouts nutritionnels, la consommation excessive de viande présente des limites justifiant les recommandations de modération. Les principaux risques concernent la santé cardiovasculaire, certains cancers, et plus généralement l'équilibre alimentaire. Cependant, les études restent insuffisantes pour déterminer si, à consommation équivalente de viande, un apport concomitant élevé en légumes, comme observé dans certains régimes alimentaires en France, ou plus faible, comme dans certains modèles alimentaires nord-américains, conduit aux mêmes effets sur la santé. Les viandes rouges grasses et surtout les viandes transformées (trop riches en graisses, sel, nitrites) sont associées à un risque accru de maladies coronariennes et d'AVC, en partie *via* l'élévation du LDL-cholestérol. Toutefois, les analyses récentes – notamment la série *Burden of Proof* (Lescinsky *et al.*, 2022) – concluent que la preuve d'un lien entre une consommation de viande rouge non transformée et maladies cardiovasculaires reste faible. Il convient également de mentionner la carnitine, abondante dans la viande rouge, qui peut être transformée par certains

✓ Signalisation centrale : la leucine peut activer la voie mTOR et moduler l'appétit ; cet effet a été démontré chez l'animal (Cota *et al.*, 2006), mais est moins clair chez l'Homme.

En outre, la viande, en tant qu'aliment solide nécessitant une mastication prolongée, peut renforcer la satiété *via* le temps oral et le volume gastrique.

microbiotes intestinaux en triméthylamine, ou TMA, ensuite oxydée au niveau hépatique en triméthylamine-N-oxyde, ou TMAO, un métabolite associé à des effets métaboliques et cardiovasculaires défavorables. Un excès de consommation de viande peut avoir pour conséquence un appauvrissement du régime en aliments d'origine végétale, avec une diminution en fibres, vitamines et antioxydants. Les légumes consommés avec la viande contribuent par ailleurs à limiter d'éventuels effets pro-oxydants de la digestion grâce à leur apport en antioxydants, et peuvent exercer un effet favorable sur le microbiote. Sur le plan rénal, les très fortes consommations protéiques (>2 g/kg/j) peuvent augmenter la charge acide et solliciter les reins, mais les apports modérés de viande ne posent aucun problème chez le sujet sain ; une réduction de l'apport en protéines est toutefois nécessaire en cas d'insuffisance rénale. En somme, intégrée dans un régime varié et accompagnée de végétaux, la viande permet de bénéficier de ses atouts nutritionnels, tout en minimisant les risques liés à une consommation excessive.

