



# Valorisation des sous-produits de la filière viande (et poisson)

**Les sous-produits des filières viande (et poisson) : point de départ d'une nouvelle symbiose intersectorielle et contribution à la durabilité du système de production animale**

**Mots-clés :** sous-produits animaux, valorisation, économie circulaire

**Auteur :** Vincenza Ferraro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> INRAE, QuaPA, F-63122 Saint-Gènes-Champanelle, France  
vincenza.ferraro@inrae.fr

**De grandes quantités de sous-produits sont générées lors de l'abattage et de la transformation des animaux en vue de la consommation humaine. Selon les filières, de 35 à 50 % du poids de chaque animal devient un résidu, avec un impact économique et environnemental majeur. Néanmoins, une valorisation à haute valeur ajoutée de ces gisements peut représenter une opportunité d'évolution économique pour plusieurs secteurs d'activités, et peut contribuer à la durabilité du système de production animale.**

## Résumé :

La valeur biologique et technique des molécules qui caractérisent les résidus animaux, et en particulier les sous-produits (résidus non comestibles), peut faire l'objet d'utilisations à plus haute valeur ajoutée par rapport aux modes de gestions adoptés aujourd'hui. Les sous-produits animaux peuvent devenir des nouvelles matières premières ayant un intérêt technologique, alimentaire et pharmaceutique, qui répondent, en outre, à la demande en nombreux produits biosourcés et biologiquement actifs. Des biopolymères naturels (les protéines fibreuses structurales collagène, élastine, kératine), des protéoglycane, des prostaglandines, des insuline-équivalents, des facteurs de régénération des tissus et des minéraux essentiels tels que le calcium, le phosphore et le magnésium, peuvent être obtenus des sous-produits animaux. Ces molécules ont des propriétés uniques et non répétables par synthèse chimique mais leurs potentialités sont aujourd'hui très peu exploitées, et encore moins en France, malgré les importants gisements générés dans le pays qui détient, en outre, le plus grand nombre de têtes de bétail bovin et de volaille parmi les 27 pays de l'Union européenne. La recherche fondamentale sera importante et indispensable pour une valorisation efficace, multisectorielle et multi-acteurs. L'élévation des sous-produits au rang de « matières premières » demande en fait une caractérisation physico-chimique et biologique exhaustive pour cibler un secteur d'application ou un autre ; la mise au point de procédés innovants et spécifiques, et des systèmes de gestion plus adaptés sera tout autant indispensable.

## Abstract: Added value of by-products of the meat (and fish) sector

### By-products of meat (and fish) sectors: the beginning of a new cross-cutting symbiosis and contribution to the sustainability of animal production systems

The biological and technical value of the molecules that characterize animal residues, and in particular the by-products (inedible residues), can promote higher added value applications compared to the modes of management adopted today. Animal by-products can become new raw materials having technological, food and pharmaceutical relevance, which could also meet the demand for numerous bio-based and biologically active products. Natural biopolymers (the fibrous structural proteins collagen, elastin, and keratin), proteoglycans, prostaglandins, insulin equivalents, tissue regeneration factors and essential minerals such as calcium, phosphorus and magnesium, can be obtained from animal by-products. These molecules have unique properties which, moreover, cannot be obtained through chemical synthesis; however, their potential is not appropriately harnessed, and even less in France, despite the large quantities of animal by-products generated in the country, which has the largest number of heads of cattle and poultry among the 27 countries of the European Union. Fundamental research will be vital for an effective, multi-sectoral and multi-stakeholder valorisation. The elevation of by-products to the rank of "raw materials" requires an exhaustive physical-chemical and biological characterization to target one sector of application or another; the development of innovative and specific processes, and more suitable management systems, will be equally essential.

## I. INTRODUCTION

De grandes quantités de résidus d'animaux terrestres et aquatiques sont générées tout au long de la transformation pour la consommation humaine. Ces résidus représentent 35 à 50 % du poids de l'animal et peuvent atteindre jusqu'à 75 % pour certaines espèces de poissons (Ferraro *et al.*, 2013 ; 2016). Il a été estimé que 20 à 100 millions de tonnes de ces rejets sont produites chaque année dans le monde, et parmi elles, 16,5 millions de tonnes de résidus de bétail et 5,2 millions de tonnes de résidus de poisson proviennent uniquement de l'Union européenne (Gustavsson *et al.*, 2011). Bien que moins importants que les gisements de résidus végétaux, les gisements des résidus animaux demandent des coûts de gestion significativement plus élevés, avec une dégradation beaucoup plus lente, et un impact sur l'environnement plus négatif. Les dernières statistiques de la FAO (Food and Agricultural Organisation) (2012) pour 2050 prévoient une augmentation à l'échelle mondiale de la consommation des produits d'origine animale (viande et lait), ce qui entraînera une inévitable augmentation des gisements de résidus.

