ACADÉMIE
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ CHOISI PARTAGÉ DES
TECHNOLOGIES

INNOVATION DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES : IMPACTS DE LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE

RAPPORT DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES



ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

POUR UN PROGRÈS
RAISONNÉ
CHOISI
PARTAGÉ

Rapport de l'Académie des technologies

INNOVATION DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES : IMPACTS DE LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE



mars 2021

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies .fr
www .academie-technologies .fr

©Académie des technologies

ISBN : 979-10-97579-77-2

Sommaire

Présentation	5
Résumé exécutif	7
Introduction	19
Les mutations dans les comportements alimentaires	23
Les industries alimentaires au sein du système alimentaire	29
Des données massives, sûres et exploitables	45
Meilleure prise en compte de la complexité des aliments lors de leur conception	53
Vers la numérisation des usines	63
Avec la technologie blockchain, une traçabilité renforcée jusqu'aux consommateurs	73
Une meilleure prise en compte des impacts environnementaux	83
L'émergence de nouveaux concurrents : robots cuisiniers et restauration virtuelle	93
De nouveaux services pour les entreprises et les consommateurs	99
Conclusions	109
Annexes	117

Membres du groupe de travail

Ce rapport a été rédigé par un groupe de travail[1] composé de membres de l'Académie des technologies (A.M. Boudet, président du groupe de travail, V. Bellon-Maurel, P. Feillet, B. Jarry, F. Kepes, G. Pascal, C. Saguez, G. Trystram et P. Van Bladeren) et des deux experts D. Majou[2] et P. Robichon [3]. Le secrétariat scientifique a été assuré par Cyrille Costa.

1 Voir en annexe 1 la déclaration des membres du groupe de travail concernant les conflits d'intérêt.

2 Directeur général de l'Actia – et membre de l'Académie d'agriculture de France

3 Ancien directeur industriel de Pernod Ricard et membre de l'Académie d'agriculture de France

Présentation

Ce rapport est plus particulièrement destiné aux pouvoirs publics, aux professionnels, aux centres techniques, aux enseignants et aux chercheurs.

Les industries alimentaires représentent un maillon du système alimentaire qui s'étend des productions agricoles jusqu'aux étapes de consommation. Ces industries, qui convertissent les matières premières brutes en denrées alimentaires, mettent en œuvre des procédés de transformation et d'assemblage pour aboutir à des aliments de propriétés constantes. Elles occupent en France la première place industrielle en termes d'emplois et de chiffre d'affaires. Elles sont constituées de quelques groupes de dimension internationale et, surtout, de milliers de PME et de TPE qui tentent de prendre en compte des critères multiples pour produire des aliments attractifs, sûrs et bons pour la santé par des procédés respectueux de l'environnement. Les industries alimentaires françaises sont confrontées à deux défis :

- alors que la qualité des produits d'origine française est reconnue à l'étranger, la compétitivité économique du secteur s'érode progressivement (le solde commercial des échanges à l'intérieur de l'Europe, largement positif il y a quelques années, est devenu négatif depuis 2018) ;
- le secteur doit répondre à une demande diversifiée et évolutive de consommateurs exigeants tout en rétablissant la confiance auprès de ces usagers qui s'interrogent sur les qualités nutritionnelles et les impacts sur la santé des produits « industriels ».

Nos industries alimentaires nationales doivent donc améliorer leurs procédés et leurs produits en intégrant le contexte de différentes transitions (numérique, écologique) et de différentes crises (climatique, nutritionnelle : surpoids/obésité) auxquelles nos sociétés sont confrontées.

L'Académie des technologies, forte de sa pluridisciplinarité et répondant à sa vocation d'information sur les forces et faiblesses des nouvelles technologies, a analysé comment la transition numérique pouvait, dans le cas des industries alimentaires, favoriser l'innovation, aider à mieux répondre aux demandes des consommateurs et améliorer leur compétitivité.

Ce rapport présente tout d'abord les mutations actuelles des comportements alimentaires et les caractéristiques générales du domaine industriel considéré, interface essentielle entre agriculteurs et consommateurs. Il souligne ensuite que le préalable à un usage optimisé du numérique réside dans la collecte, la hiérarchisation et la valorisation des mégadonnées (ou *big data*). Ce rapport recense ainsi les différentes bases de données existantes ou en cours de constitution sur la composition des aliments, leur qualité nutritionnelle, leurs impacts environnementaux, etc. et souligne que les industries alimentaires doivent progresser dans la maîtrise de leurs données. Il est donc nécessaire de diffuser dans le secteur la culture correspondante. Le traitement des données par les technologies d'apprentissage associées à l'intelligence artificielle permettra ainsi de mieux caractériser les produits commercialisés, mais aussi, de façon prospective, de concevoir des modèles prédictifs d'optimisation des produits et des chaînes de fabrication, aspects qui sont détaillés dans plusieurs chapitres spécifiques du rapport :

- conception et composition des aliments ;
- fonctionnement des usines responsables de la production ;
- réduction des impacts environnementaux de la filière ;
- relations avec les acteurs du système alimentaire et, en particulier, les consommateurs (transparence, traçabilité) ;
- mise au point de nouveaux services alimentaires.

Ce panorama présente des exemples concrets de réalisations et identifie des voies de développement pour lesquelles un travail considérable doit être encore mené dans les filières traditionnelles ou émergentes.

L'exploitation du numérique et des données multiples constitue une stratégie unique et efficace pour la résolution des problèmes complexes qui sont associés à l'alimentation. Elle permet, en particulier, une approche systémique de toute la chaîne agroalimentaire. Il ne faut cependant pas attendre de miracles des seules données. Les progrès passeront par l'implication d'esprits préparés, d'où les importants besoins de formation et d'approches combinatoires associant les propositions issues des algorithmes d'exploitation des données aux modèles plus traditionnels et aux connaissances empiriques des opérateurs.

De nombreuses recommandations sont associées aux différents chapitres pour concrétiser un basculement numérique au sein des entreprises. S'approprier les technologies numériques pour mieux concevoir, contrôler et distribuer les aliments répondant aux demandes des consommateurs selon des procédés à faibles impacts environnementaux représente une impérieuse nécessité et une grande ambition que les pouvoirs publics doivent accompagner. Cette industrie doit s'engager dans cette voie de façon volontariste pour améliorer sa compétitivité et optimiser les pratiques d'un secteur dont les retombées sur la société sont multiples.

Résumé exécutif

S'approprier les technologies numériques, de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage par les données pour mieux concevoir, fabriquer, contrôler et distribuer des aliments répondant aux demandes des consommateurs et respectant les contraintes environnementales : pour les industries alimentaires, une nécessité et une grande ambition que les pouvoirs publics doivent significativement soutenir.

L'alimentation est depuis toujours une préoccupation majeure de nos sociétés, car elle est indispensable à la survie des hommes au même titre que la santé, mais plus prégnante car l'acte alimentaire se répète plusieurs fois par jour et à tout âge. Au temps présent, les consommateurs attendent beaucoup des produits alimentaires à travers des exigences sanitaires, sensorielles, nutritionnelles, culturelles, cultuelles, environnementales et individuelles.

Pour répondre à cette demande, le système agro-industriel qui s'est progressivement mis en place et aujourd'hui dominant, présente des atouts (massification, accessibilité, prix, qualité sanitaire), mais aussi des limites à différents niveaux (impact environnemental négatif, qualité nutritionnelle inégale, répartition parfois déséquilibrée de la valeur).

Au même titre que l'agriculture et la distribution, les industries alimentaires doivent donc évoluer pour répondre à des exigences nouvelles qui impliquent la mise en œuvre de pratiques innovantes. Dans ce contexte, la transition numérique[4] peut apporter de nouvelles opportunités.

4 Processus d'intégration de la technologie numérique dans tous les aspects de l'entreprise, nécessitant des changements fondamentaux en termes de technologie, de culture, d'opérations et de création de valeur.

Des industries alimentaires à la recherche d'un second souffle

Le système alimentaire occupe une place centrale au sein de l'économie française en raison des millions d'emplois qu'il génère, de son chiffre d'affaires cumulé (agriculture : 76 milliards d'euros, industrie alimentaire[5] : 215 milliards d'euros, distribution : 234 milliards d'euros, restauration hors domicile : 97 milliards d'euros) et de son impact positif sur la balance commerciale de la France (7,9 milliards d'euros en 2019). Un meilleur fonctionnement doit permettre d'optimiser les multiples composantes des aliments : biologiques (santé, sécurité sanitaire), sociales (plaisir, convivialité, facilité d'achat et d'utilisation), sociétales (durabilité, solidarité, réduction du gaspillage, naturalité, bien-être animal) et économiques (prix des aliments, revenus des agriculteurs, rentabilité des entreprises). Au sein de ce système, le métier des industries alimentaires est de transformer des matières premières agricoles de composition variable en aliments et boissons de composition constante. Depuis quelques années, des inquiétudes se manifestent sur la compétitivité de ces industries marquées par une destruction de valeur sans précédent (5 milliards d'euros en cinq ans) et un déclin de la France dans les échanges à l'intérieur de l'Europe.

Les industries alimentaires sont structurées en trois groupes d'activités : les industries de première transformation qui extraient et parfois transforment des matières premières agricoles en produits élémentaires (farines, semoules, huiles, beurre, sucre, amidons) ; les fabricants d'ingrédients alimentaires (enzymes, ferments, nutriments, additifs) ; les industries de deuxième transformation qui stabilisent et conditionnent les produits agricoles peu transformés (lait, viande, fruits, légumes) et fabriquent des aliments plus élaborés (biscuits, fromages, vins, charcuteries, plats cuisinés, conserves, produits surgelés).

Ces dernières sont souvent des industries « d'assemblage » consistant à formuler et structurer un aliment à partir de ses différentes composantes. Les innovations dont elles font preuve sont essentiellement de nature incrémentale. Quant à leurs innovations de rupture, peu nombreuses, elles sont de moins en moins acceptées par les consommateurs qui marquent leur attachement à « une alimentation naturelle et traditionnelle ».

Dans ce contexte, la transition numérique présente un caractère stratégique primordial pour aider les industries alimentaires françaises à répondre aux nouvelles exigences de la société et à retrouver leur compétitivité. Son impact concerne tous les secteurs d'activité des entreprises : conception et fabrication des aliments, traçabilité des produits tout au long de la chaîne agroalimentaire, écoconception des procédés, adaptation à la demande des consommateurs-citoyens, pratiques d'achat de ces derniers, gestion de l'entreprise[6].

5 En France, les industries alimentaires sont le premier secteur industriel en termes d'emplois et de chiffre d'affaires. Cependant, le plus important des groupes français, Danone, n'arrive qu'au quinzième rang des grands groupes internationaux du secteur.

6 La question de la gestion de l'entreprise n'est pas abordée dans le rapport.

Produire et exploiter des données massives et sûres

La question de l'accès aux mégadonnées (*big data*) et de l'usage des technologies numériques pour les exploiter (apprentissage automatique, apprentissage profond et intelligence artificielle) se pose avec acuité aux industries alimentaires. Les entreprises doivent gérer le changement d'échelle induit par l'exploitation numérique d'un très grand nombre de données afin de « décoder » les systèmes complexes que sont les aliments en intégrant à la fois les propriétés des matières (à toutes les échelles), les procédés de fabrication (approche dynamique) et de conditionnement, les demandes des consommateurs et les contraintes environnementales. La première étape est d'avoir accès à des bases de données fiables et prenant en compte le maximum de paramètres reliés aux caractéristiques des aliments. La deuxième est de les exploiter.

De nombreuses bases de données existent déjà sur la composition des aliments, leurs impacts environnementaux, les cycles de vie, les microorganismes alimentaires. En France, on peut citer CIQUAL (composition nutritionnelle des aliments), AGRIBALYSE® (données environnementales), Num-Alim (identité numérique de chaque aliment). À côté de ces centres « ressources », un nombre considérable d'informations sont dispersées dans des rapports internes aux entreprises, des résultats de projets de recherche, ainsi que dans des documents accessibles sur le web. Celles concernant les caractéristiques sensorielles d'un aliment ou les paramètres d'un procédé de fabrication ou de conditionnement, sans oublier les impacts environnementaux, sont particulièrement complexes et coûteuses à recueillir. Elles sont néanmoins indispensables.

Pour ce qui concerne l'exploitation de ces données, il faut distinguer le « modèle produit » visant à mieux connaître les caractéristiques des aliments et le « modèle prédictif » dont l'objet est de faciliter la conception et la fabrication de produits. Il faut souligner l'importance, mais également la difficulté, pour l'entreprise de se doter de ces modèles prédictifs.

Pour la construction de ces modèles, le recours aux technologies d'intelligence artificielle et d'apprentissage par les données, en complémentarité avec les approches mathématiques traditionnelles, devrait permettre de maîtriser la complexité des phénomènes et de prendre en compte les caractéristiques biologiques des aliments. Les modélisateurs devront non seulement bien intégrer le savoir des « scientifiques », mais également celui des « praticiens » qui s'appuient sur des usages bien maîtrisés sans toujours en connaître les fondements explicatifs.

Principales recommandations

Favoriser un rapprochement entre AGRIBALYSE®, Num-Alim et Numagri[1] pour mutualiser les capacités de construction et de traitement des bases de données, ainsi que leur interopérabilité.

Construire des bases de données et développer les outils numériques adaptés à des objectifs propres aux industries alimentaires : conception ou fabrication des aliments, sécurité sanitaire tout au long des chaînes de valeur, cycle de vie des produits.

Une aide significative des pouvoirs publics sera nécessaire pour atteindre ces objectifs.

1 Une association dont l'objectif est de concevoir, animer et organiser les conditions de la standardisation des données numériques dans le domaine agricole.

MEILLEURE PRISE EN COMPTE DE LA COMPLEXITÉ DES ALIMENTS LORS DE LEUR CONCEPTION

La qualité d'un aliment intègre des composantes biologiques, culturelles, sociétales et économiques, parfois difficilement conciliables, et doit aussi tenir compte de la complexité structurelle des aliments (on parle de « matrice alimentaire ») résultant des interactions développées entre les molécules entrant dans la formulation d'un aliment au cours de sa fabrication. Pour concevoir un nouveau produit ou améliorer ceux existants, les professionnels doivent résoudre des problèmes multifactoriels comprenant des variables interagissant souvent entre elles.

L'évolution spectaculaire des moyens d'acquisition et de traitements des données ouvre la voie à la résolution de ces équations. Cet objectif demeure néanmoins encore très ambitieux.

Si agir sur les propriétés nutritionnelles est possible, mais peut se révéler parfois compliqué, prendre en compte les impacts environnementaux l'est bien davantage. Par exemple, en raison de la forte variabilité des compositions en nutriments et ingrédients de produits tels que des pizzas ou des desserts lactés, il est possible de développer des modèles pour améliorer leurs propriétés nutritionnelles tout en conservant de bonnes caractéristiques sensorielles. En revanche, il existe une multiplicité de paramètres environnementaux (climat, énergie, qualité des eaux, biodiversité, etc.), dont certains sont en outre inaccessibles à des mesures fiables et validées. Aussi peut-il être très difficile d'optimiser simultanément valeur santé, qualité organoleptique et bilan environnemental d'un aliment, tout en maîtrisant les prix.

Principales recommandations

Accroître les connaissances fondamentales sur les relations entre les caractéristiques structurales des aliments et leurs propriétés sensorielles et nutritionnelles.

Construire des bases de données robustes relatives à la conception et à la fabrication des aliments.

Développer des modèles et des outils de simulation des réactions biochimiques au sein des aliments en relation avec les propriétés de ces derniers. Élaborer des outils d'aide à la conception des aliments.

Ces différents domaines devraient être approfondis dans le cadre d'un important programme de recherches pluridisciplinaires à l'échelle européenne.

Vers la numérisation des usines

Les défis de performance et de flexibilité productive au sein des usines, quel que soit le secteur industriel, requièrent l'apport des technologies numériques. Ce sont les enjeux du concept d'industrie 4.0 qui correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production.

Les industries alimentaires n'échappent pas à cette « révolution ». L'automatisation des procédés et son évolution grâce à l'intelligence artificielle et au déploiement des techniques biomécaniques (robots, cobots et exosquelettes) est l'une des cartes dont elles disposent pour relever ces enjeux. Elles devront lever des obstacles propres à leurs activités : nature biologique des produits, robots résistants au froid et à l'humidité des ateliers, maintien impérieux de la qualité sanitaire. De plus, les unités de production devront accroître leur flexibilité (format, produit, conditionnement, capacité à fournir des aliments à des populations aux attentes diversifiées).

Dans ce contexte, les entreprises devront dans un schéma optimal :

a) développer des équipements « intelligents » et des technologies internet des objets connectés ;
b) assurer le stockage, la structuration et le traitement mathématique des données ;
c) se doter des outils de simulation et de visualisation permettant de produire une réplique virtuelle de tout ou partie du procédé. Ceci se fera en priorité au niveau des grandes entreprises et progressivement au niveau des PME.

La disponibilité de capteurs pertinents reste un verrou pour généraliser la numérisation des usines. En complément de ceux mesurant des paramètres conventionnels comme la pression ou la température, la conception de nouveaux capteurs est nécessaire pour avoir accès à des critères tels que le potentiel rédox, l'activité de l'eau, la concentration en diverses molécules.

Les robots, cobots et exosquelettes devraient trouver une place croissante dans les usines des industries alimentaires. Actuellement, les principales applications concernent des tâches répétitives, de peu de valeur ajoutée. Pour généraliser leurs usages, les pistes d'amélioration sont les suivantes : préhenseurs adaptés aux produits mous, augmentation des performances de la vision 2D, acquisition de la vision 3D, maîtrise des nouveaux outils de découpe (ultrasons, jet d'eau, marquage laser).

Si le contexte industriel et économique est peu favorable à la robotisation (forte proportion de PME et de TPE, faibles marges et capacités d'investissement limitées, petites séries de fabrication), le contexte de travail (cadences élevées, travail répétitif, conditions de travail difficiles) devrait cependant pousser les entreprises à s'équiper. Dans le cadre des contraintes spécifiques des ateliers agro-industriels (ambiance froide et humide, nettoyage et désinfection quotidiens, préhension de matières fragiles, molles et déformables, investissements limités), les cobots et les exosquelettes devraient permettre de réduire les pathologies musculaires des opérateurs. D'un point de vue social, ils seront plus facilement acceptés en raison de leur complémentarité avec les opérateurs, lesquels devront bien maîtriser leur fonctionnement.

Quant à la fabrication additive, il est difficile d'envisager son utilisation dans des chaînes de fabrication à grand débit (biscuiterie par exemple). Elle devrait se limiter à satisfaire des demandes pour une alimentation très personnalisée (forme des produits) et à son usage dans les laboratoires lors de la mise au point de nouveaux produits.

Principales recommandations

Favoriser des partenariats entre la recherche en robotique-cobotique, la recherche sur les capteurs, la recherche technologique agroalimentaire, les équipementiers et les entreprises utilisatrices.

Favoriser l'usage et la mise en place des outils numériques dans les ETI/PME/TPE et leur proposer des diagnostics gratuits.

Mettre en place des enseignements sur la digitalisation des outils de production (formation de techniciens et d'ingénieurs).

Se pencher sur l'acceptabilité sociale de moyens de production plus digitalisés et automatisés.

Avec la technologie blockchain, une traçabilité renforcée

Une blockchain construite par les membres d'un « consortium » peut être assimilée à un grand livre dont aucun passage — une fois rédigé — ne peut être modifié, mais auquel de nouveaux paragraphes peuvent être ajoutés et sur lequel chacun peut lire l'histoire d'un produit tout au long

de la chaîne de fabrication et de commercialisation. Une limite importante à son bon fonctionnement est la qualité des données qui y sont introduites : sa mise en œuvre n'est pas une garantie contre des erreurs ou des fraudes initiales introduites par l'un ou l'autre des membres. La perte de confiance en un seul maillon de la chaîne peut porter atteinte à la crédibilité de tout le système.

Avec les technologies numériques, et tout particulièrement celles exploitant les données recueillies pendant tout le cycle de vie du produit, la technologie blockchain devrait donc trouver sa place au sein du système alimentaire pour assurer une analyse globale de l'histoire des aliments à l'aide d'indicateurs intégrant toutes les étapes « de la fourche à la fourchette ». Cet outil peut se révéler particulièrement utile aux industriels qui ont besoin de connaître le parcours des produits qu'ils commercialisent, pour trois raisons : veiller au respect de leur cahier des charges, avoir la capacité de réagir très rapidement en cas d'accident sanitaire et se donner les moyens pour répondre à la demande croissante de « transparence » exprimée par les consommateurs.

L'impact de la consommation énergétique de la technologie blockchain sur l'environnement est une critique souvent mise en avant. Dans le cas du système alimentaire, ce risque environnemental est négligeable dans la mesure où il s'agit de « pseudo-blockchains » (« blockchains de consortium » avec un nombre réduit de participants et « blockchains privées » au sein d'une entreprise).

Une autre critique est que la technologie blockchain est une « boîte noire » où se trouvent stockées des informations auxquelles les consommateurs souhaiteraient avoir accès, sans en avoir la possibilité. Cet accès dépend en effet du bon vouloir des membres du « consortium ». Cette critique mérite d'être sérieusement prise en compte.

Principales recommandations

Poursuivre les travaux sur l'interopérabilité nationale, européenne et internationale entre blockchains.

Normaliser les méthodes conduisant à informer les consommateurs des multiples dimensions de la qualité des aliments, tout particulièrement nutritionnelles et environnementales.

Soutenir les PME et TPE désireuses de s'approprier cet outil, une fois consolidées les « bonnes pratiques » de la technologie blockchain au sein du système alimentaire.

Ces recommandations pourraient trouver leur place au sein de la stratégie nationale visant à faire de la France « une nation de la blockchain » dévoilée par la direction générale des entreprises lors de la Paris Blockchain Conference le 15 avril 2019.

UNE MEILLEURE PRISE EN COMPTE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les leviers d'action les plus significatifs dont disposent les industries alimentaires pour produire plus « durablement » sont un approvisionnement des usines avec des produits agricoles à faible impact environnemental, une diminution des consommations d'énergie et d'eau et l'optimisation de la chaîne logistique en amont et en aval des usines avec, en particulier, la réduction des emballages plastiques à usage unique.

Les analyses de cycle de vie montrent que les produits agricoles contribuent de manière prépondérante au score environnemental d'un aliment. Les usines doivent donc veiller à s'approvisionner auprès de producteurs ayant pour souci de diminuer l'impact environnemental de leurs activités. La participation de l'entreprise à des blockchains doit leur permettre d'avoir accès aux données dont elles ont besoin pour faire leurs choix. La difficulté à surmonter est d'assurer l'interopérabilité des blockchains auxquels participent indépendamment les fournisseurs des ingrédients qui entrent dans la composition d'un aliment ; ceci afin de garantir la traçabilité de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement.

Les industries alimentaires françaises constituent le troisième plus gros secteur industriel en termes de consommation d'énergie. Elles sont également de grandes consommatrices d'eau. Pour une part, l'eau utilisée doit respecter des normes sanitaires spécifiques aux denrées alimentaires. Des économies très significatives d'énergie et d'eau ont été accomplies dans de nombreuses branches (amidonnerie, sucrerie, laiterie, biscuiterie). Parmi les gains attendus du déploiement des technologies numériques, on peut citer une utilisation optimale des robots et cobots, une réactivité instantanée à des incidents de production avec un meilleur asservissement des machines, une maintenance préventive et une interconnexion du système productif donnant accès à une vision globalisée de l'ensemble des paramètres dont dépend le bon fonctionnement de l'usine.

Le transport des produits au sein de la chaîne alimentaire est une autre composante non négligeable de l'impact de l'alimentation sur l'environnement, sous deux aspects : les émissions de gaz à effet de serre et le rejet de particules fines dans l'atmosphère. Les industries peuvent intégrer les possibilités offertes par la révolution digitale dans quatre domaines : stockage, conditionnement, transport et respect de la qualité sanitaire des produits (une spécificité de la chaîne logistique alimentaire). La bonne gestion des emballages et la réduction du gaspillage alimentaire (non développées dans ce rapport) sont également des composantes essentielles de l'optimisation des circuits logistiques.

Principale recommandation

De tous les impacts environnementaux associés à la vie d'un aliment, celui sur le changement climatique est le plus inquiétant car il est universel, quasiment irréversible (à l'échelle de nombreuses générations futures) et ses effets potentiellement dramatiques sur la planète et les sociétés humaines. L'effort des professionnels du système alimentaire devrait porter prioritairement sur ce paramètre.

L'industrie des plats cuisinés menacée par les robots cuisiniers et la restauration virtuelle

Avec la digitalisation, la cuisine « fait maison » (robots-cuisiniers, fours « intelligents ») et la livraison de repas à domicile (restauration virtuelle) pourraient devenir de redoutables concurrents de l'industrie des plats cuisinés.

Déjà, les robots-cuisiniers multifonctions (en fait des cobots) permettent de préparer un grand nombre de plats, sucrés ou salés. À leur fonction d'aide culinaire, certains d'entre eux proposent des « services » destinés à aider les consommateurs à améliorer leur alimentation au quotidien. Le programme interdisciplinaire *Open Food System*, un consortium de recherche coordonné par le groupe SEB, a pour ambition de concevoir de nouveaux appareils de cuisson plus « intelligents » permettant de moduler automatiquement (sans contact et sans intervention humaine) les paramètres de cuisson afin de conserver les qualités organoleptiques et nutritionnelles des aliments. Le « fait maison » est également facilité par les fours « intelligents » qui commencent à trouver leur place dans les cuisines des plus fortunés.

La troisième génération de robots ménagers est en route. Ce seront de vrais robots capables de cuisiner sans intervention humaine après avoir commandé les ingrédients nécessaires à la confection des plats. Science-fiction ? L'avenir le dira.

Autres concurrents de l'industrie alimentaire, la « nouvelle » restauration devient virtuelle pour les consommateurs et repose sur l'existence d'une cuisine « invisible » pour ses clients, si ce n'est sur internet. Chacun peut y commander les plats proposés sur des sites dédiés et se faire livrer où et quand il veut. Il est parfois possible de personnaliser son plat (sans gluten, sans lactose, salades composées, etc.). Quant au « cuisinier », il s'approvisionne lui aussi auprès de fournisseurs qu'il ne connaît souvent que « numériquement ». La croissance de ce secteur est spectaculaire.

De nouveaux services pour les entreprises

Les technologies numériques permettent aux entreprises de cerner plus précisément et plus rapidement l'évolution de la demande des consommateurs. Les PME, souvent plus réactives que les grands groupes, sont bien placées pour réagir rapidement à cette évolution. Les pouvoirs publics pourraient les y aider. Cependant, le souci légitime des entreprises de chercher à mieux répondre à la demande sociétale glisse progressivement vers une approche plus marketing qui consiste à cibler spécifiquement des individus, en prêtant moins d'attention aux intérêts collectifs de la société. Les choix des consommateurs deviennent alors moins libres qu'ils ne le paraissent. Ces politiques de ciblage personnalisé ne vont pas sans poser des problèmes éthiques dont les entreprises doivent s'emparer.

La majorité des industries alimentaires est constituée d'entreprises de petite taille dont les produits sont représentatifs du « savoir-faire » traditionnel français. L'insuffisance de leurs moyens est un frein à l'accès aux marchés internationaux alors qu'ils pourraient être les ambassadeurs de la gastronomie à la française. L'appel aux technologies numériques devrait permettre d'inverser cette tendance en mutualisant les outils promotionnels et de commercialisation. Deux chantiers pourraient être ouverts : la construction d'un catalogue numérique des produits proposés à l'exportation et l'accès à des entrepôts partagés capables d'assurer dans les meilleurs délais la livraison des commandes chez leurs clients, partout dans le monde. Cette initiative devrait être accompagnée par une réflexion sur l'adéquation des propriétés gustatives de produits « typiquement » français aux demandes des consommateurs étrangers tout en gardant l'image très positive des produits du terroir français.

Principales recommandations

L'impact du suivi des achats numérisés pour « tout savoir » sur le comportement d'un consommateur afin de lui adresser des messages ciblés soulève des questions éthiques dont peu d'industriels ou de distributeurs semblent s'être emparés. Chercheurs et responsables d'entreprises devraient mener une réflexion commune pour éclairer la société et les pouvoirs publics sur ce sujet.

Une mutualisation des moyens (catalogues et entrepôts partagés) aiderait les moyennes et petites entreprises à davantage exporter leurs productions. Les organisations professionnelles régionales en liaison avec les présidents de région pourraient jouer un rôle moteur en ce domaine.

De nouveaux services pour les consommateurs

Conséquence de la généralisation de l'accès à des sites internet, aux réseaux sociaux et aux applications numériques, les pratiques d'achat des consommateurs évoluent rapidement (commandes en ligne, accès rapide et plus complet aux caractéristiques des aliments, croissance de la consommation hors domicile, choix de plus en plus orientés par les entreprises). L'objectif d'une alimentation davantage personnalisée devient plus réaliste avec la possibilité de se faire livrer des repas « sur mesure » qui se substituent aux achats d'ingrédients qu'il faudrait ensuite cuisiner. Pour ceux qui le souhaitent, il est plus facile de s'approvisionner avec des produits locaux. De façon intéressante, la crise sanitaire récente de la Covid-19 a servi d'accélérateur aux formules de vente directe et aux circuits courts. Les acteurs locaux ont souvent créé leurs propres sites web, effort amplifié dans certaines régions par la création de plateformes numériques gratuites recensant les producteurs et commerçants livrant leurs produits à domicile dans une zone géographique donnée. L'exploitation du numérique pourrait être encore élargie pour favoriser l'épanouissement du secteur par la création d'une plateforme nationale du type « Doctolib » qui donnerait plus de visibilité à ces initiatives en ne les limitant pas à des initiés.

Un autre facteur d'évolution des pratiques alimentaires est l'accès à des informations sur la valeur nutritionnelle et environnementale des aliments. Celles-ci sont fournies sur les réseaux sociaux et sur des applications numériques « autovalidées » par les dirigeants des start-up qui les ont mises en ligne. Une nouvelle génération d'applications prenant en compte les spécificités des consommateurs (allergie, intolérance, régimes particuliers, choix sociétaux et culturels) commence à voir le jour. Les messages deviennent parfois illisibles dans la mesure où ils peuvent être contradictoires. Il est inquiétant de constater que les consommateurs n'accordent pas davantage de crédit aux supports validés par les autorités sanitaires qu'à ceux proposés par des start-up indépendantes.

Principale recommandation

Les applications qui revendiquent aider les consommateurs lors de leurs achats ont un effet sur le comportement de ces derniers et par voie de conséquence celui des distributeurs et des entreprises alimentaires à la recherche de bonnes notes. Eu égard à leur succès et à leur impact, les pouvoirs publics devraient satisir l'Anses afin d'évaluer la pertinence des méthodologies utilisées pour construire les scores que ces applications attribuent aux aliments et aux boissons.

Les consommateurs sont nombreux à se plaindre de l'opacité des industries alimentaires d'où sortent des aliments dont ils ne comprennent ni d'où ils viennent, ni comment ils ont été formulés et fabriqués. Cela les inquiète et ils demandent davantage de transparence.

Au-delà des possibilités qu'elles offrent aux industriels pour optimiser l'ensemble de leurs procédés, les technologies numériques peuvent les aider à mieux informer les consommateurs. L'une des caractéristiques de celles-ci est en effet de permettre une approche systémique globale de toute la chaîne agroalimentaire. Les industriels possèdent de ce fait un ensemble d'informations dont beaucoup mériteraient d'être portées à la connaissance de leurs « clients ».

Par ailleurs, les industriels doivent mieux expliquer qu'il leur faut s'appuyer sur les progrès de la science et de la technologie, notamment ceux du numérique, pour proposer aux Français une alimentation de qualité. Ils devront également se pencher sur les problèmes éthiques posés par la collecte et l'utilisation de données touchant aux comportements individuels des consommateurs.

Une question importante concerne l'usage des technologies numériques par les PME agroalimentaires qui constituent le tissu industriel principal pour cette filière. Les enjeux principaux portent sur l'acquisition du savoir-faire et l'appui technique pour la mise en œuvre de ces outils. À ces enjeux doivent être rapidement apportées des solutions à des conditions économiques acceptables, avec le soutien des pouvoirs publics.

Introduction

L'alimentation est depuis toujours une préoccupation majeure de nos sociétés car elle est indispensable à la survie des hommes au même titre que la santé, mais plus prégnante car l'acte alimentaire se répète plusieurs fois par jour et à tout âge.

Au temps présent, nos communautés du monde occidental sont confrontées à un paradoxe : jamais il n'a été aussi facile d'obtenir de la nourriture et de se nourrir, et pourtant les nutritionnistes nous mettent en garde sur nos mauvais comportements alimentaires et l'opinion s'inquiète sur la qualité et la composition de nos aliments. Ceci alors qu'une analyse rationnelle conduit à conclure que l'alimentation des Français est l'une des meilleures au monde. On attend donc beaucoup de nos produits alimentaires à travers des exigences sanitaires, sensorielles, nutritionnelles, culturelles, cultuelles, environnementales et individuelles alors que l'on s'est éloigné progressivement de l'origine de nos aliments qui sont issus majoritairement des industries alimentaires (de 60 à 90 % dans les pays développés).

Ce système industriel dominant présente des atouts (massification, accessibilité, prix, qualité sanitaire), mais aussi des limites (impact environnemental, qualité nutritionnelle inégale, répartition de la valeur). Des systèmes alternatifs (circuits courts…) tendent à se développer, mais l'urbanisation croissante et l'évolution des rythmes de vie maintiennent l'attractivité des produits de type industriel. Les différentes approches sont destinées à cohabiter dans des formules hybrides où la pondération de chacune pourra varier selon les contextes.

Les industries alimentaires doivent donc rechercher des améliorations pour répondre à des exigences nouvelles qui impliquent la mise en œuvre de pratiques innovantes. Dans ce contexte, la transition numérique qui touche déjà de nombreux secteurs peut apporter des opportunités intéressantes.