Références

- Aguilera, J. M. (2019) The food matrix: Implication in processing, nutrition and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(22):3612-3629. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1502743>.
- Bailey, H.M.; Mathai, J.K.; Berg, E.P.; Stein, H.H. (2020) Most meat products have digestible indispensable amino acid scores that are greater than 100 but processing may increase or reduce protein quality. *British Journal of Nutrition*, 124 (1):14-22. <https://doi.org/10.1017/S0007114520000641>
- Bauchart, C.; Rémond, D.; Chambon, C.; Patureau Mirand, P.; Savary-Auzeloux, I.; Reynès, C.; Morzel, M. Small Peptides (2006) Found in Ready-to-Eat Beef Meat. *Meat Science*, 74 (4), 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.05.016>.
- Bauchart, C.; Morzel, M.; Chambon, C.; Mirand, P. P.; Reynès, C.; Buffière, C.; Rémond, D. (2007) Peptides Reproducibly Released by *in Vivo* Digestion of Beef Meat and Trout Flesh in Pigs. *British Journal of Nutrition*, 98 (6), 1187–1195. <https://doi.org/10.1017/S0007114507761810>.
- Bax, M.-L.; Buffière, C.; Hafnaoui, N.; Gaudichon, C.; Savary-Auzeloux, I.; Dardevet, D.; Santé-Lhoutellier, V.; Rémond, D. (2013) Effects of Meat Cooking, and of Ingested Amount, on Protein Digestion Speed and Entry of Residual Proteins into the Colon: A Study in Minipigs. *PLoS ONE*, 8 (4), e61252. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061252>.
- Björn-Rasmussen, E.; Hallberg, L. (1979) Effect of Animal Proteins on the Absorption of Food Iron in Man. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 23 (3), 192–202. <https://doi.org/10.1159/000176256>.
- Brune, M.; Rossander, L.; Hallberg, L. (1989) Iron Absorption and Phenolic Compounds: Importance of Different Phenolic Structures. *European Journal of Clinical Nutrition*, 43 (8), 547–557.
- Buffière, C.; Gaudichon, C.; Hafnaoui, N.; Migné, C.; Scislowsky, V.; Khodorova, N.; Mosoni, L.; Blot, A.; Boirie, Y.; Dardevet, D.; Santé-Lhoutellier, V.; Rémond, D. (2017) In the Elderly, Meat Protein Assimilation from Rare Meat Is Lower than That from Meat That Is Well Done. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 106 (5), 1257–1266. <https://doi.org/10.3945/ajcn.117.158113>.
- Chang, V. C.; Cotterchio, M.; Kotsopoulos, J.; Bondy, S. J. (2023) Iron Status and Associated Factors among Canadian Women: Results from the Canadian Health Measures Survey. *The Journal of Nutrition*, 153 (3), 781–797. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2022.10.011>.
- Consalez, F.; Ahern, M.; Andersen, P.; Kjelleve, M. (2022) The Effect of the Meat Factor in Animal-Source Foods on Micronutrient Absorption: A Scoping Review. *Advances in Nutrition*, 13 (6), 2305–2315. <https://doi.org/10.1093/advances/nmac089>.
- Cook, J.; Monsen, E. (1976) Food Iron Absorption in Human Subjects. III. Comparison of the Effect of Animal Proteins on Nonheme Iron Absorption. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 29 (8), 859–867. <https://doi.org/10.1093/ajcn/29.8.859>.
- Cota, D.; Proulx, K.; Smith, K. A. B.; Kozma, S. C.; Thomas, G.; Woods, S. C.; Seeley, R. J. (2006) Hypothalamic MTOR Signaling Regulates Food Intake. *Science*, 312 (5775), 927–930. <https://doi.org/10.1126/science.1124147>.
- Dardevet, D.; Mosoni, L.; Savary-Auzeloux, I.; Peyron, M.-A.; Polakof, S.; Rémond, D. (2021) Quels sont les déterminants importants à prendre en compte pour optimiser la nutrition protéique chez les personnes âgées : une équation complexe mais avec des solutions. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 56 (6), 333–349. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2021.10.002>.
- Dardevet, D.; Sornet, C.; Balage, M.; Grizard, J. (2000) Stimulation of In Vitro Rat Muscle Protein Synthesis by Leucine Decreases with Age. *The Journal of Nutrition*, 130 (11), 2630–2635. <https://doi.org/10.1093/jn/130.11.2630>.
- De Souza Genaro, P.; Martini, L. A. (2010) Effect of Protein Intake on Bone and Muscle Mass in the Elderly: *Nutrition Reviews*©, Vol. 68, No. 10. *Nutrition Reviews*, 68 (10), 616–623. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00321.x>.

