Synthèses

DURABILITÉ DES SYSTÈMES POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Combiner les approches locales et globales

A. Thomas, A. Alpha, A. Barczak, N. Zakhia-Rozis, coord.

éditions Quæ

Chapitre 8

Réduire les pertes et le gaspillage alimentaires dans les chaînes d'approvisionnement en viandes et en fruits : que peut apporter le génie des procédés alimentaires ?

Alain Kondjoyan, Valerie Guillard, Pierre-Sylvain Mirade, Thierry Goli, Antoine Collignan, Élodie Arnaud, Sandrine Costa, Nathalie Gontard, Nadine Zakhia-Rozis

Les produits végétaux et animaux sont rarement consommés immédiatement après la récolte ou l'abattage, ce qui implique que des mesures appropriées (transformation, conditionnement, stockage) doivent être prises pour garantir la sécurité alimentaire. Lorsque le nombre d'étapes de transformation et de distribution se multiplie, il en résulte inévitablement des pertes et du gaspillage alimentaires (PGA). Les pertes alimentaires se produisent tout au long de la chaîne d'approvisionnement, depuis la récolte (ou l'abattage) jusqu'à la distribution, mais sans l'inclure, tandis que le gaspillage inclut les étapes de distribution et de consommation (FAO, 2019). Même si les PGA se produisent tout au long de la chaîne d'approvisionnement, ils atteignent leur maximum en bout de chaîne, c'est-à-dire au niveau de la consommation par les ménages ou de la restauration. L'Union européenne s'est fixée pour objectif de réduire de moitié les PGA d'ici 2030. L'allongement de la durée de conservation des produits grâce à l'optimisation des technologies de transformation et de conservation innovantes est un moyen essentiel pour atteindre cet objectif. Il est donc urgent pour les décideurs politiques et pour tous les acteurs impliqués dans les chaînes d'approvisionnement de quantifier l'impact des technologies de transformation et de conservation sur la réduction des PGA. Cela permettra d'évaluer le rapport bénéfice/coût de la réduction des PGA obtenue grâce aux technologies innovantes et les compromis nécessaires.

À noter que les PGA traités dans ce chapitre se concentrent sur la diminution de la quantité et de la qualité[10] des aliments aux étapes de transformation, de distribution

10. La diminution de la quantité fait référence aux aliments qui sortent de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, tandis que la diminution de la qualité fait référence à la diminution des attributs de ces aliments qui réduit leur valeur quant à l'utilisation prévue (FAO, 2019).

et de consommation, à cause d'un défaut ou d'une faible efficacité des technologies de transformation-conservation, ou d'une mauvaise compréhension de ces technologies par les acteurs de la chaîne alimentaire (y compris les consommateurs). Les PGA étudiés ne comprennent donc pas ceux qui existent au niveau de l'agriculture et de la récolte, et plus généralement les pertes post-récolte, c'est-à-dire celles qui se produisent avant qu'un produit n'atteigne les installations de transformation. Notre principale question est de quantifier l'impact des technologies de transformation sur la diminution des PGA. D'autres actions de diminution des PGA qui ne sont pas directement liées à l'optimisation du traitement et du stockage, comme les programmes de redistribution des aliments sur le point d'expirer, n'entrent pas dans le cadre de cette étude mais ont été développées dans d'autres projets (voir, par exemple, le projet européen Reamit ; Interreg, 2021).

Ce chapitre présente brièvement les résultats concernant les réductions des PGA dans une chaîne d'approvisionnement en viande et dans une chaîne en fruits et en légumes frais. Des perspectives sont ensuite discutées pour réduire davantage les pertes dans ces chaînes grâce à des technologies de traitement et de conservation optimisées, en utilisant une approche générique de génie des procédés alimentaires et des collaborations multidisciplinaires associées.

Objectifs et approche méthodologique

Notre objectif était de quantifier la part des PGA causée par un manque ou une mauvaise gestion des technologies de conservation dans deux types de chaînes d'approvisionnement alimentaire, l'une concernant la viande et l'autre les fruits et légumes frais. La première étape a consisté à étudier l'impact des technologies de transformation et de conservation sur l'extension de la durée de vie des produits et la réduction concomitante des PGA aux différentes étapes des chaînes post-abattage et post-récolte. Pour ce faire, nous avons d'abord utilisé des approches de génie des procédés alimentaires basées sur le développement de modèles mathématiques. Ces approches sont cruciales, car la combinaison d'un traitement, d'une conservation et d'un conditionnement efficaces permet d'éviter les pertes, non seulement en usine ou lors de la distribution des aliments, mais aussi au domicile des consommateurs. La deuxième étape a consisté à établir un lien entre l'allongement de la durée de conservation du produit et la diminution des PGA en différents points de la chaîne alimentaire, et notamment au niveau de la consommation des ménages. Pour établir ces liens, il fallait disposer de données expérimentales sur les PGA. Étant donné que ces données étaient rares et fragmentées, des enquêtes ont été menées pour obtenir plus d'informations sur les pertes aux différentes étapes des chaînes d'approvisionnement en viande et en fruits et légumes. Dans la mesure du possible, l'impact des comportements des acteurs et des consommateurs, tels que les pratiques courantes, les connaissances et les croyances concernant les technologies utilisées pour conserver les aliments, a également été pris en compte afin de prédire les PGA. Les données publiées confondent souvent les pertes dues à la dégradation des aliments et le pur gaspillage d'aliments comestibles (en raison du comportement imprévisible des consommateurs, qui jettent parfois les produits comestibles). Par conséquent, elles ne quantifient pas clairement la part des pertes qui pourraient être évitées par une amélioration des procédés alimentaires.