Ces industries ne découvrent pas aujourd'hui l'impact croissant du numérique sur leurs activités. Dans son rapport *Alimentation intelligente - Une alimentation sûre, saine, durable et exportable* daté de 2015, l'ANIA (Association nationale des industries alimentaires) attirait l'attention de ses adhérents sur le fait que le numérique *« Allait structurellement modifier le monde*

industriel, l'usine, son mode de fonctionnement, les rapports en son sein et avec son écosystème (fournisseurs, prestataires, clients, consommateurs) ». Pour l'Ania, l'impact du numérique porte sur les performances des entreprises, les systèmes de production, le contrôle d'une qualité optimisée, la traçabilité des produits, les échanges de données simplifiés et le développement de services aux clients en phase avec leurs attentes. Son bon usage permettra d'agir sur les quatre principaux leviers de la valeur : efficience-productivité, efficacité-qualité des offres, maîtrise du temps et fiabilité-réduction des risques.

Au terme d'une réflexion plus académique[7], l'*International Union of Food Science and Technology* (IUFoST) souligne également le besoin d'intégrer le traitement des données massives, les technologies de l'information et l'intelligence artificielle tout au long de la chaîne alimentaire. Pour l'IUFOST, le numérique doit permettre « *D'élaborer des modèles d'interactions matériaux/processus lors de fabrication, […] de préciser les relations statistiques et causales entre l'alimentation et la santé et d'utiliser des données validées pour améliorer la traçabilité des produits alimentaires* ».

Pour le ministère de l'agriculture et de l'alimentation[8], « *Le secteur de l'agroalimentaire présente des spécificités qui rendent l'enjeu d'appropriation des technologies numériques encore plus fort que dans d'autres secteurs ».* Et de poursuivre : *« l'information sur les conditions de fabrication et la confiance dans ces informations sont en effet des attributs essentiels des produits alimentaires […]; inéluctable, la révolution numérique doit être une occasion pour le secteur agroalimentaire français de faire valoir ses principaux atouts : sa diversité et sa créativité.* »

Ces analyses, qu'elles proviennent des réflexions des chefs d'entreprise, des chercheurs ou des pouvoirs publics, convergent ainsi vers la même conclusion : la prise en compte de la révolution numérique présente un caractère stratégique primordial pour assurer la compétitivité des industries alimentaires françaises et améliorer leurs produits. Cet impact concerne tous les secteurs d'activité des entreprises : conception et fabrication des aliments, relation avec les agriculteurs et les distributeurs, traçabilité des produits tout au long de la chaîne alimentaire, adaptation à la demande des consommateurs-citoyens, pratiques d'achat de ces derniers, gestion via l'ERP[9].

Ce diagnostic partagé mérite d'être accompagné de recommandations explicites et approfondies pour permettre aux entreprises alimentaires de s'approprier la révolution numérique. Tel est l'objet de ce rapport axé sur une analyse des conséquences, à plus ou moins long terme, de cette révolution sur le métier des industries alimentaires : concevoir, fabriquer, distribuer et garantir la qualité des aliments proposés aux consommateurs. Ce document n'aborde pas la manière dont les entreprises alimentaires, et notamment les PME, devraient développer en leur sein une « culture » du numérique au quotidien (gestion, formation, marketing, relations avec les fournisseurs et les clients, suivi des stocks). Il prend plus particulièrement en compte ce qui

7 IUFOST, 2019. Global Challenges and the Critical Needs of Food Science and Technology.

8 Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018. *Panorama des industries agro-alimentaires*.

9 E*nterprise Resource Planning* : logiciel permettant de gérer l'ensemble des processus opérationnels d'une entreprise (ressources humaines, gestion comptable et financière, commandes, gestion des stocks).

démarque les industries alimentaires des autres secteurs manufacturiers, à savoir les relations très particulières qui les lient à des consommateurs-citoyens pluriels, proactifs et exigeants. En effet, ceux-ci ne sont pas de simples clients car « ils sont ce qu'ils mangent » et donc ce qu'ils achètent.

Forte de la présence en son sein de spécialistes de l'alimentation, des technologies du numérique, de la robotique et de l'ingénierie des procédés, l'Académie des technologies propose les pistes qui lui semblent prioritaires pour que les industries alimentaires françaises puissent maintenir, sinon retrouver, un haut niveau de compétitivité en prenant mieux en compte la révolution numérique dans l'ensemble de ses activités productives. Les technologies numériques sont aussi considérées comme un outil pouvant contribuer à la durabilité des pratiques du secteur.

En dépit de leur importance, ce rapport ne consacre pas un chapitre particulier aux questions éthiques posées par l'usage de mégadonnées *(big data)*. Cette question a en effet déjà été traitée par l'Académie des technologies dans une communication parue en juillet 2019[10].

On trouvera en annexe 2 la liste des experts consultés sans lesquels ce rapport n'aurait pu voir le jour. Les auteurs de ce rapport les remercient pour leur importante contribution.

10 Académie des technologies, 2020 *Les* Big Data*, questions éthiques*.

Chapitre I

Les mutations dans les comportements alimentaires

L'alimentation est une préoccupation aussi ancienne que l'humanité qui revêt à notre époque une nouvelle forme de modernité en raison de l'évolution rapide des pratiques alimentaires et de l'intérêt qu'elles suscitent.

Pendant longtemps, les critères principaux orientant l'alimentation ont été d'ordre quantitatif : manger suffisamment pour, au moins, assurer sa survie et, au mieux, demeurer en bonne santé. Aujourd'hui, dans les pays développés, en dehors d'une faible part de la population qui, pour des raisons essentiellement pécuniaires, ne mange pas à sa faim, les préoccupations du plus grand nombre sont plutôt d'ordre qualitatif et concernent la recherche d'une alimentation saine, diversifiée, conviviale, si possible goûteuse et répondant à différentes caractéristiques liées à des choix individuels. Le critère prix demeure cependant important et prioritaire pour certaines catégories de population[11].

L'aliment a été qualifié par les sociologues de construction psychoculturelle dans un contexte d'attraction-répulsion conduisant par la culture personnelle et les valeurs individuelles à admettre certains aliments et en refuser d'autres. On ne peut donc prétendre proposer un modèle alimentaire national bien que certaines valeurs soient associées à l'alimentation française. On peut seulement tenter d'identifier différentes tendances.

Les critères des choix alimentaires s'avèrent en effet très divers et portent sur les composantes biologiques (santé, sécurité sanitaire), sociales (plaisir, convivialité, facilité d'achat et d'utilisation), sociétales (durabilité, solidarité, gaspillage, naturalité, bien-être animal) ou économiques (prix des aliments, revenus des agriculteurs). Au-delà, la demande alimentaire évolue et fluctue avec l'apparition de nouvelles conduites alimentaires plus spécifiques que nous évoquerons plus loin.

Cette diversité est une caractéristique du paysage alimentaire contemporain liée au foisonnement de l'offre et à la multitude des comportements qui relèvent de facteurs sociologiques et psychologiques complexes et évolutifs.

11 P. Hebel, 12 novembre 2019. Audition à l'Académie des technologies, CREDOC.

Si l'on part du modèle français, stabilisé au XX^e siècle, de trois repas par jour à heures relativement fixes, avec une cuisine préparée à la maison, souvent roborative, pour arriver aux profils alimentaires contemporains, il est possible de relever de profonds changements[12] qui sont présentés dans ce qui suit avec les moteurs de ces évolutions.

LES ÉVOLUTIONS DE LA DEMANDE LIÉES AUX CHANGEMENTS SOCIOLOGIQUES

Les mécanismes mis en jeu en réponse aux mutations de la société ont été très bien analysés par B. Hérault et al.[13] On peut en rapporter les points essentiels suivants.

L'urbanisation des populations, phénomène général et en forte progression à l'échelle mondiale, entraîne un éloignement des sites de production agricole et une accélération des rythmes sociaux, ce qui a un effet sur les comportements alimentaires : préférence pour la restauration rapide et les plats préparés, tendance au *snacking* (grignotage), alimentation nomade (portions individuelles prêtes à consommer n'importe où, n'importe quand) avec des objectifs de commodité, praticité et rapidité. À titre d'exemple on peut souligner que 55 % de la viande de bœuf consommée en France l'est sous forme de viande hachée[14].

La féminisation du monde du travail et de la société dans son ensemble va dans le même sens en réduisant considérablement le temps dévolu à la préparation des repas et en entraînant une sollicitation croissante des services alimentaires (repas livrés à domicile, plats préparés prêts à consommer, aliments conditionnés faciles à utiliser tels que les salades lavées sous emballage) et de la restauration hors domicile.

L'individualisation croissante des consommateurs résulte d'un affranchissement des influences familiales, culturelles ou professionnelles, de l'expression de choix individuel, de manières de penser et de juger. L'alimentation représente ainsi un facteur de différenciation individuelle, un élément de distinction et d'affirmation de valeurs. Ceci est illustré, en partie, par l'aphorisme du sociologue Claude Fischler *Je suis ce que je mange* et entraîne une diversité de régimes excluant ou intégrant certains produits ou ingrédients.

Ces différentes mutations ont donc induit dans un temps relativement court des conduites alimentaires nouvelles qui semblent bien installées.

12 J. P. Poulain, 2012. *Mutations des pratiques alimentaires*, OCHA.

13 B.Hérault, J.Gassie et A.Lamy, Transformations sociétales et grandes tendances alimentaires, Centre d'études et de prospective du ministère de l'agriculture

14 https://www.interbev-normandie.fr/_medias/NORM/documents/4pages

Les évolutions de la demande associées à de nouveaux rapports de défiance vis-à-vis de l'alimentation

Cette défiance provient des incidents répétés dans le domaine alimentaire et qui se sont succédé depuis la crise de la « vache folle » dans les années 1995, grippe aviaire, lasagnes de cheval, lait infantile contaminé par des salmonelles. Ils ont entraîné inquiétudes et pertes de confiance dans l'alimentation et aussi dans les institutions chargées des contrôles. Ils ont aussi révélé certaines insuffisances industrielles.

Le doute et l'appréhension sont amplifiés par des techniques considérées comme peu naturelles (OGM) ou insuffisamment validées (farines animales à destination d'herbivores) correspondant à une « artificialisation » des chaînes de production. Les craintes d'intoxication qui ont longtemps meublé les époques précédentes et qui s'étaient estompées réapparaissent avec l'émergence des risques chimiques. Ceci alors que sur le plan de la sécurité microbiologique nos aliments n'ont jamais été aussi sûrs[15].

Les consommateurs expriment par ailleurs une défiance vis-à-vis des grands groupes internationaux mais conservent cependant une estime et une confiance vis-à-vis des artisans et des PME/TPE implantés à proximité. Les itinéraires technologiques de fabrication des aliments transformés demeurent opaques pour le grand public[16] et une méfiance s'enracine, illustrée par des oppositions aux aliments ultratransformés (ou plutôt ultra-formulés) qui renferment un grand nombre d'ingrédients et d'additifs.

D'une manière générale, l'inquiétude augmente avec le nombre d'intermédiaires impliqués dans la commercialisation des aliments. Tous ces facteurs conduisent de nombreux consommateurs-mangeurs à dire qu'ils souhaitent privilégier des produits locaux, naturels, de proximité en favorisant les circuits courts. Quand ces filières ne sont pas accessibles, ils souhaitent une traçabilité et une totale transparence sur l'origine des produits : d'où vient un aliment, de quoi est-il fait, quelles sont les étapes entre la ferme et la commercialisation ?

De façon intéressante, la crise sanitaire récente de la Covid-19 a servi d'accélérateur aux formules de vente directe et aux circuits courts ainsi qu'à l'exploitation des commandes par voie numérique, montrant une bien meilleure faisabilité que celle attendue de ces approches. Différentes solutions et sites web spécifiques ont permis aux producteurs de s'adresser au client final par internet avec des livraisons à domicile, des dépôts à la ferme ou en points relais. On a ainsi noté une amplification de la transition numérique du commerce alimentaire touchant les petits producteurs pour des produits bruts, mais aussi dans certains cas des plats cuisinés. Ces acteurs locaux ont souvent créé leurs propres sites web, effort amplifié dans certaines régions par la création de plateformes numériques gratuites recensant les producteurs et commerçants

15 C. Babusiaux et M. Guillou, juin 2014. *La politique de sécurité sanitaire des aliments*, *rapport aux ministrse,* ministère de l'agriculture.

16 L'Ania vient de créer le site https://www.decouvrezcequevousmangez.fr/ pour permettre aux consommateurs « *D'entrer dans les coulisses des entreprises de l'alimentation et découvrir comment sont préparés vos produits du quotidie*n. »

livrant leurs produits à domicile dans une zone géographique donnée. L'exploitation du numérique pourrait être encore élargie pour favoriser l'épanouissement du secteur par la création d'une plateforme nationale du type « *Doctolib* » qui donnerait plus de visibilité à ces initiatives en ne les limitant pas à des initiés.

Au-delà de ces tendances assez générales, une proportion plus limitée de la population s'inscrit dans des attitudes systématiques d'éviction de certains produits alimentaires ou de leurs constituants naturels (lait et produits laitiers, viandes, poissons, gluten) ou d'aliments « transformés » comprenant des composants exogènes (additifs). Ces comportements sont alimentés par les déterminants évoqués plus haut, mais plus particulièrement par une méfiance générale vis-à-vis des institutions et parfois par une forme de rejet du type de société dans lequel nous vivons[17]. Un des moteurs individuels réside aussi dans une démarche autocentrée sur son propre corps, sa protection, son amélioration en cohérence avec l'aphorisme déjà cité de C. Fischler.

Ces évolutions illustrent la distanciation entre certains mangeurs et leurs aliments qui s'est installée depuis plusieurs décennies. Le dilemme permanent pour ces populations est celui du bon choix alimentaire qui peut tourner à l'obsession. Que faut-il que je mange, dites-moi ce que je mange, d'où vient ce que je mange ? Ces comportements sont encore minoritaires, mais les sociologues s'intéressent à leur progression et aux valeurs qui les sous-tendent[18].

Transparence, traçabilité, naturalité et proximité sont donc les maîtres mots d'une consommation qui se veut éclairée alors que l'éloignement ne cesse de s'accroître entre les agriculteurs-producteurs et le citoyen-consommateur dont le choix est guidé par ses valeurs et ses ressources.

LES DEMANDES ASSOCIÉES À LA MONDIALISATION ET À LA DIGITALISATION DE LA SOCIÉTÉ

Ces évolutions géopolitiques ou technologiques récentes induisent ou facilitent de nouvelles attentes des consommateurs. La pandémie récente de coronavirus a également modifié significativement les modes de consommation.

Les échanges commerciaux accrus et la mobilité des individus toujours augmentée à l'échelle internationale ont plusieurs impacts sur la consommation et les profils alimentaires. La disponibilité de denrées très diversifiées issues de différents continents à toute époque de l'année amplifie la palette des choix pour les consommateurs, ceci au détriment du souci de proximité (circuit court) revendiqué par de nombreux citoyens.

Les expériences alimentaires à l'étranger et les ouvertures de commerces spécialisées dans des cuisines « exotiques » entraînent une forme de « panachage » de l'alimentation tout en gar-

17 C. Fischler, mars 2020. *Sociologie de la consommation de la méfiance à la défiance… mode d'emploi* , Fonds français pour l'alimentation et la santé.

18 Colloque OCHA, *Quand manger reflète les valeurs de la société*, Musée de l'Homme, 30 mars 2020.

dant un socle de référence national assez solide. Les influences extérieures s'amplifient comme l'illustre la vague croissante des burgers, sushis et autres kebabs. On assiste ici à un enrichissement relativement superficiel des choix alimentaires associé aux évolutions actuelles vers une alimentation rapide, pratique et facilement accessible.

La digitalisation de la société a de multiples répercussions sur les conduites alimentaires et la demande associée. Elle rend possible, pour certaines catégories de consommateurs, la commande à distance de denrées ou de plats ou repas préparés. Ceci s'accorde avec les critères énoncés précédemment de rapidité, commodité, praticité et de réduction des « activités cuisine » à domicile. De plus, elle intervient de façon croissante dans le choix des achats alimentaires par le biais d'applications *smartphone* du type YUKA qui notent les aliments en fonction de leurs qualités prétendument nutritionnelles. Nous entrons donc dans une alimentation « codes-barres » dont le principe séduit les jeunes générations, rassure et donne l'impression de maîtriser la chaîne de son alimentation.

Deux tendances profondes : la recherche d'impacts positifs de l'alimentation sur la santé et l'environnement

Les progrès des recherches en nutrition, y compris celles récentes sur le microbiote intestinal, ouvrent de nouvelles pistes, encore timides, sur les relations entre alimentation et santé. Les populations jeunes et d'un niveau intellectuel élevé sont très sensibles à ce critère santé et orientent leurs profils alimentaires en conséquence. Cette préoccupation s'étend plus largement à une société éduquée et aisée qui retient les critères sur lesquels les pouvoirs publics communiquent largement (moins gras, moins salé, moins sucré, cinq fruits et légumes par jour), évite pesticides, additifs et perturbateurs endocriniens et s'attache à choisir des aliments aux vertus reconnues ou supposées[19].

Dans ce contexte, le consommateur chemine dans un labyrinthe de préconisations et d'informations parfois contradictoires. Il est attiré par les politiques marketing d'aliments soi-disant particulièrement bons pour la santé. Il faut voir cependant, dans ce marché peu régulé, que les promesses et les résultats sont rarement concordants, en dehors d'effets placebo toujours possibles. Les effets les plus évidents et concrets sur la santé devraient certainement venir d'une éducation nutritionnelle dès le plus jeune âge, d'un bon équilibre alimentaire et des efforts des industries alimentaires pour améliorer les paramètres santé de leurs produits.

Une autre demande, qui devient de plus en plus générale, concerne la réduction de l'impact des chaînes alimentaires sur l'environnement et le réchauffement climatique. Ceci est analysé dans le récent rapport du GIEC (août 2019) qui démontre que certaines préférences alimentaires ont une empreinte carbone plus importante que d'autres et qui préconise en particulier la limi-

19 P. Hebel, 12 novembre 2019. CREDOC, Audition à l'Académie des technologies.

tation de consommation de viande et l'utilisation accrue de protéines végétales, ainsi qu'une réduction du gaspillage. Tous les secteurs, de la production agricole à la commercialisation en passant par la transformation et la distribution, sont fortement interpellés, en particulier par les jeunes générations.

Chapitre II

Les industries alimentaires au sein du système alimentaire

Une industrie qui doit satisfaire des consommateurs pluriels, proactifs et exigeants

Au sein du système alimentaire, l'utilisateur final est ce qu'il est convenu d'appeler un consommateur, et non pas seulement un client ou un usager. Il n'a pas vis-à-vis des aliments le comportement qu'il peut manifester lors d'autres achats (vêtements, meubles, voitures, appareils ménagers, informatique, etc.). Il se préoccupe non seulement des caractéristiques des aliments, mais également de la manière dont ils sont fabriqués et de leur origine[20]. Il veut savoir comment sa nourriture a été obtenue. Il attend des entreprises qu'elles réduisent l'impact de l'alimentation sur l'environnement et qu'elles soient des acteurs du développement durable. Ainsi, le consommateur est à la fois « citoyen » et « mangeur », ce qui multiplie ses attentes, ses critiques et ses rejets.

Comme cela a été développé dans le chapitre précédent, particulièrement en France, l'alimentation est un sujet extrêmement sensible sur lequel les cultures, les habitudes familiales ou locales, les modes ou les crises amplifiées par les réseaux sociaux, et même les croyances, induisent des réactions souvent plus émotionnelles que raisonnées. Les consommateurs-citoyens ont peu confiance dans la science et moins encore dans l'industrie. Ils expriment une sorte d'incohérence entre leur déclaration de vouloir consommer des produits « naturels » et leurs achats de produits issus de l'industrie alimentaire. De ce fait, les consommateurs sont polymorphes et leurs comportements alimentaires correspondent à l'expression de leur manière de vivre. Ils se positionnent entre continuité et rupture, entre tradition et innovation. Les personnes ayant de faibles revenus rencontrent des difficultés à manger « varié et équilibré », les gourmets privilégient les

20 Selon une étude réalisée en 2011 par l'agence Ethicity, 48 % des Français souhaitent voir indiquer sur les étiquettes l'origine des matières premières alimentaires et 40 % leur lieu de fabrication ; selon une étude plus récente d'Opinion Way/French food capital de 2018, 86 % des consommateurs souhaitent obtenir plus d'informations, dont 28 % demandant d'avoir accès à toutes les informations disponibles.

plaisirs de la table, ceux qui s'inquiètent pour leur santé regardent attentivement les indications nutritionnelles, les écologistes cherchent à réduire les impacts environnementaux et sont prêts à dépenser plus pour manger « bio », mais sans toujours disposer des informations leur permettant de faire les bons choix. Les femmes, plus sensibles que les hommes aux valeurs « santé » et « environnement », attachent une importance particulière aux composantes nutritionnelles, sanitaires et environnementales de l'alimentation. Elles s'inquiètent des effets à long terme sur leurs enfants d'aliments qui seraient « pollués par des produits chimiques ». L'intérêt pour les problèmes environnementaux poussant à la consommation de produits issus de l'agriculture biologique est particulièrement visible chez les jeunes et les Français les plus diplômés : on assiste à une coupure entre ces derniers et ceux qui ont arrêté leurs études avant le baccalauréat. Cette diversité de la demande conduit à une diversité de l'offre et à la très grande gamme d'aliments proposés aux consommateurs par les entreprises et les distributeurs.

Il n'existe donc pas un consommateur « moyen », même si 79 % d'entre eux se retrouvent en 2017 pour déclarer ne suivre aucun « régime » (Tableau 1). Les 21 % restant, en augmentation, se déclarent surtout flexitariens (limitant et régulant leur consommation de viande au profit d'une alimentation plus diversifiée), mais également végétariens, végétaliens, locavores, adeptes des aliments biologiques et des produits sans additifs, climatériens[21]. Leurs attentes évoluent depuis une décennie du fait des modifications des modes de vie (individualisation, vieillissement), des modes de consommation, des pratiques culinaires, des formes de distribution, des modes de communication.

Comportement	%	Comportement	%
Sans régime particulier	79	Locavores	0.8
Flexitariens	8	Végétaliens, végans	0.7
Végétariens	3	Régime paléo	0.1
Sans gluten	2	Fructivore	# 0
Exclusivement « bio »	1	Crudivore	# 0

Tableau 1 – Les catégories de consommateurs parmi les Français[22]

Autre tendance importante et inattendue chez les Français, l'alimentation serait en train de devenir une activité secondaire peu valorisante au sein de la diversité des activités sociales. Bien que plus résistant que celui des autres pays, le modèle alimentaire français perdrait peu à peu une partie de sa spécificité. Il conserve néanmoins encore une forte valeur culturelle et symbolique.

21 Leur première motivation d'achat est de réduire l'impact de leur alimentation sur le changement climatique.

22 L'Obsoco, 2017. *La consommation alimentaire comme nouvelle conduite de vie.* Enquête réalisée en ligne du 24 mai au 13 juin 2017 auprès d'un échantillon de 4 000 personnes représentatif de la population française âgée de 18 à 70 ans.

Les évolutions actuelles sont guidées par les couches moyennes de la population urbanisée. Les pratiques alimentaires sont marquées par la demande d'aliments-service sophistiqués adaptés à la variété des prises alimentaires quotidiennes et en adéquation avec les styles de vie. Il faut cependant prendre garde à ne pas généraliser les résultats des enquêtes d'opinion dans la mesure où de grandes différences sont observées entre ce qui est déclaré par les personnes sondées (un « idéal alimentaire ») et ce qu'elles consomment réellement.

Parmi l'ensemble des facteurs influençant l'évolution des modes de vie, c'est la transformation des rapports au temps qui a les effets les plus forts sur la consommation alimentaire : rythmes de vie liés aux rythmes des villes bien différents de celui des zones rurales ; tendance à considérer l'alimentation comme une activité sociale secondaire, interstitielle, passant après les autres ; recherche avant tout de praticité, de rapidité, d'une cuisine d'assemblage du dernier moment. Selon l'Ania[23], les consommateurs portent cependant une attention croissante à la qualité, la fraîcheur et le goût des produits achetés.

Les Français qui consacrent en moyenne[24] 20 % de leurs revenus à leur alimentation, chez eux ou hors de leur domicile, s'inquiètent pour leur niveau de vie. S'agissant des produits alimentaires, ils sont nombreux à percevoir des prix à la hausse alors que cette impression ne correspond pas à la réalité : on observe une baisse des prix de l'ordre de 6 % entre 2013 et 2018 et une inflation quasiment nulle en 2019, ce qui fait de l'alimentaire une exception industrielle. En raison de ce sentiment, la consommation des ménages en biens alimentaires recule. La baisse a été particulièrement importante en 2018 (-1,2 %). D'une manière générale, la consommation alimentaire évolue depuis quatre ans à un rythme nettement inférieur à celui d'autres biens, signe d'arbitrages en défaveur des biens alimentaires.

Selon une étude Opinion Way de 2016, le premier critère de choix des Français lorsqu'ils font leurs courses alimentaires est le prix (76 %), suivi par le goût (40 %), la date de péremption (39 %) et la provenance (34 %). La crise sanitaire provoquée par la CoViD-19 a néanmoins sensiblement modifié les critères d'achats. Pour l'Ipsos[25], les Français se tournent davantage vers les produits d'origine France, vers les produits frais (on observe une baisse de la consommation de plats préparés) ou encore vers des produits issus des circuits courts (l'origine est devenue le premier critère de choix pour les fruits et légumes) : ils sont 63 % à consommer le plus possible de produits locaux pour soutenir l'économie. Que ce soit pour les produits frais, les produits d'entretien ou l'épicerie, le prix reste néanmoins le premier critère de choix ». L'avenir dira si cette évolution confirmée par une étude du Credoc en juin 2020 (Figure 1) est durable.

23 Ania, 2019. Conjoncture du secteur agro-alimentaire français au premier trimestre 2019 : l'IAA, Un fleuron français mis à l'épreuve.

24 Il y a de très grandes variations entre les populations.

25 Étude réalisée en avril 2020 à la demande de l'Observatoire E. Leclerc des Nouvelles Consommations.

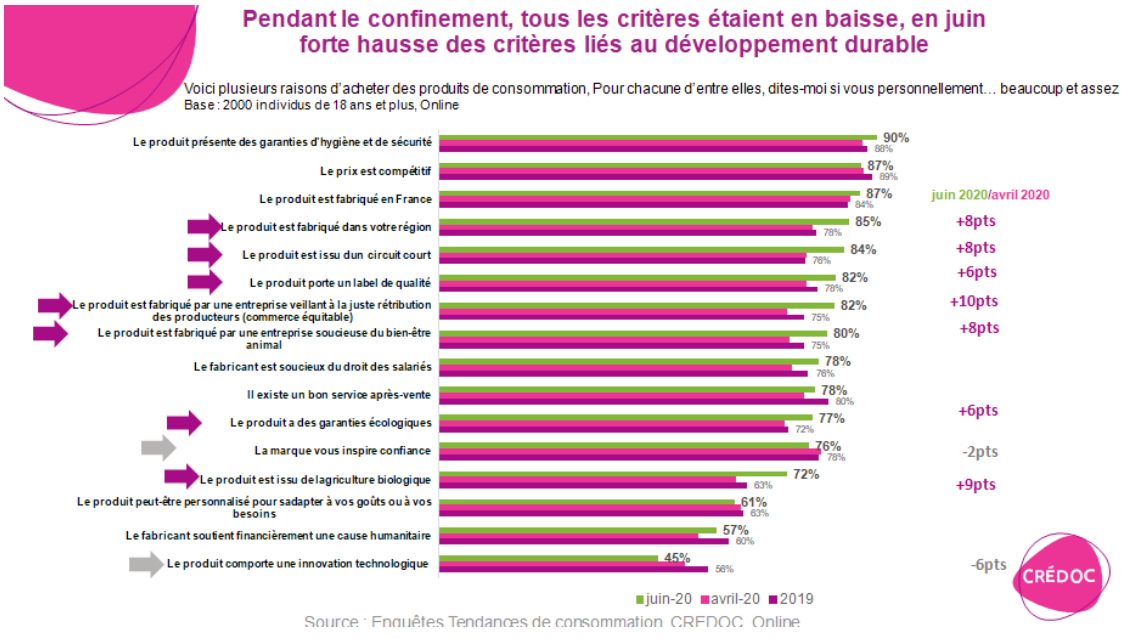


Figure 1- Critères d'achat des Français en période d'épidémie de CoViD-19 (CREDOC, 2020)

La plupart des acteurs du système alimentaire, en particulier les industriels, ont désormais intégré que leur vision stratégique d'évolution de leurs pratiques doit prendre en compte les demandes des consommateurs-citoyens pour des aliments respectant leur santé, l'environnement et dont l'origine et la composition soient totalement garanties.

UN INTERMÉDIAIRE ESSENTIEL ENTRE LES AGRICULTEURS ET LES CONSOMMATEURS

Le système alimentaire, celui qui produit et distribue nos aliments, du champ à notre assiette[26] (depuis les semenciers, les fabricants d'engrais et de produits phytosanitaires, les constructeurs de matériels agricoles, les agriculteurs, les transporteurs et les industriels jusqu'à la grande distribution et la restauration hors domicile) occupe une place centrale au sein de la société et de l'économie française. Cela en raison des millions d'emplois qu'il génère, de son chiffre d'affaires cumulé (agriculture : 76 milliards d'euros, industrie alimentaire : 215 milliards d'euros, distribution : 234 milliards d'euros[27], restauration collective : 97 milliards d'euros) et de son impact positif sur la balance commerciale de la France (7,9 milliards d'euros en 2019), sans parler des dépenses des touristes étrangers pour se nourrir (un milliard de repas par an). Les défis auxquels il doit faire face sont multiples (Tableau 2). Les industries alimentaires doivent en prendre toute leur part.

26 Ou encore, selon le professeur Louis Malassis, « La manière dont les hommes s'organisent, dans l'espace et dans le temps, pour obtenir et consommer leur nourriture ».

27 70 % des achats alimentaires des Français se font dans les enseignes de la grande distribution.

Assurer les besoins biologiques en nutriments et calories	Préserver l'avenir des générations futures
Garantir la qualité sanitaire	Agir avec des ressources limitées en eau
Assurer les équilibres économiques	Produire sur des surfaces cultivables limitées
Approvisionner les populations urbaines	Anticiper la modification du climat
Respecter les spécificités régionales	

Tableau 2- Les défis du système alimentaire (colonne de droite : un système « durable »).

Ce système, dont les consommateurs-citoyens se sont progressivement retrouvés au centre (Figure 2), est en pleine mutation, de manière moins visible, mais au même titre que les secteurs de la santé, du transport, de l'énergie et de la communication. Plusieurs raisons expliquent cette évolution : la nécessité de nourrir une population mondiale plus urbanisée, plus aisée et en continuelle augmentation ; l'obligation d'atténuer l'impact de l'agriculture et de l'élevage sur l'environnement, tout particulièrement sur les émissions de gaz à effet de serre ; une connaissance renouvelée des effets de l'alimentation sur notre bien-être et notre santé ; l'évolution des pratiques de commercialisation. Sans oublier, tout aussi déterminantes, des avancées scientifiques et technologiques majeures dans des domaines qui concernent très directement le système alimentaire : la nutrition, les biotechnologies, le génie des procédés, la robotique et les sciences de l'information et de la communication.

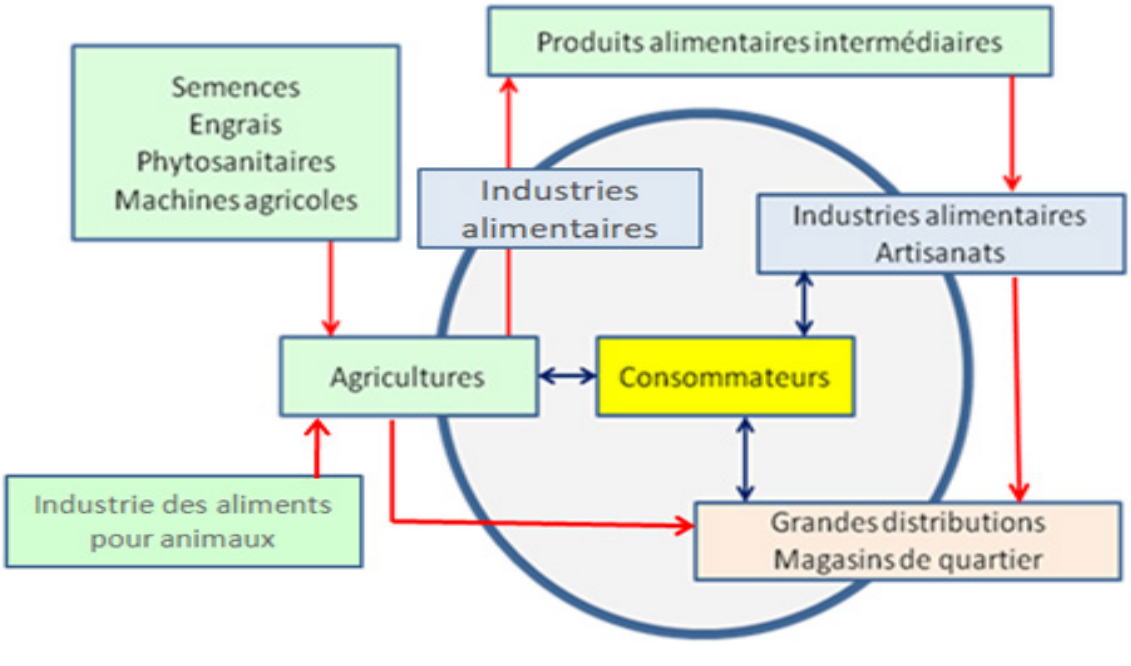


Figure 2 – Les consommateurs sont au centre du système alimentaire

Au sein de ce système, le métier principal des industries alimentaires est de transformer des matières premières de composition variable (les produits agricoles) en aliments et boissons de composition constante (Figure 3).