- Dillon, E. L. (2013) Nutritionally Essential Amino Acids and Metabolic Signaling in Aging. *Amino Acids*, 45 (3), 431–441. <https://doi.org/10.1007/s00726-012-1438-0>.
- Evcan, E.; Gulec, S. (2020) The Development of Lentil Derived Protein–Iron Complexes and Their Effects on Iron Deficiency Anemia *in Vitro*. *Food Funct.* 11 (5), 4185–4192. <https://doi.org/10.1039/D0FO00384K>.
- Fanelli, N.S.; Bailey, H.M.; Thompson, T.W.; Delmore, R.; Nair, M.N.; Stein, H.H. (2021) Digestible indispensable amino acid score (DIAAS) is greater in animal-based burgers than in plant-based burgers if determined in pigs. *European Journal of Nutrition*, 61 (1):461-475. <https://doi.org/10.1007/s00394-021-02658-1>
- Frank, D.; Joo, S.-T.; Warner, R. (2016) Consumer Acceptability of Intramuscular Fat. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 36 (6), 699–708. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.6.699>.
- Gallego-Narbón, A.; Zapatera, B.; Barrios, L.; Vaquero, M. P. (2019) Vitamin B₁₂ and Folate Status in Spanish Lacto-Ovo Vegetarians and Vegans. *Journal of Nutritional Science*, 8, e7. <https://doi.org/10.1017/jns.2019.2>.
- Gandemer, G.; Scislowski, V.; Portanguen, S.; Kondjoyan, A. (2020) Impact of Cooking of Beef on the Supply of Heme and Non-Heme Iron for Humans. *Food and Nutrition Sciences*, 11 (07), Art. 07. <https://doi.org/10.4236/fns.2020.117045>
- Glahn, R. P.; Van Campen, D. R. (1997) Iron Uptake Is Enhanced in Caco-2 Cell Monolayers by Cysteine and Reduced Cysteinyl Glycine. *The Journal of Nutrition*, 127 (4), 642–647. <https://doi.org/10.1093/jn/127.4.642>.
- Gleerup, A.; Rossander-Hultén, L.; Hallberg, L. (1993) Duration of the Inhibitory Effect of Calcium on Non-Haem Iron Absorption in Man. *Eur J Clin Nutr*, 47 (12), 875–879.
- Haas, J. D.; Brownlie, T. (2001) Iron Deficiency and Reduced Work Capacity: A Critical Review of the Research to Determine a Causal Relationship. *The Journal of Nutrition*, 131 (2), 676S-690S. <https://doi.org/10.1093/jn/131.2.676S>.
- Hocquette, J.F.; Gondret, F.; Baéza, E.; Médale, F.; Jurie, C.; Pethick, D.W. (2010) Intramuscular fat content in meat-producing animals: development, genetic and nutritional control, and identification of putative markers. *Animal*, 4 (2),303-319. <https://doi.org/10.1017/s1751731109991091>
- Hodgson, J. M.; Burke, V.; Beilin, L. J.; Puddey, I. B. (2006) Partial Substitution of Carbohydrate Intake with Protein Intake from Lean Red Meat Lowers Blood Pressure in Hypertensive Persons. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 83 (4), 780–787. <https://doi.org/10.1093/ajcn/83.4.780>.
- Hodgkinson, S.M.; Montoya, C.A.; Scholten, P.T.; Rutherford, S.M.; Moughan, P.J. (2018) Cooking conditions affect the true ileal digestible amino acid content and digestible indispensable amino acid score (DIAAS) of bovine meat as determined in pigs. *The Journal of Nutrition*, 148 (10):1564-1569. <https://doi.org/10.1093/jn/nxy153>
- Hunt, J. R. (2002) Moving toward a Plant-Based Diet: Are Iron and Zinc at Risk? *Nutrition Reviews*, 60 (5), 127–134. <https://doi.org/10.1301/00296640260093788>.
- Hunt, J.; Matthys, L.; Johnson, L. (1998) Zinc Absorption, Mineral Balance, and Blood Lipids in Women Consuming Controlled Lactoovovegetarian and Omnivorous Diets for 8 Wk. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 67 (3), 421–430. <https://doi.org/10.1093/ajcn/67.3.421>.
- Hurrell, R. (2004) Phytic Acid Degradation as a Means of Improving Iron Absorption. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 74 (6), 445–452. <https://doi.org/10.1024/0300-9831.74.6.445>.
- Hurrell, R. F.; Reddy, M. B.; Juillerat, M.; Cook, J. D. (2006) Meat Protein Fractions Enhance Nonheme Iron Absorption in Humans. *The Journal of Nutrition*, 136 (11), 2808–2812. <https://doi.org/10.1093/jn/136.11.2808>.
- Hursel, R.; Van Der Zee, L.; Westerterp-Plantenga, M. S. (2010) Effects of a Breakfast Yoghurt, with Additional Total Whey Protein or Caseinomacropeptide-Depleted α -Lactalbumin-Enriched Whey Protein, on Diet-Induced Thermogenesis and Appetite Suppression. *Br J Nutr*, 103 (5), 775–780. <https://doi.org/10.1017/S0007114509992352>.
- Ishikawa, S. -I.; Tamaki, S.; Arihara, K.; Itoh, M. Egg Yolk Protein and Egg Yolk Phosvitin Inhibit Calcium, Magnesium, and Iron Absorptions in Rats. (2007) *Journal of Food Science*, 72 (6). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00417.x>.

Jalabert-Malbos, M.-L.; Mishellany-Dutour, A.; Woda, A.; Peyron, M.-A. (2007) Particle Size Distribution in the Food Bolus after Mastication of Natural Foods. *Food Quality and Preference*, 18 (5), 803–812. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2007.01.010>.

