

Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour les consommateurs et pour les entreprises

Annexes

Auteurs de la publication :

Hélène BOURGADE

Olivier CHARTIER

Elodie CLUZEL

Nicolas HÉMON

Patrice DOLE (CTCPA)

François ZUBER (CTCPA)

Arnout FISCHER (Université de Wageningen)



Étude commanditée par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, et
par le ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique.

Ce document n'engage que ses auteurs et ne constitue en aucun cas le point de vue des ministères commanditaires.

Les innovations technologiques, leviers de réduction
du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour
les consommateurs et pour les entreprises



Annexe : Fiches technologiques

MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE

Stéphanie BORDES	MAAF/ DGPAAT
Marie-Christine CHAPELLE	MEIN/CGEJET
Perrine COULOMB	MAAF/DGAL
Franck FAIVRE	MAAF/DGAL
Laura FARRANT	ANIA
Julien FOSSE	MAAF/DGAL
Franck FOURES	ANSES/DER
Bénédicte GARBIL	MEIN/DGE
Françoise GORGA	ANIA
Geneviève HABELLION	MAAF/DGAL
Marie-Hélène JOUIN-MOULINE	MEIN/DGE
Frédéric KAROLAK	MEIN/DGE
Marie-Christine LE GAL	MEIN/DGE
Noël LE SCOUARNEC	MEIN/DGE
Madeleine LESAGE	MAAF/SG/SSP/ CEP
Laura MARLEY	ANIA
Gérard MATHIEU	MAAF/CGAAER
Aïnhua PARÉ	MAAF/DGAL
Sophie PERIZ-ALVAREZ	MAAF/DGAL
Charles PERNIN	CLCV
Olivier ROUXEL	MEIN/DGE
Florence SCARCI	MEDDE/CGDD/SEEI
Ariane VOYATZAKIS	BPI France Financement
Éric ZUNINO	MAAF/DGAL

La conduite des entretiens et la rédaction du présent rapport ont été réalisées par le cabinet de conseil :

EUROQUALITY

8 rue de l'Isly

75008 PARIS

Tél. : +33 (0)1 44 69 99 80

Fax : +33 (0)1 44 69 99 81

<http://www.euroquality.fr>

Consultants :

Hélène Bourgade (EUROQUALITY) ;	Patrice Dole (CTCPA) ;
Olivier Chartier (EUROQUALITY) ;	François Zuber (CTCPA) ;
Elodie Cluzel (EUROQUALITY) ;	Arnout Fischer (Université de Wageningen).
Nicolas Hémon (EUROQUALITY) ;	

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des acteurs ayant participé à cette étude, tant pour leur disponibilité, que pour la qualité des informations qu'ils nous ont délivrées au cours des différentes interactions.

Nous tenons en particulier à remercier les membres du comité du pilotage pour leur implication et les discussions et retours au cours des différentes réunions tout au long de ce projet qui témoignent de l'intérêt porté à cette étude.

Sommaire

INTEGRATEURS TEMPS TEMPERATURE.....	12
DETECTION DE TRACEURS	25
EMBALLAGES INSTRUMENTES PAR DETECTION DE MICROORGANISMES.....	35
EMBALLAGES PIEGEURS	43
EMBALLAGES EMETTEURS.....	55
EMBALLAGES A LIBERATION CONTROLEE D'ACTIFS ANTIMICROBIENS	60
BIOPRESERVATION	67
BIOPRESERVATION PAR LES PHAGES	79
TRACABILITE ET TECHNOLOGIES RFID	85
NOUVEAUX POLYMERES D'EMBALLAGES AVEC HAUTES PROPRIETES BARRIERES.....	96
COATINGS MINERAUX TECHNOLOGIES PLASMA	102
COATINGS ORGANIQUES NANOCHARGES.....	112
MATERIAUX D'EMBALLAGE NANOCHARGES DANS LA MASSE	119
EMBALLAGES RESPIRANTS PAR TECHNOLOGIES DE MICROPERFORATION	128
EMBALLAGES A PERMEABILITE SELECTIVE	137
EMBALLAGES BIO-SOURCES	144
HAUTES PRESSIONS	152
CHAUFFAGE MICROONDES	164
CONDITIONNEMENT ASEPTIQUE	175
CHAUFFAGE OHMIQUE	185
LUMIERE PULSEE - ILHDE.....	194
IONISATION	209
DECONTAMINATION CHIMIQUE DE SURFACE DES ALIMENTS.....	225
DECONTAMINATION DES EMBALLAGES PAR PLASMAS.....	236
TECHNOLOGIES MONOCOUCHE RECYCLABLES.....	245
EMBALLAGES MINIMISANT EN TOUTES CONDITIONS LES PHENOMENES DE MIGRATION	253