Deux types de phénomènes biologiques, qui impactent la qualité des produits vendus, peuvent expliquer la perte (ou le rejet) d'aliments par les consommateurs : le développement de micro-organismes d'altération et les dégradations biochimiques. Il est important de prendre en compte ces deux phénomènes pour prévoir et prévenir les pertes dans les chaînes alimentaires. En pratique, de nombreux procédés peuvent améliorer la conservation des aliments et limiter les pertes, et ils peuvent souvent être combinés ou adaptés pour une plus grande efficacité. Des recherches ont été menées sur la viande pour développer des procédés adaptables et peu coûteux, ou pouvant être appliqués à différentes échelles, tant en France qu'en Afrique du Sud. Cette approche par des procédés simples est similaire à celle utilisée pour désinfecter l'eau à l'aide de l'énergie solaire (McGuigan *et al*., 2012). Étant donné que la qualité des aliments recouvre de multiples dimensions et que la durabilité est un problème majeur pour les procédés, la modélisation multi-objectifs était une façon intéressante d'aborder le problème. La recherche sur la chaîne des fruits et légumes frais s'est concentrée sur la fraise, un fruit emblématique en France. En tant que produit hautement périssable avec une durée de vie très courte, l'étude de la fraise représente le cas le plus difficile sur l'ensemble de cette chaîne. Dans ce cas, le travail s'est concentré sur la quantification de l'augmentation de la durée de vie du produit et de la réduction concomitante des PGA dans la chaîne post-récolte en utilisant un emballage sous atmosphère modifiée bien conçu, en plus, ou à la place, de l'utilisation exclusive du froid. La modélisation mathématique était indispensable pour explorer les nombreux scénarios post-récolte et les différentes pratiques des consommateurs.

Pertes et gaspillage tout au long de la chaîne d'approvisionnement en viandes

La production de protéines animales nécessite plus d'énergie, de terres et d'eau et génère plus d'émissions de CO_2 que celle de protéines végétales. De plus, la croissance de la population mondiale et l'élévation des niveaux de vie ont fait croître la demande en protéines de viandes, qui ne pourra probablement pas être satisfaite dans le futur. Il est donc essentiel de limiter les pertes et le gaspillage à chaque étape de la chaîne alimentaire, en particulier par le contrôle de la chaîne du froid et l'utilisation d'emballages appropriés. Dans les pays occidentaux, la plupart des viandes sont vendues après l'abattage et la découpe. Dans les pays du Sud, où la fraîcheur de la viande ne peut pas être garantie par la chaîne du froid, le produit est souvent stabilisé à l'aide de procédés traditionnels (salage, séchage et fumage), pour être consommé ultérieurement ou transporté dans des régions éloignées. Les PGA ont donc été comparés dans deux pays différents, la France et l'Afrique du Sud.

Chaîne d'approvisionnement française en viandes fraîches

Les données sur les PGA étant rares, nous avons mené une enquête pour les évaluer dans un contexte français afin de déterminer l'étape à laquelle la plupart des pertes se produisent dans la filière des viandes fraîches. Les données ont été recueillies auprès

de cinq entreprises situées dans le département de l'Allier, en région Auvergne-Rhône-Alpes (centre de la France), comprenant à la fois des petites entreprises engagées dans le commerce régional et des entreprises de plus grande taille engagées dans le commerce national ou international. Les résultats ont montré que les pertes étaient très faibles dans les usines lors de la transformation des viandes, alors qu'elles devenaient importantes lors de leur distribution (Comparet *et al*., 2016). Si les pourcentages de pertes semblaient faibles (2 % à 4 % de la production), ils devaient être relativisés car ils représentaient des tonnages importants. De plus, seuls les grands supermarchés avaient été considérés, alors que l'on sait que les pertes sont plus élevées dans les petits magasins en raison d'un niveau d'activité plus faible. Enfin, les pertes de viandes même minimes peuvent avoir un fort impact en matière de durabilité, notamment pour la filière bovine ; certains auteurs estiment qu'une perte de 3,5 % de viande de bœuf dans un supermarché équivaut à 29 % des pertes alimentaires globales du supermarché lorsqu'elle est traduite en empreinte carbone (Eriksson *et al*., 2014). Sur la base de la différence du montant total des pertes déjà connues, la conclusion la plus importante de notre enquête est que les pertes de viandes fraîches se produisent principalement chez le consommateur. Cela s'explique en partie par la meilleure maîtrise de la conservation des aliments par les industriels et les distributeurs. Les professionnels minimisent aussi leurs durées de stockage, ce qui leur permet de transférer les PGA vers l'extrémité de la chaîne alimentaire (c'est-à-dire vers les consommateurs). La surface de la viande étant toujours contaminée microbiologiquement lors de l'abattage des animaux, puis de la découpe des carcasses, une solution technique pour la stabiliser peut être de la traiter en appliquant des procédés thermiques par la vapeur, qui restent des procédés assez simples et flexibles. Des recherches antérieures avaient montré que ces traitements thermiques représentaient un moyen efficace de décontaminer la surface de la carcasse et des muscles, tandis que la recontamination ultérieure pouvait être contrôlée en utilisant des composés chimiques naturels (Kondjoyan et Portanguen, 2008 ; Lecompte *et al*., 2008). Mais les conservateurs, mêmes naturels, sont de moins en moins acceptés par les consommateurs. La formation d'une croûte sèche à la surface de la viande, par un chauffage supplémentaire, a donc été envisagée dans notre projet pour éviter la recontamination de la surface et le développement des micro-organismes. Mais cet effet barrière ne reste efficace que jusqu'à ce que la croûte se réhydrate. Nous avons donc effectué des calculs pour estimer le temps pendant lequel la croûte pouvait garder un rôle de barrière. Les résultats montrent qu'aux températures et aux conditions d'emballage habituelles, la croûte perd assez rapidement son effet barrière. La technique du croûtage devra donc être combinée à l'utilisation d'un emballage modifié pour contrôler l'humidité ou la composition gazeuse de l'environnement autour du produit.