Kapsokefalou, M.; Miller, D. D. (1991) Effects of Meat and Selected Food Components on the Valence of Nonheme Iron during *In Vitro* Digestion. *Journal of Food Science*, 56 (2), 352–355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb05278.x>.

Kashyap, S.; Shivakumar, N.; Varkey, A.; Duraisamy, R.; Thomas, T.; Preston, T.; Devi, S.; Kurpad, A.V. (2018) Ileal digestibility of intrinsically labeled chicken meat protein in humans using the dual isotope tracer method. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 108 (5):980–987. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqy178>

Katsanos, C. S.; Kobayashi, H.; Sheffield-Moore, M.; Aarsland, A.; Wolfe, R. R. (2006) A High Proportion of Leucine Is Required for Optimal Stimulation of the Rate of Muscle Protein Synthesis by Essential Amino Acids in the Elderly. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 291 (2), E381–E387. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00488.2005>.

Kondjoyan, A.; Portanguen, S.; Duchène, C.; Mirade, P. S.; Gandemer, G. (2018) Predicting the Loss of Vitamins B3 (Niacin) and B6 (Pyridoxamine) in Beef during Cooking. *Journal of Food Engineering*, 238, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.008>.

Kristensen, M. B.; Hels, O.; Morberg, C.; Marving, J.; Bügel, S.; Tetens, I. (2005) Pork Meat Increases Iron Absorption from a 5-Day Fully Controlled Diet When Compared to a Vegetarian Diet with Similar Vitamin C and Phytic Acid Content. *Br J Nutr*, 94 (1), 78–83. <https://doi.org/10.1079/BJN20051417>.

Kwok, T.; Chook, P.; Qiao, M.; Tam, L.; Poon, Y. K. P.; Ahuja, A. T.; Woo, J.; Celermajer, D. S.; Woo, K. S. (2012) Vitamin B-12 Supplementation Improves Arterial Function in Vegetarians with Subnormal Vitamin B-12 Status. *The Journal of nutrition, health and aging*, 16 (6), 569–573. <https://doi.org/10.1007/s12603-012-0036-x>.

Layrisse, M.; Martínez-Torres, C.; Leets, I.; Taylor, P.; Ramírez, J. (1984) Effect of Histidine, Cysteine, Glutathione or Beef on Iron Absorption in Humans. *The Journal of Nutrition*, 114 (1), 217–223. <https://doi.org/10.1093/jn/114.1.217>.

Layrisse, M.; Martínez-Torres, C.; Roche, M. (1968) Effect of Interaction of Various Foods on Iron Absorption. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 21 (10), 1175–1183. <https://doi.org/10.1093/ajcn/21.10.1175>.

Le Bourgot, C. ; Liu, X.; Buffière, C.; Hafanaoui, N.; Salis, L.; Pouyet, C.; Rémond, D. (2023) Development of a protein food based on texturized wheat proteins with protein digestibility equivalent to meat. *Food Research International*, 164:112978. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112978>

Lee, S.; Jo, K.; Choi, Y.-S.; Jung, S. (2024) Tracking Bioactive Peptides and Their Origin Proteins during the *In Vitro* Digestion of Meat and Meat Products. *Food Chemistry*, 454, 139845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139845>.

Lescinsky, H.; Afshin, A.; Ashbaugh, C. ; Bisignano, C. ; Brauer, M. ; Ferrara, G. ; et al. (2022) Health effects associated with consumption of unprocessed red meat: a Burden of Proof study. *Nature Medicine*, 28(10):2075-82. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01968-z>

Lozoff, B.; De Andraca, I.; Castillo, M.; Smith, J. B.; Walter, T.; Pino, P. (2003) Behavioral and Developmental Effects of Preventing Iron-Deficiency Anemia in Healthy Full-Term Infants. *Pediatrics*, 112 (4), 846–854.

Lynch, S. R. (2000) The Effect of Calcium on Iron Absorption. *Nutrition Research. Reviews*, 13 (2), 141–158. <https://doi.org/10.1079/095442200108729043>.

Lynch, S. R.; Cook, J. D. (1980) Interaction of Vitamin and Iron. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 355 (1), 32–44. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1980.tb21325.x>.

Martinez-Torres, C.; Layrisse, M. (1970) Effect of Amino Acids on Iron Absorption from a Staple Vegetable Food. *Blood*, 35 (5), 669–682.