INTEGRATEURS TEMPS TEMPERATURE

Intitulé complet : Emballages avec indicateurs Intégrateurs de Temps et Température

Fiche consolidée par Nathalie Gontard (Université Montpellier), Coralie Gallis et al (CEA Grenoble)

Données clés

Résumé

La puce fraîcheur permet d'adapter la DLC à l'évolution réelle du produit, en apportant plus de sécurité alimentaire et une possible diminution du gaspillage, ce qui crée une relation de confiance avec le consommateur.

Il y a déjà plusieurs essais de port d'indicateurs ITT sur les produits finaux mais aucun n'a été concluant pour cause d'un grand nombre de retours produits. Ils sont aujourd'hui utilisés essentiellement en « B to B ».

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Les évaluations de durée de vie des aliments correspondent à des situations pour lesquelles le produit est considéré dans des conditions de température fixes et définies.

La validation expérimentale d'une Durée de Vie Microbiologique (DVM) comprend en général un scénario « worst case » avec une rupture de chaîne du froid, le plus souvent 1/3 de la DMV à +4°C, puis 2/3 à +8°C, par exemple.

En réalité le vieillissement réel d'un produit est caractérisé par une succession de conditions d'ambiances variables. L'altération à un temps donné correspond en effet à l'intégration de processus lents à basse température, et rapides à haute température. L'accélération de l'altération en fonction de la température est décrite par une énergie d'activation.

Beaucoup de phénomènes physiques ou chimiques sont accélérés par la température et peuvent être associés de façon simplifiée à une énergie d'activation. Les indicateurs ITT sont généralement des étiquettes extérieures à l'emballage (connues aussi sous la dénomination « puce fraîcheur ») qui changent d'aspect au cours du temps et de la température d'entreposage. Ils sont sélectionnés et mis au point afin que leur conversion soit caractéristique de l'état d'altération de l'aliment : pour ceci, la cinétique température dépendante du phénomène de virage de l'indicateur doit être identique à la cinétique apparente du processus de dégradation de l'aliment.

Plusieurs types d'indicateurs ITT existent :

- Les plus courants sont des encres thermo chromiques basées sur une réaction de polymérisation :



Figure 1: Fresh-Check Indicator Source: fresh-check.com

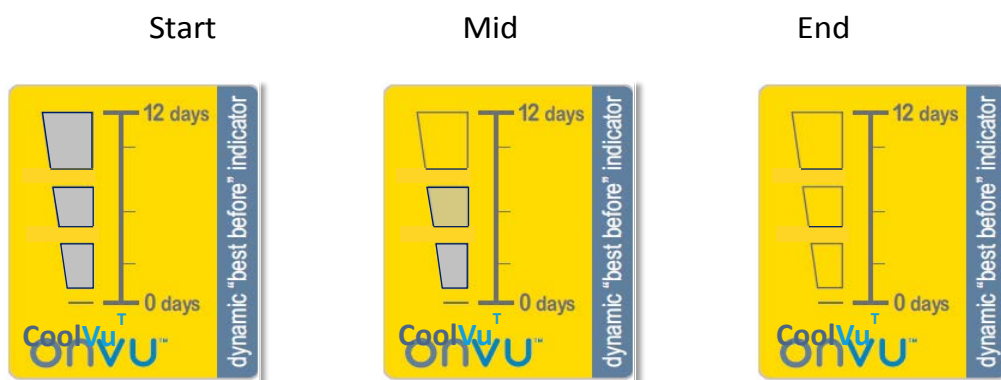


Figure 2: Indicateur temps température Source: Fresh point

- d'autres reposent sur le suivi de la cinétique d'un phénomène physique, comme le suivi de la migration par capillarité d'un liquide.
- d'autres enfin reposent sur des développements microbiologiques. Les phénomènes cinétiques associés étant exponentiels, ces indicateurs ne donnent généralement pas d'information monotone sur le stade de dégradation du produit, mais plutôt une information « tout ou rien », « use » / « do not use », caractérisée par exemple par l'effacement du code barre :



Figure 3 : Indicateur intégré au code barre Source : traceo.com

Ces indicateurs « tout ou rien » sont également utilisés en témoins de rupture sévère de chaîne du froid. Dans ce cas ils ne sont pas spécifiques à un produit donné ; ils alertent uniquement d'une anomalie inacceptable dans le cycle de transformation/distribution du produit ; pour cette utilisation ce sont des indicateurs « IT » qui donnent uniquement une information de dépassement de température.