La directive EU 2018/2001 (2018) définit comme « résidu » toute substance qui ne constitue pas le ou les produits finaux qu'un processus de production tend directement à obtenir ; la substance résiduelle n'est pas donc l'objectif premier du processus de production, et celui-ci n'a pas été délibérément modifié pour l'obtenir. Les résidus d'abattage d'animaux élevés pour la production agroalimentaire, et du gibier, sont représentés par tous les tissus et les organes autres la viande de la carcasse (où, pour carcasse, on entend le corps d'un animal de boucherie après l'abattage et l'habillage (EC N° 853/2004)). Ces résidus peuvent être regroupés en deux classes : les résidus comestibles (dans certains cas appelés coproduits), tels que les abats (EC N° 853/2004) ; et les résidus non comestibles ou non destinés à la consommation humaine, définis comme sous-produits par le règlement EC N° 1069/2009, tels que les os non transformés en gélatine, les os dégraissés, les ligaments, les sabots, les plumes et les têtes de volaille, les soies de porc, les cornes, les pieds, les cuirs et les peaux (y compris les chutes et rognures), le tissu adipeux, le sang quand il est destiné à la nourriture animale ou à la production d'engrais.

A l'heure actuelle, près de 15 % des abats sont utilisés pour l'alimentation humaine (abats nobles : foie, cœur, cervelle, langue, rognons, ris) et pour la production de gélatine (peaux de porc principalement) ; une faible quantité, au tour de 1 %, est utilisée en opothérapie (traitement des maladies par de cellules d'origine animale) (FranceAgriMer, 2013). De plus grandes quantités sont « minimisées / valorisées » à travers la production de nourriture pour animaux de compagnie, pour la production d'huiles techniques (lubrification, forages pétroliers, etc.), ou sont incinérées selon les dispositions législatives en vigueur.

Les sous-produits solides représentent un problème majeur à cause notamment de leur nature physico-chimique et biologique. Ils demeurent en fait inadaptés pour une

utilisation dans l'alimentation animale sans un prétraitement industriel (cas des PAT – Protéines Animales Transformées), car le système digestif n'est pas capable de les convertir en nutriments ; en outre, il existe des restrictions d'emploi de certaines protéines (et graisses animales) dérivées des sous-produits animaux pour l'alimentation d'animaux de rente, des poissons et des animaux de compagnie (CGAAER, 2011 ; EU N° 53/2013).

L'emploi des sous-produits pour la fertilisation des sols par épandage direct est interdit ; l'efficacité de conversion en énergie thermique par combustion est assez faible compte-tenu de leur faible pouvoir calorifique (sauf les graisses du tissu adipeux, pour lequel il s'élève à près de 75 % de celui du fioul) mais cependant, leur élimination par incinération génère des coûts importants. En outre, les sous-produits animaux solides se dégradent beaucoup plus lentement des résidus d'origine végétale et entraînent le développement d'odeurs très désagréables (Ferraro *et al.*, 2016).

Néanmoins, la grande valeur biologique et technique des molécules qui caractérisent les résidus animaux, et en particulier les sous-produits, peut faire l'objet d'une utilisation à plus haute valeur ajoutée. Leur valorisation via des procédés innovants et des modes de gestion adaptés pourrait répondre à une demande en nombreux produits biosourcés et biologiquement actifs, avec des propriétés uniques et non répétables par synthèse chimique, faisant des sous-produits de nouvelles matières premières. Au sein de l'Union européenne, les gisements de sous-produits animaux sont très peu valorisés pour des applications à haute valeur ajoutée, et les options de gestion prises sont peu rentables et parfois inefficaces. Par contre, la symbiose industrielle qui pourrait dériver de leurs utilisations (résidus pour des filières = ressources pour d'autres), représenterait une opportunité d'évolution économique, une source de revenu, ainsi qu'une contribution à la durabilité du système de production animale et de plusieurs secteurs d'activités.

Cet article met en évidence le potentiel des sous-produits comme source naturelle la plus abondante et probablement unique, de protéines fibreuses structurales telles que le collagène, l'élastine et la kératine, et molécules associées représentées par les protéoglycanes, les glycoprotéines, les facteurs de régénération des tissus, les hormones-équivalents, et les minéraux, calcium et phosphore. La structure moléculaire et supramoléculaire du collagène de l'élastine et de la kératine, permet en fait de concevoir de nombreux produits tels que des biomatériaux et des matériaux techniques, fibres textiles, émulsions, mousses, micro- et nanocapsules, etc. Parallèlement, l'hydrolyse du collagène, de l'élastine et de la kératine, et des molécules associées, peut produire des peptides (et des acides aminés essentiels) et/ou des mélanges à activité biologique, aux propriétés très intéressantes, faisant des sous-produits animaux une source remarquable de composés fonctionnels pour la pharmaceutique, la cosmétique et l'alimentation (Ferraro *et al.*, 2016).