- Martinez-Torres, C., Leets, I., Renzi, M., & Layrisse, M. (1974) Iron absorption by humans from veal liver. *The Journal of Nutrition*, 104(8), 983–993. <https://doi.org/10.1093/jn/104.8.983>
- Mathevon, E.; Mioche, L.; Brown, W. E.; Culioli, (1995) J. Texture analysis of beef cooked at various temperatures by mechanical measurements, sensory assessments and electromyography. *Journal of Texture Studies*, 26 (2), 175–192. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1995.tb00792.x>.
- Mathoniere, C.; Mioche, L.; Dransfield, E.; Culioli, J. (2000) Meat Texture Characterisation: Comparison of Chewing Patterns, Sensory and Mechanical Measures. *Journal of Texture Studies*, 31 (2), 183–203. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2000.tb01416.x>.
- Matsui, T.; Tamaya, K.; Seki, E.; Osajima, K.; Matsumoto, K.; Kawasaki, T. (2002) Val-Tyr As A Natural Antihypertensive Dipeptide Can Be Absorbed Into The Human Circulatory Blood System. *Clin Exp Pharma Physio*, 29 (3), 204–208. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1681.2002.03628.x>.
- McArthur, J. O.; Petocz, P.; Caterson, I. D.; Samman, S. (2012) A Randomized Controlled Trial in Young Women of the Effects of Consuming Pork Meat or Iron Supplements on Nutritional Status and Feeling of Well-Being. *Journal of the American College of Nutrition*, 31 (3), 175–184. <https://doi.org/10.1080/07315724.2012.10720025>.
- McKnight, J. R.; Satterfield, M. C.; Jobgen, W. S.; Smith, S. B.; Spencer, T. E.; Meininger, C. J.; McNeal, C. J.; Wu, G. (2010) Beneficial Effects of L-Arginine on Reducing Obesity: Potential Mechanisms and Important Implications for Human Health. *Amino Acids*, 39 (2), 349–357. <https://doi.org/10.1007/s00726-010-0598-z>.
- Mente, A.; Dehghan, M.; Rangarajan, S.; O'Donnell, M.; Hu, W.; Dagenais, G.; Wielgosz, A.; A. Lear, S.; Wei, L.; Diaz, R.; Avezum, A.; Lopez-Jaramillo, P.; Lanas, F.; Swaminathan, S.; Kaur, M.; Vijayakumar, K.; Mohan, V.; Gupta, R.; Szuba, A.; Iqbal, R.; Yusuf, R.; Mohammadifard, N.; Khatib, R.; Nasir, N. M.; Karsidag, K.; Rosengren, A.; Yusufali, A.; Wentzel-Viljoen, E.; Chifamba, J.; Dans, A.; Alhabib, K. F.; Yeates, K.; Teo, K.; Gerstein, H. C.; Yusuf, S. (2023) Diet, Cardiovascular Disease, and Mortality in 80 Countries. *European Heart Journal*, 44 (28), 2560–2579. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehad269>.
- Mioche, L.; Bourdiol, P.; Monier, S. (2003) Chewing Behaviour and Bolus Formation during Mastication of Meat with Different Textures. *Archives of Oral Biology*, 48 (3), 193–200. [https://doi.org/10.1016/S0003-9969\(03\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0003-9969(03)00002-5).
- Moore, D. R.; Robinson, M. J.; Fry, J. L.; Tang, J. E.; Glover, E. I.; Wilkinson, S. B.; Prior, T.; Tarnopolsky, M. A.; Phillips, S. M. (2009) Ingested Protein Dose Response of Muscle and Albumin Protein Synthesis after Resistance Exercise in Young Men. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 89 (1), 161–168. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2008.26401>.
- Nebl, J.; Schuchardt, J. P.; Ströhle, A.; Wasserfurth, P.; Haufe, S.; Eigendorf, J.; Tegtbur, U.; Hahn, A. (2019) Micronutrient Status of Recreational Runners with Vegetarian or Non-Vegetarian Dietary Patterns. *Nutrients*, 11 (5), 1146. <https://doi.org/10.3390/nu11051146>.
- Neufingerl, N.; Eilander, A. (2021) Nutrient Intake and Status in Adults Consuming Plant-Based Diets Compared to Meat-Eaters: A Systematic Review. *Nutrients*, 14 (1), 29. <https://doi.org/10.3390/nu14010029>.
- Oberli, M.; Lan, A.; Khodorova, N.; Santé-Lhoutellier, V.; Walker, F.; Piedcoq, J.; Davila, A.-M.; Blachier, F.; Tomé, D.; Fromentin, G.; Gaudichon, C. (2016) Compared with Raw Bovine Meat, Boiling but Not Grilling, Barbecuing, or Roasting Decreases Protein Digestibility without Any Major Consequences for Intestinal Mucosa in Rats, Although the Daily Ingestion of Bovine Meat Induces Histologic Modifications in the Colon. *The Journal of Nutrition*, 146 (8), 1506–1513. <https://doi.org/10.3945/jn.116.230839>.
- Oberli, M.; Marsset-Baglieri, A.; Airinei, G.; Santé-Lhoutellier, V.; Khodorova, N.; Rémond, D.; Foucault-Simonin, A.; Piedcoq, J.; Tomé, D.; Fromentin, G.; Benamouzig, R.; Gaudichon, C. (2015) High True Ileal Digestibility but Not Postprandial Utilization of Nitrogen from Bovine Meat Protein in Humans Is Moderately Decreased by High-Temperature, Long-Duration Cooking. *The Journal of Nutrition*, 145 (10), 2212–2219. <https://doi.org/10.3945/jn.115.216838>.