Applications et aliments concernés :

Les champs d'applications sont les aliments frais, les produits laitiers, les produits traiteur, produits carnés, les produits de la mer, produits snack, de façon globale la majorité des produits emballés distribués réfrigérés puis stockés par le consommateur au réfrigérateur avant utilisation. Cette convergence des applications des indicateurs ITT donne une perspective toute particulière à leur développement, en lien avec le « réfrigérateur intelligent », innovation qui donnera une cohérence aux multiples modes de contrôle individuel des aliments qui ne permettent aucune gestion globalisée d'un ensemble de produits.



Figure 4 : Produits vendus avec ITT Source : Fresh point

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Les indicateurs sont ou ont été utilisés, avec plus ou moins de succès dans la distribution et par les consommateurs.

Le gaspillage se fait principalement en bout de chaîne. La technologie est donc ciblée sur l'acteur le plus en mesure de réduire le gaspillage. Les indicateurs ITT permettraient au consommateur de repérer les défauts de sa chaîne de froid (passage des produits dans le coffre des voitures, réfrigérateur à température trop élevée, réfrigérateur surchargé) et de l'avertir lorsqu'il faut se dépêcher de consommer un produit (puce entre 2 couleurs). Ils permettent donc aux consommateurs une gestion éclairée des stocks de produits à domicile qui ira dans le sens de la diminution du gaspillage.

Par ailleurs, les DLC des produits "frais" à courte durée de vie comprennent une marge de sécurité très importante qui provoque le rejet de produits qui ne devraient pas l'être quand les conditions optimales de conservation ont été respectées, ce qui est ou devrait être la plupart du temps le cas. De plus, certains produits ne sont plus consommables avant ces dates lorsqu'ils ont été conservés/distribués dans de mauvaises conditions d'où des accidents d'intoxications alimentaires. Les puces fraîcheurs évitent ces problèmes en offrant une meilleure transparence sur la qualité du produit. A terme, ces indicateurs pourraient remplacer la DLC.

Pour la distribution, l'utilisation d'indicateurs témoigne vis-à-vis du consommateur d'un objectif de gestion optimale des flux permettant d'allier la qualité des produits et la minimisation du gaspillage. Cependant, les avis sur l'influence que peuvent avoir les ITT sur le gaspillage divergent. Ces indicateurs sont à double tranchant. S'ils peuvent permettre à l'utilisateur de consommer des produits encore frais hors DLC, ils peuvent aussi entraîner de nombreux retours de produits. C'est pour cette raison que l'initiative de Monoprix d'imposer le port des puces fraîcheur aux produits frais n'a pas duré. Pour les industries, la chaîne de froid du consommateur est trop incertaine et entraînerait trop de retour produit. Il est également signalé des problèmes de changement de couleur trop rapide qui sont souvent dû à la chaleur des mains lors de manipulation du produit. D'autres distributeurs indiquent que toute indication d'état en dehors de l'extra frais est perçue négativement par le consommateur et démotive l'achat, ou encore pire, après l'achat génère et justifie un comportement de gaspillage.

Mais les bénéfices ont déjà été démontrés, ils incitent tous les acteurs de la chaîne, du producteur au consommateur en passant par le distributeur, à respecter les règles de bonne conservation d'un produit, et donc à limiter les pertes.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le caractère innovant consiste à gérer l'utilisation, la distribution, et la consommation de produits, non pas en fonction de leur état de maturation/altération théorique, mais dans leurs conditions d'ambiances effectives. Ceci conduit à envisager des durées de vie de produits supérieures ou inférieures aux données théoriques, et de gérer au mieux l'ensemble de leur cycle d'utilisation.