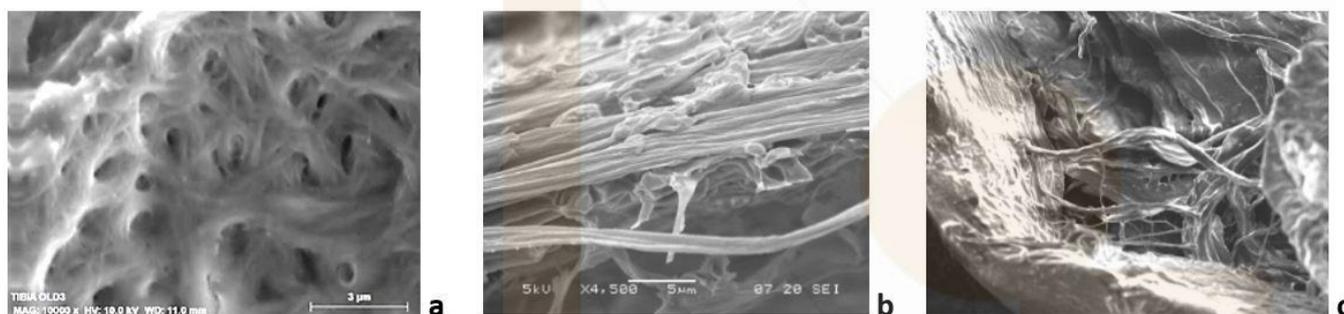
## II. FONCTIONS MECANIQUES ET BIOLOGIQUES *IN-VIVO* ET SOURCES DES PROTEINES FIBREUSES STRUCTURELLES (COLLAGENE, ELASTINE ET KERATINE)

Le collagène, l'élastine et la kératine représentent un sous-ensemble important de protéines fibreuses ; elles sont appelées scléroprotéines, du grec, protéines dures, en vertu de leurs propriétés mécaniques. Elles fournissent support et structure aux mammifères et invertébrés, sont essentielles pour la locomotion, pour la résistance et pour la capacité à porter des charges, pour la protection des organes internes et des tissus (Brinckmann *et al.* 2005 ; Daamen *et al.*, 2007 ;

Vasconcelos et Cavaco-Paulo, 2013). Dans le règne animal, elles sont l'équivalent des polysaccharides (cellulose, chitosan, etc.) du règne végétal, ayant les mêmes fonctions de support et de protection. Ces caractéristiques sont le résultat d'un assemblage hiérarchique qui génère des fibres plus ou moins épaisses et rigides, avec une géométrie différente selon le tissu représenté (Figure 1).

**Figure 1. : Assemblage de fibres de collagène (a), de kératine (b) et d'élastine (c)**

(Microscopie électronique à balayage, INRA – Institut National de la Recherche Agronomique, centre Auvergne-Rhône-Alpes)



Le collagène et l'élastine sont les principaux constituants du tissu conjonctif, où le collagène fournit la rigidité tandis que l'élastine fournit la flexibilité et la rotabilité. Le collagène est la protéine la plus abondante chez les vertébrés et les invertébrés, et représente environ 30 % des protéines totales chez l'Homme et l'animal ; elle est présente dans tous les tissus et les organes (Duconseille *et al.*, 2015). L'élastine est un composant essentiel de tous les tissus et organes pourvus d'élasticité et de résilience ; elle est produite principalement avant la naissance puis au cours des premières années de la vie, lorsque les cellules produisent toute l'élastine nécessaire au développement du corps. Au contraire du collagène, il n'y a pas de régénération après sa production. Bien qu'elle soit la protéine la plus durable du règne animal, avec une demi-vie de 74 ans dans les tissus et les organes sains, le processus de vieillissement en modifie la structure chez les adultes et les personnes âgées, où elle devient tortueuse, effilochée et poreuse avec des conséquences sur la locomotion (Mithieux et Weiss, 2005).

La kératine est un composant important du système tégumentaire chez l'Homme et l'animal, où elle y remplit diverses fonctions telles que l'étanchéité et la régulation de la

température, et elle fournit une couche protectrice des tissus les plus profonds contre les infections ; elle est également importante dans la perception de la douleur et de la pression (Rizzo, 2015). En raison de ses rôles, la kératine représente le biopolymère le plus important chez les mammifères après le collagène. C'est un matériau très dur qui montre des propriétés intermédiaires entre le collagène et l'élastine : elle est viscoélastique, ductile et résiliente, et a un module de Young (élasticité/traction) plus élevé que le collagène (Eslahi *et al.*, 2013). On estime qu'environ 5 millions de tonnes de résidus riches en kératine sont générés chaque année dans la seule Union européenne ; un pourcentage de ce sous-produit est utilisé pour la production des PAT (principalement à partir des plumes et soies de porc). Ils sont exportés ou incinérés dans les cas où ils ne sont pas utilisés pour la production de nourriture animale, avec une forte demande énergétique à cause de leur stabilité vis-à-vis de la combustion. Ils peuvent notamment représenter un problème écologique majeur si déversés dans la nature car la kératine agit comme un caoutchouc et oppose une grande résistance à la dégradation (Ferraro *et al.*, 2016).