Chaîne d'approvisionnement en viandes transformées en Afrique du Sud

La consommation de viande de bétail et de gibier est très répandue en Afrique du Sud. Les viandes transformées traditionnelles comme le biltong (viande assaisonnée avec du sel, du vinaigre et des épices, puis séchée) et le *droëwors* (littéralement, « saucisse sèche ») peuvent être conservées sans chambre froide. Le secteur traditionnel de ces produits carnés à humidité intermédiaire s'industrialise de plus en plus en Afrique du

Sud pour répondre à la demande croissante du marché. Les objectifs de notre projet étaient de mieux comprendre les PGA dus à la transformation de la viande, que ce soit dans des unités artisanales ou industrielles, et d'étudier les transferts de matière qui se produisent pendant la transformation, ainsi que leurs effets sur les critères de qualité. L'accent a été mis sur le contrôle du procédé, basé sur un simulateur mathématique global, qui considérait le changement de la qualité du produit pendant les trois principales étapes du traitement (barattage, séchage et stockage).

Pour mieux comprendre les PGA au cours de la transformation de la viande, une enquête a été menée auprès des principaux fabricants et distributeurs de biltong dans la province du Cap occidental (Beyers, 2017). Cette étude a permis d'établir que la fabrication génère très peu de pertes (dont le niveau est non quantifiable). En effet, lors de la préparation de la viande, les morceaux qui ne sont pas assez gros pour fabriquer le biltong, ainsi que les restes du parage, sont utilisés pour fabriquer des *droëwors*. En outre, les distributeurs de biltong retournent très rarement les produits à leurs fournisseurs. Lorsqu'ils le font, c'est la plupart du temps en raison du développement de moisissures. En outre, les distributeurs détruisent des quantités marginales quand les produits approchent de la fin de leur durée de conservation. Parfois, lorsque le produit fini est par exemple trop sec, les producteurs le transforment en poudre pour l'utiliser dans l'industrie alimentaire ou dans les aliments pour animaux de compagnie. Le concept de date de péremption dans ce secteur est vague, car les produits arrivent aux consommateurs sous différents formats, allant des produits en vrac, qui sont suspendus et vendus à la tranche, jusqu'aux portions prétranchées, qui peuvent être conditionnées dans un emballage sous atmosphère modifiée (mélange gazeux injecté dans l'emballage). Il serait intéressant d'étendre l'étude des pertes aux distributeurs non spécialisés et aux consommateurs. À côté de ces produits hautement stabilisés, il existe une demande croissante de produits moins transformés (moins salés, moins séchés et de texture plus douce). Ces produits nécessitent un meilleur contrôle de la stabilité, qui repose en grande partie sur une bonne maîtrise des procédés (formulation, séchage et conservation). Cependant, l'absence de cadre réglementaire et le manque d'infrastructures de caractérisation des produits et de suivi des procédés sont autant de menaces à la pérennité de ces nouvelles niches de marché, pourtant économiquement et socialement prometteuses. La formulation du biltong et les liens entre les transferts de matière et les propriétés du produit, telles que la texture, le pH, l'activité de l'eau (a_w) et la teneur en sel, ont été étudiés. L'objectif était de développer un outil d'optimisation multicritère fondé sur un modèle global de procédé. Ce simulateur est basé sur des modèles simplifiés développés à l'échelle des opérations unitaires pour une meilleure maîtrise de la qualité du produit fini en matière de réduction de sa variabilité, d'amélioration des conditions de stockage et d'allongement de la durée de conservation par la baisse du développement des levures et des moisissures, tout en assurant un itinéraire technologique durable. La modélisation de l'opération de barattage a permis d'identifier les profils expérimentaux de solutés obtenus dans la viande, et donc de déterminer numériquement les coefficients de diffusion du sel et d'acide liés à la formulation et au barattage (Mirade *et al*., 2020). D'autres études sont en cours pour définir les meilleurs profils post-barattage de concentration en sel et en acide, afin d'obtenir, une fois le séchage final effectué, un aliment qui offrira le meilleur compromis entre une bonne stabilité du produit et les caractéristiques organoleptiques (tendreté, goût, etc.) souhaitées par les consommateurs.