Des améliorations sont toutefois nécessaires pour que la technologie des indicateurs constitue un plus fort potentiel de réduction du gaspillage alimentaire. En effet le fait que le consommateur ait un accès trop détaillé aux informations de qualité du produit avant l'acte d'achat peut conduire à une augmentation du gaspillage alimentaire (non achat). Une solution peut être de revisiter le concept d'emballage intelligent, ne délivrant que des données numériques, lisibles chez le distributeur par l'unique distributeur, et par le consommateur à domicile via des outils adaptés tels que le réfrigérateur intelligent.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Les technologies d'indicateurs ITT ne posent pas de questions d'ordre sanitaire étant donné qu'elles reposent sur l'évolution d'un système extérieur à l'aliment emballé (étiquette généralement).

Cette technologie est encadré par le Règlement cadre 1935/2004/EC, art 4, publié le 27/10/2004 et le Règlement spécifique 450/2009/EC, publié le 29/05/2009 :

- Matériaux et objets actifs : matériaux et objets destinés à prolonger la durée de conservation ou à maintenir ou améliorer l'état de denrées alimentaires emballées; ils sont conçus de manière à comprendre délibérément des constituants qui libèrent ou absorbent des substances dans les denrées alimentaires emballées ou dans l'environnement des denrées alimentaires.

- Matériaux et objets intelligents : matériaux et objets qui contrôlent l'état des denrées alimentaires emballées ou l'environnement des denrées alimentaires.

Se pose alors la question de leur innocuité : à ce jour, en l'absence d'une liste établie de substances autorisées pour les emballages actifs et intelligents, tous les nouveaux produits doivent passer par la soumission d'un dossier à l'EFSA, ce qui constitue un frein provisoire au développement rapide des technologies.

D'un point de vue réglementaire, les indicateurs n'apportent qu'une information complémentaire aux seules données de référence que constituent les DLC des produits, et qui restent obligatoires. C'est pourquoi, il est extrêmement délicat d'apporter à un distributeur, et qui plus est à un consommateur, une information double, combinant pour exemple DLC et information fraîcheur. Comment un consommateur gèrera une situation de DLC dépassée associée une information « fresh » issue d'un indicateur ? Comment un distributeur doit gérer une situation de DLC non dépassée à une information «not fresh » issue d'un indicateur ? Qui certifie la conformité du produit ? Il faut donc trouver des solutions pour gérer cette complexité afin de faire évoluer les DLC vers des solutions plus justes et transparentes concernant la qualité des produits, et limiter ainsi les pertes et les risques liés aux marges de sécurité utilisées. Concernant la question de la responsabilité, la solution serait de mettre en place un Organisme certifié qui garantira la conformité des puces.

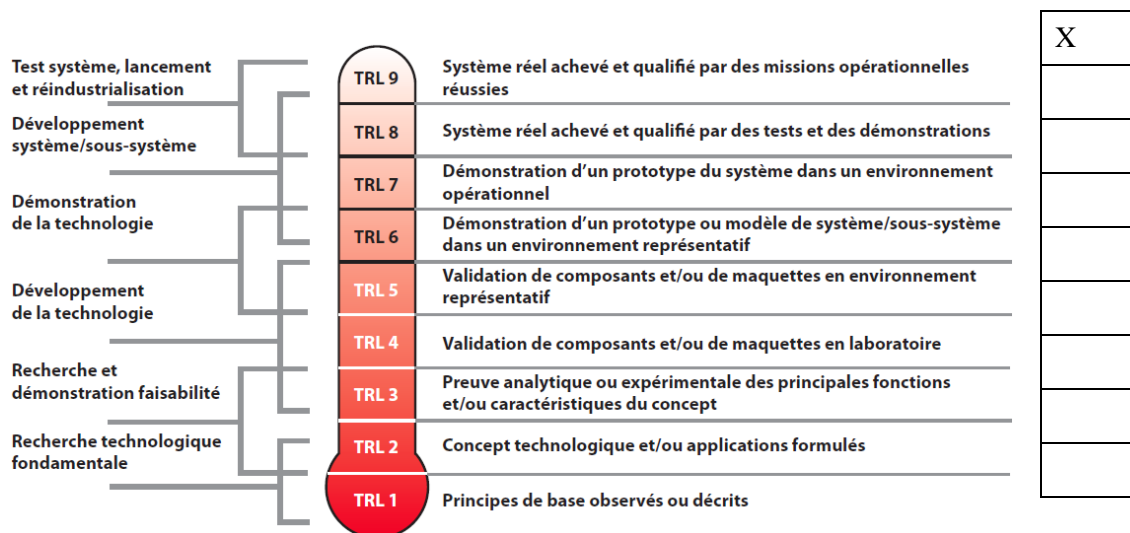
Pour les produits présentant une DLUO, la question est moins complexe, puisque la DLUO est une valeur de référence « indicative » ; dans ce cas les informations fraîcheur pourraient être utilisées à domicile en plus de la DLUO. Toutefois à ce jour, les puces fraîcheurs ne sont utilisées que pour les produits à DLC.