## III. UTILISATION DU COLLAGENE, DE L'ELASTINE, DE LA KERATINE ET DES MOLECULES ASSOCIEES

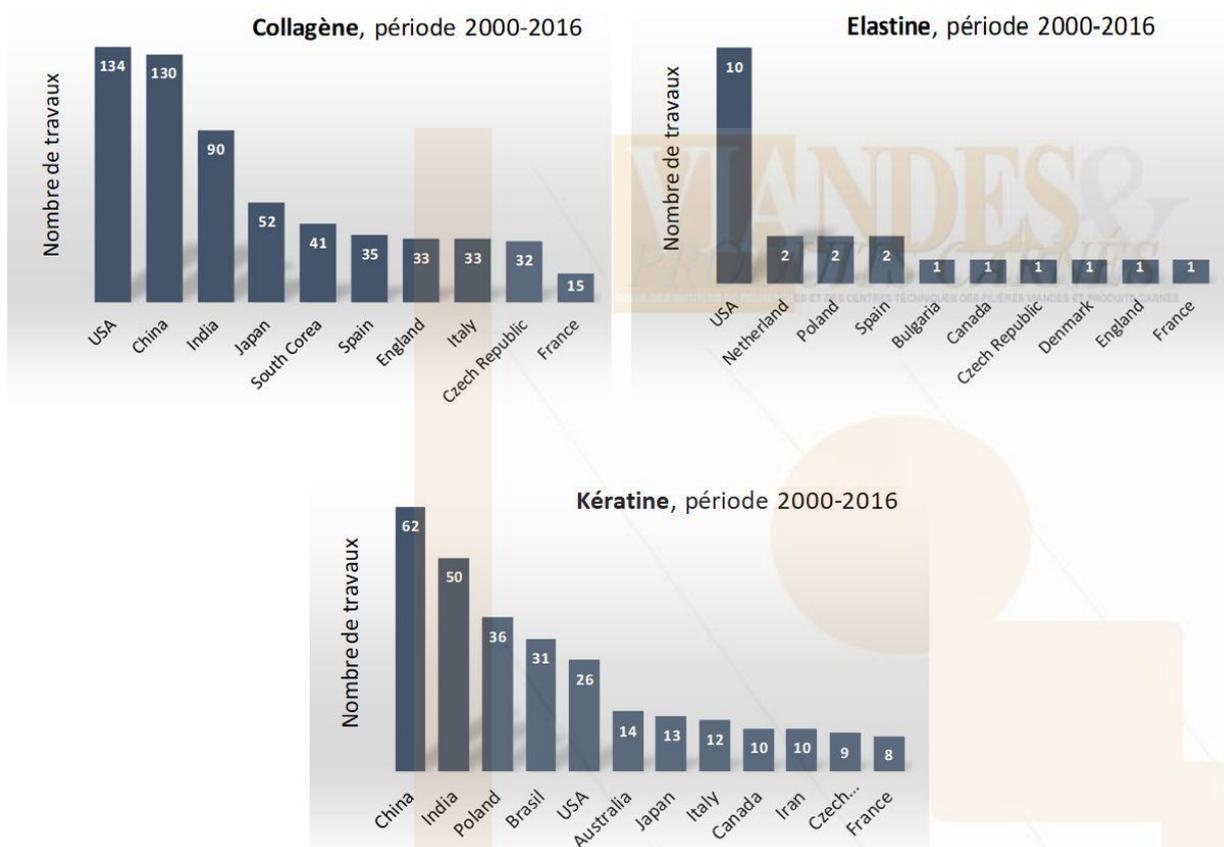
Les fonctionnalités du collagène, de l'élastine et de la kératine extraites des sous-produits animaux suscitent de plus en plus d'attention, comme en témoigne aussi l'évolution des travaux scientifiques menés sur ce sujet. Le nombre de publications sur le collagène et sur l'élastine a été multiplié par 10 durant la période 2000 – 2016 par rapport à la période 1970 – 1999, et par plus de 20 pour la kératine, dans la même période. Cet intérêt est dû à la combinaison de plusieurs

facteurs : les caractéristiques uniques du collagène, de l'élastine et de la kératine d'origine naturelle, la disponibilité d'importants gisements de matières premières à coût zéro (telles que les sous-produits animaux d'où elles peuvent être extraites), et la solution à une problématique socio-économique et environnementale via une valorisation à haute valeur ajoutée. La synergie entre ces trois facteurs traduit bien de surcroît le concept d'économie circulaire.

En Europe, les potentialités de valorisation sont très peu exploitées, et encore moins en France (Figure 2), malgré les importants gisements de sous-produits animaux générés dans

le pays, qui détient, en outre, le plus grand nombre de têtes de bétail bovin et de volaille parmi les 28 pays de l'Union européenne (EUROSTAT, 2014).

**Figure 2 :** Nombre de travaux repérés par une recherche bibliographique avec principalement des publications relatives à la valorisation des sous-produits animaux, à l'extraction et à l'utilisation du collagène, de l'élastine et de la kératine



Travaux réalisés par l'unité INRA QuaPa (Qualité des Produits Animaux) via le service scientifique et technique de l'INRA, fin 2016.

L'utilisation des protéines fibreuses structurales, mise en évidence dans ceux nombreux travaux, devrait continuer à augmenter, et dans plusieurs domaines. Les matériaux, la

santé et le bien-être, et l'agriculture, sont les secteurs où collagène, élastine et kératine peuvent trouver une large utilisation, comme mis en évidence dans la Figure 3.