Pertes et gaspillage tout au long de la chaîne d'approvisionnement en fruits frais

Les pourcentages de pertes et de gaspillage sont généralement plus élevés pour les fruits et les légumes que pour les autres produits, en particulier dans les situations où les conditions de stockage au froid ou de transformation sont inadéquates (FAO, 2019). Même dans les pays occidentaux où les installations frigorifiques sont bien développées, la grande fragilité et le caractère périssable des fruits et des légumes frais entraînent des pertes et du gaspillage considérables, en particulier au niveau des distributeurs et des consommateurs. De nombreuses technologies innovantes ont été envisagées pour prolonger la durée de conservation des fruits et légumes et réduire leurs pertes, notamment par un emballage bien conçu. Dans la chaîne post-récolte des fruits frais, l'utilisation d'un emballage sous atmosphère modifiée équilibrée (nommé eMAP[11]) peut contribuer à prolonger la durée de conservation du produit et à atténuer les pertes et le gaspillage tout au long de la chaîne alimentaire, et notamment chez les consommateurs (Angellier-Coussy *et al*., 2013 ; Guillard *et al*., 2018). Nous avons exploré le lien entre l'augmentation de la durée de conservation et la réduction des pertes liée à l'utilisation de l'eMAP, ainsi que l'avantage environnemental lié à l'utilisation d'un tel emballage, que ce soit en remplacement ou en complément du stockage au froid, qui est actuellement la technologie de conservation la plus utilisée.

Nous avons développé un modèle mathématique pour prédire l'extension de la durée de vie des fraises et les pertes au stade de la distribution et chez le consommateur. Les pratiques et les croyances des parties prenantes, en particulier celles des consommateurs, ont été recueillies par des enquêtes de terrain. La modélisation mathématique a intégré ces pratiques de consommation afin de prédire les pertes à domicile en fonction de l'occurrence de chaque comportement de consommation : par exemple, certains consommateurs conservent toujours les fraises au réfrigérateur, tandis que d'autres les conservent à température ambiante ; certains ouvrent l'emballage immédiatement après l'achat, ce qui élimine l'atmosphère modifiée et annihile son effet bénéfique sur la conservation des fruits. L'avantage environnemental de la mise en œuvre de l'eMAP dans la chaîne post-récolte des fraises a également été évalué en le comparant avec l'impact de la réfrigération, et en tenant compte de la diversité des comportements des consommateurs. Pour quantifier l'augmentation de la durée de conservation obtenue grâce à l'eMAP, un modèle mathématique de dégradation de la qualité des fraises a été développé, couplé aux transferts d'O_2 et de CO_2 dans l'emballage et à la respiration des fruits. Le niveau de dégradation dépendait de la température et de la teneur en CO_2 dans

11. L'eMAP est un type d'emballage sous atmosphère modifiée, utilisé plus spécifiquement pour les fruits et légumes, qui crée un mélange gazeux optimal dans l'environnement autour du produit. Le mélange de gaz autour du produit est le résultat de sa respiration et de la perméation des gaz à travers le film d'emballage. L'équilibre entre ces deux phénomènes conduit à définir une composition gazeuse adéquate autour du produit. Celle-ci ne peut être obtenue que si les propriétés de perméation aux gaz (oxygène et CO_2) du film d'emballage correspondent aux caractéristiques de respiration du produit dans des conditions déterminées de surface, de volume d'emballage et de masse du fruit.

l'emballage à l'équilibre. Ce modèle a permis d'explorer numériquement l'effet des conditions de stockage à des temps différents et à températures différentes, et de prédire les augmentations de la durée de stockage du produit lorsqu'elles excédaient un jour. Les résultats ont montré que l'eMAP pouvait significativement augmenter la durée de stockage du produit. Une dégradation maximale de 13 % a été jugée acceptable sur la base de la disposition des consommateurs à acheter et des courbes de dégradation mesurées sur le produit (Matar *et al*., 2018a, 2018b). En d'autres termes, si la détérioration est inférieure à 13 %, le consommateur achètera la barquette de fraises ; si elle est supérieure à 13 %, le consommateur rejettera la barquette, qui sera finalement jetée par le distributeur. Une fois à domicile, les pertes ont été considérées comme proportionnelles à la dégradation du produit, celle-ci dépendant des conditions de stockage (température et composition de l'atmosphère dans la barquette dans les conditions de l'eMAP) et des pratiques des consommateurs. Afin d'évaluer les pratiques des consommateurs, une enquête a été réalisée au moment de la récolte des fraises. 749 participants âgés de plus de 20 ans et représentatifs de la population française en matière d'âge, de sexe et de profession ont répondu à l'enquête. Les résultats montrent, entre autres, que 79 % des consommateurs ont retiré l'emballage juste après l'achat. Au total, 57 % des consommateurs ont conservé les fruits à température ambiante, tandis que 43 % les ont conservés au réfrigérateur.

Pour tenir compte de la variété des conditions de stockage post-récolte et du comportement des consommateurs, 132 scénarios de stockage de fraises fraîches ont été simulés en utilisant le modèle numérique. Ces scénarios ont été introduits en entrée du modèle pour calculer les pertes générées dans la chaîne post-récolte du fait de la dégradation du produit. Les résultats montrent que, compte tenu de la probabilité d'occurrence de chaque scénario et des pratiques des consommateurs, l'utilisation de l'eMAP, au lieu d'un emballage macroperforé commercial, réduirait les pertes de fraises de 17 % en moyenne. Cette réduction est faible car, à l'échelle française, environ 50 % des consommateurs ouvrent actuellement l'emballage à atmosphère modifiée avant de ranger le fruit dans le réfrigérateur, ce qui annule les avantages de l'eMAP. Les simulations montrent que les pertes pourraient être réduites de 74 % si tous les consommateurs conservaient l'emballage intact, tout en stockant les fraises au réfrigérateur (Matar *et al*., 2020).