Dans tous les cas, la situation actuelle qui consiste à superposer, sans outil de compilation, des données de référence (DLC ou DLUO réglementaires) à d'autres informations de qualité de produits, est a minima une source de confusion ; d'où la nécessité de migrer vers une exploitation numérique de l'ensemble des données (capteurs et données réglementaires) qui apportera l'information la plus pertinente, ou préconisera directement la meilleure solution de gestion du produit en adéquation avec la réglementation.

En Europe, le paquet Hygiène mentionne une vérification de la température de la chaîne de froid mais laisse la liberté aux industriels de gérer ces contrôles. Aujourd’hui, il n’y a que des mesures ponctuelles. La réglementation pourrait donc jouer en faveur des indicateurs ITT en « B to B ».

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l’échelle Technology Readiness Level (TRL):



Dans leur mode actuel, les indicateurs ITT peuvent être considérés en pleine maturité. Si les produits sont complexes à mettre au point, leur production est généralement plutôt simple, ce qui explique que de nombreuses structures de petite taille ont pu s’engager dans cette activité.

En ce qui concerne la voie alternative reposant sur des indicateurs délivrant des informations exploitables numériquement, un effort conséquent de recherche technologique est actuellement en cours, notamment via des puces RFID à technologies adaptées, beaucoup moins coûteuses que les actuelles puces qui sont assez complexes dans leur élaboration, et compatibles en association avec les produits agroalimentaires les plus basiques.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Parmi les points de blocages techniques identifiés :

- *La complexité des informations à gérer* : Ces indicateurs présentent une hétérogénéité des modes de communication de l’information : apparition d’un pictogramme, disparition d’un code barre, changement de couleur... Ce manque d’homogénéité rend leur utilisation difficile pour le consommateur, qui peut en outre être amené à gérer des informations contradictoires avec la DLUO ou la DLC.
- *L’efficacité sur le gaspillage alimentaire* : La technologie risque de démotiver l’acte d’achat. Mais ce défaut, évoqué par les distributeurs, ne serait pas constaté dans les pays où les emballages indicateurs ont largement été développés.

- *Freins économiques* : sous une forme évoluée (avec exploitation numérique des données), la technologie envisagée (via RFID) présente un coût trop élevé, incompatible avec une utilisation large sur tous les types de produits agroalimentaires.
- *Freins réglementaires* : pas de freins réglementaires, mais une complexité technique à arbitrer sur le devenir d'un produit à partir d'informations quelquefois non convergentes (cf. DLC + information fraîcheur).

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Trois problématiques sont intéressantes à développer en parallèle :

- La connaissance et la maîtrise de la dégradation des produits alimentaires avec le développement du capteur de température, et la réduction des facteurs de sécurité associés à la DLC
- L'enjeu actuel: développer des systèmes simples, fiables et à faible coût. La technologie RFID peut générer des puces à faible coût selon le type de technologies utilisées.

Le capteur de température peut être un capteur intégré au réfrigérateur intelligent tel qu'un capteur optique/IR de détection de température pertinente et localisé au niveau d'un produit ou plus globalement dans le volume de stockage.

2.5 Principaux acteurs

- **France**

La France dispose de nombreux acteurs de la recherche en matière d'ITT :

- UMR IATE INRA Montpellier / Nathalie Gontard,
- Pôle Minalogic Grenoble, et structures associées (cf. CEA)
- Pôle Plastipolis Oyonnax, et structures associées

En complément de la recherche, on remarque des acteurs industriels, tels que la société Cryolog/Traceo en France.

- **Europe**

La R&D est également très active en Europe, où on remarque les firmes suivantes :

- Freshpoint et Bizerba en Suisse,
- Timestrip au Royaume-Uni.

- **Monde**

Le développement industriel reste cependant bien plus important au Japon et aux Etats-Unis, où on remarque la présence de leaders mondiaux :

- Fresh Max de Temp Time Corporation, N°1 mondial des ITT aux Etats-Unis
- MonitorMark de 3M aux Etats-Unis

Cette avance du Japon et des Etats-Unis s'explique par des raisons à la fois culturelles et réglementaires. La remise en cause en Europe du principe d'inertie de l'emballage ne date en effet que de 2004, depuis l'ouverture réglementaire sur les emballages actifs et intelligents.