**Figure 3 :** Secteurs d'applications pratiques du collagène, de l'élastine, de la kératine et des molécules associées



### 3.1 Utilisations du collagène, de l'élastine et de la kératine en tant que biopolymères

L'ingénierie tissulaire a été le premier secteur à exploiter les propriétés des protéines fibreuses structurales et il multiplie ses recherches encore aujourd'hui. Collagène, élastine et kératine ont la capacité à se polymériser (spontanément ou de façon induite sous l'influence de certains paramètres physico-chimiques) en réseaux tridimensionnels, structures fibreuses et poreuses, hydrogels,

mousses et capsules (Daamen *et al.*, 2007 ; Vasconcelos et Cavaco-Paulo, 2013). Des constructions biocompatibles et mimétiques, comme des échafaudages pour l'adhésion de cellules et la délivrance de composés bioactifs, des substituts cutanés et vasculaires pour la cicatrisation des plaies, pour la régénération osseuse et pour la réparation des nerfs périphériques, des macro, micro et nanocapsules pour la délivrance de médicaments peuvent être obtenues. L'Asie est le continent qui a mené le plus de recherches sur les

biomatériaux à base de kératine depuis la première application médicale d'un cheveu humain pyrolysé par un herboriste chinois au XVI<sup>e</sup> siècle. Des échafaudages, des hydrogels, des films et des fibres ont été ensuite préparés à partir de la première étude d'un scientifique japonais datant de 1982 sur la production d'un greffon vasculaire aux propriétés hémostatiques (Rouse et Van Dyke, 2010). La laine de mauvaise qualité a été de loin le sous-produit dominant pour la préparation des textiles kératiniques puis des biomatériaux. Au contraire, le potentiel des plumes n'a été exploré que très récemment. Moore *et al.* (2006) ont mis en évidence que, malgré une charge de rupture plus faible, les films de kératine des plumes ont le même degré d'allongement que leurs analogues de la kératine de la laine. En ce qui concerne le collagène, des éponges et des hydrogels ont été également produits et explorés en chirurgie hémostatique, en pansements pour la peau brûlée et ulcérée, pour soigner les plaies de lit, pour favoriser la motilité et la croissance des cellules saines afin de reconstituer les tissus (Chattopadhyay et Raines, 2014). Outre leurs comportements en tant que substances actives, ils sont également utilisés pour véhiculer des kératinocytes destinés au remplacement cutané et pour le transport des médicaments tels que des antibiotiques. En fonction du degré de réticulation, les éponges et les hydrogels de collagène sont complètement dégradés en petits peptides et en acides aminés libres en l'espace de 3 à 6 semaines (Chattopadhyay et Raines, 2014 ; Singh *et al.*, 2011). Actuellement, l'origine du collagène est principalement bovine, mais on peut s'attendre à ce que le collagène marin devienne aussi important prochainement. Ce dernier présente en fait des caractéristiques différentes par rapport à l'équivalent des mammifères, cependant, il n'a pas été complètement valorisé ; il a été estimé en fait que seulement 1 % des résidus d'origine marine sont explorés pour la chimie fine et pour la chimie de spécialités (Ferraro *et al.*, 2013). Les matériaux capables de remplacer l'élastine, en particulier chez les adultes, sont en forte demande en raison du faible renouvellement de cette protéine, dont la source principale aujourd'hui est l'épiderme des cadavres. La possibilité de produire des substituts cutanés, des constructions tubulaires pour les greffes vasculaires, des valves cardiaques et du cartilage à base d'élastine a été explorée dans les dernières années. Certains de ces biomatériaux synthétiques ont été obtenus par l'ingénierie des protéines et/ou par des techniques de biologie moléculaire (Daamen *et al.*, 2007 ; Nilson-Smith et Weiss, 2011). Néanmoins, l'élastine naturelle, extraite des tissus animaux, pourrait offrir la possibilité de matériaux plus biocompatibles, grâce aussi à la présence des molécules naturellement associées à l'élastine dans le tissu conjonctif qui contribuent à ses fonctionnalités.

Outre les applications en médecine, le collagène, l'élastine et la kératine récupérés à partir de produits d'origine animale deviennent de plus en plus recherchés dans l'industrie des matériaux et du textile, sans parler du grand intérêt manifesté par le secteur cosmétique. Les propriétés rhéologiques et fonctionnelles du collagène, sont exploitées dans le secteur alimentaire en tant qu'émulsifiants, en particulier dans la perspective de réduire la graisse et l'amidon, dans les boyaux comestibles, destinés principalement aux produits à base de viande, dans les sachets et emballages biodégradables, dans la fonctionnalisation et la finition des tissus pour vêtements ordinaires et industriels. En outre, la production d'engrais fonctionnels plus performants, avec notamment la possibilité de développer des revêtements à base de polymères biodégradables tels que le collagène, l'élastine et la kératine, pour une libération contrôlée des nutriments, est un secteur

assez prometteur, surtout à la lumière de la nouvelle réglementation sur les fertilisants parue au mois de juin 2019 (EU 2019/1009). Cette réglementation encourage la valorisation des sous-produits animaux en reconnaissant leur potentialité de contribuer à la croissance du marché interne des fertilisants, à l'économie circulaire de l'EU et à son indépendance des Pays tiers.