Enfin, la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) a été utilisée pour étudier l'avantage environnemental de l'utilisation de l'eMAP, à température ambiante, comme alternative à l'utilisation d'emballages macroperforés conventionnels et du froid. L'ACV a été appliquée sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des fraises, de la production agricole au consommateur, en tenant compte des pertes à chaque étape ainsi que, le cas échéant, de la fabrication et de l'élimination de l'emballage utilisé. Nos résultats confirment que, pour des produits hautement périssables comme les fraises, l'étape de la production agricole est la principale source d'impacts environnementaux. Par conséquent, les technologies de conservation ont un impact environnemental moindre. Dans ce cadre, notre étude montre que l'eMAP pourrait être, dans diverses conditions, une alternative intéressante à l'utilisation des emballages standards actuels (Matar *et al*., 2020).

▸▸ Conception intelligente et technologies innovantes pour réduire les pertes et le gaspillage

Les PGA pourront être réduits dans le futur avec des approches d'ingénierie combinant l'utilisation de modèles de dégradation des aliments et la conception et l'application de technologies intelligentes qui ralentiront cette dégradation. Cette section détaille les étapes et les besoins pour atteindre cet objectif.

Besoin en modèles représentatifs de la dégradation des aliments

Pour prolonger la durée de vie des produits alimentaires et réduire leurs pertes, il faut limiter la croissance microbienne et la dégradation enzymatique à la surface des produits frais. Dans les pays occidentaux, le stockage au froid est traditionnellement utilisé pour y parvenir. Dans le cas des fraises, l'inhibition de la croissance microbienne, la diminution de la respiration et la dégradation enzymatique ont été analysées au moyen d'un seul modèle mathématique de dégradation. Les simulations de l'utilisation de l'eMAP ont montré qu'il serait possible de réduire encore les pertes de fraises réfrigérées. Dans le cas de la viande rouge, les emballages sous atmosphère modifiée sont utilisés à la place des eMAP. Ils contiennent généralement un niveau élevé de CO_2 pour ralentir la croissance bactérienne, ainsi qu'une grande quantité d'O_2 pour maintenir la couleur rouge attrayante de la viande. Pour prédire correctement la dégradation des aliments, deux modèles de dégradation différents sont alors nécessaires pour modéliser séparément l'inhibition microbienne et le changement de la couleur de la viande. Des travaux récents ont permis de relier la variation du paramètre de couleur rouge au potentiel d'oxydoréduction pendant la conservation d'un morceau de faux-filet, stocké soit dans un emballage totalement perméable à l'oxygène, soit dans un emballage sous atmosphère modifiée totalement imperméable à l'oxygène (Cucci *et al*., 2020). On peut imaginer l'utilisation de tels modèles et d'algorithmes d'intelligence artificielle pour réduire les pertes dans les usines. Cependant, cette approche reste limitée et ne peut pas être appliquée directement à de nouveaux procédés, car la dynamique du modèle n'est pas encore totalement expliquée. Une autre approche consiste à modéliser la diffusion de l'oxygène et la cinétique d'oxydation pour prédire le changement de couleur de la viande de bœuf. Des modèles plus fondamentaux incluant des schémas réactionnels complexes ont été développés dans ce sens (Tofteskov *et al*., 2017 ; Oueslati *et al*., 2018 ; Kondjoyan *et al*., 2022a, 2022b). D'autre part, dans le cadre du projet H2020 GLOPACK[12], certains outils de modélisation sont en cours d'amélioration et de déploiement pour proposer des logiciels d'aide à la décision dans le domaine de l'emballage alimentaire. Ces modèles intègrent les transferts de matière liés à l'utilisation d'emballages sous atmosphère modifiée autour de produits frais et certains mécanismes de dégradation, comme ceux dus au développement de micro-organismes. Même si ces modèles de dégradation sont encore très élémentaires et ne donnent pas une vision complète des réactions impliquées dans la dégradation d'un produit, le logiciel peut être utilisé pour optimiser l'emballage sous atmosphère modifiée (composition de l'atmosphère et sélection des

12. https://glopack2020.eu/

matériaux d'emballage appropriés) et éviter toute perte d'efficacité avant la date limite de consommation. Cet outil a l'avantage d'être applicable à une grande variété de produits alimentaires (produits laitiers, viandes, aliments prêts à consommer), à condition de connaître l'atmosphère optimale ciblée pour limiter la dégradation et optimiser la durée de conservation. Toutefois les modèles plus fondamentaux restent intéressants pour comprendre l'effet de la variation de la composition des aliments ou des traitements (cuisson, etc.) sur la dégradation des produits et pour concevoir de nouveaux produits alimentaires (Kondjoyan *et al*., 2022a, 2022b).

Clarifier le rapport bénéfice/coût des technologies innovantes

L'entreposage frigorifique reste très coûteux en matière de consommation d'énergie et doit être bien géré ; des défaillances de la chaîne du froid se produisent encore, même dans les pays occidentaux. Pour atténuer l'impact environnemental global de la chaîne post-récolte, on a tenté, pour certains fruits et légumes, de remplacer, partiellement ou totalement, le stockage frigorifique par des technologies eMAP. Ces deux technologies sont conçues pour ralentir la respiration des produits et prolonger leur durée de conservation, mais ces effets doivent encore être quantifiés et comparés. En réduisant les PGA, les deux technologies conduisent à des bénéfices environnementaux. Cependant, une plus grande diminution des PGA n'entraîne pas automatiquement des avantages environnementaux. Certaines technologies utilisées pour réduire les PGA peuvent avoir leur propre impact sur la consommation des ressources et les émissions de gaz à effet de serre, contrebalançant ainsi l'effet bénéfique de la réduction des pertes alimentaires. Ce rapport bénéfice/coût est un point clé pour toutes les innovations proposées pour réduire les PGA ; cependant, il est rarement évalué. Notre recherche a démontré que l'eMAP à température ambiante ne pouvait pas remplacer le stockage réfrigéré dans le cas spécifique des fraises conservées plus de deux jours chez les consommateurs. Malgré le coût environnemental supplémentaire de l'entreposage frigorifique, son surcoût économique reste suffisamment faible pour que l'eMAP ne puisse pas le concurrencer, malgré le bénéfice environnemental et la réduction des pertes liés à l'utilisation des emballages sous atmosphère modifiée. Dans d'autres conditions, l'eMAP pourrait être une option intéressante par rapport aux stratégies standard de stockage des fraises. Cette approche méthodologique pourrait être généralisée à d'autres produits alimentaires.