- O'Flaherty, E. A. A., Tsermoula, P., O'Neill, E. E., & O'Brien, N. M. (2019) Co-products of beef processing enhance non-haem iron absorption in an in vitro digestion/Caco-2 cell model. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(4), 1256–1264. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14049>
- Okumura, T.; Saito, K.; Sakuma, H.; Nade, T.; Nakayama, S.; Fujita, K.; Kawamura, T. (2007) Intramuscular fat deposition in principal muscles from twenty-four to thirty months of age using identical twins of Japanese Black steers. *Journal of Animal Science*, 85 (8), 1902-7. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-752>
- Oppenheimer, S. J. (2001) Iron and Its Relation to Immunity and Infectious Disease. *The Journal of Nutrition*, 131 (2), 616S-635S. <https://doi.org/10.1093/jn/131.2.616S>.
- Park, S.; Church, D. D.; Schutzler, S. E.; Azhar, G.; Kim, I.-Y.; Ferrando, A. A.; Wolfe, R. R. (2021) Metabolic Evaluation of the Dietary Guidelines' Ounce Equivalents of Protein Food Sources in Young Adults: A Randomized Controlled Trial. *The Journal of Nutrition*, 151 (5), 1190–1196. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa401>.
- Peiretti, P. G.; Medana, C.; Visentin, S.; Dal Bello, F.; Meineri, G. (2012) Effect of Cooking Method on Carnosine and Its Homologues, Pentosidine and Thiobarbituric Acid-Reactive Substance Contents in Beef and Turkey Meat. *Food Chemistry*, 132 (1), 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.035>.
- Pematilleke, N.; Kaur, M.; Adhikari, B.; Torley, P.J. (2020) Influence of meat texture on oral processing and bolus formation. *Journal of Food Engineering*, 283:110038. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110038>
- Pennings, B.; Groen, B. B.; Van Dijk, J.-W.; De Lange, A.; Kiskini, A.; Kuklinski, M.; Senden, J. M.; Van Loon, L. J. (2013) Minced Beef Is More Rapidly Digested and Absorbed than Beef Steak, Resulting in Greater Postprandial Protein Retention in Older Men. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 98 (1), 121–128. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.051201>.
- Pera, P.; Bucca, C.; Borro, P.; Bernocco, C.; De, L. A.; Carossa, S. (2002) Influence of Mastication on Gastric Emptying. *J Dent Res*, 81 (3), 179–181.
- Peyron, M.-A.; Mishellany, A.; Woda, A. (2004) Particle Size Distribution of Food Boluses after Mastication of Six Natural Foods. *J Dent Res*, 83 (7), 578–582. <https://doi.org/10.1177/154405910408300713>.
- Pinckaers, P. J.; Domić, J.; Petrick, H. L.; Holwerda, A. M.; Trommelen, J.; Hendriks, F. K.; Houben, L. H.; Goessens, J. P.; Van Kranenburg, J. M.; Senden, J. M.; De Groot, L. C.; Verdijk, L. B.; Snijders, T.; Van Loon, L. J. (2024) Higher Muscle Protein Synthesis Rates Following Ingestion of an Omnivorous Meal Compared with an Isocaloric and Isonitrogenous Vegan Meal in Healthy, Older Adults. *The Journal of Nutrition*, 154 (7), 2120–2132. <https://doi.org/10.1016/j.tjn.2023.11.004>.
- Powers, H. J. (2003) Riboflavin (Vitamin B-2) and Health. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 77 (6), 1352–1360. <https://doi.org/10.1093/ajcn/77.6.1352>.
- Prodhan, U. K.; Pundir, S.; Chiang, V. S.-C.; Milan, A. M.; Barnett, M. P. G.; Smith, G. C.; Markworth, J. F.; Knowles, S. O.; Cameron-Smith, D. (2020) Comparable Postprandial Amino Acid and Gastrointestinal Hormone Responses to Beef Steak Cooked Using Different Methods: A Randomised Crossover Trial. *Nutrients*, 12 (2), 380. <https://doi.org/10.3390/nu12020380>.
- Rémond, D.; Machebeuf, M.; Yven, C.; Buffière, C.; Mioche, L.; Mosoni, L.; Patureau Mirand, P. (2007) Postprandial whole-body protein metabolism after a meat meal is influenced by chewing efficiency in elderly subjects. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 85(5):1286-92. <https://doi.org/10.1093/ajcn/85.5.1286>.
- Ruxton, C. H. S.; Gordon, S. (2024) Animal Board Invited Review: The Contribution of Red Meat to Adult Nutrition and Health beyond Protein. *Animal*, 18 (3), 101103. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101103>.
- Rysman, T.; Van Hecke, T.; Van Poucke, C.; De Smet, S.; Van Royen, G. (2016) Protein Oxidation and Proteolysis during Storage and in Vitro Digestion of Pork and Beef Patties. *Food Chemistry*, 209, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.027>.
- Sandström, B.; Cederblad, A. (1980) Zinc Absorption from Composite Meals II. Influence of the Main Protein Source. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 33 (8), 1778–1783. <https://doi.org/10.1093/ajcn/33.8.1778>.