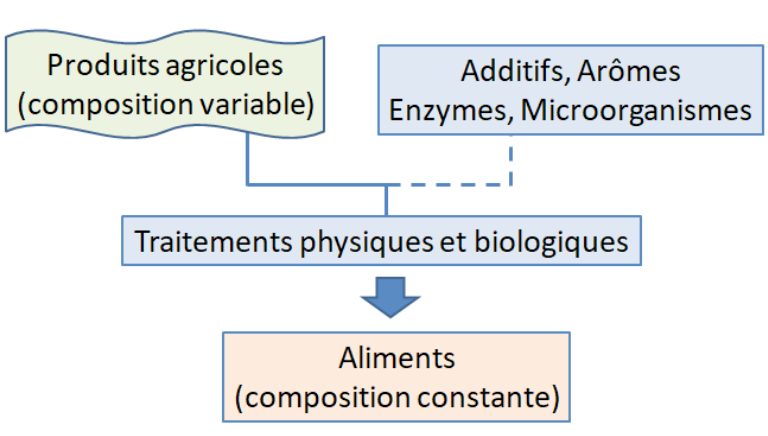


Figure 3 – Le métier des industries alimentaires

Situées à la confluence des activités agricoles et de la distribution, les industries alimentaires sont structurées en trois groupes d'activités :

- les industries de première transformation qui extraient et parfois transforment des matières premières d'origine agricole en produits « élémentaires » : farines, semoules, huiles, beurres, sucres, amidons. Ce sont essentiellement des industries de « fractionnement » ;
- les fabricants d'ingrédients alimentaires : enzymes, ferments (levures, bactéries), nutriments (vitamines, fibres, etc.), additifs (agents de textures, colorant, etc.) ;
- les industries de deuxième transformation dont le métier est de stabiliser et de conditionner les produits agricoles peu transformés (laits, viandes, fruits, légumes) ou de fabriquer des aliments plus élaborés (biscuits, fromages, vins, charcuteries, plats cuisinés, conserves, produits surgelés, etc.) dont les caractéristiques sensorielles sont bien maîtrisées. Ce sont souvent des industries d'« assemblage » consistant à formuler et structurer un aliment à partir de ses différentes composantes dont la part principale est issue des industries de première transformation. Cet assemblage se fait aux niveaux industriels et artisanaux.

Ainsi, les industries alimentaires tentent de répondre à la demande des consommateurs en faisant appel à une diversité d'opérations physiques (décorticage, broyage, chauffage, etc.) et biologiques (fermentation) pour fabriquer des produits sûrs et de bonne qualité nutritionnelle, faciles à conserver et à préparer, au meilleur coût et accessible à tous, tout en prenant en compte les impacts environnementaux de leurs activités.

Si à l'échelle mondiale, le système dominant de production de notre alimentation est industriel, une multitude de systèmes alimentaires spécifiques (alternatifs, innovants, ancestraux, religieux) coexistent néanmoins, parallèlement à cette dimension mondialisée. En France, cet enchevê-

trement reste limité. Le système alimentaire national continue de se caractériser par une forte domination du trio « agriculture intensive et raisonnée », « industries alimentaires » et « grande distribution ». Des systèmes alternatifs se développent néanmoins, chacun avec sa spécificité (nutrition personnalisée, transformation artisanale, produits issus de l'agriculture biologique, circuits courts, distribution *via* des plateformes internet) pour répondre aux demandes de certaines catégories de consommateurs. Comme aucun système alimentaire particulier ne peut seul répondre à l'ensemble des demandes, il est clair que le « système industriel » devra cohabiter et se combiner avec ces systèmes alternatifs.

Il n'en demeure pas moins que la consommation d'aliments d'origine industrielle est en nette croissance, en lien avec l'augmentation de l'urbanisation, de la restauration collective et de nouveaux modes de consommation (recherche d'aliments faciles à conserver, à utiliser et à préparer, services de livraison à domicile). Ce système industriel dominant présente des atouts (massification, accessibilité, prix, qualité sanitaire), mais aussi des limites (impact environnemental important, qualité nutritionnelle inégale, répartition de la valeur déséquilibrée). Pour répondre à ces exigences nouvelles, les industries alimentaires doivent mettre en œuvre des pratiques innovantes.

Les mesures européennes adoptées le 20 mai 2020 devraient les y encourager, en particulier le programme *Farm to Fork* (F2F) qui met en cohérence l'ensemble de la chaîne alimentaire, de la production à la consommation afin d'allier santé de la planète, santé des consommateurs et juste rémunération des producteurs.

Une industrie puissante, mais fragile

En France, le secteur des industries alimentaires (boissons comprises) est le premier secteur industriel en termes d'emplois et de chiffres d'affaires, devant l'automobile. Il est un des premiers exportateurs mondiaux de produits alimentaires transformés et représente un poids économique important pour notre pays (3^{e} contributeur au solde positif de la balance commerciale) avec cependant des signes de ralentissement et avec une contribution majeure des seuls produits alcoolisés (Figure 4).

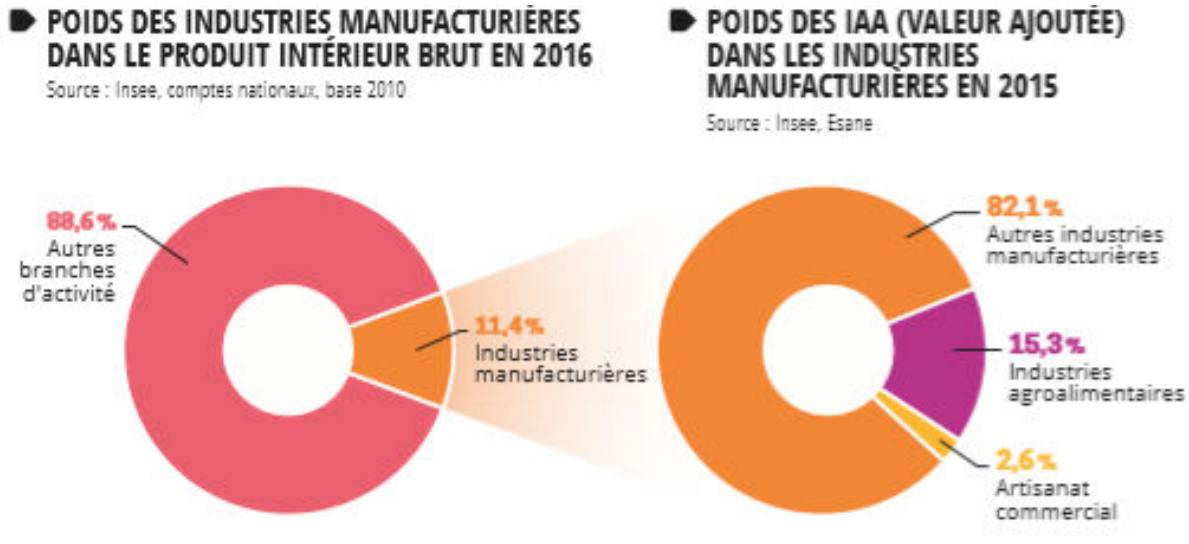


Figure 4 - Part des industries agroalimentaires (IAA) dans le PIB en 2016 : 1,74 %
(source : ministère de l'agriculture et de l'alimentation).

Comparativement aux autres branches industrielles, les industries alimentaires ont à prendre en compte quatre particularités :

- un marché inépuisable et universel qui se heurte au mur des estomacs et à des pouvoirs d'achat limités ;
- des clients – les consommateurs – inquiets (surtout pour leurs enfants) et particulièrement influençables ;
- une valeur ajoutée plus présente dans les activités de service (facilité d'usage) que dans les produits eux-mêmes (l'aliment) ;
- des innovations qui doivent surmonter des freins culturels et tenir compte de la variabilité des produits d'origine biologique et des contraintes réglementaires.

Les plus grandes des entreprises françaises sont loin d'occuper les premières places du classement mondial du secteur. La plus importante d'entre elles, Danone, arrive au quinzième rang, suivi par Lactalis (vingtième) et Pernod-Ricard (trente-quatrième). Les secteurs des produits laitiers et des boissons alcoolisées sont les seuls à jouer dans la cour des géants mondiaux (Tableau 3).

Rang	Nom	Siège	Ventes milliards	Principales activités
1	Cargill	US	100,5	Multiproduits
2	Nestlé	CH	82	Multiproduits
3	PepsiCo	US	56,8	Boissons, snacks
4	JBS	BR	43,7	Viandes, produits laitiers
5	AB InBev	BE	41,2	Bière
15	Danone	FR	21,9	Produits laitiers, eau, nutrition spécialisée
20	Lactalis	FR	17	Produits laitiers
34	Pernod Ricard	FR	9	Boissons alcoolisées
	Top 50		987	

Tableau 3 – Les leaders mondiaux de l'industrie alimentaire
(Source : FoodDrink Europe, 2017, Data & Trends, EU Food and Drink Industry).

Chiffres-clés de l'industrie alimentaire en France (2020)

Premier secteur industriel français, en termes de chiffre d'affaires et d'emploi.
Chiffre d'affaires : 215 milliards d'euros.
460 000 salariés.
10 000 entreprises, dont celles de moins de 250 salariés (98 %) réalisent 40 % du chiffre d'affaires.
Le premier groupe français (Danone) est quinzième mondial.
70 % de la production agricole est transformée.
4e exportateur mondial (excédent commercial : 7,6 milliards d'euros).

Des inquiétudes se manifestent sur la compétitivité d'une industrie marquée par une destruction de valeur sans précédent (5 milliards d'euros en cinq ans) et un déclin de la France dans les échanges à l'intérieur de l'Europe (solde commercial avec le reste du continent de plus de 6 milliards d'euros en 2011, désormais négatif de 300 millions d'euros en 2018). À l'international, mesuré hors boissons, le déficit s'inscrit dorénavant à 5,4 Md€ alors que les exportations équilibraient les importations au milieu des années 2000. De plus, la France exporte principalement des matières premières agricoles avant de les réimporter sous forme de produits transformés alors que nos voisins européens, en particulier du Nord, affichent de meilleures performances sur les produits transformés. Ce constat est d'autant plus préoccupant que la valeur ajoutée des aliments au sein de la filière alimentaire croît avec leur complexité tout au long de la chaîne alimentaire : du blé aux farines, aux pains, aux biscuits et aux céréales pour petits-déjeuners, du lait au lait UHT, au yaourt et aux fromages.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Total IAA	8,2	6,4	4,6	6,8	8,2	9,1	8,3	7,6	8,0	7,4	7,6
Total produits agricoles bruts	2,0	3,3	1,6	2,3	4,5	3,7	4,2	2,7	2,6	0,2	-0,5
Total IAA hors boissons	-0,7	-2,4	-2,6	-1,8	-1,4	-1,6	-2,4	-2,9	-3,3	-4,1	-4,7

Tableau 4 - Évolution des soldes commerciaux en Md€, entre 2007 et 2017 (Source : Douanes).
«IAA» : industrie agroalimentaire.

Parmi les facteurs pénalisant leur croissance, les industriels relèvent les quatre domaines suivants : les relations conflictuelles avec la grande distribution (69 %), des coûts structurels trop élevés (46 %), des difficultés de recrutement (44 %) et une réglementation contraignante pour leur activité mais destinée à protéger le consommateur (33 %)[28]. Élément d'espoir au sein de ce tableau un peu sombre : les industries alimentaires françaises sont vues à l'étranger comme ayant une très bonne notoriété, une très bonne qualité même si elles se caractérisent par un mauvais rapport qualité/prix.

Les tendances de long terme sont donc préoccupantes, avec une baisse de la compétitivité et une dégradation des échanges commerciaux. L'analyse de conjoncture de l'ANIA du 1er trimestre 2019 note une dégradation inquiétante de valeur tant sur les marchés domestiques qu'à l'export. La diminution des marges, induite par la concurrence sur les prix au niveau de la grande distribution, réduit fortement les capacités d'investissement des entreprises en amont (recrutements, innovation) pour permettre la montée en gamme attendue des consommateurs. Moindres marges aussi car les entreprises de transformation ont moins bien pris en compte en France qu'en Allemagne et d'autres pays que l'alimentation est entrée dans la révolution des services : il ne faut plus vendre uniquement des produits, mais également des services alimentaires facilitant la vie quotidienne.

Dans ce contexte économique fragile[29], l'industrie alimentaire doit faire face aux critiques du modèle agro-industriel qui se sont progressivement fait jour dans le monde, en France et en Europe notamment. Les consommateurs-citoyens s'inquiètent de l'impact de ce modèle sur leur santé et sur l'environnement. Pour répondre à ces inquiétudes, plusieurs scénarios se dessinent :

- un système agro-industriel évoluant en prenant mieux en compte les multiples composantes de sa durabilité,
- une évolution déjà en marche aboutissant à un système alternatif reposant sur une production alimentaire territorialisée,
- ou encore un scénario hybride combinant les deux systèmes précédents.

28 Ania, juin 2019. *Conjoncture du secteur agro-alimentaire français au deuxième trimestre 2019 : restaurer la compétitivité du secteur, pour créer de l'emploi à long terme.*

29 Ce phénomène n'est pas propre à la France. Selon une étude de l'assureur-crédit Euler Hermes, sur la période 2017-2019, c'est l'Europe occidentale qui a enregistré le plus de défaillances d'entreprises agroalimentaires réalisant un chiffre d'affaires supérieur à 50 millions d'euros, au nombre de 46, suivie par l'Europe centrale (27) et l'Asie-Pacifique (26). L'Amérique du Nord a, elle, connu la défaillance de son plus gros transformateur de lait (Dean Foods).

Certes, le système agro-industriel présente de nombreux points positifs : des produits de qualité standardisée et très sûrs, des prix bas liés à l'importance des volumes traités, un grand champ d'innovation. Mais il a aussi ses faiblesses : la banalisation et l'artificialisation des aliments, des marchés hyperconcurrentiels, un modèle financier peu résilient aux crises, des contestations citoyennes croissantes.

Le modèle « territorialisé » qui lui est opposé est souvent adopté par les PME et TPE. Il s'appuie sur la différenciation de ressources spécifiques (qualité organoleptique, sanitaire, origine, patrimoine). Ses forces sont le développement durable, des terroirs non « délocalisables », une triple proximité entre les producteurs, les transformateurs et les consommateurs, les labels, l'emploi, une synergie élevée avec les écosystèmes naturels. Ses faiblesses sont son atomisation et son manque de compétitivité économique.

Pour l'instant, le système industriel reste dominant, peut-être parce que « Jusqu'alors, au moins en France, l'industrie alimentaire a réussi à garder un lien avec son territoire et son héritage culturel, tout en répondant aux standards de qualité et de sécurité des aliments, en conciliant tradition et innovation en lien avec son modèle alimentaire. »[30] Le modèle « territorialisé » devrait néanmoins poursuivre son implantation. Les grandes et moyennes entreprises pourraient d'ailleurs le rejoindre, au moins partiellement, en implantant des usines de moindre taille au plus proche des lieux de production. D'autant plus que la diversité des aliments spécifiques à certaines régions demeure particulièrement marquée en France.

Le diagnostic de l'Association nationale des industries alimentaires-Ania (2019)

En 2018, la première industrie de France porte les stigmates d'une destruction de valeur continue depuis six ans, une véritable exception industrielle. Elle reste la première industrie de France, mais la conjoncture de ses entreprises continue de se détériorer tant sur les marchés domestiques que sur l'export, levier de croissance essentiel pour les IAA. La production industrielle, résiliente en 2017, a baissé (-1,4 % après +0,5 %), tout comme la consommation des ménages, qui a affiché en 2018 sa plus forte chute depuis la crise financière (1,2 %). En outre, si le solde commercial reste largement positif, plaçant l'IAA comme 3e secteur en termes de performances commerciales, son excédent baisse pour se situer autour de 7 milliards d'euros, soit son niveau le plus bas en huit ans. Cette dégradation de la conjoncture traduit avant tout les faiblesses structurelles du secteur : marges au plus bas et guerre des prix sans relâche avec la grande distribution.

La situation économique des industries agroalimentaires fait figure d'exception. Il s'agit du seul secteur industriel à être en déflation continue depuis six ans. En cumul depuis 2013, celle-ci se chiffre à 6,1 %, pour porter à 5,5 milliards d'euros la destruction de valeur sur l'ensemble de la filière. L'une des causes est la bataille de parts de marchés à laquelle se livrent les enseignes de la distribution : elle a

30 Didier MAJOU, 2017. L'alimentation : enjeux et complexité. Agronomie, *Environnement et Société*, Volume 7, N°1

progressivement laminé les capacités d'investissement des industries alimentaires. Prises en étau entre un amont qui a vu sa compétitivité se réduire considérablement et un aval toujours plus concentré, les entreprises subissent une pression grandissante sur les prix de vente des produits qu'elles fabriquent. Sans profiter à la consommation, la guerre des prix impacte la survie des entreprises et donc leur capacité à créer des emplois.

Si le redressement de la conjoncture macroéconomique avait permis au secteur alimentaire d'ouvrir davantage d'usines ces dernières années, les industries alimentaires comptent en 2018 plus de fermetures que d'ouvertures. Dans l'ensemble, les entreprises avaient mieux résisté à la crise financière de 2008 qu'elles ne le font aujourd'hui à la guerre des prix. Cette atrophie du tissu industriel affecte désormais la capacité des entreprises à recruter pour développer leur activité commerciale.

DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES INCRÉMENTALES PLUTÔT QUE DE RUPTURE

Les industries alimentaires font preuve d'innovation, surtout dans les domaines organisationnels et du marketing.

Entre 2012 et 2014, 69 % des entreprises de plus de dix salariés du secteur des industries agroalimentaires ont innové dans au moins une des catégories suivantes : création ou amélioration d'un produit, introduction ou modification d'un procédé de production, nouveau mode d'organisation, stratégie marketing. Selon l'ANIA, la moitié des produits vendus dans les supermarchés est renouvelée tous les cinq ans : chaque année, ce sont 3 000 produits nouveaux qui sont proposés par 20 % des industriels. On note en revanche la rareté de produits réellement nouveaux et un manque d'innovations de rupture dans les procédés de fabrication.

Les sources de financement pour l'émergence des produits innovants sur ces trois dernières années sont l'autofinancement pour 60 % des entreprises, les financements publics pour 46 % et les financements privés pour 17 %. 0,5 à 1,5 % du chiffre d'affaires est consacré à la recherche et développement (R & D). Les grands groupes innovent plus que les PME et TPE alors que celles-ci représentent 98 % en nombre des entreprises de l'agroalimentaire.

Industries alimentaires : des entreprises plus innovantes que les autres entreprises manufacturières

Entre les périodes 2010-2012 et 2012-2014, le taux d'entreprises innovantes dans les industries agroalimentaires françaises est passé de 61 % à 69 %. Les secteurs les plus innovants sont ceux des boissons et de la transformation et conservation de poissons.

L'innovation est plus fréquente dans les industries agroalimentaires que dans les industries manufacturières (69 % d'entreprises innovantes contre 48 %) alors que, paradoxalement, les entreprises agroalimentaires dépensent relativement moins pour l'innovation (1,3 % du chiffre d'affaires contre 3,4 %). Les entreprises agroalimentaires innovent plus souvent en marketing et déposent plus de marques, mais moins de brevets que les autres industries manufacturières. La présence de l'entreprise à l'exportation ou la taille de l'entreprise favorise l'innovation dans les industries agroalimentaires, plus que dans l'industrie manufacturière.

Source : *Agreste – Les dossiers, avril 2018, Jeanne-Marie Daussin, L'innovation dans les entreprises agro-alimentaires*.

Les industries alimentaires utilisent peu les aides publiques mises à leur disposition en raison de la complexité des dossiers à remplir. De plus, le manque de compétences en interne au sein des petites entreprises et l'absence de culture d'innovation technologique de leur « patron » ne sont pas les moindres des obstacles. Il existe heureusement en France le réseau des centres techniques coordonnés par l'ACTIA[31] pour introduire dans les petites entreprises une culture de l'innovation et les assister dans leurs projets. Un autre frein est la lourdeur des procédures d'homologation des aliments qualifiés de « nouveaux » (« novel foods ») au sens de la réglementation européenne[32].

Les innovations produits et procédés sont presque exclusivement de nature incrémentale. Elles consistent en des améliorations généralement mineures des formulations et des procédés de fabrication, par exemple l'adaptation des équipements ou le réassemblage de technologies existantes comme les technologies de conservation des aliments combinant de multiples facteurs de conservation : pH, température, potentiel rédox. Le plus souvent, les consommateurs ne perçoivent que les innovations « produit » et « marketing » : celles portant sur le contenant (les emballages), la qualité des services (facilité d'achat, de conservation et de préparation) et la valeur santé des aliments. Les innovations incrémentales qui touchent aux procédés sont ignorées bien qu'elles soient très nombreuses dans les usines.

Il en est autrement des innovations de rupture. Peu nombreuses, certaines anciennes, elles sont difficilement acceptées par les consommateurs. Celles qui ont reçu un bon accueil font dorénavant partie du « paysage » et se caractérisent par les services visibles qu'elles rendent aux consommateurs. On en dénombre quatre principales :

- le traitement du lait à très haute température (lait UHT),
- la surgélation,
- la lyophilisation (café) et
- le chauffage ménager avec des microondes.

D'autres restent ignorées et donc protégées des controverses, au moins pour l'instant :

- le chauffage ohmique (stérilisation de soupe contenant des légumes en morceau),
- la cuisson extrusion (produits céréaliers alvéolés pour les apéritifs),
- l'isomérisation enzymatique (sucres de maïs : un mélange de fructose et de glucose),
- l'utilisation d'enzymes issues de microorganismes génétiquement modifiés (par exemple, la chymosine « recombinante », substitut de la présure de veau utilisée en fromagerie).

Certaines, enfin, sont fortement rejetées, parfois à juste titre comme l'hydrogénation des acides gras, d'autres – malheureusement – comme l'usage de l'ionisation pour protéger les steaks

31 Association de coordination technique pour l'industrie agro-alimentaire.

32 Voir à ce sujet le rapport de l'Académie des technologies : *Les aliments santé : avancées scientifiques et implications industrielles* (2016).

hachés contre le développement de microorganismes pathogènes (Figure 5). Les freins à ces innovations de rupture sont nombreux : l'attachement à une alimentation « à la française », la bonne image de l'aliment naturel, le temps nécessaire à rendre ces innovations opérationnelles (supérieur à dix ans) et donc des retours sur investissement difficiles à supporter dans un secteur où les marges sont faibles.

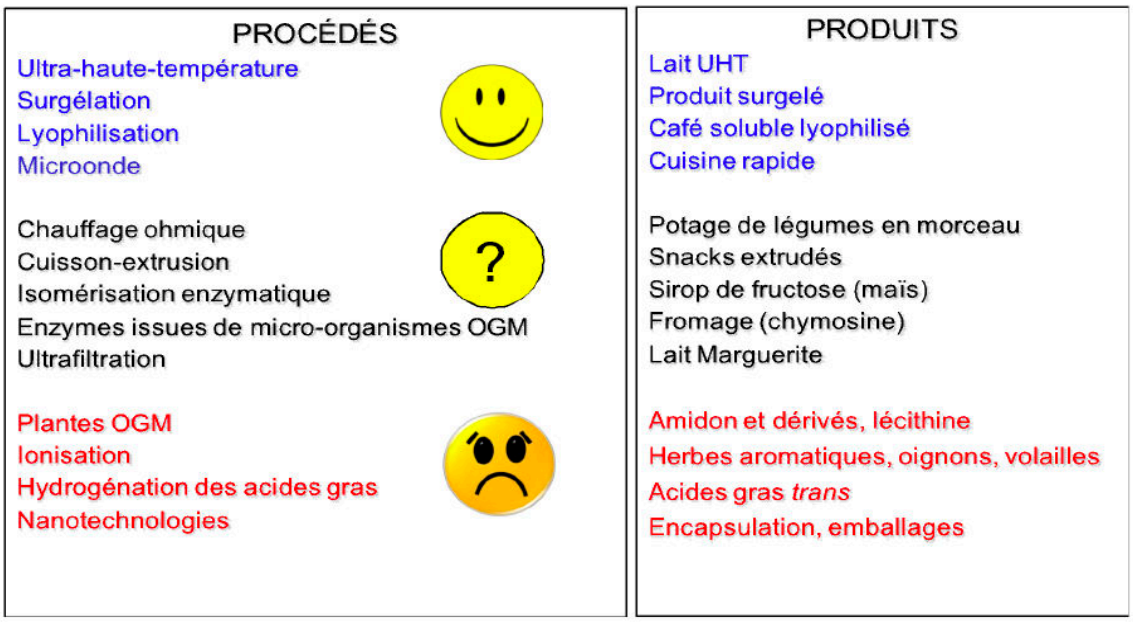


Figure 5 - Les innovations de rupture depuis 1950 : le regard des consommateurs

La demande citoyenne est le moteur premier des innovations « produits ». Les priorités accordées aux propriétés gustatives au cours des années 2000 se font moins prégnantes. En France, le « sans » gluten, « sans » lactose, « sans » additifs ou « sans » résidus chimiques a un poids croissant dans la notion de qualité ainsi que les circuits liés à l'agriculture biologique. Les industriels modifient leurs produits en conséquence.

En termes d'innovations, les industriels ont de nombreux défis à relever :

- faire face à l'accroissement des inquiétudes alimentaires (elles ont augmenté de 19 points entre 1995 et 2018) alors que les risques réels ont régulièrement diminué. À la suite de quelques crises depuis la fin des années 1990, les pratiques alimentaires sont de plus en plus débattues sur les réseaux sociaux et les médias. Les sujets d'inquiétude les plus cités sont le manque de transparence de la part des professionnels, les résidus de pesticides, les perturbateurs endocriniens, les polluants et plus récemment l'ultra-transformation des aliments liée à la présence d'additifs[33]. Les consommateurs sont également désorientés par

33 Pour l'instant, le rejet des aliments qualifiés d'ultra-transformés est plus affiché que réel. On observe en effet que leurs ventes augmentent. Il conduit néanmoins les industriels à modifier leurs formulations et leurs procédés afin de se protéger contre les évolutions probables des comportements.

les messages contradictoires qu'ils reçoivent de différentes sources en matière de nutrition ;
- satisfaire une demande de plus en plus prégnante, surtout chez les plus jeunes et les plus diplômés, pour une réduction de l'impact de l'alimentation sur l'environnement et le réchauffement climatique : un tiers des Français placent l'environnement comme principale préoccupation, avant le chômage ; un quart associe la consommation durable à la protection de la planète ;
- prendre en compte l'entrée des consommateurs dans une « société de services alimentaires » caractérisée par une demande pour des produits faciles à acheter avec des emballages porteurs d'informations facilitant leurs décisions, faciles à conserver, à préparer, voire prêts à consommer ;
- s'adapter à la part croissante de la consommation hors domicile (restauration, sandwicheries, pizzerias et autres kebabs) dont l'un des effets est de réduire les achats de produits industriels par les ménages.

Comme nous l'analyserons chapitre IX, cette demande est exacerbée par l'apparition d'applications numériques qui notent la « qualité » des aliments sur la base de critères autoproclamés et auxquels les consommateurs sont de plus en plus nombreux à faire appel lors de leurs achats.

Les industriels ont de la peine à répondre à des demandes aussi diverses et parfois contradictoires d'où émergent des souhaits mal définis pour des produits simples, naturels et donc sans additifs. L'une de leurs difficultés est que le « pas de temps » des scientifiques et des technologues est sensiblement supérieur à celui de la demande sociale, laquelle va en s'accélérant avec la place croissante des réseaux sociaux. Leurs objectifs varient selon que les produits finis sont de « grande consommation » ou « innovants à grande valeur ajoutée » :
- avec les produits de grande consommation, dont les marges sont faibles, les industriels s'efforcent de réduire les coûts, réduire les impacts environnementaux, tenir compte de l'attrait des consommateurs pour les produits végétaux, mettre en avant la valeur santé des produits. Les pistes d'innovation reposent sur l'optimisation des procédés de fabrication, la re-conception des formulations (75 % des actions industrielles actuelles), les performances sanitaire et environnementale des emballages, la valorisation des coproduits. Innover se réduit parfois à simplement reformuler. Les besoins d'innovation « produits » se font plus particulièrement sentir sur la redistribution des molécules au sein des aliments pour réduire les quantités de certaines d'entre elles (sel, sucre, additifs) tout en conservant aux aliments leurs propriétés sensorielles ;
- dans le cas des produits innovants à forte valeur ajoutée, les entreprises visent à fabriquer des produits sur mesure (seniors, jeunes, femmes…), utiliser de nouvelles matières premières (insectes, algues…), travailler sur les mix protéiques, inventer de nouvelles sensations et perceptions. Il s'agit de maximiser les marges, la compétitivité, les nouvelles connaissances en santé, le potentiel de nouvelles molécules. Pour cela, les réponses s'appuient très directement sur les avancées de la recherche (génétique, génie industriel, physique et chimie

des aliments, microbiologie, nutrition, toxicologie) : analyse moléculaire des composantes des aliments (identification de molécules actives, interactions), sciences et ingénierie de la formulation, approches biologiques (fermentation, enzymologie), maîtrise du fractionnement des produits végétaux pour obtenir les molécules d'intérêt.

À titre illustratif, on peut citer les travaux portant sur la structure/microstructure des produits : ils partent de la perception sensorielle pour remonter vers la structure des aliments et font appel à l'ingénierie de la microstructure, aux technologies additives (imprimante 3D, assemblage robotique, encapsulation) et à la formulation directe (sans déstructurer les matières premières comme avec l'extraction de molécules d'intérêt par simple infusion). Ainsi, Unilever a divisé le temps de fabrication de sa margarine et l'a rendue tartinable à température ambiante en faisant appel à des techniques de micronisation, d'encapsulation et de distribution programmée des molécules d'intérêt.

Plus que dans d'autres secteurs d'activité, la percée d'une innovation est très dépendante de facteurs sociaux et psychologiques. Une innovation majeure ne pourra être acceptée que si le marketing est accompagné d'un versant pédagogique expliquant aux consommateurs ce que leur apporte cette innovation. Ceux-ci accepteront plus facilement les innovations associées à de nouveaux plaisirs sensoriels ou à des facilités d'usage. Cette acceptation varie avec les régions, les milieux (urbains ou ruraux) et les âges. Elle doit surmonter des réactions de défiance qui sont liées à des déficits de connaissances ou à des croyances infondées.

Pour les industriels, un accès direct aux consommateurs par l'intermédiaire des réseaux sociaux devrait aider à faire accepter leurs innovations (voir chapitre IX). Pour promouvoir celles-ci, l'Association nationale des industries alimentaires (Ania) a créé en 2008 une « plate-forme technologique » dédiée à l'alimentation (*Food For Life* France) dans le prolongement de l'initiative européenne *Food for life*. Elle a vocation à réunir au sein d'une même instance tous les acteurs de la recherche et de l'innovation dans le secteur agroalimentaire (industriels, chercheurs, financeurs, consommateurs, pouvoirs publics, distributeurs). Elle pourrait être plus active.

Chapitre III

Des données massives, sûres et exploitables

Avec la transition numérique, la question de l'accès aux mégadonnées *(big data)* et de l'usage des technologies d'apprentissage et d'intelligence artificielle pour les exploiter se pose avec acuité aux industries alimentaires. L'exploitation de données multiples doit en effet les aider à mieux comprendre les phénomènes complexes qui contribuent à la qualité globale d'un aliment en y intégrant les facteurs sanitaires, nutritionnels, sensoriels et environnementaux, tout en prenant en compte le coût de production et de distribution. Il s'agit donc d'optimiser les procédures de création de produits nouveaux et d'amélioration des produits existants.

Dans un précédent rapport sur les aliments-santé[34], l'Académie des technologies avait déjà souligné l'intérêt de ce duo acquisition/exploitation des données pour mettre au point des aliments à effets physiologiques spécifiques (aliments-santé). Le défi auquel les entreprises sont confrontées est de trouver une articulation optimale entre les hypothèses formulées dans leurs laboratoires ou ateliers de conception de nouvelles formulations/fabrications et les outils d'aide à la décision résultant d'une analyse des données.

Les entreprises doivent donc gérer le changement d'échelle induit par l'exploitation numérique d'un très grand nombre de données afin de « décoder » les systèmes complexes que sont les aliments en analysant les propriétés de la matière (à toutes les échelles), les procédés de fabrication (approche dynamique) et de conditionnement, les demandes des consommateurs et les contraintes environnementales. La nécessité de faire appel à des capacités de calcul importantes aux fins d'apprentissage, de modélisation et de simulation nécessitera pour la grande majorité d'entre elles à s'accorder sur une mutualisation des moyens matériels (stockage, traitement…) et logiciels.

La première étape est d'avoir accès à des bases de données fiables prenant en compte le maximum de paramètres reliés à la « qualité » des aliments. La deuxième est de les exploiter.

34 Académie des technologies, 2016. *Les aliments-santé : avancées scientifiques et implications industrielles*.

BASES DE DONNÉES ET DONNÉES DIFFUSES

Il existe déjà de nombreuses bases de données sur la composition des aliments et sur leurs impacts environnementaux. Par exemple :

- sur la composition des aliments : *Open Food Facts* (des informations sur les aliments collectées de façon collaborative et mises à disposition de tous), *CIQUAL* (table de composition nutritionnelle des aliments), *INFOOD* (catalogue international des tables et bases de données sur la composition des aliments), *CODEX ALIMENTARIUS* (norme générale pour les additifs alimentaires), la base de données de l'Observatoire de la qualité des aliments alimentée *OQALI* construite à partir des informations figurant sur les emballages des aliments.
- sur les analyses de cycle de vie : *Ecoinvent* (la plus utilisée à l'heure actuelle), *AGRI-FOOTPRINT* (spécifique à l'agriculture et l'alimentation), *World Food LCA Database, Product Environmental Footprint European Life Cycle Database* en cours de développement par la Commission européenne.

Il est également possible d'avoir accès à des données sur les microorganismes dans des « banques », telle celle du site de Rennes du Centre international de ressources microbiennes de l'Inrae pour les bactéries alimentaires, ou dans l'outil de microbiologie prédictive *Sym'Previus* dont il sera fait plus longuement état chapitre VI.