### 3.2. Peptides bioactifs issus du collagène, de l'élastine et de la kératine

L'hydrolyse enzymatique, chimique et physique ainsi que la fermentation, peuvent donner lieu à des fragments spécifiques de la chaîne protéique du collagène, de l'élastine et de la kératine, avec de nombreux effets positifs sur l'Homme et l'animal. Ces fragments sont de petites tailles par rapport à la chaîne non hydrolysée (2 à 30 acides aminés, contre 1000 à 1300) et sont appelés peptides bioactifs. Leur caractéristique la plus surprenante, et qui suscite beaucoup d'attention depuis quelques années, est le fait que ces peptides sont complètement inactifs au sein de la chaîne protéique mais qu'une fois libérés, ils peuvent moduler de nombreuses voies physiologiques lorsqu'ils atteignent la circulation sanguine (Ferraro *et al.*, 2016). Les peptides de collagène se sont révélés actifs dans la régénération du cartilage, principalement en cas d'arthrose, dans la régénération de l'os, l'affermissement de la peau et la cicatrisation des plaies. L'activité antithrombotique, antihypertensive, immunomodulatrice, anticancéreuse, antagoniste des opiacés, chélatrice des oligominéraux essentiels, et la participation à la synthèse de collagène natif ont été aussi mis en évidence (Gómez-Guillén *et al.*, 2011). Les peptides de collagène sont également intéressants pour leur pouvoir antioxydant et cryoprotecteur qui pourrait permettre de remplacer des composés synthétiques dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique. Une fraction peptidique de collagène bovin a, par exemple, réduit la croissance des cristaux de glace d'un facteur 10 avec amélioration conséquente de la texture. L'incorporation d'un peptide de collagène dans un muscle émincé de poisson a permis de prévenir les pertes d'eau au cours de la décongélation, et l'oxydation des lipides a aussi été réduite par l'ajout de 25 ppm du même peptide (Wang *et al.*, 2009 ; Gómez-Guillén *et al.*, 2011). L'étude des peptides de kératine a été principalement axée sur les cosmétiques et en particulier sur les soins capillaires, car la protéine en est le constituant principal, et le domaine est très lucratif (Ferraro *et al.*, 2016). Des effets importants sur la peau ont également été remarqués, tels que l'augmentation de l'hydratation et de l'élasticité, ainsi qu'un renforcement de l'intégrité de la barrière cutanée (Barba *et al.*, 2008). L'activité antioxydante et antihypertensive, et l'activité inhibitrice de l'enzyme dipeptidyl peptidase-IV des peptides de kératine, ont été récemment rapportées par Fontoura *et al.* (2014). De nombreuses recherches sur l'inhibition de la dipeptidyl peptidase-IV sont en cours car cette protéine joue un rôle pathogène dans le développement de la fibrose de divers organes tels que le foie et les reins, et dans le diabète (Kaji *et al.*, 2014). Les peptides d'élastine modulent également la physiologie de nombreuses cellules telles que les fibroblastes, les cellules musculaires lisses, les cellules endothéliales, les macrophages, les neutrophiles, les leucocytes et les lymphocytes. Elles peuvent améliorer la vasorelaxation et sont également actives sur les cellules cancéreuses humaines telles que les cellules de fibrosarcome, de carcinome du poumon, de mélanome et de gliome, et peuvent induire une apoptose à fortes concentrations (Duca *et al.*, 2004 ; Ferraro *et al.*, 2016).

Les bioactivités des peptides ont été mises en évidence par des études *in-vitro*, *ex-vivo* (sur des lignées cellulaires) et sur des modèles animaux (études précliniques) ; certaines de ces bioactivités ont été déjà validées par des études cliniques (sur l'Homme) assez récemment (König *et al.*, 2018 ; Porfirio et Fanaro, 2016). Mais si les effets des peptides bioactifs sur l'Homme via l'administration topique et sous-cutanée ont été documentés, les effets biologiques après ingestion orale sont par contre très peu connus. Certaines études chez l'animal ont révélé que jusqu'à 800 Da, les peptides sont directement absorbés (Iwai *et al.*, 2005) mais la biodisponibilité n'est pas clairement comprise ; plus d'informations sont donc nécessaires pour décrire les mécanismes associés et l'effet du système gastro-intestinal sur la bioactivité. On peut s'attendre donc à une augmentation des études concernant les peptides bioactifs du collagène, de l'élastine et de la kératine (et de tout autre source protéique), et leurs potentialités d'application, ce qui impliquera à la fois la découverte de nouvelles fonctionnalités et des mécanismes d'actions élargis, avec par conséquent, des possibles applications inédites.