Quelle est l'efficacité des technologies alternatives de conservation des aliments ?

Parmi les technologies innovantes pour prolonger la durée de conservation des aliments frais et réduire leurs pertes, des recherches récentes ont été consacrées aux méthodes alternatives de biopréservation ou d'inactivation microbienne et aux procédés physiques non thermiques. La biopréservation est basée sur des micro-organismes ou des substances spécifiques, mais elle est souvent limitée par la législation sur les nouveaux aliments et par l'aversion des consommateurs envers les additifs biologiques ou chimiques. Par conséquent, les procédés physiques non thermiques suscitent un regain d'intérêt. Le développement du traitement par

haute pression hydrostatique (HP) permet d'allonger considérablement la durée de conservation des aliments et de limiter les pertes de produits frais (Huang *et al*., 2014). Cependant, les HP nécessitent des infrastructures importantes et coûteuses, qui sont surtout réservées aux produits à haute valeur ajoutée destinés à l'exportation, aux grandes entreprises ou aux plateformes financées par les régions. D'autres procédés non thermiques ont été étudiés pour décontaminer les aliments frais, prolonger leur durée de conservation et limiter les pertes. Le champ électrique pulsé, la lumière pulsée, la lumière ultraviolette et le plasma froid sont plus acceptables pour les consommateurs que les rayons gamma, ou même les rayons X (faisceaux d'électrons). La prolongation de la durée de conservation des aliments est plus efficace lorsque le traitement est appliqué directement dans l'emballage, sur des liquides homogènes ou sur des surfaces planes facilement accessibles. L'efficacité des procédés non thermiques sur les produits alimentaires solides de forme complexe, tels que les carcasses ou les morceaux de viande, est souvent moindre, et leurs applications restent jusqu'à présent limitées à la recherche. Cependant, l'inactivation des micro-organismes à la surface des aliments ne suffit pas à les conserver, les réactions biochimiques pouvant aussi altérer leurs propriétés sensorielles. De plus, certains procédés d'inactivation microbienne peuvent favoriser les réactions biochimiques de dégradation dans les aliments (comme les HP, qui accélèrent les réactions d'oxydation dans les viandes rouges et grasses) et modifier leur couleur et leur saveur, augmentant ainsi leurs pertes. Il est donc essentiel de mieux prédire le changement de couleur en fonction de l'oxydation. L'étude des cinétiques d'oxydation est intéressante, car ces réactions génèrent des radicaux chimiques utilisés dans certains procédés d'inactivation microbienne non thermiques. Des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour déchiffrer l'impact de ces technologies alternatives sur l'extension de la durée de vie des aliments et la diminution des pertes et du gaspillage.

Urgence d'actions ciblées pour réduire les pertes alimentaires dans les pays du Sud

Quelles solutions peut-on imaginer pour limiter la perte de produits frais dans les pays du Sud où le stockage en chambre froide n'est pas toujours possible, ni durable, et où les plateformes régionales dédiées à des technologies coûteuses (comme les hautes pressions hydrostatiques par exemple) ne sont pas pertinentes ou sont impossibles à financer ? Une possibilité est de s'orienter vers des méthodes d'inactivation de la surface des produits, combinant des procédés physiques simples et adaptables avec l'application de composés naturels tout en utilisant peu d'énergie et d'eau. Par exemple, une faible énergie de combustion ou l'énergie solaire pourraient être utilisées pour vaporiser des composés bactériostatiques ou bactéricides naturels à des températures comprises entre 75 °C et 90 °C. Cette technique repose sur le principe ancestral du fumage des aliments, mais sans l'application de fumée, imitant ainsi les applications récentes du chlore sans ses risques potentiels pour la santé (Sun *et al*., 2019). De nombreux composés naturels aux effets bactéricides ou bactériostatiques ont été proposés dans les pays occidentaux (Tyagi *et al*., 2012), néanmoins de nombreux autres peuvent certainement être extraits de la flore