2.5 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

- **Faiblesses :**

L'un des freins au développement de capteurs de nouvelle génération, compatibles avec une exploitation numérique des données, est la nécessité de mettre au point des technologies convergentes qui pourront être utilisées par les mêmes outils numériques. Or le marché des indicateurs ITT est aujourd'hui très divers et construit à partir d'innovations niches évidemment non conçues pour répondre à une quelconque compatibilité.

- **Forces :**

La France possède actuellement toutes les compétences amont et les acteurs industriels pour innover dans le domaine des emballages indicateurs ITT.

L'atout national est la possibilité, par l'intermédiaire des pôles (notamment Minalogic), de fédérer l'activité sur les emballages indicateurs ITT (et plus globalement sur les indicateurs), afin d'amener les entreprises françaises à converger sur des technologies compatibles.

3- Impact environnemental

De façon générale, cet aspect a été peu étudié, car il est difficile de faire entrer l'aspect conservation du produit et réduction des pertes alimentaires dans les analyses du cycle de vie.

Dans leur version actuelle, les indicateurs ITT représentent un impact environnemental matière non nul, mais acceptable au regard de leur potentiel de meilleure gestion des denrées alimentaires. En effet, ils sont majoritairement recyclables. Par ailleurs, Shockwatch précise que l'adhésif utilisé sur la puce est à base d'eau. La proportion d'énergie nécessaire à la production des ITT est raisonnable.

En revanche, pour la mise au point d'indicateurs plus évolués, dont on espère un fort impact sur la diminution du gaspillage alimentaire, l'impact environnemental de la technologie devra constituer le point de départ de la sélection, autant du point de vue de leur acceptabilité que de leur viabilité économique.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie des ITT a obtenu une note de 10 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclabilité	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	1	10

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans l'ensemble, les consommateurs sont assez favorables à l'utilisation d'indicateurs temps/température, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les consommateurs apprécient les avantages liés au service après-vente (suivi de la conservation du produit) ainsi que la facilité d'utilisation de cette technologie à la maison (Davis, 1989). Ils suggèrent notamment de créer un code couleur unique pour tous les produits. De plus, les consommateurs apprécient de pouvoir avoir une information dynamique en fonction des conditions de conservation du produit. Cette innovation paraît bien adaptée aux produits à risque : boucherie, charcuterie et surgelés. Ce système d'indicateurs pourrait également être utilisé dans les supermarchés pour mettre en place des systèmes automatiques assurant une réduction du prix des produits dont la date limite de consommation est proche.

Des doutes concernant l'apport réel de cette technologie par rapport aux attentes qui en sont faites se posent, notamment s'il est montré que les entreprises agroalimentaires ont la possibilité de frauder en

remplaçant le capteur. Enfin, certains consommateurs doutent de la fiabilité de la technique car celle-ci dépend de trop nombreux paramètres.

L'impact de la technologie sur le gaspillage est fonction de la sensibilité de l'indicateur. Si celui-ci est trop sensible, les consommateurs pourraient jeter plus d'aliments qu'il ne le faudrait en réalité. La perception des couleurs est subjective ; des consommateurs pourraient jeter des produits alors que la puce n'a pas encore viré de couleur. Les consommateurs craignent que cette situation puisse à terme devenir abusive dans l'industrie agroalimentaire.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Les premières puces fraîcheurs sont apparues aux Etats-Unis. Aujourd'hui, tous les pays sont à peu de chose près au même niveau sur cette technologie, c'est-à-dire à un développement faible dans le secteur de l'agroalimentaire. La société Evidencia vend en France sa puce fraîcheur « Timestrip » à hauteur de 15% pour l'industrie agroalimentaire et de 80% pour l'industrie pharmaceutique.

De plus, 95% de ces ITT sont utilisés en B-to-B. Ils se situent au niveau de la palette ou des suremballages. Le groupe Ferrero utilise par exemple l'indicateur sur ses plaquettes de chocolat (2 indicateurs par boîte de 24 unités).