### **3.3 Autres molécules d'intérêt présentes dans les sous-produits animaux non comestibles**

Outre les protéines fibreuses structurales, les résidus animaux non comestibles comptent des molécules ayant elles aussi un intérêt technologique, alimentaire et pharmaceutique. Le tissu conjonctif minéralisé est particulièrement riche en

macro-minéraux essentiels : calcium, phosphore et magnésium. La Commission européenne a classé ces deux derniers minéraux comme matières premières critiques pour l'Union européenne, en raison de sa condition de dépendance, l'obligeant à s'approvisionner chez des Pays tiers (Maroc, Tunisie et Russie pour le phosphore, Chine pour le magnésium) (EC, 2018). Ces matières premières critiques sont liées à un nombre significatif d'activités productives et de produits, que ce soit en amont ou en aval de la chaîne de production ; elles sont particulièrement importantes pour des produits de haute technologie et dans la mise en œuvre de certaines technologies émergentes. Le caoutchouc naturel a aussi été identifié comme matière première critique pour l'économie de l'UE ; dans ce cadre, l'élastine et la kératine extraites des sous-produits animaux pourraient être candidates privilégiées pour répondre à cette demande. D'autres molécules, telles que les protéoglycanes, les prostaglandines, les insuline-équivalents et les facteurs de régénération des tissus, ont un très fort potentiel d'application dans le domaine de la nutrition (métabolisme de nutriments, perception de la satiété, etc.) et de la pharmaceutique. Les oligo-éléments fer et zinc, et les acides aminés essentiels tels que la cystéine, la leucine et l'isoleucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, la tyrosine et la valine (9 des 11 acides aminés essentiels pour l'Homme) peuvent être également obtenus des sous-produits animaux non comestibles.

## **IV. TENDANCES FUTURES**

Le contexte national et international actuel est particulièrement favorable à la valorisation des résidus issus des activités productives, où les industries agroalimentaires de la viande et du poisson retrouvent une place d'ampleur. La valorisation des résidus s'inscrit parmi les objectifs prioritaires de l'Union Européenne, énoncés dans plusieurs documents parus dans les dernières années et récemment, tels que la « Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources » (Commission Européenne, 2011), la nouvelle directive sur les déchets (EU 2018/581) et sur les fertilisants (EU 2019/1009), le plan d'action sur l'économie circulaire (EU 2019/90 final), parmi d'autres. Ces mesures ont pour finalité principale d'améliorer la valorisation, de stimuler l'innovation par le recyclage, de créer des emplois à un coût relativement bas, de réduire la dépendance de l'Union européenne aux matières premières importées, tout en contribuant à un meilleur environnement.

### **Remerciements**

L'autrice remercie vivement Sylvie Blinet, INRAE UR QuaPA, pour la relecture et la correction du texte.

### **Références :**

- Barba C., Méndez S., Roddick-Lanzilotta A., Kelly R., Parra J.L., Coderch L. (2008). Cosmetic effectiveness of topically applied hydrolysed keratin peptides and lipids derived from wool. *Skin Research Technology* 14(2), 243-248.
- Brinckmann J., Notbohm H., Müller P.K. (2005). *Collagen. Primer in structure, processing and assembly*. Springer, Berlin, Germany.
- CGAAER (2011). Production des sous-produits animaux et utilisation des produits dérivés en France. Conseil General de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux. Rapport N° 11043.
- Chattopadhyay S., Raines R.T. (2014). Collagen-based biomaterials for wound healing. *Biopolymers* 101, 821-833.
- Commission Européenne (2011). Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources, COM(2011) 571 final.
- Daamen W.F., Veerkamp J.H., van Hest J.C.M., van Kuppevelt T.H. (2007). Elastin as a biomaterial for tissue engineering. *Biomaterials* 28, 4378-4398.

D'importantes retombées économiques et sociales sont donc à espérer.

La recherche fondamentale sera importante et indispensable pour une valorisation des sous-produits animaux (et de tout autre type de résidu) efficace, multisectorielle et multi-acteurs. L'élévation des sous-produits au rang de « matières premières » demande en fait la mise en œuvre de systèmes de gestion adaptés à la valorisation (stockage, traçabilité, conservation), et une caractérisation physico-chimique et biologique exhaustive. Comprendre l'influence des multiples facteurs (tels que l'âge, la race, l'anatomie des tissus, etc.) sur le rendement d'extraction des molécules d'intérêt et sur leurs fonctionnalités sera fondamental pour cibler un secteur d'application ou un autre. La mise au point de procédés innovants et spécifiques sera tout autant indispensable.