microbienne endogène dans les pays du Sud. Une autre façon d'inactiver les micro-organismes sur les surfaces planes après la découpe des produits carnés pourrait être l'utilisation de la lumière pulsée *via* des diodes électroluminescentes ultraviolettes, comme le proposent Hinds *et al*. (2019). Cependant, dans les pays du Sud, même si la surface des produits carnés a été décontaminée microbiologiquement, il est fortement recommandé de traiter l'ensemble du produit en raison de l'absence de chambre froide, des dangers de recontamination et de la présence de parasites dans les muscles des animaux. La conception des systèmes de transformation des aliments dans ces pays est une activité complexe, motivée par des enjeux sanitaires, économiques, environnementaux et humains majeurs. Il est important dans ce cas de développer des systèmes de transformation efficaces et durables, adaptés aux conditions locales, à des coûts abordables, basés sur des savoir-faire traditionnels mais capables d'apporter une valeur ajoutée à la qualité nutritionnelle des aliments. La prise en compte de différents critères de performance, tels que les caractéristiques organoleptiques, les qualités nutritionnelles et sanitaires du produit, la consommation d'énergie et l'impact environnemental, ainsi que le coût et la robustesse du système, pose la question de leur hiérarchisation et de la détermination de leur agrégation pour l'optimisation des procédés de transformation (Madoumier *et al*., 2019 ; Raffray *et al*., 2015 ; Rivier, 2017). Dans le cas du biltong par exemple, la mise au point d'un outil d'optimisation multicritère qui combine des modèles élaborés à l'échelle de l'opération unitaire pourrait conduire à un développement durable de ce produit, répondant ainsi aux attentes des consommateurs en matière d'aliments moins transformés, tout en identifiant les meilleures voies technologiques pour limiter les pertes, notamment lors du stockage. Une telle approche générique pourrait être transposée dans les pays occidentaux pour concevoir de nouveaux produits alimentaires et de nouveaux systèmes de transformation.

Vers une approche inclusive de l'ingénierie alimentaire

Certains facteurs peuvent empêcher les acteurs de la chaîne alimentaire de prendre des décisions rationnelles et d'adopter des pratiques pour réduire efficacement les pertes et le gaspillage. En particulier, les opérateurs du secteur alimentaire et les consommateurs peuvent ne pas disposer d'informations suffisantes sur les options disponibles pour réduire les pertes et le gaspillage, ou sur les avantages d'une telle démarche. Notre travail a mis en évidence l'importance de la sensibilisation des consommateurs et de leurs croyances à l'égard des technologies utilisées pour conserver les aliments. Nos travaux montrent que la modélisation mathématique peut intégrer les comportements des consommateurs vis-à-vis du stockage et de la consommation des aliments afin d'explorer et d'évaluer l'impact de ces comportements sur la réduction des PGA (Matar *et al*., 2020). Il est donc essentiel de sensibiliser les individus et de leur présenter les avantages des nouvelles technologies pour diminuer les pertes. Les parties prenantes peuvent également être confrontées à des contraintes ou à des préférences qui les empêchent ou les dissuadent de mettre en œuvre des actions visant à réduire les PGA. Connaître et intégrer toutes ces contraintes dans une approche d'ingénierie alimentaire plus inclusive est essentiel pour concevoir des technologies qui s'alignent sur les demandes et les pratiques des acteurs de la chaîne

alimentaire. Cette question est essentielle, notamment dans les pays du Sud, où les contraintes de transformation sont réelles. Le plus grand défi pour l'avenir sera donc de combiner les approches multidisciplinaires telles que celles utilisées en science des aliments, en génie des procédés alimentaires et en sciences sociales.

Conclusion

Une approche inclusive basée sur l'ingénierie des procédés alimentaires a été développée pour réduire les pertes et le gaspillage dans les chaînes d'approvisionnement en viandes et en fruits frais. Dans les pays occidentaux, notre étude a confirmé qu'une grande partie des pertes et du gaspillage en produits frais a lieu au domicile des consommateurs, mais qu'elle est souvent due à des problèmes en amont de la chaîne. Des modèles mathématiques, combinant des données sur le transfert de matière et sur la qualité des produits, peuvent prédire la part des pertes et du gaspillage liée à la dégradation des aliments. À l'avenir, les résultats issus des modèles combinés pourront être associés à des capteurs intelligents pour améliorer la conception des procédés et des emballages. Le développement de procédés de conservation adaptés, peu coûteux et à petite échelle sera d'une importance capitale pour réduire les pertes et le gaspillage dans les pays du Sud, où l'utilisation régulière des chambres froides est peu réaliste. Une approche holistique est nécessaire pour l'optimisation multi-objectifs du traitement des produits et l'évaluation du rapport bénéfice/coût, afin d'assurer la sécurité alimentaire des populations, de répondre aux attentes des consommateurs en matière de qualité sensorielle et nutritionnelle des aliments et de tendre vers la durabilité des transformations alimentaires. La collaboration entre les sciences de l'aliment, le génie des procédés alimentaires, la nutrition, les sciences de l'environnement, l'économie et la sociologie contribuera à cet objectif.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le métaprogramme GloFoodS pour le financement des projets Valorcarn et Pack4Fresh, portant respectivement sur la réduction des pertes et du gaspillage dans les chaînes d'approvisionnement en viande et en fruits frais. Ce chapitre est basé sur les recherches et les discussions résultant de ces deux projets.

Références bibliographiques

Angellier-Coussy, H., Guillard, V., Guillaume, C., Gontard, N. (2013). Role of packaging in the smorgasbord of action for sustainable food consumption. *Agro FOOD Industry. Hi Tech*, *24*(3), 15–19.

Beyers, C. (2017). *Exploring FLW along the biltong value chain in the Western Cape, South Africa* [Thèse, Stellenbosch University]. https://core.ac.uk/download/pdf/188219812.pdf

Comparet, R., Lacherez, S., Petit-Riff, S. (2016). *Détermination des pertes de viandes au cours des circuits de transformation-distribution*. Polytech Clermont-Ferrand-université Blaise Pascal.