La France avait, dans les années 2000, une légère avance sur les autres pays Européens suite à l'initiative de Monoprix qui imposait à tous ses fournisseurs de mettre des indicateurs ITT sur leurs produits frais. Picard avait également équipé ses surgelés de puces fraîcheur. La plus longue initiative était celle de Carrefour qui avait équipé ses cartons de lait de ces puces pendant 7 à 8 ans. Toutes ces initiatives sont à ce jour abandonnées à cause d'un trop grand nombre de retour de produits. Les indicateurs entraînaient plus de pertes que de bénéfices pour les distributeurs et producteurs. Une industrie Norvégienne innovante de fruits coupés frais vendus en sachet et le distributeur Metro utiliseraient encore ces produits.

Le secteur de la RHF utilise ces indicateurs sur leurs produits. Ces puces peuvent être à utilisation multiple car utilisées sur les palettes. A titre d'exemple, le traiteur aérien, British Airlines, utilise les indicateurs fraîcheurs Vitsab entre son usine et la réception à l'avion. Il dispose quelques indicateurs dans un chariot contenant 48 unités.

Les perspectives

Les courtes initiatives françaises ont permis aux puces fraîcheurs de se faire connaître auprès du consommateur qui devrait bien accepter ce produit. Dans d'autres pays voisins (Allemagne, Royaume-Unis, Ukraine), le consommateur est demandeur de cette information, selon l'équipementier Freshpoint. En effet, il y a aujourd'hui une demande de plus de traçabilité qui est favorable au développement des indicateurs ITT.

Cette technologie peut être appliquée à des produits à haute valeur ajoutée. D'ailleurs, les produits "Vineguard" de la société Freshpoint voient leur part de marché en croissance sur le vin, produit très sensible aux aléas de températures.

Les ITT appliqués sur des produits à forte valeur ajoutée pourront être vendus plus chers du fait d'une assurance de qualité supérieure.

Les industriels sont pour la plupart intéressés par cette technologie mais souhaitent une meilleure qualité pour éviter les retours non justifiés.

Les indicateurs temps/température pourraient être couplés à d'autres détecteurs (O₂, microorganisme) pour à terme remplacer totalement la DLC.

Rentabilité économique

Le prix des ITT est très variable. Il est fonction du modèle et des quantités achetées :

- Freshpoint : 0.02€/unité en moyenne
- La NIGK Corporation (firme japonaise) : moins de 0.10€/unité, avec dégressivité rapide du prix en fonction des quantités
- Evidencia : entre 10 et 20 cts d'euros
- Traceo/Cryolog : entre 10 et 40 cts d'euros
- Shockwatch : entre 50 et 70 cts d'euros

L'ajout d'ITT ne devrait pas augmenter le prix de revient de plus de 10 cts. Le consommateur devrait être prêt à payer pour avoir cette information, cela peut lui permettre de faire des économies en réduisant son gaspillage.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des ITT :

<p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sécurité sanitaire - Diminution du gaspillage - Education du consommateur - Bonne perception des consommateurs - Economiquement intéressante - Bonne perception au niveau de la RHF - Détection de rupture de la chaîne de froid - Gestion des stocks 	<p>Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Entraîne des retours au niveau industriel et distribution - Possibilité de confusion pour le consommateur - Coût additionnel
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Produits premium - Substitution de la DLC - Couplage avec d'autres détecteurs ou RFID - Demande de sécurité alimentaire des consommateurs 	<p>Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement - Responsabilité du produit

Les indicateurs ITT créent une relation de confiance avec le client lui apportant une information supplémentaire sur le produit. Aujourd’hui, les tentatives des industries ou des distributeurs sur les produits finaux n’ont pas été concluantes car les indicateurs entraînaient trop de retours sur les produits. Si aujourd’hui le consommateur a du mal à s’adapter et jette de manière compulsive les produits (puce non verte ou information contradictoire avec la DLC), à terme la puce devrait l’éduquer à réduire son gaspillage.

De plus, elle est ciblée sur le bon acteur, puisque c’est en bout de chaîne que le gaspillage est le plus important. Par ailleurs, le fait que des industriels aient essayé les ITT démontre qu’ils sont acceptables d’un point de vue économique. A terme, la réglementation pourrait favoriser son développement en permettant la substitution de la DLC par les indicateurs temps/température.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l’impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