En France, un travail très important a été entrepris sous la coordination de l'Ademe en collaboration avec l'Inrae, l'*Acta* et l'*Actia* pour créer la base de données *AGRIBALYSE*®. La toute dernière version *AGRIBALYSE* v3.0[35] (2020) porte sur les produits alimentaires consommés, tout au long de leur cycle de vie. Les 2 500 aliments présents dans la base de données correspondent en partie aux aliments disponibles dans la table nutritionnelle *CIQUA*L[36], facilitant ainsi la réalisation d'analyses nutritionnelles couplées nutrition-santé et environnement. Sa faiblesse est de se référer à des produits « standards moyens » sans préciser les écarts-types, ni prendre en compte la diversité des produits commercialisés appartenant à une même catégorie, alors que les différences entre ces produits peuvent être très importantes.

35 Accessible sur https://ecolab.ademe.fr/agribalyse

36 Accessible sur https://ciqual.anses.fr/

AGRIBALYSE®

AGRIBALYSE® est une base publique de données environnementales de référence qui offre un panel de données robustes sur l'impact environnemental des produits agricoles et alimentaires, pour améliorer les pratiques, du champ à l'assiette : 200 productions agricoles, 2 500 aliments, quatorze indicateurs d'impacts (eau, sol, air…) et un indicateur agrégé (score unique).

Co-piloté par l'Ademe et Inrae en s'appuyant sur la collaboration des instituts techniques agricoles et agroalimentaires, le programme AGRIBALYSE® existe depuis une dizaine d'années. La construction progressive de la base de données a mis à contribution une centaine d'experts et de scientifiques français et internationaux dans les secteurs de l'agriculture, des industries alimentaires et de l'environnement.

À l'origine focalisé sur les impacts liés à la production agricole, AGRIBALYSE® fournit aujourd'hui des données sur l'ensemble du cycle de vie des produits alimentaires en prenant en compte la transformation agroalimentaire, l'emballage, la logistique (stockage, transport, distribution) et la préparation culinaire des plats (cuisson, décongélation).

Les données sont fondées sur la méthode de l'analyse du cycle de Vve (ACV). Cette méthode fournit des indicateurs d'impacts environnementaux des produits, incluant toutes les étapes (du champ à l'assiette) et les différents enjeux (climat, eau, air, sol, etc.). Les données disponibles, qui demeurent génériques, sont assorties d'incertitudes qu'il convient de considérer pour une bonne utilisation (Tableau 5).

INDICATEUR D'IMPACT	Facteur de pondération pour le calcul du single score	INDICATEUR D'IMPACT	Facteur de pondération pour le calcul du single score
Changement climatique Unité : kg CO2 eq	22.19	Acidification Unité : mol H+ eq	6.64
Particules fines Unité : disease incidence	9.54	Radiation ionisante, effet sur la santé - Unité : kBq U235 eq	5.37
Consommation d'eau Unité : m3 world eq	9.03	Formation photochimique d'ozone - Unité : kg NMVOC eq	5.10
Consommation d'énergie non renouvelable - Unité : MJ	8.92	Eutrophisation, terrestre Unité : mol N eq	3.91
Usage des terres Unité : indice de qualité du sol	8.42	Eutrophisation, marine Unité : kg N eq	3.12
Consommation de ressources non renouvelables - Unité : kg Sb eq	8.08	Eutrophisation, eau douce Unité : kg P eq	2.95
Appauvrissement de la couche d'ozone - Unité : kg CFC-11 eq	6.75	Ecotoxicité d'eau douce Unité : CTUe	/

Tableau 5 - Les quatorze impacts environnementaux retenus par AGRIBALYSE®, associés aux facteurs de pondération définis par la Commission européenne

Les travaux se poursuivent dans une logique d'amélioration continue et de développement de nouvelles données. Ils visent également à améliorer les méthodologies de leur traitement. Ils ont déjà abouti à la construction de profils d'émissions de gaz à effet de serre pour de nombreux produits (Figure 6).

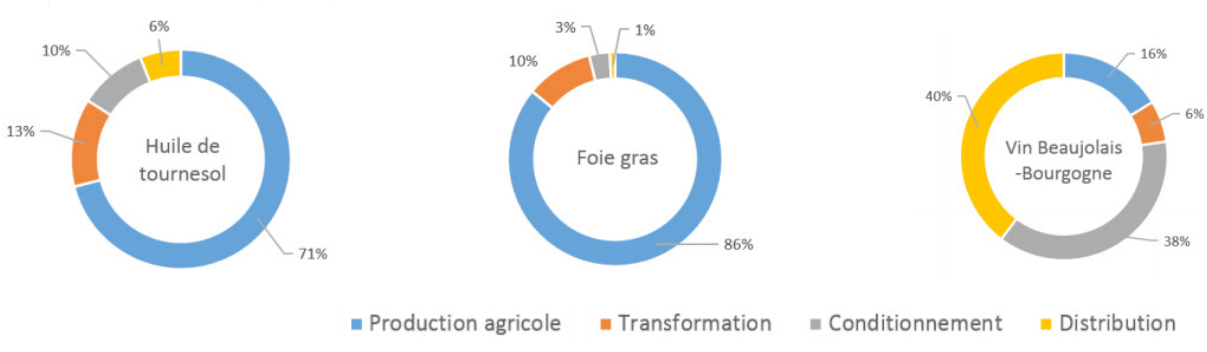


Figure 6- AGRIBALYSE® : exemples de profils des émissions de gaz à effet de serre par étapes du cycle de vie de différents produits alimentaires

En cours de réalisation, *Num-Alim* est une autre initiative qui mérite d'être soulignée. *Num-Alim* est issu du travail collectif de l'Ania, du Fonds français pour l'alimentation et la santé (FFAS), de la Fondation Avril (représentant de l'amont agricole) et de GS1 (l'organisme des standards : codes à barres, QR Code). *Num-Alim* s'est fixé quatre grands objectifs : formation à destination des entreprises, atteindre une large couverture et une grande fiabilité des gammes et attributs renseignés, faire de la plateforme *Num-Alim* un espace de confiance, susciter des projets de R & D. Sa phase opérationnelle a commencé à être mise en place. Renseignée directement et de manière volontaire par les fabricants, cette plateforme numérique de l'alimentation rassemblera au sein d'un catalogue numérique unique des données vérifiées et mises à jour en temps réel sur une large gamme de produits alimentaires. La carte d'identité numérique de chaque aliment agrégera une multitude d'informations comme les modes de production, la notation Nutri-Score, les labellisations, l'empreinte environnementale, etc. Au sein de la chaîne de valeur de la donnée, *Num-Alim* souhaite avoir un rôle clé sur le « nettoyage et le raffinage » de la donnée et sur la génération de la valeur ajoutée.

La mise en œuvre de la stratégie retenue par *Num-Alim* s'appuie sur le croisement de données issues de multiples sources :

a) données consommations avec Panels Nielsen, IRI, Kantaret, les distributeurs ;

b) avis consommations avec Webedia, Semantiweb et Shopvizor ;

c) veilles/risques réglementaires avec Mérieux NutriScience, Ecocert et Bureau Véritas.

À côté de ces centres « ressources », Il existe un nombre considérable d'informations dispersées dans un nombre non moins considérable de publications scientifiques, rapports et autres avis plus ou moins accessibles sur le web. Au sein des entreprises, les informations obtenues sont

également très nombreuses et souvent particulièrement pertinentes car relevant de la « vraie vie » du système alimentaire. Cependant, elles ne sont généralement pas enregistrées et encore moins traitées.

On notera l'absence de bases de données structures-fonctions, y compris nutritionnelles, qui reposeraient sur des études mécanistiques.

Les données d'achat et de consommation sont relativement « simples » à identifier, saisir et exploiter. En revanche les données concernant les multiples caractéristiques d'un aliment, d'un procédé de fabrication ou de conditionnement sont beaucoup plus complexes. Cette complexité est la conséquence des interactions qui existent de manière quasi-permanente entre matières premières (produits agricoles, ingrédients, additifs, ferments), procédés (degrés de liberté physiques, chimiques et biologiques) et produits finis (sécurité sanitaire, valeur nutritionnelle, propriétés sensorielles), sans oublier les impacts environnementaux et économiques. La construction des bases de données correspondantes demande de ce fait de très gros investissements.

Exploitation des bases de données

L'exploitation de bases de données est un objectif commun à la totalité des branches professionnelles. Dans le cas des industries alimentaires, il faut distinguer :

- les modèles exploitant les données dans le but de mieux connaître les caractéristiques des aliments proposés aux consommateurs et que nous suggérons de qualifier de « modèle produit » ;
- les modèles qui permettraient aux professionnels de concevoir et fabriquer des produits répondant aux cahiers des charges qu'ils se seraient fixés et qui pourraient être qualifiés de « modèle prédictif » sur lesquels nous reviendrons longuement dans le chapitre *V* (les fabricants d'aliments pour animaux les utilisent pour optimiser leurs formulations). C'est sur l'importance, mais également la difficulté, pour l'industrie de se doter de modèles prédictifs que ce rapport souhaite insister.

Pour ce qui est des « modèles produits », les distributeurs semblent ouvrir la voie, par exemple :

– la direction de Monoprix (elle n'est pas la seule) estime que *« La donnée est le carburant de la croissance »*. Comme les autres distributeurs, Monoprix dispose d'un nombre considérable de données (données de caisse, données de fidélisation, données disponibles sur les réseaux sociaux) sur les achats et les préférences de sa clientèle. Le distributeur souhaite mieux les collecter et les analyser. Son objectif est d'identifier les leviers de performance de chaque produit et d'optimiser l'efficacité des campagnes de promotion. Mais l'hétérogénéité des données rend difficile, voire impossible, leur exploitation. Pour lever ces obstacles, le distributeur a retenu un outil qui permet d'analyser la qualité des données, de supprimer les

doublons et les incohérences, puis de les intégrer dans des bases de données relationnelles et multidimensionnelles. Il devient alors possible d'analyser les données de stock, de vente et de produits et de croiser celles-ci avec les résultats de la campagne de promotion. Par ailleurs, ce type d'outil constitue une aide à la décision en permettant aux équipes d'actualiser rapidement les campagnes à venir.

- le groupe belge de distribution Colruyt a annoncé en juin 2020 l'acquisition de la jeune pousse belge spécialisée dans le traitement et l'analyse des données Daltix dont l'ambition est de « transposer des données en informations en temps réel » en s'appuyant sur des technologies d'intelligence artificielle et d'exploitation des données pour collecter et analyser des volumes de données internes et externes. Cet investissement «s'inscrit dans le cadre de l'ambition du groupe de répondre aux besoins du consommateur et de créer une valeur ajoutée durable dans la distribution». Avec cette collaboration, Colruyt espère capter davantage de données en temps réel sur les prix et le comportement des consommateurs.

Dans le cas des modèles prédictifs, l'objectif des modélisateurs est d'optimiser les propriétés des produits, les processus de fabrication, les techniques de suivi et de distribution en prenant en compte les contraintes environnementales tout au long du cycle de vie du produit. La construction de ces modèles doit prendre en compte les paramètres de la qualité que nous avons énumérés précédemment et dont on sait que certains interagissent. Ces modèles sont encore très peu nombreux, limités, et ne prennent pas en compte la complexité du système « aliment ».

Le recours aux technologies d'apprentissage par les données et d'intelligence artificielle en complémentarité avec les approches mathématiques traditionnelles pour la construction de ces modèles devrait permettre de traiter toute la complexité des phénomènes et de prendre en compte la nature biologique des aliments en intégrant un aspect dynamique et évolutif dans ces modèles. En raison de cette nature biologique, les propriétés des aliments peuvent en effet évoluer au cours du temps, parfois très rapidement et de façon variable avec l'environnement (température, activité de l'eau, composition de l'air ambiant).

Enfin, les modélisateurs devront non seulement intégrer le savoir des « scientifiques », mais également celui des « praticiens » qui s'appuient sur des pratiques bien maîtrisées sans toujours en connaître les fondements explicatifs. Il est ainsi possible de distinguer deux approches complémentaires :

- d'une part, les connaissances des experts ou profanes qui travaillent autour du procédé peuvent être formalisées *via* des systèmes experts, des algorithmes à base de règles, une programmation par les mots. Ceci donne lieu à des modèles explicites permettant aux spécialistes du traitement des données de dialoguer avec les responsables et opérateurs de production, d'expliquer les causes du dysfonctionnement en cas de pertes de production ou logistiques, de débrayer l'application et remettre en cause un système expert. Le contrôle qualité, l'aide à la maintenance, l'optimisation de ressources sont des secteurs où s'emploient ces méthodes.
- d'autre part, les méthodes puissantes (apprentissage profond, par exemple) font abstrac-

tion des structures et des connaissances *a priori* sur les données ou sur les phénomènes et construisent des modèles non linéaires. Il faut un très grand nombre de données pour mettre en œuvre ce type d'approches. Le chapitre suivant qui développe la manière dont la révolution numérique pourrait aider à « une meilleure prise en compte de la complexité des aliments lors de leur conception » illustre bien les difficultés auxquelles se trouvent confrontées les industries alimentaires pour franchir le pas d'une « révolution digitale » intégrée dans leur cœur de métier.

Recommandations

La construction de bases de données « produit » et leur exploitation font l'objet de plusieurs initiatives qu'il faut encourager en souhaitant que leurs promoteurs se rapprochent les uns des autres. Il apparaît urgent de mutualiser les capacités matérielles et logicielles de construction et de traitement des bases de données. Un consortium associant AGRIBALYSE® et *Num-Alim*, auquel devrait se joindre l'association Numagri, serait bien placé pour assurer cette coordination.

Un effort important de recherche doit être engagé pour doter les industries alimentaires de modèles prédictifs de la qualité et de bases de données dont ces modèles devront se nourrir. Deux projets doivent être menés simultanément :

- **construire des bases de données adaptées à des objectifs particuliers (conception ou fabrication des aliments) ;**
- **développer les outils numériques permettant de valider les données en vue d'obtenir par des techniques d'apprentissage et les connaissances déjà acquises des modèles prédictifs pour optimiser la conception et la fabrication des produits tout en gérant mieux toutes les étapes du cycle de vie des produits. Cet objectif pourrait, dans une première étape, être confié à une entreprise spécialisée dans la gestion des données, française si possible, via un appel d'offres. À plus long terme cette approche exclusivement par les données devrait être complétée par une approche où l'apprentissage automatique pourra tirer profit des modèles mécanistiques qui auront pu alors être développés.**

En plus des questions techniques (accès aux données, standardisation, interopérabilité), tous ces projets devront intégrer les aspects juridiques (propriété, licence d'exploitation) et éthiques, un lien étroit devra être établi avec les consommateurs.

Une aide significative des pouvoirs publics sera nécessaire pour atteindre ces objectifs.

Chapitre IV

Meilleure prise en compte de la complexité des aliments lors de leur conception

Les aliments sont des objets de plus en plus complexes

Le dictionnaire Larousse définit un aliment comme une « *substance habituellement ingérée par un être vivant et lui fournissant les matières et l'énergie nécessaires à sa vie et à son développement* ». Cette vision est purement physiologique. Chacun sait que les consommateurs attendent beaucoup plus de leur nourriture (voir les chapitres I et II).

Jusqu'au tournant des années 1970, trois mots-clés étaient utilisés pour caractériser un aliment : santé, sécurité, sensoriel. Auxquels s'est ajouté vers 1980 celui de service. Se popularisait alors chez les professionnels la règle des 4S que le directeur scientifique de Danone (alors BSN) se plaisait à utiliser pour expliquer ce qui faisait la qualité d'un aliment. Ce n'est que récemment qu'une nouvelle étape a été franchie en proposant d'apprécier la qualité d'un aliment en se référant à la règle des 8S (Figure 7) une fois intégrées des composantes environnementales.

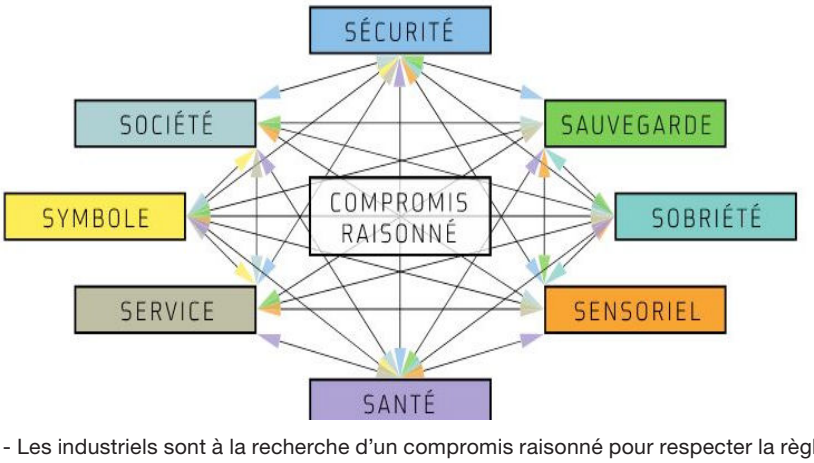


Figure 7 - Les industriels sont à la recherche d'un compromis raisonné pour respecter la règle des 8S[37].

37 D.Majou, 2017. L'alimentation : enjeux et société, *Agronomie, environnement et sociétés*, volume 7, N°1.

Pour les chercheurs, le regard porté sur un aliment peut être très différent selon qu'ils sont physico-chimistes ou sociologues (Figure 8).

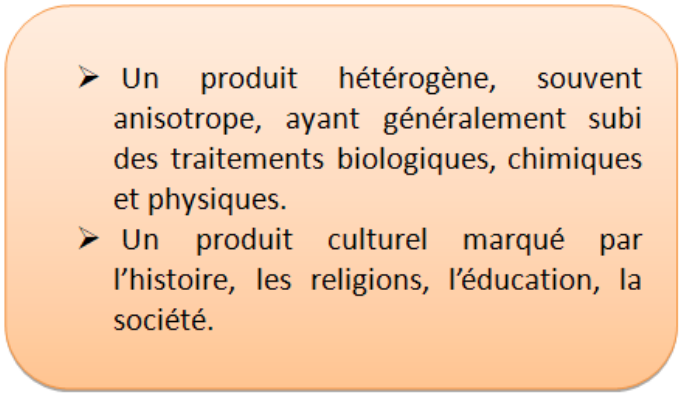


Figure 8 – Le double visage d'un aliment vu par un physico-chimiste ou par un sociologue

Aujourd'hui, la qualité d'un aliment est jaugée à l'aune de multiples paramètres. Ainsi que noté précédemment, elle intègre des composantes biologiques, culturelles, sociétales et économiques, parfois contradictoires :

- biologiques (nutritionnelles et sanitaires) : composition en nutriments (protéines, lipides, glucides), en micronutriments (minéraux, vitamines) et en calories, présence de molécules physiologiquement actives exerçant un effet positif sur la santé, présence (ou non) de molécules responsables d'allergies (protéines d'origines multiples) ou d'intolérances (lactose, gluten), qualité sanitaire (absence de bactéries et de virus pathogènes et de produits chimiques en quantités suffisantes pour les rendre dangereux pour la santé) ;
- culturelles et cultuelles : plaisir, portée symbolique, interdits religieux, origine, naturalité, tradition, commodités d'achat, facilité d'usage ;
- citoyennes : impact sur l'environnement[38], durabilité des moyens de production, de fabrication (y compris les opérations d'emballage/conditionnement) et de logistique, solidarité de nos choix alimentaires avec les pays pauvres, soutien à l'agriculture en achetant « français », proximité des lieux de production et de transformation, réduction du gaspillage ;
- économiques : prix des aliments, revenu des acteurs professionnels du système alimentaire.

À partir des années 2000, une nouvelle notion est apparue pour mieux prendre en compte certaines des caractéristiques d'un aliment, celle de « matrice alimentaire ». Celle-ci est définie comme la structure alimentaire complexe qui résulte des interactions développées entre les molécules entrant dans la « formulation » d'un aliment au cours de sa fabrication. Par exemple, la valeur nutritionnelle

38 Selon un rapport du GIEC (aout 2019), certains comportements alimentaires ont une empreinte carbone moins importante que d'autres (par exemple : limiter la consommation de viande, utiliser davantage de protéines végétales, réduire le gaspillage).

d'un produit ne peut pas être appréciée sur la base de la seule somme des propriétés de chacun des nutriments considérés isolément, au même titre que pour les propriétés organoleptiques.

Concevoir de nouveaux aliments ou améliorer l'existant : les obstacles à surmonter

Initialement, les responsables du développement dans les entreprises reproduisaient dans leurs laboratoires le travail des cuisiniers devant leurs fourneaux, procédant par essais et erreurs, imaginant et modifiant leurs recettes sur la base de leurs intuitions et de leurs expériences. Ils étaient à la fois artistes et techniciens. Les bases scientifiques et techniques de leurs essais étaient alors quasi inexistantes.

Depuis la fin des années 1960, sept mouvements ont fait évoluer leur métier :

- l'émergence d'une nouvelle science, qualifiée de « science des aliments », dont l'objet est de comprendre les fonctionnalités des molécules constitutives des matières premières agricoles, des ingrédients et *in fine* des aliments. Les connaissances accumulées en ce domaine sont aujourd'hui considérables, rendant impératif le recours à une exploitation raisonnée et « intelligente » des bases de données pour en tirer le meilleur parti ;
- l'émergence quasi-simultanée du « génie industriel alimentaire », prolongement du génie chimique, qui consiste à étudier et à associer les opérations unitaires (mécaniques, chimiques, biologiques) mises en œuvre pour fabriquer un aliment (dont les propriétés sont prédéfinies) à partir de matières brutes d'origine agricole ;
- la diversité croissante des caractéristiques des produits agricoles, matières premières de base des industries alimentaires, selon leurs modes de production (par exemple : choix des variétés et pratiques agricole pour les végétaux, conditions d'alimentation pour les animaux) et leurs origines ;
- une meilleure connaissance des interactions entre les conditions de conservation (emballages, chaîne du froid) et les propriétés des aliments (contaminations, stabilité, qualités sensorielles, etc.) ;
- la complexité de la notion de qualité telle qu'analysée précédemment ;
- une réactivité très prégnante des consommateurs et des associations militantes *via* les réseaux sociaux sur toutes les questions liées à l'alimentation ;
- une réglementation de plus en plus complexe.

Ainsi, pour concevoir un nouveau produit ou améliorer ceux existants, les professionnels doivent résoudre une équation multifactorielle dont les variables interagissent souvent entre elles (Figure 9). Le savoir-faire des concepteurs demeure une clé de la solution, mais il est devenu insuffisant. Le grand chef Auguste Escoffier en avait déjà conscience, lui qui écrivait en 1903 : « *La cuisine,*

sans cesser d'être un art, deviendra scientifique et devra soumettre ses formules, empiriques trop souvent encore, à une méthode et à une précision qui ne laisseront rien au hasard »[39].

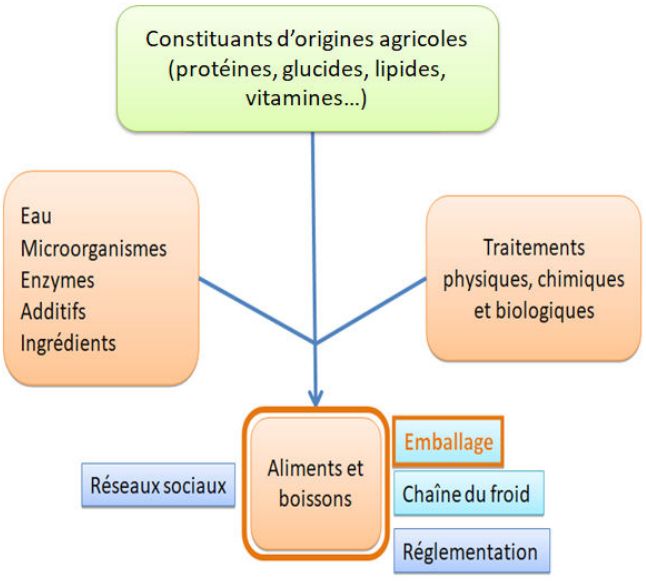


Figure 9 - Créer un nouveau produit revient à résoudre une équation multifactorielle

En 1998, le GIS RIA[40] avait souligné cette complexité et mis en avant un nouveau concept, celui de « conception assistée des aliments par ordinateur ». Les aliments étaient définis comme des systèmes complexes rassemblant de manière optimisée les caractéristiques hygiéniques, nutritionnelles et organoleptiques recherchées[41]. Il était alors proposé de « mettre au point des systèmes experts de conception des aliments » en faisant appel à la notion d'ingénierie de la qualité[42] et « *au sens très opérationnel de la prise en compte raisonnée de l'ensemble des paramètres contribuant à la qualité des aliments et des boissons, tout au long de la chaîne alimentaire* ».

Cet objectif est toujours d'actualité. Alors que son atteinte s'est heurtée à l'époque à des difficultés méthodologiques, il apparaît plus réaliste aujourd'hui en raison de l'évolution spectaculaire des moyens dont disposent les professionnels pour rechercher et exploiter l'ensemble des données accumulées en matière d'alimentation, de la production agricole à la consommation des aliments. Il n'en n'est pas moins très ambitieux dans la mesure où, comme déjà souligné, les variables à prendre en compte sont très nombreuses et souvent interdépendantes.

39 Auguste Escoffier, *Le guide culinaire - Aide-mémoire de cuisine pratique,* Chez L'art culinaire,4 place Saint-Michel Paris, 1903.

40 GIS Recherche industries alimentaires : Aliments et industries alimentaires, les priorités de la recherche publique, *Inra éditions*, 1998 (288 pages).

41 Cette définition apparaît aujourd'hui très restrictive puisqu'elle ne prend pas en compte les multiples composants dont nous avons parlé précédemment (non seulement biologiques, mais également culturels, cultuels, sociales et économiques).

42 Il serait plus pertinent de parler aujourd'hui d'ingénierie de la durabilité, soulignant ainsi la nécessité de prendre simultanément en compte les aspects économiques, sociaux et environnementaux.

Par exemple, au regard de la forte variabilité des compositions en nutriments et ingrédients de produits appartenant à une même famille d'aliments (pizza, lasagne ou desserts lactés), il est possible d'optimiser certaines formulations dans le but d'améliorer les propriétés nutritionnelles tout en conservant de bonnes caractéristiques sensorielles et en maximisant le bilan carbone. Les solutions ne sont pas toujours simples : réduire la teneur en nitrites d'une charcuterie par peur d'éventuels impacts sur les cancers colorectaux accroît les risques sanitaires d'origine microbienne et modifie sensiblement les caractéristiques sensorielles ; réduire celle en sucre et en graisses des pâtisseries pour répondre à la demande des nutritionnistes impacte les propriétés sensorielles (le « fiasco » des pâtisseries allégées lancées dans les années 1980 en est un bon exemple). Pour satisfaire des besoins à première vue contradictoires, il peut être nécessaire de faire appel à de nouveaux ingrédients, des arômes notamment, pour compenser les pertes de certaines caractéristiques sensorielles, ou de modifier les conditions de fabrication pour répartir différemment le sel ou le sucre au sein d'un aliment de manière à compenser les pertes de goûts consécutives à une baisse des teneurs en ces composés.

Si agir sur les propriétés nutritionnelles peut se révéler compliqué, prendre en compte les impacts environnementaux l'est bien davantage. Pour deux raisons : la difficulté de choisir les priorités à accorder à chacun des paramètres environnementaux (climat, énergie, qualité des eaux…) et le manque de méthodes de mesures fiables et validées pour un grand nombre d'entre eux, dont certains ne sont encore que qualitatifs.

Un dernier élément vient compliquer la donne : la réglementation. Celle-ci est bien évidemment indispensable pour protéger les consommateurs et éviter les distorsions de concurrence entre les entreprises, mais si sa prise en compte peut être facteur de progrès, elle peut également compliquer la mise au point de nouveaux produits. D'autant plus qu'elle évolue sous la pression croissante des citoyens au travers des réseaux sociaux.

En résumé, la conception ou l'amélioration d'un aliment doit prendre en compte tous les éléments constitutifs de la qualité (sécurité sanitaire, durée de conservation, coûts de production, sensorialité, nutrition/santé, impacts environnementaux et écoconception, services/praticité, emballages, réglementation) qui répondent au cahier des charges « produit » de l'industriel dans un compromis raisonné entre les différents composantes qui ont des poids différents, certaines non négociables comme la sécurité sanitaire et la réglementation.

Concevoir un nouvel aliment ou améliorer l'existant, c'est gérer la complexité. L'appel à des bases de données pertinentes et complètes d'une part (voir le chapitre précédent), le développement de modèles basés sur des études mécanistiques[43] d'autre part, sont nécessaires pour la mise au point d'outils d'aide à la décision.

43 Des études dont l'objet est d'élucider les réactions mises en jeu pour conférer une propriété particulière à un produit.

Exemples d'actions en cours

On trouvera ci-dessous quelques actions en cours, certaines concernant directement la mise au point de nouveaux produits produits aromatisés ou fermentés, la microbiologie prévisionnelle, la formulation nutritionnelle, d'autres limitées à des conditions de fabrication (transfert de matières, simulateur de fabrication de jambon) et une septième et dernière portant sur la création d'une cuisine virtuelle.

De nouveaux arômes et produits alimentaires (McCormick)

Dans un partenariat de recherche avec IBM, McCormick[44] — l'un des leaders mondiaux dans le domaine des arômes — annonce utiliser l'intelligence artificielle pour développer des produits « originaux et savoureux » en s'appuyant sur des centaines de millions de données disponibles. Leur exploitation permet de mieux comprendre les bases sensorielles des aliments et d'inventer de nouvelles saveurs, répondant ainsi de plus près aux préférences des consommateurs.

L'une des raisons de la réussite de ce projet invoquée par McCormick est que l'entreprise avait eu la prévoyance de stocker plus de quarante ans de données portant sur le développement de nouveaux produits. Il a fallu ensuite numériser toutes ces données dont certaines n'étaient disponibles que sur des cahiers de laboratoire et sous des formats différents.

Les premiers développements portent sur la conception d'un plat cuisiné à base de poulet, de porc et de saucisses, ainsi que des mélanges d'isolats protéiques et de légumes. McCormick prévoit d'utiliser cette technologie à l'échelle mondiale en 2021.

Le projet MetaPath

Ce projet est doté d'un budget total de 9,4 millions d'euros. Il réunit trois partenaires industriels (Abolis Biotechnologies, Groupe Bel, Lesaffre) et la plateforme technologique MetaToul[45] du laboratoire de recherche Toulouse Biotechnology Institute, Bio & Chemical Engineering (INSA, CNRS et INRAE).

Les entreprises partenaires du projet utilisent des microorganismes pour fabriquer leurs produits, par exemple du pain, des yaourts ou du fromage. Mais choisir les microorganismes les plus intéressants et optimiser leur culture dans les procédés fermentaires rend indispensable la compréhension fine des mécanismes biologiques et des réactions biochimiques qui interviennent au cours de la fermentation. Face à cet enjeu, le projet MetaPath est de développer des approches et des outils performants pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes microbiens tout au long des procédés de fabrication. Le projet prévoit le développement d'un ensemble d'outils

44 https://www.cerealsgrains.org/publications/cfw/2019/November-December/Pages/CFW-64-6-0065.aspx

45 Metatoul plateforme labellisée nationalement regroupe équipements et compétences pour l'analyse globale du métabolisme en termes d'identification des métabolites (métabolomique)ou de fonctionnement des voies métaboliques (fluxomique).

dont des méthodes analytiques de haute résolution et un logiciel de modélisation *in silico* des réactions biochimiques simulant les comportements des consortia microbiens dans les conditions considérées. Une première version de l'algorithme central du logiciel a été développée par Abolis.

Sécurité sanitaire et microbiologie prévisionnelle (Sym'Previus)

Reconnu internationalement, cet outil de microbiologie prévisionnelle, créé en 1999, a été mis au point en France dans le cadre d'une collaboration entre la recherche publique (Inrae, Enva), des instituts techniques de l'Actia et des industriels. Il permet de simuler la croissance, la décroissance et la latence des flores pathogènes dans les aliments et les équipements. Cet outil s'enrichit régulièrement pour suivre l'évolution des flores d'altération, en prenant en compte le microbiome local et les procédés de fabrication. Ce système expert est à la fois une aide à la validation des durées de vie des aliments et à la formulation de nouveaux produits.

Formulation nutritionnelle (Nutriprevius)

Un outil de formulation nutritionnelle est développé depuis 2014, sous la coordination du CRITT agroalimentaire et biotechnologies La Rochelle, en utilisant la programmation linéaire[46]. Il doit servir à maîtriser et à améliorer la qualité nutritionnelle des aliments pour améliorer l'offre alimentaire en soutien aux politiques de santé publique. Il intègre des contraintes sur les quantités des ingrédients et les teneurs en nutriments, ainsi que celles sur le prix des ingrédients afin de pouvoir contrôler le prix de la recette finale (Figure 10).

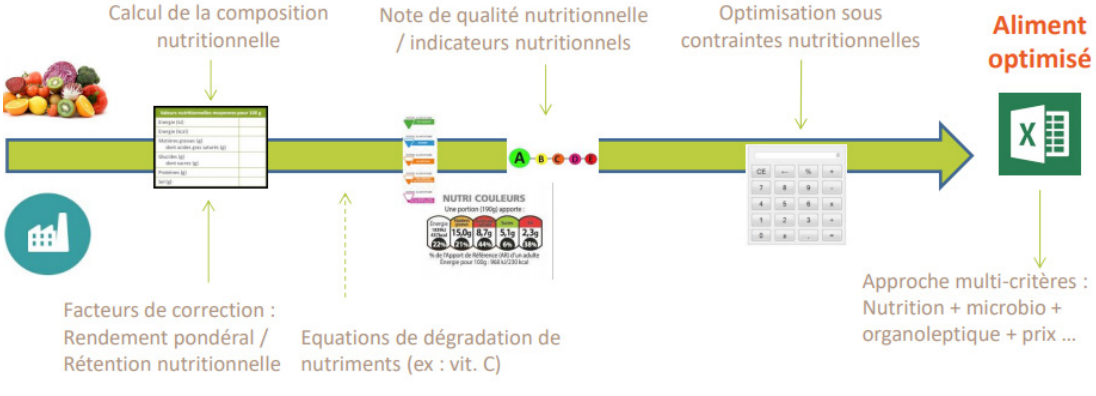


Figure 10 – Nutriprevius : une démarche intégrée d'amélioration nutritionnelle[47]

Une version de cet outil permet d'optimiser indépendamment la teneur en chacun des nutri-

46 Optimisation d'un système dont les contraintes sont décrites par des fonctions linéaires.

47 On trouvera une démonstration d'optimisation de la valeur Nutriscore d'un biscuit aux amandes à l'adresse : https://www.youtube.com/watch?v=AzQPaUg7S8I&t=50s

ments entrant dans le calcul du Nutri-Score[48].