Cucci, P., N'Gatta, A. C. K., Sanguansuk, S., Lebert, A., Audonnet, F. (2020). Relationship between color and redox potential (E_h) in beef meat juice. Validation on beef meat. *Applied Science*, *10*, 3164–3177. https://doi.org/10.3390/app10093164

Eriksson, M., Strid, I., Hansson, P.-A. (2014). Waste of organic and conventional meat and dairy products – A case study from Swedish retail. *Resources, Conservation and Recycling*, *83*, 44–52. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.011

FAO (2019). The state of food and agriculture. Moving forward on FLW reduction. http://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf

Guillard, V., Gaucel, S., Fornaciari, C., Angellier-Coussy, H., Buche, P., Gontard, N. (2018). The next generation of sustainable food packaging to preserve our environment in a circular economy context, *Frontiers in Nutrition*, *5*(121), 1–13. https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00121

Hinds, L. M., O'Donnell, C. P., Akhter, M., Tiwari, B. K. (2019). Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *56*, 102–153.

Huang, H.-W., Lun, H.-M., Yang, B. B., Wang, C.-Y. (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing, *Food Control*, *40*, 250–259. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.12.007

Interreg North-West Europe (2021, December 9). *Reamit project*. https://www.nweurope.eu/projects/project-search/reamit-improving-resource-efficiency-of-agribusiness-supply-chains-by-minimising-waste-using-big-data-and-internet-of-things-sensors/news-blogs/what-is-the-reamit-project/

Kondjoyan, A., Portanguen, S. (2008). Effect of superheated steam on the inactivation of *Listeria innocua* surface-inoculated onto chicken skin. *Journal of Food Engineering*, *87*(2), 162–171. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.030.

Kondjoyan, A., Sicard, J., Badaroux, M., Gatellier, P. (2022a). Kinetics analysis of the reactions responsible for myoglobin chemical state in meat using an advanced reaction–diffusion model. *Meat Science,* 191, https://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108866.

Kondjoyan, A., Sicard, J., Cucci, P., Audonnet, F., Elhayel, H., Lebert, A., Scislowski, V. (2002b). Preventing the oxidative degradation of raw beef meat during storage using numerical simulations and sensors – generalization to meat and fish foods. *Foods*, *11*(8), 1139, https://dx.doi.org/10.3390/foods11081139.

Lecompte, J.-Y., Kondjoyan, A., Sarter, S., Portanguen, S., Collignan, A. (2008). Effects of steam and lactic acid treatments on inactivation of *Listeria innocua* surface-inoculated on chicken skins. *International Journal of Food Microbiology*, *127*(1–2), 155–161.

Madoumier, M., Trystram, G., Sébastian, P., Collignan, A. (2019). Towards a holistic approach for multi-objective optimization of food processes: a critical review. *Trends in Food Science & Technology*, *86*, 1–15.

Matar, C., Gaucel, S, Gontard, N., Guilbert, S, Guillard, V. (2018a). Predicting shelf life gain of fresh strawberries '*Charlotte* cv' in modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, *142*, 28–38. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.03.002.

Matar, C., Gaucel, S., Gontard, N., Guilbert, S., Guillard, V. (2018b). A global visual method for measuring the deterioration of strawberries in MAP. *MethodsX*, *5*, 944–949. https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.07.012.

Matar, C., Guillard, V., Gauche, K., Costa, S., Gontard, N., Guilbert, S., Gaucel, S. (2020). Consumer behaviour in the prediction of postharvest losses reduction for fresh strawberries packed in modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, *163*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111119

McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H.-J., du Preez M., Ubomwa-Jaswa, E., Fernandez-Ibañez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, *235–236*, 29–46. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053

Mirade, P. S., Portaguen, S., Sicard, J., De Souza, J., Musavu Ndob, A., Hoffman, L. C., Goli, T., Collignan, A. (2020). Impact of tumbling operating parameters on salt, water and acetic acid

transfers during biltong-type meat processing. *Journal of Food Engineering*, *265*, 1–9. 109686. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109686.

Oueslati, K., Promeyrat, A., Gatellier, P., Daudin, J.-D., Kondjoyan, A. (2018). Stoichio-kinetic modeling of Fenton chemistry in a meat-mimetic aqueous phase medium. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*, 5892-5900. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b06007

Raffray, G., Collignan, A., Sébastian, P. (2015). Multiobjective optimization of the preliminary design of an innovative hot-smoking process. *Journal of Food Engineering*, *158*, 94–103. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.010

Redlingshöfer, B., Soyeux, N. (2011). Pertes et gaspillages. *In* Esnouf, C., Russel, M., Bricas, N. (Eds.). *Pour une alimentation durable – Réflexion stratégique duALIne*, pp. 143–153. Éditions Quae, Versailles.

Rivier, M. (2017). *Analyse et optimisation multicritères d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest* [Thèse, Montpellier SupAgro]. https://agritrop.cirad.fr/586972/

Sun, X., Baldwin, E., Bai, J. (2019). Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables – A review. *Food Control*, *95*, 18–26. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.044

Suysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., van der Vorst, J. (2014). Modelling food logistics networks with emission considerations: the case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, *152*, 57–70. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.012

Tofteskov, J., Hansen, J. S., Bailey, N. P. (2017). Modelling the autoxidation of myoglobin in fresh meat under modified atmosphere packing conditions. *Journal of Food Engineering*, *214*, 129–139. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.002

Tyagi, A. K., Malik, A., Gottardi, D., Guerzoni, M. E. (2012). Essential oil vapour and negative air ions: A novel tool for food preservation. *Trends in Food Science & Technology*, *26*, 99–113. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.02.004