Sante-Lhoutellier, V.; Aubry, L.; Gatellier, P. (2007) Effect of Oxidation on In Vitro Digestibility of Skeletal Muscle Myofibrillar Proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (13), 5343–5348. <https://doi.org/10.1021/jf070252k>.

Sheffield, S.; Fiorotto, M. L.; Davis, T. A. (2024) Nutritional Importance of Animal-Sourced Foods in a Healthy Diet. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1424912. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1424912>.

Seth, A.; Mahoney, R.R. (2001) Iron chelation by digests of insoluble chicken muscle protein: the role of histidine residues. *Journal of the science of food and agriculture*, ISSN 0022-5142. [http://dx.doi.org/10.1002/1097-0010\(20010115\)81:2%3C183::AID-JSFA799%3E3.0.CO;2-1](http://dx.doi.org/10.1002/1097-0010(20010115)81:2%3C183::AID-JSFA799%3E3.0.CO;2-1)

Soucy, J.; Leblanc, J. (1998) Protein Meals and Postprandial Thermogenesis. *Physiology & Behavior*, 65 (4–5), 705–709. [https://doi.org/10.1016/S0031-9384\(98\)00188-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9384(98)00188-7).

Stubbendorff, A.; Borgström Bolmsjö, B.; Bejersten, T.; Warensjö Lemming, E.; Calling, S.; Wolff, M. (2025) Iron Insight: Exploring Dietary Patterns and Iron Deficiency among Teenage Girls in Sweden. *European Journal of Nutrition*, 64 (3), 107. <https://doi.org/10.1007/s00394-025-03630-z>.

Symons, T. B.; Sheffield-Moore, M.; Wolfe, R. R.; Paddon-Jones, D. (2009) A Moderate Serving of High-Quality Protein Maximally Stimulates Skeletal Muscle Protein Synthesis in Young and Elderly Subjects. *Journal of the American Dietetic Association*, 109 (9), 1582–1586. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2009.06.369>.

Taylor, P.; Martínez-Torres, C.; Romano, E.; Layrisse, M. (1986) The Effect of Cysteine-Containing Peptides Released during Meat Digestion on Iron Absorption in Humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 43 (1), 68–71. <https://doi.org/10.1093/ajcn/43.1.68>.