Migration des substances des matériaux vers les aliments (LNE-INRAE/AGROPARISTECH)

L'outil d'aide à la décision développé s'appuie sur la modélisation des transferts de matière des composants des matériaux au contact d'aliments ou d'eau potable. Il simule la migration des substances en s'appuyant sur une base de données de propriétés des dites substances. Ce système expert permet d'évaluer l'impact sanitaire d'un grand nombre d'emballages au contact des aliments.

Un simulateur de procédé pour fabriquer des jambons moins salés (Inrae)

Une diminution trop forte du taux de sel dans les jambons se traduit par des problèmes de texture consécutifs à une protéolyse excessive ainsi que par des risques sanitaires. Elle rend plus difficile l'étape de tranchage industriel et crée des problèmes de stabilité microbiologique.

Un modèle 3D de « jambon numérique » a été développé par l'Inrae pour prédire l'évolution de la protéolyse, des teneurs en eau (et de son activité) et en sel ainsi que la cinétique de perte de poids à l'intérieur d'un jambon. En couplant des modèles physiques de transferts de chaleur et de matière avec des modèles statistiques de quantification de la protéolyse, ce simulateur a été construit à partir d'une série de 181 images obtenues par tomographie[49]. Le modèle a permis d'estimer l'allongement de la phase de maturation pour obtenir des activités de l'eau identiques avec deux lots de jambons dont le salage avait été réduit de 25 % et 33 %.

La première version de ce jambon virtuel doit faire l'objet d'améliorations de façon à prédire avec plus de précision le transport du sel vers l'intérieur du jambon, mais les travaux sont arrêtés, au moins provisoirement, faute de financement.

Une cuisine virtuelle (Dassault Systèmes et SATS)

Dassault Systèmes et SATS (premier fournisseur de solutions de restauration et de services de passerelle en Asie) unissent leurs efforts pour créer la première « cuisine virtuelle » destinée à l'optimisation des services de restauration en vol. Il s'agit ici plus de logistique que de conception d'aliment, mais l'exemple est intéressant. L'objectif est d'améliorer l'efficacité opérationnelle et de minimiser les gaspillages. L'expérience offerte par la plateforme 3DEXPERIENCE de Dassault a permis de mettre en œuvre le premier « jumeau numérique » d'une cuisine centrale. Cette cuisine virtuelle doit permettre de faire le lien entre les mondes virtuels et réels. Elle associe des opérations virtuelles et physiques dans le but de fournir des analyses basées sur les données et d'améliorer

48 Lucile Royer, Stéphane Georgé, Didier Majou, Reformulation nutritionnelle : démarche et outil simple destinés à l'accompagnement des entreprises, Paris, Inra, *Innovations agronomiques*, vol.78, novembre 2019, p.95-105.

49 Analyse d'un objet en 3D, couches par couches.

la planification des ressources. L'utilisation d'un jumeau numérique permet de simuler différents scénarios de production et de processus de préparations culinaires.

Recommandation : lancer un grand programme de recherche européen coopératif

Avoir la possibilité de concevoir de nouveaux aliments, qu'ils résultent de modifications de produits déjà commercialisés ou qu'ils soient de véritables nouveautés, est un enjeu majeur pour les industries alimentaires. Ceci nécessite de s'appuyer sur les informations directement accessibles dans des bases de données bien répertoriées ou sur les données « grises », bien plus nombreuses, mais plus difficilement accessibles, car dispersées sur les réseaux internet, voire, pour certaines, confidentielles au sein des entreprises. Les entreprises maîtrisant cette technique de conception accéderaient à un avantage compétitif significatif en améliorant les qualités nutritionnelles et l'impact environnemental de leurs produits. La mise en œuvre des possibilités offertes par l'intelligence artificielle devrait y aider.

La route est encore longue avant de concevoir, formuler puis fabriquer des aliments en prenant en compte tout ou partie des paramètres qui contribuent à leur complexité, en fonction d'un cahier des charges industriel, *via* des outils d'aide à la décision. Il sera sans doute raisonnable de procéder par étapes en évitant, dans un premier temps, de vouloir prendre en compte la totalité des paramètres qui interviennent dans l'appréciation globale de la « qualité » d'un aliment. Les moins difficiles à prendre en compte sont ceux pour lesquels une « note objective » indépendante des facteurs humains d'appréciation peut être attribuée, par exemple l'état sanitaire d'un aliment ou son impact sur le réchauffement climatique. Juger des propriétés organoleptiques d'un produit et de son acceptabilité par les consommateurs dont les goûts ne sont pas uniformes sans faire appel à une expertise humaine apparaît beaucoup plus complexe et donc plus problématique.

Les obstacles qui se dressent devant un tel projet ne doivent pas freiner les initiatives. En raison des efforts financiers à consentir et de son état précompétitif, il semble raisonnable d'en faire un grand programme européen dont le contour détaillé reste à préciser par un groupe d'experts appartenant à plusieurs disciplines : science des aliments, génie des procédés, exploration des données, intelligence artificielle. Ces experts devraient être issus de l'industrie et du monde académique.

La liste qui suit pourrait servir à esquisser les grandes lignes de ce programme :

- **accroître les connaissances fondamentales sur les propriétés des matrices alimentaires (biochimiques, nutritionnelles et sensorielles) en relation avec les ingrédients entrant dans leur composition, leurs écosystèmes chimiques et biologiques, et les différentes étapes de leur fabrication ;**
- **établir des bases de données robustes avec des données fiables et tracées, tout en prenant en compte leur hétérogénéité et leur interopérabilité entre elles et avec des données *ex situ* (résultats d'autocontrôles microbiologiques ou d'évaluation sensorielle par exemple) (voir chapitre V) ;**
- **développer des modèles pour simuler et gérer les connaissances basées sur les mécanismes biochimiques ;**
- **construire des outils d'aide à la décision en s'appuyant sur les bases de données et les modèles de simulation ;**
- **rendre possible pour chaque entreprise d'intégrer de manière protégée l'intuition et les compétences de leurs collaborateurs pour concevoir des produits originaux qui démarquent une entreprise de ses concurrents (en absence de cette intégration, les entreprises finiraient par proposer les mêmes produits) ;**
- **faire appel à la robotique pour valider les modèles en fabricant de manière automatique un très grand nombre de prototypes de nouveaux aliments ;**
- **donner la priorité à des actions visant à concevoir des aliments associant « valeur santé » et « faible impact climatique ».**

Les trois concepts-clés, fil rouge de ce programme, sont « fiabilité et exploitation des données », « intelligence artificielle » et « robotique ».

Chapitre V

Vers la numérisation des usines

Durant plus de deux siècles, l'évolution des sciences et des techniques a transformé les pratiques de l'ingénierie industrielle. Elle s'est progressivement écartée d'une démarche simple de réflexion suivie d'une réalisation, puis d'un retour d'expérience des réussites et des échecs, pour développer des démarches prédictives. Dans un récent rapport (octobre 2019)[50], la fondation de l'Académie des technologies soulignait que la multiplicité croissante des fonctions et des constituants des systèmes industriels, et donc de leurs interactions, allait dans le sens d'une complexité de plus en plus difficilement appréhendable par l'esprit humain. Une nouvelle approche s'impose progressivement. Elle concerne toutes les phases du « processus produit » (conception, vérification-validation, exploitation et maintenance des « objets » ou des « systèmes » dans lesquels ils sont intégrés) et repose sur des bases de données massives à explorer, gérer et exploiter. Peu à peu, elle s'étend à l'ensemble de la chaîne de valeur.

Ces défis de performance et de flexibilité productive requièrent l'apport de la transition numérique et de ses outils. Depuis quelques années, les ingénieurs commencent à faire partiellement appel à l'intelligence artificielle tout en continuant à s'inspirer de leur propre inventivité et de leurs intuitions. Cette industrie 4.0, ou industrie du futur, ou usine intelligente, correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production. C'est la numérisation de l'usine qui permet une communication continue et instantanée entre les différents outils et postes de travail intégrés dans les chaînes de production et d'approvisionnement. La conception ou la réingénierie des procédés sont alors au service de la performance, de la productivité et donc de la compétitivité.

Les industries alimentaires n'échappent pas à cette « révolution ». Cependant, la transposition de ce qui se met progressivement en place dans d'autres domaines (industries automobiles, aéronautiques, informatiques, chimiques) ne sera pas simple en raison de nombreuses spécificités de cette branche industrielle. Certes, dans les industries agroalimentaires, l'automatisation

50 Fondation de l'Académie des technologies, 2019. *Tirer des leçons de l'évolution de l'ingénierie industrielle. Nouveaux processus de développement. Les promesses de l'intelligence artificielle basée sur la donnée vont-elles supplanter la culture du modèle ?*

des procédés est bien implantée depuis plus de cinquante ans avec des disparités selon les filières, les technologies, les matières premières, les produits finis, les tailles d'entreprises et leur implantation. Les étapes de traitement des liquides ou des grains, ainsi que celles de dosage et conditionnement, sont celles qui bénéficient le plus de l'intégration d'automates programmables industriels[51]. Le traitement des pièces isolées (viandes ou poissons découpés) est plus complexe. Cependant, dans un contexte de transition numérique pour accroître la performance, l'efficience et la flexibilité, les entreprises devront développer et mettre en place, en ligne ou hors ligne, ou en combinaison :

- des équipements « intelligents » et des technologies internet des objets tout au long de la chaîne de production, aptes à recueillir de multiples informations afin d'optimiser la flexibilité des chaînes de production et de tracer les processus dans un souci de transparence (fonctionnement d'opérations unitaires, équipements, produits en cours de fabrication ou finis, flux des matières premières, d'eau et d'énergie) ;
- le stockage, la structuration et le traitement mathématique des données appropriées en prenant en compte leur hétérogénéité et la contrainte de leur interopérabilité entre elles, mais aussi avec des données *ex situ* (résultats d'autocontrôles microbiologiques par exemple) ;
- des outils de simulation et de visualisation permettant de produire une réplique virtuelle de tout ou partie du procédé afin de générer des simulations qui alimentent des outils d'aide à la décision et de gestion des connaissances pour une maîtrise des procédés (choix, conduite, commande, contrôle) ou de maintenance préventive et de nettoyage-désinfection.

LES PARTICULARITÉS DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

Les industries agroalimentaires, constituées d'une grande diversité de secteurs, doivent faire face à des problèmes qui leur sont spécifiques, du fait que les matières premières qu'elles utilisent et les produits qu'elles fabriquent sont de nature biologique et souvent de composition variable et instable. En particulier, la robotisation des usines doit faire face à des contraintes techniques spécifiques :

- les unes liées à la nature des produits et au maintien impérieux de leur qualité sanitaire, avec dans certains cas des produits fragiles, non calibrés, hétérogènes, de dimensions variables, multimatières (muscle, os, arête, cartilage, noyau…), mous, déformables, compliqués à attraper ou à travailler, qui nécessitent des tâches complexes en 3D (découpe, filetage…) ;
- d'autres imposées aux robots : hygiène (nettoyage alcalin, normes alimentaires), résistance aux conditions de l'atelier (froid, humidité).

51 Cet équipement électronique commande des équipements et des procédés industriels par un traitement séquentiel. À partir de données d'entrées, obtenues par des capteurs, des valeurs de consignes fixées par la partie commande (microprocesseurs) et de programmes informatiques, l'automate adresse des ordres aux pré-actionneurs qui distribuent l'énergie utile aux actionneurs.

Ces contraintes dépendent des spécificités de chaque branche d'activités (produits laitiers, céréaliers, carnés, etc.). Elles portent sur les qualités sanitaires, sensorielles et nutritionnelles des produits du fait de leur sensibilité à des agents d'altération (bactéries, moisissures, oxydation, température). La levée de ces contraintes ne doit pas s'affranchir de la maîtrise des coûts de production. Les équipements et procédés utilisés doivent résister à des environnements hostiles (fortes températures, pressions, nettoyage, encrassement). Le contrôle de la qualité rend indispensable la traçabilité, sans rupture, de l'obtention des ingrédients aux produits finis, tout au long du processus de la chaîne de valeur, depuis les fermes jusque dans les assiettes, à la fois pour éviter un accident sanitaire, mais aussi pour rendre transparente l'information des consommateurs.

Cette recherche de sécurisation des procédés et de compétitivité se réalise aussi dans un contexte où les consommateurs sont de plus en plus frileux quant à l'« artificialisation » de leur alimentation. Rien n'est meilleur à leurs yeux que ce qui est naturel et traditionnel[52], alors qu'ils sont friands de hautes technologies pour leurs voitures, leurs appareils ménagers, leurs ordinateurs et leurs téléphones portables. Par ailleurs, les dimensions de durabilité imposent aux technologues d'inclure dans leurs cahiers des charges fonctionnels l'écoconception des procédés et des emballages.

L'enjeu des questions sociétales et environnementales, via la responsabilité sociétale des entreprises, est aussi important ; il revêt un intérêt économique : amélioration des conditions de travail (diminution des troubles musculo-squelettiques notamment), conservation des savoir-faire des opérateurs, gestion de la consommation des ressources (matières, eau, énergie, consommables pour le conditionnement), diminution des pertes et recyclage dans l'unité ou à l'extérieur.

L'automatisation des procédés et son évolution, grâce à l'intelligence artificielle d'une part et au déploiement des robots, cobots[53] et exosquelettes[54] d'autre part, est l'une des cartes dont disposent les industries alimentaires pour relever ces enjeux. Malgré le faible nombre de degrés de liberté, l'unité de production doit accroître sa flexibilité, tant en quantité qu'en qualité (format, produit, conditionnement, capacité à fournir des aliments à des populations aux attentes diversifiées) tout en conservant son efficience, ses exigences de qualité et de robustesse[55].

52 Ces positions sont néanmoins en contradiction avec leurs actes d'achats qui sont réalisés à 82 % en grandes surfaces, où prédominent largement les produits « industriels ».

53 Bras robotisé non autonome (robot passif) dont le fonctionnement est basé sur la collaboration homme-machine.

54 Dispositif mécatronique, liant la mécanique et l'électronique, porté par un individu.

55 Cette approche considère une double flexibilité au niveau de l'usine selon un paradigme de « Flex in/Flex out » (ou *FliFlo*) : Flex in, ou flexibilité à l'entrée, pour les approvisionnements des matières premières agricoles aux qualités variables en fonction des variations climatiques et des nouvelles pratiques agro-écologiques; Flex out, ou flexibilité à la sortie, qui permet de fabriquer une gamme plus élargie de produits (taille, grammage, emballage, matière, forme) sur les mêmes équipements en fonction des marchés et des demandes de la distribution.

AUTOMATISATION ET CAPTEURS

Les équipements « intelligents » communicants intègrent des systèmes d'acquisition de données (capteurs[56]). En complément à la mesure de la pression, la température, le débit et le pH, la conception de nouveaux capteurs est nécessaire pour avoir accès à des paramètres tels que le potentiel rédox, l'activité de l'eau, la concentration en diverses molécules. Ces capteurs seront destinés à la réalisation de mesures *in situ* tout au long des procédés de transformation, y compris la qualification des matières premières. Ils apportent à l'atelier de production une capacité d'autodiagnostic et permettent ainsi des contrôles à distance et une meilleure intégration dans le système productif global afin de maîtriser des dérives et des pertes. La connectivité de ces équipements est un des éléments clés pour mieux exploiter et valoriser les données de production, tracer les produits, interconnecter la ressource homme-machine. C'est notamment vrai pour des finalités spécifiques aux industries alimentaires, telles que la sécurité sanitaire, les propriétés organoleptiques et nutritionnelles, l'aptitude à la transformation des matières premières. À ces besoins spécifiques s'ajoute la mesure des paramètres d'état qui permet le contrôle du procédé ou des moyens de transformations.

Ces capteurs doivent être conçus pour répondre aux nombreuses contraintes, certaines spécifiques, des industries alimentaires (Tableau 6).

Nature appropriée des matériaux du capteur	Pas de contamination chimique par le matériau Pas d'érosion du matériau
Robustesse de la conception pour des conditions difficiles	Chaleur, humidité, pression, poussières, etc. Résistance mécanique
Géométrie de conception appropriée : hygiène	Pas de volume mort Nettoyabilité garantie Absence de zone «encrassable» (trous, coins, etc.)
Nettoyage en place	Installé en ligne sans by-pass Tenue en température, pression, concentration et débit des produits de nettoyage
Stérilisable en ligne	Tenue thermique Tenue chimique
Applicabilité à de nombreux produits	Cas des lignes Multiproduits

Tableau 6 - Qualités requises d'un capteur pour les industries alimentaires.

Il convient, enfin, de prendre en compte la grande variabilité des dynamiques des besoins de mesure selon les procédés ou les produits, y compris dans les chaînes d'emballage. La notion de

56 Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de contrôle des données. Ils permettent de transformer des grandeurs physiques en signaux qui renseignent sur ces grandeurs.

temps réel ne se décline pas de la même manière dans un procédé continu ou discontinu, si les produits sont ou non en flux individualisé (par exemple le tri des corps étrangers dans des flux de grains demande plusieurs dizaines de détection/prise de décision par seconde, à l'inverse du suivi d'un flux continu de liquide ou de poudre).

La disponibilité de capteurs pertinents reste un verrou, mais le tableau présenté en annexe V montre qu'il existe de nombreuses solutions potentielles passant toutes par le couplage entre des méthodes de mesure robustes, efficientes et un traitement des signaux et des données captés. Tout ou partie de ces verrous levés, le développement du numérique va progressivement se révéler comme un cadre essentiel aux capacités accrues de maîtrise des procédés.

Face à une grande diversité de situations, de filières, de grandeurs à mesurer et de conditions d'implantations parfois difficiles, le domaine de la mesure industrielle dans les industries alimentaires est à la fois un défi technologique et un défi d'ingénierie de mise en œuvre.

Robots, cobots et exosquelettes

A - Les robots

Un robot[57] est classiquement un dispositif commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils. Il possède un ou plusieurs « bras » d'architectures diverses, se terminant par un dispositif de fixation complété par tous les équipements externes (outils, préhenseurs, capteurs, axes externes) qui lui permettent d'accomplir sa tâche. Il est alors intégré dans un poste de travail. Mais il peut aussi être mis en œuvre pour ses capacités de mobilité, par exemple pour le transport intralogistique. Par ailleurs, il permet de réduire la charge de portage et donc la pénibilité pour les opérateurs. De plus en plus d'entreprises agroalimentaires adoptent des robots dans leur chaîne de production grâce aux efforts réalisés par les équipementiers.

Les principales applications concernent des tâches répétitives, de faible valeur ajoutée, comme les manipulations des produits. Cependant, les robots remontent peu à peu la chaîne de production vers l'emballage primaire, le prélèvement pour la calibration, le triage et le pesage avant conditionnement et la fabrication des produits, en particulier dans le secteur de la pâtisserie.

Les pistes suivies pour optimiser les performances de ces robots sont les suivantes (elles résultent d'étroites collaborations entre les sites de production et les équipementiers) :

- améliorer les préhenseurs pour les adapter aux produits mous (au stade actuel de développement, une main robotique avec doigts et capteurs tactiles revient à 120 000 euros) ;

57 Cf. *Les robots dans l'industrie : saisir l'opportunité*. Fondation de l'Académie des technologies. décembre 2020. 32p http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2020/12/11/13/23/35/4bd3dc57-2908-4a43-a7a1-547da91df18f/RobotiqueIndustrie%20V6_091220.pdf

- augmenter les performances de la vision 2D (couplage infrarouge ou balayage laser par exemple) ;
- développer la vision 3D pour s'approcher de la performance de reconnaissance d'objets ;
- améliorer les outils servant à évaluer le poids ou le volume des produits à soulever ;
- introduire des outils de découpe (ultrasons, jet d'eau) et de marquage (laser).

D'autres applications sont à l'étude, comme le nettoyage robotisé de contenants et de surfaces ou la fabrication de produits (pâtisserie, pizza).

Le secteur de la viande est particulier. Il est approprié à la robotisation car les conditions de travail sont difficiles, mais la perception et les gestes techniques y sont particulièrement complexes. Beaucoup de recherches sont en cours. À l'étranger (Allemagne et Nouvelle Zélande notamment), des prototypes voient le jour pour des tâches complexes comme la découpe et la séparation de carcasses d'animaux bien calibrés (volailles, ovins, porcs) [58]. Les abattoirs français n'ont pas encore pris ce virage.

Le contexte économique est peu favorable à la robotisation dans les industries alimentaires : la forte proportion de PME et de TPE, les faibles marges, les capacités d'investissement limitées, les petites séries de fabrication rendent le remplacement de la main-d'œuvre par des robots ni compétitif, ni pertinent. À ce contexte s'ajoute la crainte de pertes d'emplois peu qualifiés. De plus, l'infrastructure d'un robot en industries alimentaires est souvent plus complexe, et donc plus coûteuse, que dans d'autres secteurs car la robotisation est souvent « sur-mesure » et passe par la conception de prototypes. Cette situation explique pourquoi la robotique est peu présente dans les usines des industries alimentaires[59].

Cependant, le contexte de travail devrait pousser à la robotisation : cadences élevées, travail répétitif, conditions de travail difficiles (chaud, froid, humidité, horaires décalés) accompagnées de beaucoup d'accidents, dont en particulier des troubles musculo-squelettiques, et manque d'attractivité des métiers.

La robotisation des industries alimentaires sera lente car pour davantage pénétrer ce marché il sera nécessaire d'ajouter des fonctionnalités de perception[60] (voir le paragraphe sur les capteurs) alors que les investissements correspondants sont difficilement compatibles avec les retours sur investissements attendus dans ce secteur industriel. La robotisation devrait prendre une autre trajectoire que la robotisation à 100 %, avec plus de simplicité et de souplesse.

58 Dans le cas des bovins, la forte variabilité de taille et de conformation complexifie la mise en quartier et la découpe.

59 Mais pas seulement dans ce secteur, puisque la France, d'une manière générale, est en retard par rapport à l'Allemagne et l'Italie.

60 La « perception » reste le point faible des robots (un opérateur humain dispose de cinq sens) bien que ceux-ci disposent dorénavant de systèmes de vision 2D et de contrôle de l'effort.

B - Les robots collaboratifs : cobots et exosquelettes

Les robots collaboratifs, avec les cobots et exosquelettes, sont en train de révolutionner le secteur de la robotique. Ils sont pensés pour interagir et *coexister « main dans la main »* avec l'opérateur et l'assister par amplification contrôlée d'effort. Ils permettent de réduire la pénibilité du travail, en assistant l'opérateur dans la manipulation des charges trop lourdes (apport d'une force supplémentaire, report de charge vers d'autres parties du corps) et d'améliorer la productivité. À la différence des robots, ils n'ont pas de fonction de perception, celle-ci étant assurée par l'homme, mais sont plus faciles à programmer (moins de degrés de liberté), multitâches, plus rapides à intégrer dans la chaîne de fabrication avec une faible empreinte au sol, moins onéreux[61] et plus faciles à entretenir. Avec l'intégration de l'intelligence artificielle pour améliorer la commande (vision/force), cette robotique collaborative devrait permettre d'améliorer des opérations non accessibles pour l'instant. Dans le cadre de contraintes spécifiques des ateliers agro-industriels (ambiance froide et humide, nettoyage et désinfection quotidiens, préhension de matières fragiles, molles et déformables, investissements limités), les cobots et les exosquelettes devraient réduire les pathologies musculaires. D'un point de vue social, les robots collaboratifs sont plus facilement acceptés en raison de leur complémentarité avec les opérateurs, lesquels devront bien maîtriser leur fonctionnement.

Dans le cas des exosquelettes, en raison de leur relation intime avec l'opérateur, puisqu'ils épousent une partie du corps, leur développement nécessite une analyse spécifique des tâches et des positions de travail. Il faut impliquer l'opérateur dans le développement, dès le début, pour en faire accepter l'usage. L'exosquelette ne doit apporter ni gêne, ni contrainte dans l'ensemble des mouvements et des opérations.

Il y a peu d'exosquelettes spécifiques à l'agroalimentaire. Les plus utilisés sont principalement des dispositifs d'assistance physique pour le haut du corps et le dos (posture ou ports de charges). Mais les solutions proposées sont limitées car elles ne permettent pas l'adaptation à la variabilité des efforts. En France, l'industrie de la viande est la première intéressée par ces développements. Les recherches, notamment celles de l'Adiv (Institut technique sur la viande), portent sur la découpe (exosquelette) et le désossage (cobot) de viandes dans les abattoirs. Celles de l'Unité mixte technologique Agrobergo ont pour objet de concevoir un exosquelette pour la compensation des efforts du poignet porteur du couteau, lors des tâches de découpe et de désossage de la viande. Un prototype devrait être en essai industriel en 2021 en abattoir (projet Exoscarne - Investissements d'avenir). Pour ces opérations complexes, le savoir-faire et la précision de l'opérateur sont conservés et permettent de limiter les pertes de matières carnées à forte valeur. Dans d'autres secteurs, on peut citer le filetage des poissons et le portage de charges lourdes comme des meules de fromages ou des plateaux de pâtisserie (entreprise Bridor).

61 Le coût des exosquelettes est bien moins élevé que celui des robots. Pour les dispositifs d'assistance physique (sans apport d'énergie), il faut compter de 5 000 à 20 000 €. Le prix des cobots est beaucoup plus élevé (100 000 €).

Les exosquelettes et les cobots sont au stade émergent en agroalimentaire. L'industrie alimentaire devrait bénéficier de la position de leader de la France (avec les États-Unis) en termes de développement d'exosquelettes tous secteurs confondus, y compris militaires.

La fabrication additive (imprimante 3D)

La fabrication additive désigne les procédés de fabrication de pièces en volume par ajout ou agglomération de matière, par empilement de couches successives. Tous les processus d'impression 3D requièrent des outils logiciels, du matériel et de la matière, appelée « agent ». Grâce à la conception assistée par ordinateur (CAO), la pièce imaginée est modélisée, puis imprimée en suivant le modèle contenu dans un fichier numérique. D'abord cantonnée au prototypage, la fabrication additive a peu à peu pénétré de nombreux secteurs industriels[62].

Les procédés, nombreux, se différencient par la manière de déposer les couches de matériaux et la nature de ces derniers (liquides, poudres, semi-finis…). Les principaux secteurs concernés sont l'aéronautique, le spatial, la défense (Thales, Airbus, Safran), mais aussi le médical (prothèses et implants), l'automobile, la fonderie.

La mise en œuvre de la fabrication additive pourrait permettre à l'industrie alimentaire de répondre très précisément à des demandes de consommateurs pour une alimentation personnalisée destinée à satisfaire des besoins spécifiques en termes de santé (alimentation de personnes âgées) ou de propriétés sensorielles (texture, goût, arôme, aspect). Il reste difficile d'envisager son utilisation pour fabriquer le même aliment en continu et en très grande quantité tels que des biscuits.

Les technologies additives peuvent également s'appliquer à la personnalisation de la forme donnée à des aliments tels que des chocolats, des morceaux de sucres ou des desserts. Par exemple, fabriquer à partir de la photo d'un enfant un biscuit lui ressemblant pour fêter son anniversaire. Dans ce champ d'applications, de petites entreprises sont de plus en plus nombreuses à proposer de fabriquer ces produits de fêtes ou à vendre des imprimantes familiales remplissant le même service à la maison. Un tel usage des technologies additives pourrait donc trouver un marché, certes limité, mais à grande valeur ajoutée.

62 Alice Vitard dans ,*L'usine digitale*, 25 mai 2020.

Deux exemples

Barilla a développé une imprimante 3D capable de fabriquer des pâtes fraîches en partenariat avec l'institut hollandais TNO. L'objectif est de créer de nouvelles formes impossibles à obtenir avec les procédés traditionnels.

Le chocolatier suisse Barry Callebaut a annoncé qu'il allait commencer à produire des chocolats individuels en 3D pour des clients comme des hôtels, des chaînes de café et des restaurants (février 2020). L'entreprise devrait utiliser un studio d'impression 3D innovant et unique au monde, puisqu'il pourrait imprimer des milliers d'unités, tout en conservant son apparence « sur mesure, faite à la main ».

La Commission européenne a pris conscience de ces possibilités. De 2012 à 2015, elle a financé, à hauteur de 3 millions d'euros, un projet dont l'objectif était de développer un procédé de fabrication d'aliments destinés aux personnes âgées dépendantes, ayant des difficultés à mastiquer et à avaler, en faisant appel aux technologies additives (projet Performance[63]). L'idée était de remplacer des « purées » par des aliments aux aspects et goûts variés préparés sur mesure. Le procédé mis au point repose sur le remplissage de cartouches pour imprimante 3D contenant chacune un ingrédient différent sous forme pâteuse (légumes, viande, farine, huiles, agents de texture, substances aromatisantes). Les aliments obtenus, bien équilibrés sur le plan nutritionnel, se présentent sous différentes formes à l'état gélifié ou moussant. Les repas sont adaptés aux besoins individuels en termes de taille des portions, de valeurs caloriques et nutritionnelles spécifiques et de préférences en matière de texture.

Il reste une autre application. Dans les laboratoires des entreprises, les technologies additives doivent pouvoir faciliter la mise au point de nouveaux produits et de nouvelles formulations (chercher par exemple à diminuer le nombre et la quantité d'additifs). Les chercheurs en science des aliments et en nutrition pourraient également les utiliser pour concevoir des modèles leur permettant d'explorer de manière originale les relations entre « nature des matrices alimentaires » et « fonctionnalité des aliments ». Les développements à venir devront s'appuyer sur une meilleure connaissance de l'impact de l'état physique des « matrices alimentaires » sur les propriétés nutritionnelles et sensorielles des aliments.

Quels que soient les usages, la généralisation d'imprimantes 3D pour préparer des produits alimentaires se heurte à plusieurs obstacles :

- risques sanitaires microbiologiques en raison de la difficulté à bien nettoyer les équipements ;
- risques chimiques pour les équipements d'entrée de gamme dus à la migration de plastiques et de particules toxiques (les garanties nécessaires ne peuvent être obtenues qu'en contrepartie d'un prix élevé pour l'acquisition d'un équipement[64]) ;

63 *Personalized food using rapid manufacturing for the nutrition of elderly consumers.*

64 Antonietta Baiano (2020) 3D Printed Foods: A Comprehensive Review on Technologies, Nutritional Value, Safety, Consumer Attitude, Regulatory Framework, and Economic and Sustainability Issues, *Food Reviews International.*

- risques de délitement des couches successives (manque d'adhésion, effritement) et de mélange des couches d'ingrédients superposés en cours d'impression ;
- difficultés à utiliser des matériaux riches en fibres — intéressants d'un point de vue nutritionnel — qui sont de nature à obstruer les buses ou à produire des bulles à l'intérieur de l'aliment et des craquelures, compromettant sa texture et sa stabilité.

RECOMMANDATIONS

En 2018, le Gouvernement a lancé un plan d'action pour accélérer l'adoption des nouvelles technologies (robotique, réalité virtuelle ou augmentée, réseaux de capteurs et logiciels, traitement des données, contrôle non destructif…) dans les PME et ETI industrielles. À partir d'août 2020, une mesure de soutien direct sous forme de subvention a été mise en place. Ces dispositions d'appuis seront appliquées jusqu'en 2022. Au-delà, il est essentiel de poursuivre l'effort d'aides publiques pour le secteur agroalimentaire.

Ce soutien devrait porter plus spécifiquement sur les domaines suivants :

- **favoriser des partenariats entre la recherche en robotique-cobotique, la recherche sur les capteurs, la recherche technologique agroalimentaire, les équipementiers et les entreprises utilisatrices (la particularité des problèmes rencontrés par les industries alimentaires méritent des soutiens ciblés et spécifiques) ;**
- **proposer des diagnostics gratuits aux ETI/PME/TPE ;**
- **mettre en place des enseignements sur la digitalisation des outils de production (formation de techniciens et d'ingénieurs) ;**
- **mettre en place des formations professionnelles afin de sensibiliser ou faire évoluer les opérateurs vers de nouvelles compétences et de nouveaux métiers ;**
- **travailler sur l'acceptabilité sociale de moyens de production toujours plus digitalisés et automatisés.**

Chapitre VI

Avec la technologie blockchain, une traçabilité renforcée jusqu'aux consommateurs

Remarques préliminaires

Au sein de la filière agroalimentaire, l'unité de traçabilité d'un produit est un « lot » défini par la directive européenne 2011/91/UE comme « Un ensemble d'unités de vente consommateur (UVC) d'une denrée alimentaire produite, fabriquée ou conditionnée dans des circonstances pratiquement identiques ». Le nombre d'UVC constituant un lot est le plus souvent compris entre quelques centaines (TPE) et quelques dizaines de milliers (grands groupes). Les professionnels du secteur peuvent créer, pour chaque lot, une blockchain pour suivre l'histoire et les propriétés de chaque lot produit, celles-ci pouvant différer d'un lot à l'autre. Ils disposent ainsi d'une plateforme digitale capable de tracer les produits lot par lot, au fil de leur passage sur les chaînes de production, et de les auditer en temps réel.

La blockchain ainsi mise en place est sensiblement différente de la notion de référence, utilisée par le secteur financier pour la cryptomonnaie, en particulier parce que cette blockchain est amenée à se stabiliser lorsque le lot est clos (pas de nouvelles données à entrer), puis à disparaître au bout d'un certain temps. Une autre différence est que les opérateurs sont identifiés et en nombre réduit. De ce fait, le risque de perte d'intégrité pendant la durée de vie de la blockchain devient très faible65.