- Duca L., Floquet N., Alix A.J.P., Haye B., Debelle L. (2004). Elastin as a matrikine. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 49, 235-244.
- Duconseille A., Astruc T., Quintana N., Meersman F., Sante-Lhoutellier V. (2015). Gelatin structure and composition linked to hard capsule dissolution: A review. *Food Hydrocolloids* 43, 360-376.
- Eslahi N., Dadashian F., Nejad N.H. (2013). An investigation on keratin extraction from wool and feathers waste by enzymatic hydrolysis. *Preparative Biochemistry and Biotechnology* 43(7), 624-648.
- European Commission (2018). Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy, part 1/3. Brussels 16.01.2018.
- EC 853/2004. Regulation (EC) No 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin.
- EC 1069/2009. Regulation (EC) No 1069/2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002 (Animal by-products Regulation).
- EU 56/2013. Commission Regulation (EU) 56/2013 amending Annexes I and IV to Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council laying down rules for the prevention, control and eradication of certain transmissible spongiform encephalopathies.
- EU 2018/2001. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast).
- EU 2018/851. Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste.
- EU 2019/90 final. Report from the Commission of the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions on the implementation of the Circular Economy Action Plan, 4 March 2019.
- EU 2019/1009. Regulation (EU) 2019/1009 of the European parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilizing products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003.
- EUROSTAT (2014). Meat production statistics, European Commission. Available on-line at [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Meat\\_production\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Meat_production_statistics).
- FAO (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, Food and Agricultural Organisation.
- Ferraro V., Carvalho A.P., Piccirillo C., Santos M., Castro M.P.L., Pintado E.M. (2013). Extraction of high added-value biological compounds from sardine, sardine-type fish and mackerel canning residues — A review. *Material Science & Engineering C*, 3111-3120.
- Ferraro V., Anton M., Santé-Lhoutellier V. (2016). The “sisters”  $\alpha$ -helices of collagen, elastin and keratin recovered from animal by-products: functionality, bioactivity and trends of application. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 65-75.
- Fontoura R., Daroit D.J., Correa A.P.F., Meira S.M.M., Mosquera M., Brandelli A. (2014). Production of feathers hydrolysates with antioxidant, angiotensin-I converting enzyme- and dipeptidyl peptidase-IV- inhibitory activities. *New Biotechnology*, 31, 506-513.
- FranceAgriMer (2013). Etude sur la valorisation du 5e quartier des filières bovine, ovine et porcine en France. Les études de FranceAgriMer.
- Gómez-Guillén M.C., Giménez B., López-Caballero M.E., Monteiro M.P. (2011). Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A Review. *Food Hydrocolloids* 25(8), 1813-1827.
- Gustavsson J., Cederberg C., Sonesson U., van Otterdijk R., Meybeck A. (2011). Global food losses and food waste. FAO (Food and Agricultural Organisation). Available at: <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>.
- Iwai K., Hasegawa T., Taguchi Y., Morimatsu, F., Sato K., Nakamura, Y., Higashi, A., Kido, Y., Nakabo, Y., Ohtsuki, K. (2005). Identification of food-derived collagen peptides in human blood after oral ingestion of gelatin hydrolysates. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 53, 6531-6536.
- Kaji K., Yoshiji H., Ikenaka Y., Noguchi R., Aihara Y., Douhara A. Moriya K., Kawaratani H., Shirai Y., Yoshii J, Yanase K., Kitade M., Namisaki T., Fukui H. (2014). Dipeptidyl peptidase-4 inhibitor attenuates hepatic fibrosis via suppression of activated hepatic stellate cell in rats. *Journal of Gastroenterology*, 49, 481–491.
- König D., Oesser S., Scharla S., Zdzieblik D., Gollhofer A. (2018). Specific Collagen Peptides Improve Bone Mineral Density and Bone Markers in Postmenopausal Women—A Randomized Controlled Study. *Nutrients*, 10, 97.
- Mithieux S.M., Weiss A.S. (2005). Elastin. *Advances in Proteins Chemistry* 70, 437-461.
- Moore G.R.P., Martelli S.M., Gandolfo C.A., Pires A.T.N., Laurindo J.B. (2006). Queratina de penas de frango: Extração, caracterização e obtenção de filmes. *Ciência e Tecnologia Alimentar Campinas* 26(2), 421-427.
- Nilson-Smith L., Weiss A. (2011). Elastin based constructs. In: Eberli D. (Ed.) *Regenerative medicine and tissue engineering – Cells and biomaterials*, pp. 323-340. InTech.
- Porfirio E., Fanaro G.B. (2016). Collagen supplementation as a complementary therapy for the prevention and treatment of osteoporosis and osteoarthritis: a systematic review. *Revista Brasileira de Geriatria e Gerontologia*, 19, 153-164.
- Rizzo D. (2015). The integumentary system. In: *Fundamentals of Anatomy & Physiology*, Chapter 6, pp.113-135. Cengage Learning, Boston, USA.
- Rouse J.G., Van Dyke M.E. (2010). A review of keratin-based biomaterials for biomedical applications. *Materials* 3, 999-1014.
- Singh O., Gupta S.S., Sani M., Moses S., Shukla S., Mathur R.K. (2011). Collagen dressing versus conventional dressings in burn and chronic wounds: a retrospective study. *Journal of Cutaneous and Aesthetic Surgery* 4, 12-16.
- Vasconcelos A., Cavaco-Paulo A. (2013). The use of keratin in biomedical applications. *Current Drug Target* 14, 612-619.
- Wang S., Agyare K., Damodaran S. (2009). Optimisation of hydrolysis conditions and fractionation of peptides cryoprotectants from gelatin hydrolysate. *Food Chemistry*, 115, 620-630.