Thorning, T.K.; Bertram, H.C.; Bonjour, J.P.; de Groot, L.; Dupont, D.; Feeney, E.; Ipsen, R.; Lecerf, J.M.; Mackie, A.; McKinley, M.C.; Michalski, M.C.; Rémond, D.; Risérus, U.; Soedamah-Muthu, S.S.; Tholstrup, T.; Weaver, C.; Astrup, A.; Givens, I. (2017) Whole dairy matrix or single nutrients in assessment of health effects: current evidence and knowledge gaps. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 105(5):1033-1045. <https://doi.org/10.3945/ajcn.116.151548>.

Tomé, D.; Schwarz, J.; Darcel, N.; Fromentin, G. (2009) Protein, Amino Acids, Vagus Nerve Signaling, and the Brain. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 90 (3), 838S-843S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2009.27462W>.

Turgeon, S. L.; Rioux, L.-E. (2011) Food Matrix Impact on Macronutrients Nutritional Properties. *Food Hydrocolloids*, 25 (8), 1915–1924. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.026>.

Van Hecke, T.; Vossen, E.; Vanden Bussche, J.; Raes, K.; Vanhaecke, L.; De Smet, S. (2014) Fat Content and Nitrite-Curing Influence the Formation of Oxidation Products and NOC-Specific DNA Adducts during In Vitro Digestion of Meat. *PLoS ONE*, 9 (6), e101122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101122>.

Vandewater, K.; Vickers, Z. (1996) Higher-Protein Foods Produce Greater Sensory-Specific Satiety. *Physiology & Behavior*, 59 (3), 579–583. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(95\)02113-2](https://doi.org/10.1016/0031-9384(95)02113-2).

Vanhoof, G.; Goossens, F.; De Meester, I.; Hendriks, D.; Scharpé, S. (1995) Proline Motifs in Peptides and Their Biological Processing. *FASEB J*, 9 (9), 736–744.

Vattem, D. A.; Seth, A.; Mahoney, R. R. (2001) Chelation and Reduction of Iron by Chicken Muscle Protein Digests: The Role of Sulphydryl Groups. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81 (15), 1476–1480. <https://doi.org/10.1002/jsfa.973>.

Veyrune, J.L.; Mioche, L. (2000) Complete denture wearers: Electromyography of mastication and texture perception whilst eating meat. *European Journal of Oral Sciences*, 108 (2), 83-92. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0722.2000.90780.x>

Wang, X.; Sun, Y.; Liu, A.; Wang, X.; Gao, J.; Fan, X.; Shang, J.; Wang, Y. (2015) Modeling Structural and Compositional Changes of Beef during Human Chewing Process. *LWT - Food Science and Technology*, 60 (2), 1219–1225. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.008>.

Watanabe, F. (2007) Vitamin B₁₂ Sources and Bioavailability. *Experimental Biology and Medicine* (Maywood), 232 (10), 1266–1274. <https://doi.org/10.3181/0703-MR-67>.

Weiner, K.; Graham, L. S.; Reedy, T.; Elashoff, J.; Meyer, J. H. (1981) Simultaneous Gastric Emptying of Two Solid Foods. *Gastroenterology*, 81 (2), 257–266.

Yven, C.; Culioli, J.; Mioche, L. (2005) Meat Bolus Properties in Relation with Meat Texture and Chewing Context. *Meat Science*, 70 (2), 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.02.002>.

Zhang, D.; Hendricks, D. G.; Mahoney, A. W. (1989) Bioavailability of Total Iron from Meat, Spinach (*Spinacea Oleracea* L.) and Meat–Spinach Mixtures by Anaemic and Non-Anaemic Rats. *British Journal of Nutrition*, 61 (2), 331–343. <https://doi.org/10.1079/BJN19890121>.

Zimmermann, M. B.; Hurrell, R. F. (2007) Nutritional Iron Deficiency. *The Lancet*, 370 (9586), 511–520. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61235-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61235-5).

Zou, Y.; Zhao, L.; Feng, G.; Miao, Y.; Wu, H.; Zeng, M. (2017) Characterization of Key Factors of Anchovy (*Engraulis Japonicus*) Meat in the Nanoparticle-Mediated Enhancement of Non-Heme Iron Absorption. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 65 (51), 11212–11219. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04547>.