En fait, les critères essentiels requis sont les suivants pour ce système de traçage : confiance dans les données écrites et maintien de leur intégrité durant l'existence du lot dans la blockchain, accès aisé et garanti, contrôle des droits pour l'écriture des données et la destruction du lot dans la blockchain. Le consensus, la pérennité et la non-réversibilité qui sont au cœur de la technologie

65 Michel Raynal et Gérard Roucairol, 07 juillet 2019, *Le Monde,* Les techniques numériques sont porteuses d'erreurs funestes si elles ne s'appuient pas sur des résultats scientifiques.

blockchain telle qu'utilisée en cryptomonnaies ne sont pas requis. Les difficultés en termes de consommation énergétique en sont réduites d'autant. Malgré ces divergences d'avec la notion de référence, nous maintenons le vocable de « blockchain » dans ce rapport, dans la mesure où le terme est régulièrement utilisé dans le secteur alimentaire.

Par ailleurs, l'utilisation de la technique RFID pour identifier les UVC augmenterait de manière excessive leur prix. Cela explique l'absence de marquage RFID de celles-ci sur les linéaires des distributeurs et la préférence donnée au code-barres et au code QR, lesquels sont suffisants pour permettre à un utilisateur d'accéder au contenu de la blockchain du lot considéré.

Il est beaucoup demandé aux industries alimentaires. Les aliments qui sortent de leurs usines et de leurs ateliers sont non seulement jugés sur leur état sanitaire, leur qualité nutritionnelle, leurs propriétés organoleptiques et leur prix, ce qui n'est pas nouveau, mais également sur de nombreuses composantes environnementales, plus difficiles à bien évaluer et dont les industriels sont souvent les seuls à porter *in fine* tout le poids aux yeux des consommateurs. On pense tout particulièrement aux gaz à effet de serre, aux quantités d'eau et d'énergie utilisées, aux kilomètres parcourus par les ingrédients, à la présence de produits chimiques (résidus phytosanitaires, additifs) et aux pertes de produits comestibles. De plus, les aliments commercialisés doivent impérativement satisfaire la réglementation, notamment en matière d'apport en additifs et de fixation des dates limites de consommation et des dates de durabilité minimale.

Pourtant, ce « poids » résulte en partie des effets cumulés des segments amont de la chaîne alimentaire, alors que les industriels sont loin de pouvoir en contrôler toutes les étapes : fabrication d'intrants pour l'agriculture (semences, engrais, produits phytosanitaires), fourniture de matériels agricoles, pratiques culturales et d'élevage, usage des terres, transport des produits agricoles vers les usines, fabrication et nature des emballages. C'est en effet au moment des achats que les consommateurs ont accès à certaines de ces informations *via* l'étiquetage ou, plus récemment, plus rapidement et plus complètement, *via* les codes-barres et les QR codes à l'aide d'applications dédiées sur smartphone. Malheureusement, ces données peuvent être accompagnées d'interprétations pas toujours étayées (voir chapitre IX).

Pour ces raisons, une connaissance fine des flux de matière et leur optimisation représentent un enjeu économique, sanitaire et environnemental particulièrement important pour les industries alimentaires. La technologie blockchain peut y apporter sa contribution.

Il faut remarquer que dans beaucoup de secteurs, notamment ceux des technologies numériques, les normes qui s'imposent sont des normes de fait, en ce sens que certains outils développés par de grandes sociétés comme les GAFA sont utilisés par la quasi-totalité des internautes et s'imposent comme de véritables standards sans qu'interviennent les organismes de normalisations dont les temps de réponse sont inadaptés. Une attention toute particulière doit donc être portée sur ces normes de fait qui peuvent induire des positions de quasi-monopole de certains acteurs.

La blockchain, un nouvel outil au service de la traçabilité des aliments

Pour le comité *ad hoc* du Codex Alimentarius, *« La traçabilité correspond à la capacité de suivre les déplacements d'un aliment parmi des stades précis de la production, de la transformation et de la distribution »*. Elle est réglementée dans les industries alimentaires (règlement CEE traçabilité 178/2002, article 18 de la General Food Law).

La blockchain s'est développée il y a une douzaine d'années dans le secteur financier avec comme application la plus célèbre le bitcoin. Elle peut être assimilée à un grand livre[66] « distribué » (c'est-à-dire accessible à toutes les parties prenantes) dont aucun passage — une fois rédigé — ne peut être modifié, mais auquel de nouveaux paragraphes peuvent être ajoutés. Ces mises à jour sont instantanément disponibles de sorte que chaque partie peut lire en temps réel l'histoire d'un produit tout au long de la chaîne de fabrication et de commercialisation. Elle peut être considérée comme un outil d'enregistrement et d'échange d'informations entre les membres du « consortium » (Figure 11).

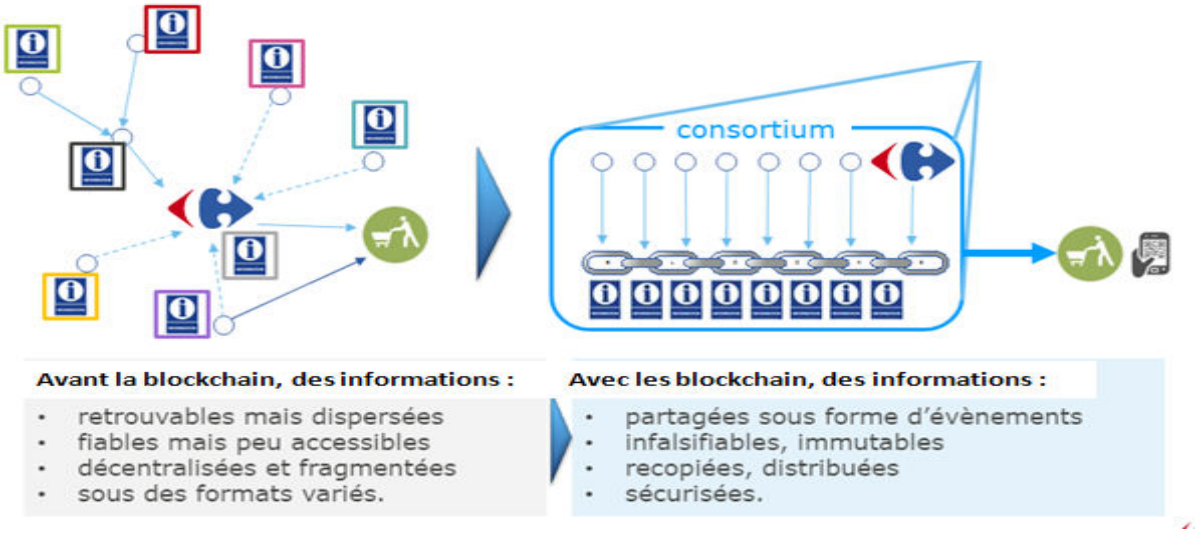


Figure 11 – Les apports de la blockchain (source : Carrefour, audition du 12 mai 2020 par l'Académie des technologies)

La blockchain se base sur cinq caractéristiques : décentralisation, traçabilité, inviolabilité (sauf si faille), irréversibilité et horodatage. Ainsi que le rappelle le Centre d'étude et de prospective du ministère de l'agriculture[67], la blockchain permet de garantir l'intégrité et la cohérence de bases de données de toutes natures, de façon décentralisée, rendant superflu l'appel à des tiers de confiance tels que des organismes de certification. Elle permet de constituer des registres transparents et distribués dans lesquels sont enregistrées les informations utiles à leurs

66 Appelé « registre ».

67 Centre d'étude et de prospectives du ministère de l'agriculture, 2019. *Les perspectives offertes par la blockchain en agriculture et agro-alimentaire.*

utilisateurs de manière vérifiable et inaltérable. De ce fait, elle trouve une application naturelle dans les chaînes d'approvisionnement agroalimentaires, confrontées à des défis de traçabilité, de sécurité sanitaire, de transparence des procédés de production et de transformation et de confiance des consommateurs.

Du fait de ce caractère d'immuabilité de la chose écrite, d'interrelations des informations et de transparence, elle est en train de s'imposer dans des systèmes alimentaires de plus en plus complexes comme une technologie qui pourrait devenir essentielle pour assurer une bonne traçabilité des chaînes d'approvisionnement. Elle doit permettre non seulement d'avoir accès à l'historique d'un produit, mais également de générer rapidement des alertes en cas de non-conformité pour les données réglementées en sécurité sanitaire, ou encore de faciliter l'inventaire des produits en temps réel. Les industriels voient également dans cet outil un instrument pour restaurer la confiance des consommateurs.

Par exemple, en cas d'intoxications alimentaires, les membres d'un consortium « blockchain » peuvent détecter très rapidement où et quand une contamination a pu se produire, là où aujourd'hui quelques jours sont nécessaires pour repérer la rupture de la chaîne de qualité (sauf, bien sûr, dans le cas de pratiques frauduleuses si les données sont déclaratives). De plus, en accumulant des données tout au long de la phase de production du produit alimentaire, la blockchain pourra contribuer à construire des informations beaucoup plus riches, comme son empreinte environnementale[68]. Elle devient alors une composante essentielle de la « gestion du cycle de vie des produits » connue également sous le nom de l'acronyme PLM pour « *product life cycle management* ». La technologie blockchain devrait donc trouver sa place pour assurer une analyse globale du cycle de vie[69] à l'aide d'indicateurs intégrant toutes les étapes « de la fourche à la fourchette ». Ceci permettra d'optimiser globalement la production et les usages (en évitant de se focaliser sur un point particulier) et d'avoir une approche multifactorielle réaliste.

Un deuxième point est que grâce aux outils d'apprentissage par les données on pourra disposer de modèles prédictifs et actualisables en temps réel permettant d'optimiser ou d'adapter les différents procédés au long de la chaîne de production et de transformation en prenant en compte les aléas propres à ce type de produits et en intégrant la chaîne de production dans sa globalité.

La technologie blockchain ouvre donc le champ à un suivi particulièrement fiable des aliments, sans qu'un individu ou une entité ne puisse unilatéralement modifier ou supprimer d'informations. Cependant, une limite importante à son bon fonctionnement est la qualité des données qui y sont introduites : sa mise en œuvre n'est évidemment pas une garantie contre des erreurs ou

68 Mais les outils d'évaluation ne sont pas encore finalisés et la démarche est aujourd'hui coûteuse ce qui la rend peu abordable pour les PME.

69 Ainsi que le rappelle l'Ademe, l'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil d'aide à la décision. Ses résultats peuvent être utilisés pour des besoins d'écoconception, d'affichage environnemental ou encore d'orientation des politiques publiques. Son objectif est de présenter une vision globale des impacts générés par des produits (biens, services ou procédés), déclinée selon différentes simulations. Les résultats d'ACV reflètent la complexité des systèmes étudiés : ils permettent d'en identifier les points forts et les points faibles, mais difficilement d'en proposer une hiérarchisation absolue en termes de qualité écologique.

des fraudes de la part de l'un ou l'autre des opérateurs. Dans ce cadre, la garantie en termes d'intégrité et de sécurité des données apportées par la blockchain est essentielle. Comme nous le verrons plus loin, des solutions sont proposées par quelques opérateurs pour repérer ces manquements à la loyauté des échanges.

LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES SONT NOMBREUSES À ADOPTER LA BLOCKCHAIN

Depuis à peine deux ans, en France et dans le monde[70], de plus en plus nombreuses sont les entreprises qui utilisent la technologie blockchain pour tracer leurs produits. Elles s'appuient notamment sur les solutions proposées par différentes sociétés (IBM Food Trust, Crystalchain/Biomérieux et start-up Connecting Food ou Tilkal) :

- **IBM Food Trust** propose à ses clients « de tracer en toute sécurité et en quelques secondes les produits alimentaires et de numériser tous les documents essentiels » ;
- **Crystalchain/BioMérieux NutriSciences** offre aux entreprises « une solution de traçabilité qui permet de tracer directement leurs produits sur la blockchain ». Chaque acteur s'engage personnellement sur la fiabilité des données. Cette offre permet de vérifier la cohérence de ces dernières ;
- **Connecting Food**[71] a pour ambition de « rétablir la confiance des consommateurs dans l'industrie alimentaire en assurant non seulement la traçabilité, mais surtout l'audit digital des produits en temps réel à l'aide de la technologie blockchain ». Les consommateurs ont accès au mode de production (origine des ingrédients, lieux de production et transformation, mode d'élevage, rémunération des producteurs) en scannant un QR code. Sa valeur ajoutée reposerait sur son module *LiveAudit* qui permet d'auditer la qualité des produits en temps réel ;
- créée en 2016, la **start-up Tilkal** propose de créer une « identité numérique » pour chaque produit (ou lot). Sa plate-forme numérique permet la construction du cycle de vie complet de chaque produit. Son offre commerciale est d'aider les industriels à organiser la traçabilité de leur chaîne d'approvisionnement *« De bout en bout et en temps réel »* et de lutter contre les contrefaçons.

Des start-up spécialisées sur certaines dimensions de la qualité ont également vu le jour :

- la société française Ethickchain vise *« Les producteurs indépendants, les coopératives, ainsi que les distributeurs proposant des lignes de produits éthiques »*. Une identité numérique qui s'enrichit à chaque étape du parcours de distribution est attribuée à chaque produit ;

70 Provenance.org (https://www.provenance.org), Agriledger (http://www.agriledger.com/), Origen Trail (http://origin-trail.com/), Arc-Net (http://arc-net.io/)

71 Créée en 2016, *Connecting Food* a levé en 2019 plus de 3M€ auprès de IDIA Capital Investissement (Crédit Agricole), LeadBlock Partners, et de ses business angels. Cette opération permet de porter les fonds levés par Connecting Food à 5 M€ depuis sa création.

- l'application mise au point par la société Infratab et NTUA (National technical university of Athens) « *Permet d'enregistrer la température du poisson frais, du pêcheur au détaillant, en remplacement des enregistrements manuels* ». Ces informations, couplées avec un modèle de croissance des microorganismes, mises à jour sur une blockchain, permettent de prévoir la durée de vie restante des produits à chaque étape de la chaîne logistique.

Pour ce qui est des blockchains mises en place au sein des industries alimentaires, on peut répertorier quelques exemples, parmi d'autres :

- la décision de Danone de tracer ses laits infantiles avec Tilkal grâce à un QR code apposé sur l'emballage du produit : avec le lancement du service numérique *Track & Connect,* Danone fournit aux distributeurs et aux consommateurs des informations sur la filière d'approvisionnement de ses préparations infantiles. Danone souhaite capitaliser sur cet emballage pour mettre en place des services après-vente personnalisés tels que des applications mobiles dédiées à la santé et à la nutrition, ou des informations sur les exigences qualité des marques pour la fabrication des produits. Le service *Track & Connect* est d'abord lancé en Chine ;
- la poursuite de la collaboration entre Nestlé et Carrefour sur la plateforme IBM Food Trust : après avoir donné naissance à la première blockchain sur la purée Mousline, ces deux groupes viennent d'annoncer une blockchain sur la gamme de lait infantile Guigoz Bio 2 et 3 ;
- l'engagement solidaire de quatre coopératives, de l'usine de fabrication du Véritable Petit Beurre à La Haye-Fouassière et de deux meuniers qui permet aux consommateurs de s'informer grâce à un QR code sur les étapes du parcours du blé du champ à l'usine : l'ensemble des informations transmises sont liées au numéro du lot auquel est rattaché le paquet concerné. Chaque consommateur peut ainsi accéder sur son smartphone à des informations dynamiques relatives à la chaîne d'approvisionnement du paquet concerné : lieu de la récolte du blé, portrait de l'agricultrice ou agriculteur qui cultive le blé Harmony utilisé, localisation des meuneries, date de transformation du blé en farine, lieu et date de fabrication des biscuits ;
- la fourniture par Labeyrie sur deux références « saumon fumé » d'informations sur l'espèce, la provenance, les conditions d'élevage en Norvège (densité, alimentation, durée) et la préparation dans son atelier du sud-ouest de la France (étapes de tranchage et de fumage) ainsi que les engagements de la marque : ce projet mené en collaboration avec le salmoniculteur Cermaq a été rendu possible grâce à la solution blockchain IBM Food Trust. Cette traçabilité doit s'étendre à l'ensemble des gammes de saumon fumé Labeyrie. Pour accéder à ces informations, un consommateur doit scanner le QR code imprimé sur les emballages.

Les risques et limites de la blockchain

L'expérience acquise dans les transactions financières a permis de mettre en évidence certains risques et limites de la technologie blockchain (voir le rapport de l'Assemblée nationale n°1501 en 2018[72] et l'article La Tribune[73]).

Le premier risque est celui du piratage de la technologie. La courte histoire des blockchains a déjà été le théâtre de scandales retentissants[74]. On peut espérer que les blockchains attachées à la traçabilité des produits alimentaires seront moins attractives pour les hackers que celles liées à la finance.

La question de la consommation énergétique est très souvent mise en avant comme un risque environnemental fort de la technologie blockchain. Ce risque est inhérent aux blockchains publiques (par exemple, celles qui régissent les cryptomonnaies) et au processus de « minage » (ou de « preuve de travail ») qui est le mécanisme choisi pour garantir la transaction et l'inscription d'un nouveau bloc au registre. Dans ce dernier cas, la consommation énergétique est due aux incitations économiques des participants à « miner », ce qui multiplie le nombre de calculs et donc la consommation. Ce risque environnemental devient négligeable dans les « pseudo-blockchains » qui sont soit des « blockchains de consortium » (ou « blockchains sous contrôle ») qui regroupent les porteurs d'enjeux d'un système réduit (par exemple, tous les acteurs liés à la fabrication et à la commercialisation d'un aliment), soit des blockchains privées (au sein d'une entreprise).

La question de la gouvernance d'une blockchain de consortium se pose avec le risque de sa prise de contrôle par un acteur dominant. Ceci peut amener à faire appel à un tiers de confiance et donc à perdre une partie de l'intérêt de la blockchain (à savoir, la décentralisation). De plus, la multiplication des blockchains de consortium pose la question cruciale de l'interopérabilité entre blockchains et en particulier entre blockchains privées, publiques et de consortium. Enfin, si la technologie blockchain est bien adaptée à des transactions de valeurs (valeurs financières, diplômes, titres, etc.), elle pose des problèmes de fond dès lors que la chaîne d'information est interfacée avec un flux de produits physiques. Comment en effet garantir que la donnée numérique saisie correspond à la donnée physique externe ? Pour les systèmes agroalimentaires, c'est une question cruciale.

72 http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/micblocs/l15b1501_rapport-information.pdf

73 https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/deconstruire-les-mythes-de-la-blockchain-794001.html

74 https://www.usine-digitale.fr/article/dao-perd-50-millions-de-dollars-lors-d-un-piratage.N397787

Recommandations

Les industriels ont besoin de connaître dans sa totalité l'histoire des produits qu'ils commercialisent. Pour trois raisons : veiller en continu au respect de leur cahier des charges, avoir la capacité de réagir très rapidement en cas d'accident sanitaire et satisfaire la demande croissante de « transparence » exprimée par les consommateurs. Les producteurs et les filières peuvent également y trouver un intérêt pour valoriser leurs pratiques et le respect de leurs engagements.

Mais la blockchain ne garantit pas la véracité des données qu'elle délivre. Ainsi, une condition *sine qua non* à son déploiement en agroalimentaire est que les acteurs de la chaîne garantissent l'exactitude des informations qu'ils entrent dans la blockchain et que des mécanismes automatiques de vérification des données transmises dans la blockchain soient aussi proposés.

Du point de vue des consommateurs, la technologie blockchain risque d'apparaître comme une « boîte noire » où se trouvent stockées des informations auxquelles certains d'entre eux souhaiteraient avoir accès, sans en avoir la possibilité. Cet accès dépend en effet du bon vouloir des membres du « consortium » dont certains peuvent vouloir se protéger contre la divulgation de données qu'ils considèrent comme confidentielles. Il est probable que la demande de transparence faite aux professionnels ouvre la voie à une très forte pression de la part des associations de consommateurs.

Considérant comme souhaitable, et probablement inéluctable, son usage par les acteurs du système alimentaire, l'Académie des technologies recommande :

- **la poursuite des travaux pour assurer l'interopérabilité nationale, européenne et internationale entre blockchains ;**
- **l'offre de nouveaux services par l'intermédiaire de plateformes de service mutualisés, accompagnés par une étude des modèles économiques associés ;**
- **la mise en place de procédures de contrôle permettant d'assurer l'exactitude des informations stockées et transportées ;**
- **que ces procédures de vérification puissent résulter d'accords contractuels entre les acteurs de la blockchain (audits automatisés), de préférence à des contrôles administratifs qui ne doivent cependant pas être exclus (ceci dans le souci de protéger les consommateurs) ;**

- **un alignement, voire une normalisation, de l'ensemble des méthodes conduisant à informer le consommateur des multiples dimensions de la qualité des aliments, tout particulièrement nutritionnelles et environnementales, en dépit de la complexité des paramètres pris en compte ;**
- **un soutien aux PME et TPE désireuses de s'approprier cet outil, une fois consolidées les « bonnes pratiques » de la technologie blockchain au sein du système alimentaire ;**
- **une concertation entre professionnels et consommateurs sur les conditions d'accès de ces derniers à tout ou partie des informations cumulées au sein de la blockchain**

Le principal enjeu pour les entreprises et les pouvoirs publics est de créer et de conserver la confiance des acteurs industriels et des consommateurs en un système très disruptif, complexe, entièrement informatisé et aisément évolutif, sans le soumettre à une supervision administrative réglementaire lourde dont l'effet serait de « gripper » la blockchain. L'un des atouts majeurs de cette technologie est en effet l'absence de contrôle centralisé. La perte de confiance en un seul maillon de la chaîne entraînerait rapidement la fin de la crédibilité de tout le système.

Ces recommandations pourraient trouver leur place au sein de la stratégie nationale visant à faire de la France « une nation de la blockchain » dévoilée par la direction générale des entreprises lors de la *Paris Blockchain Conference* le 15 avril 2019.

Chapitre VII

Une meilleure prise en compte des impacts environnementaux

La nécessité de concevoir un système alimentaire durable à l'échelle mondiale, dont les retombées négatives sur l'environnement sont minimisées tout en optimisant ses impacts sociaux et économiques, fait l'objet d'un consensus quasi universel, même si les politiques gouvernementales et les pratiques des professionnels ne sont pas toujours à la hauteur des enjeux. Le GIEC et la FAO ont publié de nombreux rapports sur la manière d'atteindre cet objectif. Pour ce qui est de l'environnement, leur conclusion commune est que les principaux impacts se font sentir au stade de la production agricole, notamment au niveau de l'élevage des ruminants. Les industries alimentaires y ont néanmoins leur part de responsabilité, ainsi que les distributeurs et les citoyens.

Avec une commission de travail dédiée, l'Ania (Association nationale des industries alimentaires), très sensible à ces problématiques, a rédigé un livre vert à destination des professionnels de l'agroalimentaire pour qu'ils intègrent le développement durable à leurs modes de fonctionnement[75]. Les industriels du secteur disposent par ailleurs de bases de données comme Agribalyse (voir chapitre III) indiquant les différents impacts environnementaux de nombreuses étapes de la chaîne alimentaire[76].

C'est dans ce cadre général que se situent les deux questions auxquelles il sera tenté de répondre, au moins partiellement, dans ce chapitre : comment les industries alimentaires peuvent-elles réduire les impacts environnementaux de leurs unités de production et comment les technologies numériques peuvent y contribuer ?

Pour les entreprises, au niveau de leurs usines, les sources de progrès sont nombreuses :

- s'approvisionner avec des produits agricoles à faible impact environnemental ;
- diminuer les consommations d'énergie et d'eau ;
- optimiser la chaîne logistique en amont et en aval des usines ;

75 Voir https://www.ania.net/developpement-durable

76 Nous avons vu dans un précédent chapitre que beaucoup de travaux restent à faire avant que cette base soit pleinement opérationnelle.

- améliorer le traitement des eaux usées ;
- réduire les émissions de particules fines ;
- utiliser des emballages « éco-compatibles » et réduire leur volume ;
- tirer le meilleur parti des coproduits dans des approches d'économie circulaire ;
- réduire au minimum les pertes et gaspillages ;
- intégrer les bonnes pratiques d'une économie circulaire.

À titre d'exemple, et en raison de leurs impacts importants sur les bilans environnementaux, nous nous limiterons à développer ici les trois premières pistes. Auparavant, nous allons tenter de cerner ce qu'il faut entendre par « empreinte environnementale d'un aliment ».

EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE D'UN ALIMENT

L'empreinte environnementale d'un aliment est la somme des effets cumulés des activités de production, transformation, commercialisation, transport et consommation, négatifs et positifs (par exemple la fixation de l'azote par les légumineuses ou la méthanisation des déchets organiques), sur les grands équilibres de l'écosystème terrestre[77].

Les indicateurs environnementaux utilisés par *Agribalyse 3.0* (chapitre III) pour mesurer cette empreinte sont préconisés par la Commission européenne. Ces quatorze indicateurs d'impact en analyse de cycle de vie sont complétés par un indicateur global issu de la pondération de l'ensemble des indicateurs. Quantitatifs ou qualitatifs, ils portent notamment sur le changement climatique, les émissions de particules fines, la consommation d'eau, la consommation d'énergies fossiles, l'usage des terres, la consommation de ressources non-renouvelables, etc. Ces mesures font appel à une « analyse de cycle de vie », c'est-à-dire à une détermination des flux de matières et d'énergie tout au long du cycle de vie de l'aliment (Figure 12). Pour leur part, les citoyens sont également très sensibles aux impacts sur la biodiversité, à la dispersion de produits chimiques dans l'eau, les sols et l'atmosphère (pesticides, nitrates, phosphates) et à la déforestation des forêts tropicales.

77 Ensemble formé par une communauté d'êtres vivants (microorganismes, animaux, végétaux) et son environnement (eau, sol, atmosphère, climat).

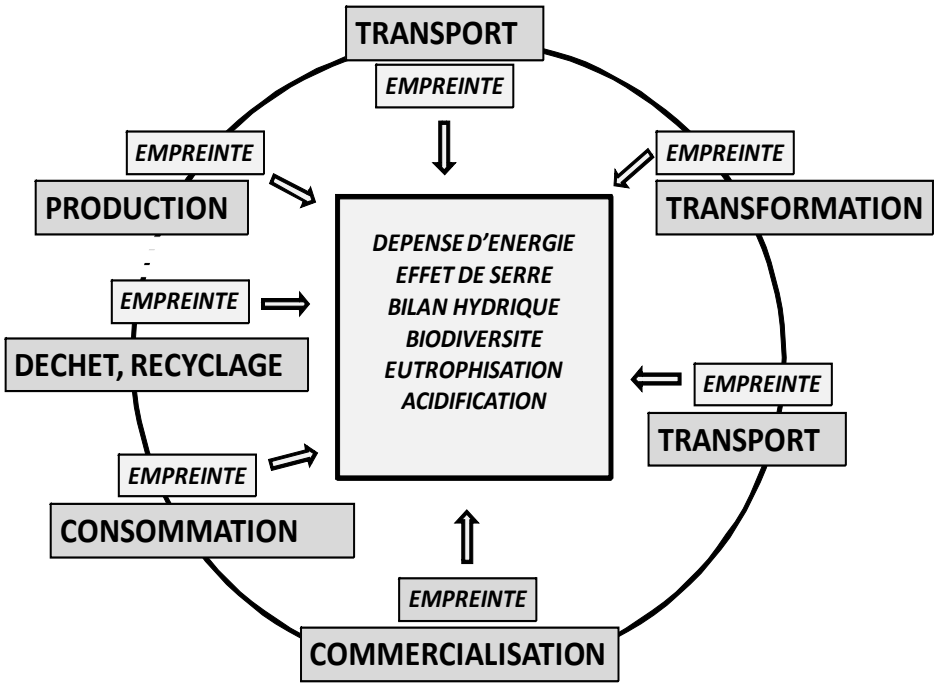


Figure 12- Analyse du cycle de vie d'un aliment[78]

L'unité d'expression de l'impact environnemental lors du cycle de vie d'un produit est désignée par unité fonctionnelle (ISO 14040 et 14044). Dans le cas des aliments, celle retenue actuellement est soit 100 g ou 100 ml de produit, soit la portion. Cette unité fonctionnelle n'est acceptable que pour comparer deux produits appartenant à une même catégorie d'aliments.

L'énergie « primaire » nécessaire pour fabriquer les calories alimentaires provient de l'énergie solaire par nature renouvelable (*via* la photosynthèse) et des énergies fossiles et renouvelables nécessaires aux « travaux des champs et des étables ». Pour les aliments, les parts de la transformation, de la distribution, de la conservation et de la préparation sont prépondérantes, devant celles de la production[79]. Dans les pays en développement, la cuisson est l'opération la plus énergivore ; dans les pays riches, c'est la transformation et la distribution.

La mesure de l'empreinte hydrique pose également des problèmes spécifiques. Les experts ne sont pas d'accord sur la meilleure méthode pour l'évaluer. Le débat porte principalement sur le bien-fondé de la prise ou non en compte de l'eau de pluie dans les calculs. La réponse apportée à cette question est essentielle puisque dans le premier cas il faudrait « consommer » une moyenne de 15 000 litres d'eau pour produire un kilo de rôti de bœuf et seulement 600 litres

78 Académie des technologies, 10 questions à Pierre Feillet, *Comment bien se nourrir en respectant la planète et notre santé*, edp sciences, 2016.

79 *Energy-smart food for people and climate*, FAO, 2011.

dans le cas contraire[80]. Pour sa part, la FAO estime que les calculs ne doivent pas prendre en compte l'eau de pluie[81].

S'APPROVISIONNER EN PRODUITS AGRICOLES À MOINDRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les quatre principales ressources nécessaires à la fabrication d'un aliment sont les matières premières agricoles, des additifs et auxiliaires de fabrication, de l'énergie et de l'eau (Figure 13). L'apport « matières » des produits agricoles est particulièrement important. Si on se réfère aux résultats d'une analyse de cycle de vie, elles contribuent de ce fait de manière très significative au score environnemental d'un aliment. Pour optimiser celui-ci, les usines doivent donc veiller à s'approvisionner auprès de producteurs veillant à diminuer autant qu'il leur est possible l'impact environnemental de leur production. D'autres contraintes peuvent perturber ces choix : le prix et la qualité des produits, la garantie d'une disponibilité régulière et en quantité suffisante (un obstacle souvent rencontré avec les produits biologiques) et l'éloignement des ressources sur lequel nous reviendrons plus loin.

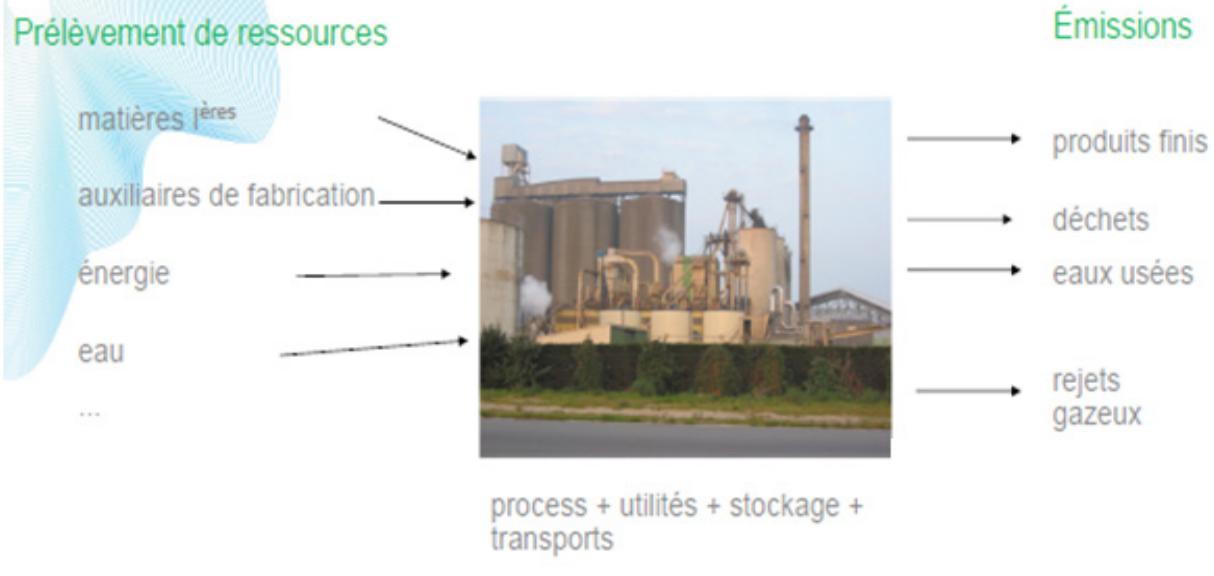


Figure 13 - Flux de matières dans une usine de fabrication d'aliments (F. Bosque, ITERG)

80 Données disponibles sur le site de l'ONG *Water footprint network.*

81 *Food wastage footprint. Impact on natural resources*. FA0, 2014.

Le responsable « achat » d'une entreprise doit donc faire à une situation complexe : optimiser un système multiparamétré et accéder aux données lui permettant d'avoir une bonne appréciation des impacts environnementaux des produits agricoles proposés par ses fournisseurs. Nous avons vu que la participation de l'entreprise à une blockchain est une approche pouvant donner accès à ces données (chapitre VI). La difficulté à surmonter est d'assurer l'interopérabilité des blockchains auxquels participent indépendamment les fournisseurs des ingrédients qui entrent dans la composition d'un aliment, ceci afin de garantir la traçabilité de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement.

Il y a là une place à occuper par des start-up, spécialistes des technologies numériques qui sauraient apporter des solutions aux entreprises alimentaires.

Diminuer les consommations d'énergie et d'eau dans les usines

Les industries alimentaires françaises constituent le troisième plus gros secteur industriel en termes de consommation d'énergie[82], derrière l'industrie chimique et la métallurgie. Dans les pays de l'OCDE, elles représentent 4 % de la consommation énergétique totale. Elles sont également de grandes consommatrices d'eau, même pour fabriquer des produits peu élaborés (par exemple, la fabrication d'un sachet de salade nécessite 10 à 20 litres d'eau). Les opérations de nettoyage-désinfection traditionnelles nécessitent des quantités d'eau et de détergents importantes[83]. Pour une part de l'eau utilisée, le respect des normes sanitaires propres aux produits alimentaires est impératif.

Pour des raisons environnementales (empreinte carbone, ressources en eau) et économiques (gains de compétitivité)[84], les industriels ont développé des stratégies d'éco-conception. Ils ont progressivement réduit de manière significative leurs consommations d'énergie et d'eau dans leurs usines. Des progrès remarquables ont notamment été accomplis en amidonnerie et en sucrerie, ainsi qu'en laiterie et dans les industries de cuisson (biscuiterie par exemple). Les équipementiers et les sociétés d'ingénierie, s'appuyant sur les avancées du génie des procédés, ont joué un rôle moteur dans ces progrès.

82 Ces besoins importants sont liés à des procédés de fabrication par nature énergivores et aux exigences en matière de sécurité sanitaire (transformation de produits humides, cuisson, séchage, déshydratation, chaîne du froid…). Le gaz naturel reste la source d'énergie préférée par les industries alimentaires.

83 Les entreprises s'intéressent de plus en plus à la réduction de ces étapes et aux alternatives possibles (voir par exemple le projet européen Susclean pour les salades 4e gamme avec des réductions recherchées de consommation en eau de 20 à 50 %). *(La 4ème gamme regroupe les légumes et fruits frais, crus, lavés, épluchés et coupés. (salades classiques et mélangées, crudités, herbes fraîches, légumes et fruits). Les produits sont conditionnés sous air ambiant ou atmosphère modifiée ou encore sous vide, en sachet ou en barquette. Leur durée limite de consommation (DLC) varie de 4 à 10 jours selon les produits.*

84 L'énergie coûte chaque année quelque trois milliards d'euros aux entreprises agroalimentaires (de plus de dix salariés), soit près de 3 % de leur chiffre d'affaires.

De manière assez conventionnelle, les pistes de progrès passent par une réduction des consommations, un recours accru aux énergies renouvelables et au traitement des eaux usées. Depuis 2011, les entreprises peuvent s'appuyer sur la norme NF EN ISO 50 001. Celle-ci précise les exigences en vigueur pour mettre en place un « Système de management de l'énergie » dont l'objectif est de fournir les moyens de gérer les consommations énergétiques de façon efficace et autonome[85].

La question qui se pose est de savoir si et comment l'usine 4.0 de demain, et son cortège de technologies numériques, permettra de réduire davantage les consommations d'énergie et d'eau et donc d'améliorer les bilans environnementaux des usines. Dans un rapport de 2017 sur les transitions numériques et écologiques, l'Ademe[86] apporte des éléments de réflexions qu'il est possible de résumer en quatre points :

- il y a encore peu de données sur les impacts environnementaux de la mise en œuvre des technologies numériques ;
- avant d'embarquer les entreprises dans une transition numérique, il est donc nécessaire d'améliorer les connaissances sur ses impacts environnementaux ;
- en particulier, il faut mieux connaître la balance entre les gains environnementaux obtenus dans les usines et les externalités négatives dues à l'usage de technologies numériques ;
- il est nécessaire d'intégrer les effets sociaux et sociétaux (culture de la donnée, montée en compétence, évolution des postes de travail) dans la transition numérique.

Parmi les gains attendus dans les usines du déploiement des technologies numériques (voir le chapitre V), on peut citer notamment une utilisation optimale des robots et cobots, une réactivité instantanée à des incidents de production avec un meilleur asservissement des machines, une maintenance préventive, une interconnexion du système productif donnant accès à une vision globalisée de l'ensemble des paramètres dont dépend le bon fonctionnement de l'usine (approvisionnements, fabrication, gestion des déchets, stockage, livraison). Cette gestion optimisée conduira à une réduction des dépenses énergétiques et à une meilleure gestion des ressources en eau.

Une société comme ProSim, issue de l'ENSIACET - Institut national polytechnique de Toulouse, est aujourd'hui positionnée entre la transition numérique et la transition écologique. Ses spécialistes proposent des solutions de simulation et de modélisation de procédés complets en prenant en compte l'optimisation énergétique selon la méthode du pincement *(pinch analysis)*.

85 L'Ania a répertorié en 2015 la diversité des actions mises en œuvre par les entreprises afin d'améliorer la gestion des énergies. https://www.ania.net/espace-pro/developpement-durable/bonnes-pratiques/consommations-denergie

86 Ademe, Deloitte Développement Durable (Benoît Tinetti, Arnaud Ladépêche, Alexis Lemeillet, Pierre-Alexis Duvernois, Astrid Michel, Agathe Viano), Deloitte In Extenso (Noémie Keller, Stéphane Faussurier, Clélia Fischer), G-SCOP (Valérie Rocchi, Peggy Zwolinski), SATIE (Javier Ojeda), FING (Jacques-François Marchandise, Sophie Maheo). 2017. *Usine du futur : comment allier transition numérique et transition énergétique et écologique*. 25 pages.

Des algorithmes numériques exploitent cette méthode pour chercher les adaptations les plus économiques, tout en tenant compte des investissements nécessaires, du prix de l'énergie, etc. Cette méthode de « pincement énergie » est étendue à la consommation d'eau. Le « pincement eau » vient d'être mis au point dans le cadre du projet ANR Minimeau entre Prosim, AgroParisTech et des centres techniques agroalimentaires de l'Actia.

La production du froid et son utilisation (réfrigération, congélation), fortes consommatrices d'énergie, requièrent des systèmes de plus en plus complexes et coûteux à concevoir. La modélisation et la simulation des systèmes thermodynamiques permettent de préfigurer les choix technologiques les plus pertinents. Elle permet également d'explorer de multiples scénarios de fonctionnement réel pour ensuite les confronter aux équipements. Le centre technique Pôle Cristal intervient auprès des industriels pour les assister dans cette optimisation numérique.

Il faut insister sur la nécessité, pour chaque entreprise, d'identifier des indicateurs de performance permettant de suivre l'évolution des consommations d'énergie[87] et d'eau et de déceler les gisements d'économies.

Il est un point sur lequel les bureaux d'études s'accordent, c'est que pour réussir, l'entrée dans l'ère de l'usine 4.0 doit être affichée comme « priorité stratégique » par la direction générale de l'entreprise.

Parmi les impacts potentiellement négatifs de l'utilisation des technologies numériques, ceux qui s'opposent à ces évolutions mettent en avant les dépenses énergétiques requises pour piloter digitalement une usine 4.0, ainsi que des suppressions d'emplois.

Optimiser la chaîne logistique en amont et en aval des usines

Le transport des aliments au sein de la chaîne alimentaire est une composante non négligeable de l'impact de l'alimentation sur l'environnement, sous deux aspects : les émissions de gaz à effet de serre et le rejet de particules fines dans l'atmosphère[88].

Nos aliments parcourent de nombreux kilomètres avant d'arriver dans nos assiettes. Selon une récente étude de l'Ademe[89], l'alimentation des ménages en France générerait un trafic de 201 milliards de tonnes/km par an. Si la majorité des transports sont maritimes (57 %), dont on sait qu'ils ont peu d'impacts en termes d'émissions de gaz à effet de serre ramenées à la tonne transportée par kilomètre[90], c'est le transport routier qui est à l'origine de l'essentiel des émis-

87 Voir fiche CEE IND UT 134

88 Dans le cas des transports intercités, les émissions de particules fines n'ont guère d'impact sur la santé.

89 Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J-M, Sylvestre M., Pharabod I., 2019, *L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en Franc*», Club ingénierie prospective énergie et environnement, Paris, IDDRI, 24p. Janvier 2019.

90 Moins de 7 grammes à la tonne/kilomètre.

sions du transport de produits alimentaires (un peu plus de 80 %)[91]. Le transport des fruits et légumes représente 31 % de ces émissions, celui des aliments pour animaux (élevage) 30 %. Tous les autres produits alimentaires considérés globalement comptent pour seulement 23 %.

Plaque tournante de la distribution des aliments transformés, entre la ferme et les distributeurs, les industries alimentaires ont un rôle important à jouer pour optimiser la circulation des biens. Elles doivent intégrer les possibilités offertes par la révolution digitale dans trois domaines : stockage, conditionnement et transport des produits. Pour celles qui n'auraient pas encore modifié leurs pratiques, il leur faut se rapprocher de spécialistes de la transformation digitale dans la chaîne d'approvisionnement *(supply chain)*. La prise en compte des impacts environnementaux, tout particulièrement l'empreinte carbone, est à intégrer dans cette démarche. La question des emballages, que nous ne développerons pas ici, est également une composante essentielle de l'optimisation des circuits logistiques pour l'approvisionnement des unités de production, ainsi que pour le tri des déchets et leur fin de vie. À ce sujet, il est intéressant de noter le récent partenariat entre l'éco-organisme Citeo et Alkemics, spécialisé dans l'échange de données de manière sécurisée autour des produits de grande consommation. Il va permettre aux consommateurs d'accéder aux consignes de tri spécifiques à leur localité par un simple scan du code-barres des produits à partir de 2021.

L'une des particularités du système alimentaire est que les conditions de transport et de stockage des aliments doivent garantir la qualité sanitaire de ces derniers. Il faut notamment éviter l'apparition et la multiplication de microorganismes pathogènes. C'est la raison pour laquelle les industriels ont obligation à porter à la connaissance des consommateurs la date limite au-delà de laquelle il pourrait être dangereux de consommer un aliment frais emballé. On parle de date limite de consommation (DLC). La prise en compte de la DLC, qui s'applique aux denrées microbiologiquement périssable et qu'il ne faut pas confondre avec la date de durabilité minimale (DMM, anciennement DLUO, pour laquelle, une fois la date dépassée, la denrée peut avoir perdu une partie de ses qualités spécifiques, sans pour autant présenter un risque pour celui qui la consommerait), est donc un paramètre particulièrement important dans la gestion de la chaîne logistique d'un aliment :

- nous avons vu précédemment que l'outil de microbiologie prédictive Sym'Previus a été développé pour faciliter la détermination de la DLC (voir chapitre VI) ;
- la start-up française Cryolog propose une solution combinant les apports de la microbiologie et des technologies numériques pour détecter directement sur les emballages le dépassement de la DLC. Sa pastille microbiologiquement thermosensible Topcryo passe du vert au rouge quand la chaîne du froid n'a pas été respectée.

91 L'avion représente une très faible part de la demande de transport (0,5 %), mais son impact en termes d'émissions de CO_2 atteint 5 % des émissions globales.

En fin de la chaîne logistique, pour éviter le gaspillage alimentaire, de nombreuses start-up proposent des solutions pour mieux gérer les aliments arrivant en « fin de vie ». Ces applications concernent plus directement les distributeurs, mais les services qu'elles offrent ne sont pas sans effet sur les entreprises qui fabriquent les aliments. Parmi les start-up françaises, on peut citer « *Too Good To Go* » qui connecte commerçants et utilisateurs qui peuvent récupérer à petit prix des invendus en fin de journée.

On peut enfin noter la tendance, encore timide, observée depuis quelques années à la relocalisation des cultures au plus proche des citadins afin, notamment, de renouer les liens actuellement distendus entre producteurs et consommateurs. Les technologies numériques accélèrent ce mouvement en facilitant la mise en relation directe de l'amont et de l'aval de la chaîne alimentaire traditionnelle. Un autre impact des technologies numériques, en émergence dans certains pays asiatiques, est l'optimisation du fonctionnement des serres urbaines et des tours végétales. Les produits concernés sont pour l'instant des légumes et, à moindre titre, des fruits. La chaîne alimentaire se trouve alors réduite à ses premiers (les producteurs) et derniers maillons (les consommateurs)[92]. Les technologies numériques pourraient ainsi fragiliser indirectement les industries de traitement et de conditionnement des fruits et légumes.

Recommandation

De tous les impacts environnementaux d'un aliment, celui sur le changement climatique est le plus inquiétant car il est universel, quasiment irréversible (à l'échelle de nombreuses générations futures) et ses effets potentiellement dramatiques. L'effort des professionnels du système alimentaire devrait porter très prioritairement sur ce paramètre. Toutes les décisions portant sur une modification du cycle de vie d'un aliment, celles notamment faisant appel aux technologies numériques, devraient systématiquement inclure une analyse de son impact sur l'émission des gaz à effet de serre.

92 Attention cependant à ne pas faire preuve d'utopie : bien qu'il soit difficile de déterminer avec précision la surface nécessaire à la production de la totalité de l'alimentation d'un être humain, la fourchette de 2 000 m^2 ± 500 en zone tempérée comme la France est accepté par nombre d'auteurs.

Chapitre VIII

L'émergence de nouveaux concurrents : robots cuisiniers et restauration virtuelle

De multiples facteurs expliquent l'aspiration des Français à acheter des aliments « prêts à manger » (plats cuisinés frais, surgelés ou en conserve, sandwichs, pizzas, offre *snacking* des grandes surfaces) : urbanisation, travail des femmes, aspiration à davantage de temps libre en sont les trois principaux.

L'industrie des plats cuisinés a longtemps profité de cette évolution des pratiques alimentaires mais marque le pas depuis quelques années. Le « scandale » de la viande de cheval en 2013 aura marqué ce secteur d'une pierre noire. Néanmoins, on observe depuis trois ans une légère reprise estimée à 2,5 % par an avec un marché français d'environ cinq milliards d'euros (par exemple, les ventes de l'enseigne Picard auront baissé jusqu'à 40 % sur certains produits avant de retrouver, puis dépasser les niveaux de vente d'avant 2013). Face à la nouvelle crainte vis-à-vis des « aliments ultra-transformés », ce sont les produits haut de gamme à forte valeur ajoutée qui retiennent le plus l'attention des consommateurs en 2020.

Avec la digitalisation, la cuisine « fait maison » (robots cuisiniers, fours « intelligents ») et la livraison des plats et des repas à domicile pourraient devenir dans l'avenir de nouveaux et redoutables concurrents de cette industrie des plats cuisinés.

Robots cuisiniers et fours intelligents

L'histoire des « robots » ménagers commence au début des années 1920 avec l'invention de l'américain Stephen Poplawski. Son appareil est constitué d'une cuve au fond de laquelle est fixée une lame coupante entraînée par un moteur électrique. Il est principalement destiné à homogénéiser des boissons. Sur cette idée originale, des appareils multifonctions sont ensuite commercialisés, jusqu'aux plus perfectionnés, équipés de plusieurs cuves et de nombreux outils interchangeables et entraînés par un même moteur dont la puissance et la vitesse sont réglables. Ces « robots »

facilitent le travail des cuisiniers. Ils permettent de pétrir, mélanger, éplucher, hacher, découper, filtrer toutes sortes de produits alimentaires.

Il faudra attendre une cinquantaine d'années avant l'arrivée des « robots » de deuxième génération qui se différencient de la première par l'introduction d'une nouvelle fonction, la cuisson. Ces robots-cuisiniers multifonctions, dont les prix s'étalent entre 300 et 1 400 euros, ont séduit de nombreuses familles. Les plus sophistiqués permettent de préparer un grand nombre de plats, sucrés ou salés, mais sont encore loin de remplacer les cuisiniers. Certains d'entre eux agrègent une communauté d'utilisateurs qui partagent leurs recettes. Celles-ci sont automatiquement ajoutées dans la « bibliothèque » du robot. Ces robots, ou plutôt ces cobots[93], sont adaptés à la préparation de soupes, de farces, de sauces, de crèmes ou encore de gougères, tous produits homogènes. En complément à leur fonction d'aide culinaire, certains d'entre eux proposent des « services » destinés à aider les consommateurs à améliorer leur alimentation au quotidien (Figure 14).



Figure 14 – Les robots culinaires vont-ils concurrencer l'industrie des plats cuisinés ?

Selon une étude commanditée par FranceAgriMer et réalisée par le consortium BLEZAT Consulting et Alim'Avenir, *« l'usage d'ustensiles ou d'appareils domestiques connectés ouvrent la voie au développement de nouveaux usages et solutions — combinaison de produits et de services associés — de nutrition personnalisée, avec par exemple des appareils de préparation culinaires qui savent proposer des recettes adaptées au goût ou aux intolérances de chacun ».*

Avec le programme *Open Food System* lancé au tournant des années 2010 et porté par le groupe SEB en collaboration avec le Groupe Bonnet Thirode Grande Cuisine, la cuisine pourrait se « digitaliser ». L'ambition est double : a) faciliter la préparation des repas grâce à la mise à disposition de contenus, d'appareils et de services innovants en développant des solutions de cuisine numérique pour le grand public ; b) fabriquer de nouveaux appareils de cuisson intelligents permettant de moduler automatiquement (sans contact et sans intervention humaine) la cuisson des viandes et poissons afin de conserver les qualités organoleptiques et nutritionnelles des

93 Voir chapitre 7.

aliments cuits au four. Fin 2020, soit dix ans après le lancement de ce programme, les ambitions initiales de ce projet semblent encore loin d'être atteintes.

Open Food System

***O**pen Food System* est un grand projet de recherche et développement associant la filière agroalimentaire, l'électroménager et celle des contenus et services numériques. Il réunit vingt-cinq partenaires dont SEB, coordonnateur du projet, et quinze laboratoires de recherches.

Le consortium associe des acteurs aux compétences et axes de recherche et développement très complémentaires, à la conjonction des filières numériques et agroalimentaires : deux grandes entreprises de dimension internationale (les groupes SEB et Bonnet Thirode Grande Cuisine), six PME technologiques, quinze laboratoires de recherche et une association. Ces partenaires industriels et scientifiques se retrouvent au sein de six pôles de compétitivité.

L'ambition est de construire un écosystème de référence de ce que sera la cuisine numérique, mettant à la disposition des amateurs de cuisine déjà utilisateurs d'appareils électroménagers, les contenus et services innovants des secteurs de l'agroalimentaire, de la distribution, des métiers de service à la personne et des outils numériques.

La troisième génération de robots est en route. Ce seront de vrais robots capables de cuisiner sans intervention humaine. *Moley Robotic*, une start-up britannique créée en 2014, est l'inventeur du premier véritable robot-chef cuisinier, mais sa commercialisation envisagée en 2018 se fait toujours attendre. Peut-être restera-t-il à l'état de prototype. Ce robot est composé de deux bras robotisés qui sont intégrés dans le mobilier de cuisine. Les bras dotés de mains et de doigts agiles sont capables de mimer les gestes d'un vrai chef cuisinier grâce à ses 20 moteurs, 24 articulations et 129 capteurs. Le système entièrement autonome est contrôlé par l'utilisateur soit par son écran tactile, soit à distance via un smartphone. Les recettes sont intégrées dans une bibliothèque. Il faut mettre à la disposition du robot, sur le plan du travail, tous les ingrédients nécessaires à la réalisation des recettes. Ces ingrédients sont identifiés grâce à un logiciel de reconnaissance d'image dont dispose l'appareil.

Imaginaire, et donc imaginable, est la mise sur le marché d'un robot capable de proposer en fin de soirée à chacun des membres d'une famille une liste de plats à cocher pour les repas du lendemain. Le robot pourrait alors passer commande des ingrédients nécessaires à la préparation de ces différents menus, puis les préparer comme le ferait un cuisinier afin de les servir à l'heure souhaitée par chacun des convives. Science-fiction ? L'avenir le dira. Ce qui est cependant certain, c'est que la commercialisation d'un robot cuisinier possédant ces capacités aurait un impact considérable sur l'industrie alimentaire (adieu les plats cuisinés !), la distribution et la vie des familles.

Le « fait maison » est également facilité par les fours « intelligents » qui commencent à trouver leur place dans les cuisines des plus fortunés. Les principales marques d'électroménager pro-

posent des appareils qui intègrent tout ou partie des services suivants : porte à écran tactile, mise en route automatique pour que le plat soit prêt au moment du repas, connexion à un smartphone ou à une tablette pour suivre à distance le déroulement de la cuisson, connexion à internet pour proposer des recettes et mémoriser les paramètres de cuisson, caméra HD intégrée pour suivre la cuisson sans ouvrir le four, système de vaporisation d'eau pour éviter le dessèchement de certains plats, zones à températures différenciées réglables au degré près, circulation différenciée de l'air entre plusieurs zones pour éviter des mélanges de produits volatils entre des plats cuits simultanément, détection du poids et du volume du produit à rôtir pour en garantir une cuisson optimale (correspondant au souhait affiché par l'opérateur), adaptation automatique des conditions de cuisson à la nature du plat à cuire, mesure des pertes de poids en cours de cuisson, fonction d'autonettoyage chaque fois que nécessaire. Il devrait être possible dans un proche futur de laisser au four le soin de passer commandes des produits nécessaires à la confection d'un plat.

Le principal concurrent de ces robots-cuisiniers et des fours « intelligents » pourrait être la restauration à domicile (la livraison de plats et repas à domicile) en pleine évolution sous l'effet de la révolution numérique.

Avec la digitalisation de son activité, la restauration à domicile change de nature

Avec la transition numérique, la « nouvelle » restauration devient virtuelle pour les consommateurs (à l'exception heureuse des repas livrés !) et repose sur l'existence d'une cuisine « invisible » pour ses clients, si ce n'est sur internet. Chacun peut y commander les plats proposés sur des sites dédiés et se faire livrer où et quand il veut. Il est parfois possible de personnaliser son plat (sans gluten, sans lactose, salades composées…). Quant au « cuisinier », il s'approvisionne lui aussi auprès de fournisseurs qu'il ne connaît souvent que « numériquement ».

La croissance de ce secteur est spectaculaire. Selon les études publiées par PreciseSecurity.com, le marché mondial de la restauration « virtuelle » pourrait atteindre 2 300 milliards de dollars en 2026, dont près de 1 000 milliards aux États-Unis. En Europe, avec la popularité croissante d'Uber Eats, Deliveroo et DoorDash la restauration numérique est également en pleine croissance (Figure 15).

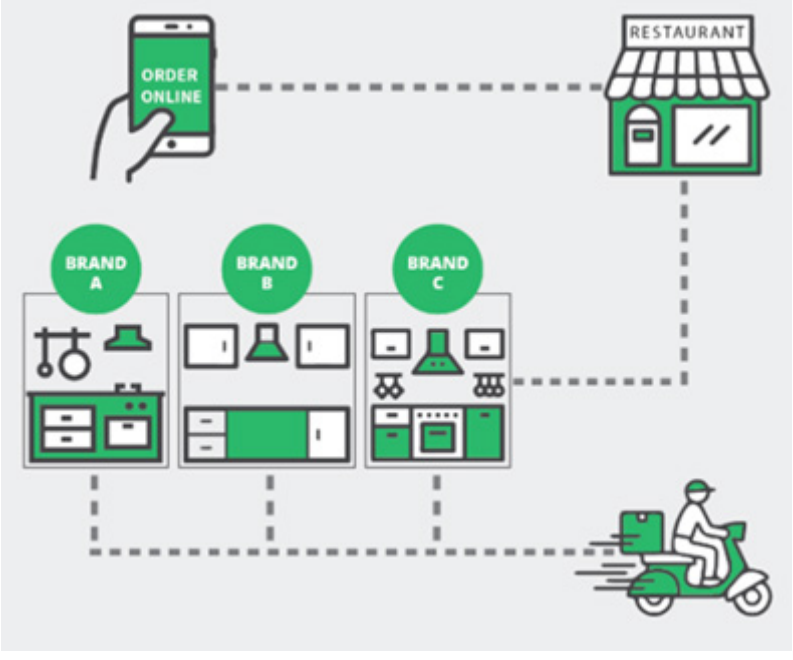


Figure 15- Un restaurant virtuel accessible par internet

La période actuelle marquée par l'épidémie de la CoViD-19 est favorable à la livraison des repas à domicile dans la mesure où celle-ci se positionnerait sur le créneau du « développement durable » tel que le perçoivent les consommateurs et donc de proximité de manière à répondre à l'aspiration croissante des Français telle qu'elle s'est exprimée lors d'une enquête réalisée par le Credoc en juin 2020 (voir chapitre IV).

Chapitre IX

De nouveaux services pour les entreprises et les consommateurs

De nouveaux services pour les entreprises

Adaptation plus rapide à l'évolution et à la spécificité de la demande des consommateurs

L'e-commerce a déjà atteint le système alimentaire : selon le groupe international de consultants Nielsen, les ventes en ligne pesaient 6 milliards d'euros (environ 5 % des ventes) en 2017 en France, dont 63 % retirées en magasin (drive notamment) et 37 % livrées à domicile. Son développement, accéléré par la crise sanitaire due à l'épidémie de la CoViD-19, pourrait remodeler les relations commerciales au sein du secteur et produire de multiples effets sur l'activité des entreprises en leur ouvrant l'accès à de nouveaux marchés. Il devrait modifier les pratiques de marketing et les flux commerciaux. Une analyse de ces évolutions, effectuée récemment par FranceAgrimer[94], ne sera pas reprise dans ce rapport.

Un autre impact, majeur, de l'usage que les consommateurs font du numérique pour leurs achats, e-commerce et usage des applications chargées sur smartphone, est la possibilité offerte aux entreprises de mieux cerner les aspirations de leur « clientèle » en prenant en compte les données générées par cet usage. Pour adapter rapidement leurs produits à ces aspirations, les entreprises doivent se doter des moyens leur permettant d'identifier rapidement ces évolutions. La tâche n'est pas facile en raison de la diversité et de la complexité[95] de ces aspirations, parfois

94 Pour une analyse très complète des évolutions attendues, le lecteur est invité à se reporter à l'étude commanditée par FranceAgriMer en 2019 auprès de Blézat Consulting : *Impact des nouvelles formes de commerces sur les entreprises agro-alimentaires*.

95 Les attentes sont parfois contradictoires : en raison de l'évolution de la société (notamment l'urbanisation des populations et le travail des femmes), la demande pour les produits transformés caractérisés par leur praticité augmente alors qu'une méfiance s'installe vis à vis des aliments qualifiés « ultra-transformés » et de la présence d'additifs.

contradictoires : sécurité sanitaire des aliments, compositions nutritionnelles optimisées pour un effet favorable sur la santé et le bien-être, impacts environnementaux réduits, origine des produits, praticité, etc., le tout à des prix raisonnables. Les PME, souvent plus réactives en raison d'une chaîne de décision réduite, pourraient être mieux à même que les grands groupes de relever ce défi, à la condition toutefois de s'allier à des partenaires leur donnant accès à ces données et à leur interprétation. Les pouvoirs publics pourraient les y aider.

En raison de la spécificité de ses produits et de la diversité des goûts de sa clientèle internationale, la société Pernod Ricard est l'une des premières à avoir perçu l'importance d'analyser les données disponibles sur internet pour prévoir l'évolution de la demande des consommateurs à partir des données collectées. Avec le développement des réseaux sociaux et de l'e-commerce comme sources de données, le groupe Pernod Ricard a annoncé avoir fait de l'utilisation de l'intelligence artificielle l'une de ses priorités en 2019. Pour cette entreprise, la captation des commentaires lui permet de mieux appréhender les contextes de consommation et les styles de vie de ses clients.

Pernod Ricard affiche sa stratégie

« Nos consommateurs aujourd'hui sont de plus en plus connectés et augmentent leurs achats en ligne. Les nouvelles technologies comme la récupération et l'analyse des données les concernant nous permettent de saisir des opportunités et de leur proposer des offres directes personnalisées et des expériences pertinentes. Avoir une forte culture client et une stratégie digitale intelligente est essentiel pour faire évoluer notre activité à l'ère du numérique. »

Pierre-Yves Calloc'h, *Digital Acceleration Director, Global Business Development*

Le souci non critiquable des entreprises de chercher à mieux répondre à la demande sociétale glisse cependant progressivement vers une approche plus marketing qui est de cibler spécifiquement des individus, en prêtant moins d'attention aux intérêts collectifs de la société. Les choix des consommateurs deviennent alors moins libres qu'ils ne le paraissent. Maîtrisé par les entreprises, ce nouveau « pouvoir numérique » a été théorisé dès 2008 par le prix Nobel d'économie Richard Thaler. Issu de l'économie comportementale, ce pouvoir du « coup de pouce » que s'approprie le « marketing incitatif » permet d'influencer le comportement des consommateurs dans l'intérêt des entreprises. Pour l'ancien président de Google Eric Schmidt, *« La technologie va être tellement puissante qu'il va être difficile de voir ou de consommer quelque chose qui n'a pas été ajusté pour vous »*[96].

Ces politiques de ciblages personnalisés ne vont pas sans poser des problèmes d'éthique spécifiques car « Les algorithmes peuvent influencer notre jugement, le façonner, le diriger en exerçant de fines manipulations sur notre subjectivité » (B.E Harcourt, La société d'exposition,

96 Cité par Éric Salobir dans son livre *Dieu et la Silicon Valley*, Buchet/Chastel,2020.

Seuil, 2020). Celles-ci n'ont pas été suffisamment étudiées dans un secteur d'activité qui touche si directement et si profondément la personnalité et le bien-être des êtres humains. Les entreprises doivent mieux analyser leur part de responsabilités.

Il est une autre manière plus positive de tirer parti des interactions dorénavant très actives entre consommateurs et professionnels. S'appuyant sur les réseaux sociaux, les entreprises peuvent établir un dialogue avec les consommateurs pour concevoir des produits répondant davantage aux besoins de ces derniers, voire imaginer de nouvelles solutions techniques pour les fabriquer (il existe chez les Français des compétences empiriques multiples et exceptionnelles dans la manière de cuisiner, c'est-à-dire de transformer des produits d'origine agricole en plats savoureux prêts à consommer). Cette approche fait appel à une innovation qualifiée de « participative ». Elle peut conduire à des innovations incrémentales dont l'importance dans les industries alimentaires a été soulignée précédemment. Elle présente le triple avantage de valoriser des ressources potentielles largement dispersées, de familiariser le public avec les processus d'innovation, d'aboutir à des innovations *a priori* souhaitées et considérées comme intéressantes par les utilisateurs. Pour les entreprises, elle conjugue plusieurs atouts : diminution des coûts de recherche et développement, rapidité de mise sur le marché, diminution des risques de non-adéquation à la demande, fidélisation indirecte d'une communauté. Des incitations financières peuvent contribuer à conduire les consommateurs à faire des propositions. Une des versions les plus courantes de cette approche est la « production participative » d'activités inventives : une entreprise « poste » un problème en ligne, un grand nombre d'individus soumettent des solutions, l'idée gagnante reçoit une récompense et l'entreprise utilise cette idée pour son propre compte. Des sociétés comme Nestlé ou Unilever sont de fervents adeptes de ces nouveaux modes d'innovation pour lesquels la capacité à poser le problème de manière assez précise et à filtrer les réponses est primordiale.

La promotion internationale des spécialités régionales facilitée

La plupart des entreprises alimentaires sont de petite taille ; leurs produits sont particulièrement représentatifs du « savoir-faire » français. Ceux-ci se distinguent des produits de très grande consommation emblématiques des grands groupes par leur typicité (propriétés sensorielles spécifiques, rattachement à un terroir, procédés de fabrication ancrés dans la culture et la tradition françaises).

À l'exception de la filière viticole, l'insuffisance de leurs moyens est un frein à l'accès aux marchés internationaux alors qu'ils pourraient être les ambassadeurs de la gastronomie à la française.

L'appel aux technologies numériques devrait permettre d'inverser cette tendance en mutualisant les outils promotionnels et de commercialisation au sein de groupements d'entreprises. Deux chantiers pourraient être ouverts à l'initiative des professionnels au niveau régional : la construction d'un catalogue numérique des produits proposés à l'exportation et l'accès à des entrepôts partagés capables d'assurer dans les meilleurs délais la livraison des commandes chez

leurs clients, partout dans le monde.

Cette initiative viendrait compléter les dispositifs d'accompagnement des entreprises françaises à l'international regroupés au sein de *Team France Export* (soutiens proposés par les Régions, les services de l'État, Bpifrance, Business France, les chambres de commerce et d'industrie). Cette démarche devrait être systématiquement accompagnée par une réflexion sur l'adaptation des propriétés gustatives de produits « typiquement » français aux attentes des consommateurs étrangers tout en gardant l'image très positive des produits du terroir[97]. Elle pourrait s'amplifier en favorisant de nouvelles alliances entre le secteur alimentaire, le secteur du numérique et d'autres secteurs cherchant à valoriser le savoir-faire français.

DE NOUVEAUX SERVICES POUR LES CONSOMMATEURS

Des nouveaux comportements d'achats

Conséquence de la généralisation de l'accès à des sites internet et à des applications numériques sur smartphones, les pratiques d'achat des consommateurs sont marquées depuis quelques années par :

- un accès rapide et de plus en plus complet aux caractéristiques des aliments conduisant à des choix se voulant plus éclairés (valeur nutritionnelle, absence d'allergènes, produits locaux ou français, impact environnemental, etc.) ;
- une croissance de la consommation hors domicile avec une facilité accrue de choisir un lieu de restauration correspondant à ses préférences ;
- une influence croissante des entreprises et des distributeurs à travers des messages largement diffusés pour orienter les achats ;
- la possibilité de passer une commande et de la réceptionner sans quitter son domicile.

La numérisation est donc en train de créer une relation marchande différente entre le fournisseur d'aliments et son client. L'objectif d'une alimentation davantage personnalisée devient plus facile à atteindre avec la possibilité de proposer du « sur mesure » livré à domicile (la multiplication des sites proposant des repas équilibrés pour maigrir témoigne de cette tendance). La livraison de repas peut se substituer aisément à l'achat d'ingrédients qu'il faudrait ensuite cuisiner. L'un des effets de cette évolution est de faire du « service rendu » un paramètre de plus en plus important des pratiques d'achats des consommateurs, au-delà des seules propriétés intrinsèques des aliments.

C'est, par exemple, le cas pour les consommateurs qui souhaitent s'approvisionner avec des produits locaux, au plus proche de leur domicile (on les appelle des locavores), considérant qu'ils sont « par nature » meilleurs pour leur santé et plus respectueux de l'environnement. Le

97 De grands groupes ont déjà intégré cette démarche adaptative (Danone, Coca-cola, Ferrero)

« numérique » doit les aider à contourner les difficultés qu'ils rencontrent pour savoir d'où viennent leurs aliments et comment ils sont fabriqués[98]. De façon intéressante, la crise sanitaire récente de la Covid-19 a servi d'accélérateur aux formules de vente directe et aux circuits courts. Les acteurs locaux ont souvent créé leurs propres sites web, effort amplifié dans certaines régions par la création de plateformes numériques gratuites recensant les producteurs et commerçants livrant leurs produits à domicile dans une zone géographique donnée. L'exploitation du numérique pourrait être encore élargie pour favoriser l'épanouissement du secteur par la création d'une plateforme nationale du type «Doctolib» qui donnerait plus de visibilité à ces initiatives en ne les limitant pas à des initiés.

Autre évolution envisageable, l'ordinateur familial, gérant vos stocks et connaissant les besoins de chacun des membres d'une famille, fait les commandes à votre place (Figure 16).



Figure 16 – L'ordinateur fait des courses adaptées à chaque membre de la famille[99].

Un fort impact des applications pour smartphone

Un autre facteur d'évolution des pratiques alimentaires est l'accès à des informations sur la valeur nutritionnelle des aliments (86 % des consommateurs souhaitent obtenir plus d'information sur les aliments qu'ils achètent, dont 28 % toutes les informations possibles). Celles-ci sont

98 Anne Rollet, 2019, Académie d'agriculture, Encyclopédie : *Question sur… Économie et politique rurale : le couple «produit/territoire», les potentiels du numérique.*

99 Imaginaire, et donc imaginable, la carte Vitaliment remplace la carte vitale après s'être enrichie de données sur votre génome, votre microbiote, vos allergies et intolérances aux aliments. Les données qu'elle contient permettent d'optimiser votre régime alimentaire.

distillées sur les réseaux sociaux et par ailleurs sur des applications dont l'une – Yuka[100] – est particulièrement populaire.

Une nouvelle génération d'applications prenant en compte les spécificités des consommateurs (allergie, intolérance, régimes particuliers, choix sociétaux et culturels) commence à voir le jour[101]. C'est le cas de celles notant la « valeur environnementale » des aliments à laquelle les Français accordent une importance croissante, alors qu'elle était loin d'apparaître comme une priorité[102] pour l'ensemble de la population il y a quelques années. D'autres applications sont plus originales (et marginales), comme « Wise Drinking » dont l'objet est de vous aider à mieux gérer votre consommation d'alcool.

Avec la multiplication de ces applications, les messages peuvent devenir incompréhensibles dans la mesure où ils sont parfois contradictoires, entre eux et avec la notation Nutri-Score (directement visible sur les emballages). C'est ce qu'illustre la Figure 17 dans laquelle nous avons comparé les notes données par l'application Nova (aliments ultra-transformés) avec les notes Nutri-Score.



Figure 17 – Les consommateurs font face à des messages parfois contradictoires

Il est inquiétant de constater que les consommateurs n'accordent pas davantage de crédits aux supports validés par les autorités sanitaires (tel Nutri-Score dont l'encart qui suit détaille les impacts sur l'évolution des ventes) qu'à ceux proposés par des start-up indépendantes.

100 L'application Yuka a été téléchargée plus de dix millions de fois, ce qui ne veut pas dire qu'elle soit utilisée par un nombre équivalent de consommateurs : selon un sondage réalisé par Made in Survey en 2020, près de 30 % des utilisateurs d'applications d'aide aux achats de produits de grandes consommations ne s'en servent plus..

101 Voir par exemple : La Note Globale : https://lanoteglobale.org/la-note-globale/

102 Enquête Ipsos/Agriconfiance, 2014.

Impact de Nutri-Score

Fin 2019, 14 % des consommateurs reconnaissaient tenir compte de Nutri-Score pour faire leurs achats. Selon une étude portant sur 92 000 produits, les ventes des produits notés A, B et E ont le plus augmenté (de 1 %), alors que celles des produits notés C diminuaient dans les mêmes proportions (1,1 %). Cette même étude fait ressortir que les produits A représentent 30 % des ventes, alors que celles cumulées des produits C et D en représentent 50 %. Ce sont les produits sucrés (épicerie, boissons et surgelés) qui ont les moins bonnes notes. Nutri-score est davantage pris en compte pour les familles de produits qui présentent des notes hétérogènes, comme les conserves de légumes où le score A séduit 96 % des acheteurs de la catégorie quand les produits B sont à 63 %, les C à 28 %.

Une alimentation plus personnalisée

Avec les progrès dans l'acquisition et le traitement des données, les chercheurs disposent d'outils remarquablement efficaces pour mieux comprendre l'impact d'un nombre croissant de paramètres sur la santé. C'est particulièrement vrai dans le domaine médical, mais c'est également visible pour les travaux des nutritionnistes. Il n'est pas dans l'objet de ce rapport de présenter dans le détail les découvertes de ces dernières années sur les relations entre « alimentation » et « santé ». La présentation des recherches en cours sur le microbiote suffira à illustrer les bénéfices que les consommateurs pourront attendre de ces études.

Le microbiote intestinal, dont la caractérisation et les fonctions représentent une rupture majeure de la biologie en ce début de XXIe siècle, est composé d'une centaine de milliards de bactéries de nombreuses espèces vivant en symbiose avec notre organisme. Les observations montrent une hétérogénéité significative des microbiotes intestinaux entre les individus. Les déséquilibres de la flore intestinale (dysbioses) sont aujourd'hui suspectés d'être à l'origine de nombreuses pathologies (obésité, diabète, maladies cardio-vasculaires, allergies, maladies inflammatoires), voire de troubles du système nerveux.

L'alimentation pourrait s'avérer un moyen de corriger ces déséquilibres une fois mieux connues les relations entre les régimes alimentaires, la composition du microbiote et la santé. Mais beaucoup d'études restent à mener avant d'aboutir à des recommandations pratiques pour agir de manière positive sur notre microbiote *via* la composition de nos repas.

À ce jour, la très grande majorité des bactéries composant le microbiote est d'espèce inconnue ; pour celles identifiées, leur culture *in vitro* est difficile. La progression dans la connaissance du microbiote intestinal résulte des avancées de la métagénomique. Cette dernière consiste à caractériser l'ensemble de l'ADN de populations de microorganismes en les considérant globalement dans un échantillon de microbiote. Ces analyses développées notamment en France par Métagénopolis, démonstrateur industriel de l'Inrae, comportent des étapes multiples faisant appel à la bioinformatique et à l'exploitation des données massives *via* l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique.

Les projets de Métagénopolis visent à analyser l'hétérogénéité du microbiote chez 100 000 individus en bonne santé. Les résultats de ces études, auxquels il faut ajouter des données métabolomiques et phénotypiques, aboutiront à un nombre considérable de données. Le projet « Frenchgut » s'intègre dans un projet international plus ambitieux portant sur un million d'individus pour lesquels les prélèvements sont associés à un questionnaire sur des paramètres « santé » et « comportement ». L'analyse des données ainsi récoltées devrait permettre d'accéder à des relations de causalité entre alimentation, microbiote et santé. L'espoir des chercheurs est d'ouvrir ainsi la voie à des avancées significatives portant sur une alimentation préventive et personnalisée scientifiquement argumentée.

Au-delà des connaissances fondamentales sur la diversité des espèces bactériennes du microbiote et son effet sur la santé, ces travaux visent de manière plus pragmatique à identifier des espèces bactériennes susceptibles d'être utilisées comme probiotiques[103] ou encore de rechercher des prébiotiques susceptibles de favoriser leur développement. Par exemple, cette approche est l'objet d'une collaboration entre Métagénopolis et la société Bridor pour définir la formulation d'un pain enrichi en fibres dont la consommation aurait un effet favorable sur le microbiote.

À terme, ces études pourraient avoir des conséquences importantes sur la définition des régimes les mieux adaptés à certaines catégories de population, voire à certains individus. Il faut néanmoins s'inquiéter de ce que des start-up présentes sur le web, « flairant » de nouveaux marchés, proposent d'analyser le microbiote de leurs clients aux fins de leur recommander un régime qui leur serait spécifiquement adapté. Au stade actuel des connaissances, ces offres sont pour le moins prématurées.

103 Probiotique/Prébiotiques : les probiotiques sont des microorganismes « alimentaires » bons pour la santé; les prébiotiques sont des ingrédients qui favorisent le développement des probiotiques.

RECOMMANDATIONS

L'impact disruptif du suivi des achats numérisés pour « tout savoir » sur le comportement d'un consommateur afin de lui adresser des messages ciblés soulève à l'évidence des questions éthiques dont peu d'industriels ou de distributeurs semblent s'être emparés. Chercheurs et responsables d'entreprises devraient mener une réflexion commune pour éclairer la société et les pouvoirs publics sur ce sujet.

Les applications numériques qui revendiquent aider les consommateurs lors de leurs achats affectent le comportement de ces derniers et par voie de conséquence celui des distributeurs et des entreprises alimentaires à la recherche de « bonnes notes ». Eu égard à leur succès et à leur impact, les pouvoirs publics devraient demander à l'ANSES d'évaluer la pertinence des méthodologies utilisées pour construire les notes qu'elles attribuent aux aliments et aux boissons. Il faut noter ceux qui donnent des notes.

Une mutualisation des moyens (catalogues et entrepôts partagés) pourrait aider les moyennes et petites entreprises à davantage exporter leurs productions. Les organisations professionnelles régionales en liaison avec les présidents de région devraient jouer un rôle moteur en ce domaine

.

Conclusions

S'approprier les technologies numériques, de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage par les données pour mieux concevoir, fabriquer, contrôler et distribuer des aliments répondant aux demandes des consommateurs et respectant les contraintes environnementales : pour les industries alimentaires, une impérieuse nécessité et une grande ambition que les pouvoirs publics doivent significativement soutenir.

Les technologies numériques sont en très rapide évolution. C'est en partant des nouveaux horizons qu'elles offrent aux industries alimentaires que cette conclusion est construite. Le lecteur qui souhaiterait avoir une vue d'ensemble sur le contenu de ce rapport est donc invité à se reporter à la synthèse présentée au début de ce document.

Le système alimentaire, celui qui produit et distribue nos aliments, de la ferme à notre assiette (de la fourche à la fourchette), occupe une place centrale au sein de la société et de l'économie française en raison des millions d'emplois, directs ou indirects, qu'il génère. Au sein de ce système, le métier des industries alimentaires est de transformer des matières premières de composition variable (les produits agricoles) en aliments et boissons de composition et de qualité constantes. Depuis quelques années, des inquiétudes se manifestent sur la compétitivité de ces industries marquées par une destruction de valeur sans précédent (5 milliards en cinq ans) et une dégradation du bilan du commerce extérieur.

Ces industries ont cependant montré une forte résilience et une remarquable agilité dans le contexte de la pandémie de Covid-19, comparativement à d'autres secteurs, en maintenant leurs activités et en les adaptant à la situation. L'amont agricole et la transformation ont globalement conservé leurs niveaux de production. Cette situation temporaire a permis de mettre en évidence des points faibles du secteur sur des souverainetés perdues et incité les entreprises à mieux anticiper ces crises en investissant davantage dans l'innovation.

Certes, les industries alimentaires font preuve d'innovations pour adapter la qualité de leurs

produits aux demandes des consommateurs de plus en plus fortement exprimées et diversifiées, mais ces innovations sont presque exclusivement de nature incrémentale. Elles consistent en des améliorations des formulations et des procédés de fabrication. Quant aux innovations de rupture, peu nombreuses, elles se heurtent à des freins culturels et à leurs taux de rentabilité interne.

Dans ce contexte, la transition numérique présente un caractère stratégique primordial pour aider les entreprises alimentaires françaises à améliorer leurs productions et à retrouver leur compétitivité. Cet impact concerne tous les secteurs d'activité des entreprises : conception et fabrication des aliments, traçabilité des produits tout au long de la chaîne alimentaire, adaptation à la demande des consommateurs-citoyens, pratiques d'achat de ces derniers, gestion[104]. La digitalisation de la société intervient également de façon croissante dans les achats alimentaires par le biais des applications « smartphone » qui font entrer certains consommateurs dans une ère de choix alimentaires orientés par des « codes-barres ».

UN ENJEU STRATÉGIQUE POUR LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

L'association nationale des industries alimentaires (Ania) a proposé six pistes d'actions prioritaires pour assurer la compétitivité des industries alimentaires françaises :

- reconquérir la compétitivité des métiers de la viande ;
- l'industrie alimentaire du futur passe par le numérique ;
- s'imposer dans les emballages et les conditionnements adaptés à la demande et éco-conçus ;
- prendre le leadership du froid durable ;
- les ferments et les produits fermentés avec une carte d'excellence à jouer pour la France, en Europe et dans le monde ;
- *« Protéines du futur » :* un enjeu stratégique pour la compétitivité des industries agroalimentaires françaises.

Comparativement aux autres priorités, dont certaines ne concernent qu'un nombre limité d'entreprises, l'Ania aurait pu souligner plus fortement l'importance du déploiement des technologies numériques, notamment de l'intelligence artificielle et du traitement des mégadonnées, ainsi que l'ont collectivement manifesté des entreprises d'autres secteurs industriels. Il est clair, en effet, que les technologies numériques jouent et vont jouer un rôle de plus en plus important dans toute la chaîne agroalimentaire. Ce phénomène provient de la concordance entre évolution des demandes et nouvelles capacités offertes par le numérique pour y répondre.

L'une des caractéristiques des technologies numériques est de permettre une approche systémique globale de toute la chaîne agroalimentaire autour du concept de gestion du cycle de vie des produits. Ceci devrait contribuer à une optimisation globale de l'ensemble des procédés

104 L'impact des technologies numériques dans le domaine de la gestion n'est pas traité dans ce rapport.

et des coûts en intégrant les aspects logistiques, les impacts environnementaux et les enjeux de l'économie circulaire : les technologies numériques peuvent aider les industriels à répondre à des besoins qui se regroupent en deux axes :

- répondre aux demandes des citoyens pour une meilleure qualité des aliments, des prix abordables, une traçabilité totale, une sécurité sanitaire maximale et le moins d'impact environnemental en prenant en compte que ces derniers seront utilisateurs de nouveaux « outils », notamment numériques, permettant de juger de la qualité et de l'historique des produits (valeur nutritionnelle, impacts environnementaux…) ;
- optimiser les différentes étapes de leur métier (conception de nouveaux produits, production, distribution), assurer le suivi et la traçabilité des produits, fournir aux consommateurs des services de plus en plus fiables et personnalisés.

Il est donc essentiel que ces technologies puissent trouver leur place au cœur de l'activité de l'ensemble des industries alimentaires, tout en évitant de creuser un fossé entre les grands groupes et les presque dix-sept mille ETI, PME et TPE du secteur en France.

Quatre niveaux d'intervention des technologies numériques

Face à ces besoins, les technologies numériques apportent des solutions grâce aux trois éléments suivants :

- la disponibilité de données numériques en nombre croissant ;
- des capacités de traitement numérique de plus en plus puissantes associées à des réseaux de diffusion à haut débit ;
- le développement de méthodes et d'outils numériques d'analyse, de modélisation et de traitement des données de plus en plus précis, associés à des logiciels largement diffusés.

Dans ce contexte, les apports du numérique interviennent principalement à quatre niveaux : un niveau amont concernant les données et trois niveaux d'applications.

Production, analyse et traitement des données

Générer des données fiables, y accéder et savoir les exploiter est la première étape incontournable du déploiement du numérique. En effet, pour concevoir et fabriquer des aliments, les industriels font face à un ensemble triplement complexe : complexité du système alimentaire, complexité de la composition et des propriétés des aliments, complexité du comportement des consommateurs. Les entreprises ont accès à un nombre croissant de données (données sur les matières premières, sur les procédés de transformation et leurs impacts sur l'environnement, sur

le suivi des produits dans la chaîne logistique et les réseaux de distribution, sur les achats et le comportement des consommateurs ; grandes bases de données qui sont pour certaines disponibles sous forme d'open data). Elles génèrent elles-mêmes des données qu'il s'agit d'ordonner et de hiérarchiser.

De nouveaux outils d'analyse et de traitement de ces données ont été développés. Il s'agit de méthodes d'analyse statistique et de méthodes d'intelligence artificielle comme l'apprentissage par les données qui apportent des techniques innovantes permettant d'appréhender plus complètement la complexité et le caractère aléatoire de certains phénomènes. Les grands usages associés à ces technologies sont la traçabilité des produits et des différents procédés, la garantie de sécurité sanitaire, l'assurance qualité et le suivi sur tout le cycle de vie. Les méthodes d'apprentissage par les données permettent aussi la mise au point de modèles reliant composition chimique et qualité nutritionnelle.

Conception de nouveaux produits

Les technologies numériques vont jouer un rôle important dans la conception des nouveaux produits, grâce aux outils de modélisation et de simulation ainsi qu'aux logiciels d'analyse et d'apprentissage par les données. Ces méthodes numériques apportent les avantages traditionnels de réduction des temps et des coûts de conception. Surtout elles permettent une étude d'un nombre beaucoup plus important de situations et sont donc un vecteur fort d'accroissement des capacités d'innovation. Il convient de noter le rôle que vont jouer les différents outils de modélisation avec le couplage entre les outils de modélisation mathématique (par exemple la dynamique moléculaire) et les outils d'apprentissage par les données. Ceci permet d'appréhender les phénomènes complexes dans leur globalité en contrôlant les différentes incertitudes qui sont inhérentes à ces phénomènes. Les technologies numériques vont permettre de déboucher sur la notion de jumeau numérique permettant une représentation virtuelle des produits et/ou procédés (jumeau numérique du produit, jumeau numérique de l'usine de fabrication). Ceux-ci assureront, grâce aux technologies d'identification des paramètres à partir des données disponibles à chaque instant, un suivi en temps réel de l'évolution des produits, et donc une prise en compte des différentes variations pouvant intervenir au cours du temps. Ces activités nécessitent la mise en place d'équipes pluridisciplinaires dans le cadre de projets collaboratifs réunissant centres de recherche académiques, instituts techniques et industriels du système alimentaire et du numérique.

Suivi et optimisation des procédés de fabrication

Une caractéristique spécifique de la filière agroalimentaire est le caractère non homogène des matières premières qui sont produites en amont et les phénomènes aléatoires intervenant dans la chaîne de transformation. Ceci nécessite la mise au point de nouvelles méthodes adaptées de commande et d'automatisation des processus couplant les approches traditionnelles reposant

sur des modèles mathématiques et les technologies d'apprentissage par les données. Cette approche couplée peut permettre d'aborder toute la complexité de ces procédés de transformation. Il s'agit d'un domaine au cœur de nombreuses recherches. Une autre utilisation de plus en plus importante concerne l'organisation et le fonctionnement des usines de transformation intégrant le suivi de production et les nouveaux outils de gestion de la production. Il s'agit d'exploiter dans ces usines les outils développés actuellement dans tous les secteurs manufacturiers sous le vocable de *« industrie 4.0 ».* Ils permettent notamment une meilleure utilisation des capacités de production, une plus grande agilité face aux variations des demandes, une diminution des stocks.

Nouvelles offres de services pour les consommateurs

Les technologies numériques vont permettre la mise à disposition de nouvelles offres de services en complément aux produits proprement dits : conseil nutritionnel, commande auprès de réseaux de fournisseurs locaux, livraison à domicile, fourniture de recettes personnalisées… Ceci correspond à une demande forte des consommateurs et permet aux fournisseurs de maintenir un contact avec les utilisateurs et donc de fidéliser ceux-ci. Cependant, la mise au point de ces offres, leur indispensable mise à jour et l'animation des réseaux sociaux associés à ces offres de service sont un investissement non négligeable pour les entreprises dont le retour sur investissement n'est pas toujours acquis. Il conviendra de concevoir des modèles économiques adaptés et innovants pour assurer la rentabilité indispensable, en distinguant les services gratuits et payants. Les entreprises doivent avoir accès à des technologies novatrices pour mieux identifier cette demande, analyser les conséquences de cette complexité et se doter des moyens pour y répondre.

Rechercher l'adhésion des consommateurs aux technologies numériques

Lors de son séminaire annuel des 11 et 12 octobre 2017, l'Académie des technologies[2] avait insisté sur la nécessité d'accompagner l'introduction de toute innovation par une étude de ses impacts sociaux et sociétaux. Cette recommandation s'applique tout particulièrement aux industries alimentaires dont on sait que les produits touchent les hommes au plus profond d'eux-mêmes.

Les consommateurs sont nombreux à penser que les industries alimentaires ne leur proposent pas des aliments bons pour leur santé. Les itinéraires technologiques de fabrication des aliments transformés sont opaques pour la majorité d'entre eux. Les associations de consommateurs désirent être mieux informées sur l'origine et la composition des produits. Pour répondre à cette demande, les messages envoyés par les professionnels ne manquent pas d'ambiguïté dans la mesure où ils font régulièrement référence aux qualificatifs « naturel » et « traditionnel », laissant implicitement croire qu'ils refusent les innovations technologiques.

Les professionnels du système alimentaire doivent mieux faire comprendre qu'il leur faut

s'appuyer sur les progrès de la science et de la technologie pour proposer aux Français une alimentation de qualité (c'est-à-dire garantir en quantité suffisante une alimentation quotidienne saine, sûre, conviviale et durable, notamment adaptée aux conditions de vie en milieu urbain). Ce constat s'applique tout particulièrement à l'utilisation des technologies numériques.

Les entreprises devront expliquer aux consommateurs que faire appel aux technologies numériques dans leurs entreprises n'est pas synonyme d'une artificialisation accrue des aliments. Elles devront également se pencher sur les problèmes éthiques posés par la collecte et l'utilisation de données touchant aux comportements individuels des Français.

UTILISER LES OUTILS NUMÉRIQUES AVEC PERTINENCE ET ESPRIT DE RESPONSABILITÉ

L'émergence d'une théorie ou d'une technologie de rupture entraîne parfois, tant de la part des professionnels que des citoyens, un enthousiasme qui peut conduire à en surestimer les pouvoirs et les retombées. Dans le cas du numérique, cette observation peut être illustrée par la position de Chris Anderson, rédacteur en chef de la revue d'informatique Wired, qui proclamait en 2008 : *« La méthode scientifique construite autour d'hypothèses que l'on teste, de modèles et d'expérimentations qui confirment ou infirment les hypothèses théoriques va devenir obsolète avec l'arrivée massive de données. La corrélation va suffire. »* Certains exemples donnent raison à Anderson, mais cette assertion a soulevé beaucoup de réactions dénonçant son caractère exagéré. Le théoricien de la physique Lee Smolin appelle à la prudence : *« l'informatique et la simulation numérique sont utiles s'ils sont utilisés par de bons scientifiques pour augmenter la puissance créative de leurs raisonnements. »*

C'est donc sur la base d'approches scientifiques solides qu'il faut « manier » le numérique et exploiter les nouveaux horizons qu'il ouvre aux professionnels. Les données sensibles doivent être utilisées avec esprit de responsabilité. Ces limites valent pour la recherche mais aussi, et sans doute plus encore, pour les applications commerciales à but lucratif. On doit par exemple s'inquiéter de voir de nombreuses start-up proposer des diagnostics nutritionnels qui reposent sur des corrélations manquant singulièrement de robustesse.

Les technologies numériques sont devenues un outil indispensable au secteur agroalimentaire pour répondre aux défis majeurs auxquels il est confronté en assurant sa compétitivité et en répondant aux demandes des consommateurs. Le développement de ces technologies, leur mise en œuvre et leur acceptabilité par le consommateur demanderont un investissement important pour lequel les pouvoirs publics doivent jouer un rôle fort.

Une question importante concerne l'usage des technologies numériques par les PME agroalimentaires qui constituent le tissu industriel principal pour cette filière. Les enjeux principaux portent sur l'acquisition du savoir-faire et l'appui technique pour la mise en œuvre de ces outils. Pour répondre à ces enjeux, des solutions à des conditions économiques acceptables doivent être rapidement apportées avec le soutien des pouvoirs publics.

Annexes

Annexe I - Conflits d'intérêt

Tous les membres du groupe de travail affirment sur l'honneur n'avoir aucun conflit d'intérêt.

ANNEXE 2 – EXPERTS AUDITÉS

Mathieu ALRIC, chargé d'études, ADIV.

Florence BERTAUX, directrice générale adjointe business development & communication, FANUC (Fuji automatic numerical control).

Xavier BOIDEVEZI, vice-président digital factory, groupe SEB.

Fabrice BOSQUE, responsable environnement, ITERG.

Benoit BUNTINX, directeur business creation, European Institute of Technology (Food).

Alexandre CAVEZZA, directeur exécutif, Metagénopolis, Inrae.

Anne-Cathy DETAEVERNIER, directrice nutrition, groupe Elior.

Hugo de VRIES, directeur de recherches, Inrae.

Séverine FONTAINE, directrice qualité, Carrefour.

Jérôme FRANÇOIS, directeur, Num-Alim.

Sébastien FROMENTIN, bioinformaticien, Métagénopolis, Inrae.

Jean-Philippe GIRARD, président, Eurogerm. Ancien président de l'ania

Françoise GORGA, directrice recherche et innovations, ania.

Wim HAETJIENS, directeur général research & innovation, unit bioeconomy & food systems at European Commission.

Christoph HARTMANN, Academic alliances and expertise development lead, groupe Nestlé.

Pascale HÉBEL, directrice du pôle consommation et entreprise, Credoc.

Bruno HÉRAULT, chef du centre d'étude de prospective, ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

Bastien HILLEN, CPG-Retail senior director, Dassault systems

Matthieu HUG, directeur général, TILKAL.

Jean-Louis RASTOIN, conseiller scientifique, chaire Unesco « Alimentations du monde ».

Catherine RENARD, directrice de l'Institut Carnot Qualiment.

Maxine ROPER et **Stefano VOLPI**, co-fondateurs, Connecting food.

Yoann ROUPIOZ, directeur d'unité adjoint, SyMMES, CEA.

Laurent SABOURIN, maître de conférences, UMR **6602**, UCA/CNRS/SIGMA, Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne.

Mehdi SINÉ, directeur scientifique, Acta.

Olivier TESTE, professeur des universités (management systems, machine learning), Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT).

Alberto TONDA, chercheur, Inrae.

Jean-Jacques TOULME, directeur de recherche Inserm et Société Novaptech.

Philippe VALET, professeur des universités (physiologie), directeur Institut RESTORE.

Jean-Pierre WILLIOT, professeur des universités (histoire contemporaine), Sorbonne Université.

ANNEXE III - LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE : DÉFINITIONS

Apprentissage automatique *(machine learning)*

L'apprentissage automatique est un champ de l'intelligence artificielle se fondant sur des approches mathématiques et statistiques qui permet par des outils informatiques d'apprendre et de développer des modèles numériques à partir des données.

Apprentissage profond *(deep learning)*

L'apprentissage profond est un ensemble de méthodes d'apprentissage automatique se nourrissant de données abondantes pour modéliser et comprendre des systèmes complexes avec un haut degré d'abstraction.

Chaîne de blocs *(blockchain)*

La chaîne de blocs (blockchain) est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée et fonctionnant sans organe central de contrôle.

Digitalisation-numérisation

La digitalisation (ou numérisation) est le processus ayant pour but de représenter un système ou un produit, un procédé, une activité en un ensemble de données numériques, ainsi que la mise en œuvre des outils logiciels permettant d'exploiter et traiter ces représentations numériques.

Mégadonnées *(big data)*

Les données massives désignent des grandes quantités de données dont les caractéristiques peuvent être très variées en termes d'origines, de volume et de structuration, et qui imposent l'utilisation de technologies et de méthodes analytiques particulières pour les collecter, les stocker, les traiter et les exploiter.

Exploration des données *(data mining)*

L'exploration des données a pour objet l'extraction d'un savoir ou d'une connaissance à partir de données par des algorithmes numériques en vue de les utiliser pour une application particulière. Elle repose sur la construction et l'utilisation d'algorithmes mathématiques.

Gestion de la chaîne logistique *(supply chain management)*

La gestion de la chaîne logistique vise à optimiser la gestion des flux tout au long de la chaîne de valeur d'un objet.

Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle réunit l'ensemble des théories et des techniques mises en œuvre en vue de réaliser de manière automatique des traitements numériques capables de simuler certains traits de l'intelligence humaine (raisonnement, apprentissage…). Elle sert notamment à reproduire par un ordinateur certaines capacités cognitives d'un être humain telles que l'apprentissage perceptuel ou le raisonnement critique.

Jumeau numérique

Un jumeau numérique est un modèle mathématique (un clone virtuel) d'un produit, un système, une ligne de production, un procédé, une chaîne logistique… permettant de simuler cet objet tout au long de son cycle de vie.

ANNEXE 4 - SOLUTIONS POUR LE DÉVELOPPEMENT DE CAPTEURS POUR LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

Solutions pour le développement de capteurs	Principes, méthodes	Illustrations
Mesure en ligne *in situ*	Création de capteurs nouveaux en cherchant un principe — physique ou chimique — se reliant à une variable pertinente du produit. Toutes les technologies sont admissibles à l'exception des biocapteurs qui ne sont pas appropriés du fait de l'impact du nettoyage ou de la dérive de leurs propriétés.	
	Adaptation et intégration de capteurs existants avec notamment les voies optiques (rayonnement en lumière visible ou non, analyse d'images). C'est une voie intense en applications, qui se caractérise toujours par le couplage d'un principe de mesure et d'un traitement numérique d'un signal pour le convertir en la variable recherchée.	Méthodes optiques proche infrarouge, caméras et analyse d'image, rayons X, ultrasons, chromatographie gaz, etc., avec des avantages comme l'absence de contact pour la plupart des techniques utilisant un rayonnement électromagnétique. Les méthodes d'IA associés à l'analyse d'images fournissent des capteurs très pertinents pour la classification de produits en contrôle qualité en temps réel.
Mesure par échantillonnage hors ligne	C'est le moyen idéal pour avoir accès aux variations de composition des produits ou à la présence de contaminants. Des mesures rapides ont été développées pour contrôler l'avancement de la transformation des produits dans les ateliers. En parallèle, les méthodes analytiques (faible limite de détection, besoin de préparation…) étaient utilisées au laboratoire pour des caractérisations précises. Une convergence logique est la réalisation d'analyses en temps quasi-réel, à côté de la ligne (at-line) et ce dans le cadre d'une procédure automatisée. L'avantage est d'apporter sur la ligne les compétences du laboratoire de contrôle. Les points-clés sont l'échantillonnage, le prétraitement des échantillons et la gestion des cycles (nettoyage, dosage, étalonnage). Ces analyseurs sont automatisés. Un avantage est l'intégration aisée au système d'information de l'entreprise, voire à un système blockchain.	Spectroscopie moyen infrarouge, fluorescence 2D, Raman. Biocapteurs, analyseur HPLC, spectrométrie de masse, chromatographie gaz, analyseur de gaz (infrarouge, ou autres).

Capteur logiciel, fusion de données	On peut envisager de créer une information élaborée, pour estimer une grandeur difficile à mesurer, à partir de plusieurs mesures simples et d'un modèle numérique. Le traitement est parfois simple (utilisation d'une corrélation), mais met en œuvre aussi des modèles complexes et non linéaires (issus de l'intelligence artificielle : réseau de neurones, logique floue, *data mining)*. Un modèle est calculé et appliqué ensuite comme un prédicteur. L'étalonnage est fait en amont, donc il est transparent pour l'utilisateur. Enfin, des modèles fondamentaux associés à des traitements d'analyse de la dynamique des phénomènes permettent de retrouver des états des procédés (encrassement d'évaporateurs par exemple). Cette voie de développement de solutions de mesures en temps réel est probablement la plus riche, car les capteurs non spécifiques bénéficient des retombées d'autres secteurs industriels et sont peu coûteux. Des dispositifs logiciels sont aujourd'hui proposés qui ne nécessitent pas de compétences spécifiques en modélisation.	L'approche la plus courante est celle du traitement simple de données. Il s'agit d'établir une corrélation entre la propriété cherchée sur le produit fini et une ou plusieurs grandeurs mesurées. Température, temps et pression sont les grandeurs les plus pratiquées pour des prévisions de teneur en eau, composition, destruction thermique de composés, viscosité… des procédés. Des traitements plus élaborés comme les calculs de cinétique donnent accès à de nouvelles informations ; consommation en sucre en vinification par exemple.
Mesure via les opérateurs humains	Pour des grandeurs organoleptiques (goût, arôme) notamment, il y a peu de capteurs, même si les capteurs mesurant la composition des produits ou des gaz donnent des informations parfois suffisantes. Des automatismes peuvent fonctionner sur la base de mesures humaines réalisées en atelier de production.	Approches IA très diverses mises en œuvre : systèmes experts, réseau de neurones, logique floue, apprentissage automatique.

ANNEXE 5 – SIGLES UTILISÉS

Acta	Association de coordination technique agricole
Actia	Association de coordination technique pour l'industrie agroalimentaire
ACV	Analyse de cycle de vie
Ademe	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'*énergie*
Adiv	Association pour le développement de l'industrie de la viande
Ania	Association nationale des industries alimentaires
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
Ciqual	Centre d'information sur la qualité des aliments
Credoc	Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie
ETI	Entreprises de taille Intermédiaire
ERP	Enterprise Resource Planning
Giec	Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
Inrae	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
ISO	Organisation internationale de standardisation
ITERG	Institut des corps gras
IUFoST	International Union of Food Science and Technology
OGM	Organisme génétiquement modifié
PLM	Product life management
PME	Petites et moyennes entreprises
TPE	Très petites entreprises

Alors que les industries alimentaires occupent en France la première place industrielle en termes d'emplois et de chiffre d'affaires, des inquiétudes se manifestent, marquées par une destruction de valeur sans précédent et un déclin dans les échanges à l'intérieur de l'Europe.

Dans ce contexte, après une présentation de l'évolution des comportements des Français, ce rapport propose une vision prospective de l'utilisation du numérique et de l'intelligence artificielle dans des domaines allant de la conception à la distribution des aliments. Cette vision est assortie de nombreuses recommandations.

L'Académie des technologies estime que la transition numérique présente un caractère stratégique pour aider ces industries à répondre aux nouvelles exigences de la société et à retrouver leur compétitivité. Elle considère également que l'appropriation du numérique par le secteur devrait se traduire par une amélioration de la qualité des aliments, sensorielle et nutritionnelle, de leurs impacts environnementaux et de leur traçabilité.

Ce rapport souligne enfin la nécessité d'un accompagnement des pouvoirs publics spécifique aux industries alimentaires pour réussir cette transition.

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies .fr
www .academie-technologies .fr

©2021 Aacdémie des technologies

ISBN : 979-10-97579-77-2

979-10-97579-77-2

Couverture : ©industrieblick - stock.ado-