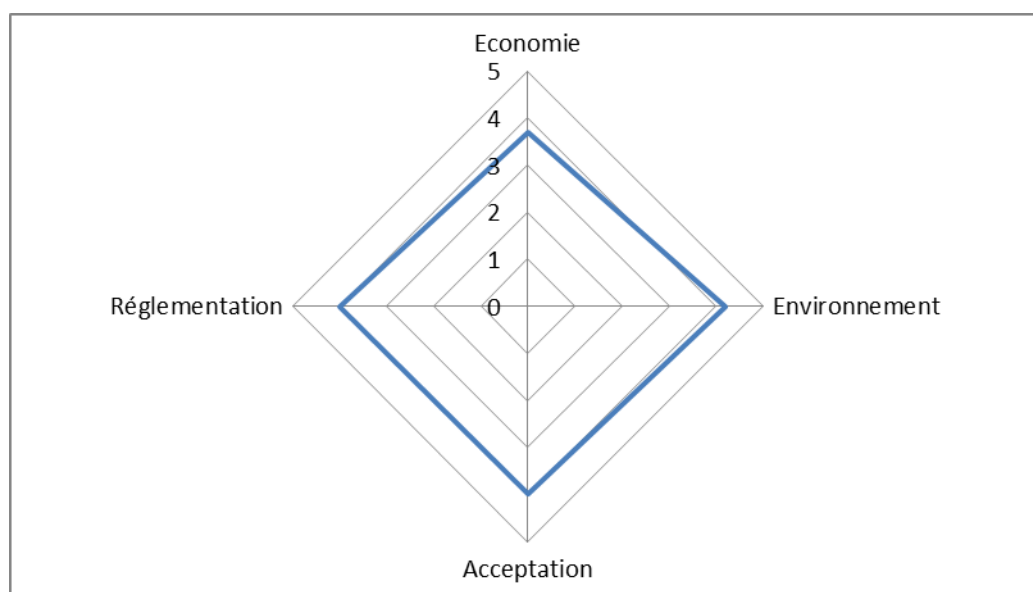


Figure 5 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Acteurs :

MonitorMark, de 3M,

http://solutions.3mfrance.fr/wps/portal/3M/fr_FR/FoodSafetyEU/FoodSafety/ProductInformation/ProductCatalogue/?PC_7_RJH9U5230ODK40IMRSPA7P2O65000000_nid=NFNLL5PG88be4W6C0B4X1Rgl

Technologies onVu et CoolVu, de Freshpoint et Bizerba, <http://www.freshpoint-tti.com/technology/default.aspx>

<http://www.bizerba-openworld.com/cms/fr/labels-consumables/labels-consumables.php>

Timestrip Plus, de Timestrip, http://www.timestrip.com/coldchain_food.php

TopCryo, de Cryolog (groupe Traceo), <http://www.traceo.com/fr/alimentaire/la-restauration-collective/chaine-du-froid.html>

Fresh Check, de Temp Time Corporation, <http://www.fresh-check.com/about.asp>

Warn Mark, de Shock Watch, <http://warmmark.com/>

(Sites consultés en octobre 2013)

Consommateurs :

DAVIS, F. D. 1989. Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13, 319-340.

Prix de marché :

Indicateurs temps NIGK sur la plateforme de vente aux professionnels Alibaba,

http://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=time+temperature+indicator+food

DETECTION DE TRACEURS

Intitulé complet : Emballages instrumentés par détection de traceurs (oxygène, CO₂, éthylène)
Fiche consolidée par Nathalie Gontard (Université Montpellier), Sébastien Lurol (CTIFL), Coralie Gallis et al (CEA Grenoble).

Données clés

Résumé

Le détecteur de traceur (oxygène, CO₂ et éthylène) apporte une information en plus au consommateur, qui augmente la sécurité alimentaire du produit et permettra une éventuelle diminution du gaspillage. Son développement industriel est encore faible aujourd'hui. Cependant, un couplage avec une puce RFID peut être prometteur.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Les emballages instrumentés par détection de traceurs ont pour objectif de détecter une anomalie, généralement via une dérive dans la composition de l'espace de tête. Ce sont donc des gaz ou des composés volatils qui sont détectés. Les composés les plus couramment tracés sont :

- **L'oxygène**, pour la détection d'une fuite (forte sensibilité attendue pour détection des défauts en amont des circuits de distribution) ou pour la détection d'une dérive inacceptable de composition d'atmosphère modifiée (dans le cas de défauts de perméabilité, avec un impact sur la conservation long terme). La composition de l'atmosphère environnant le produit contribue à la conservation de sa qualité, au même titre que l'abaissement de la température. Le gaz et la température conditionnent les vitesses de dégradation des aliments (oxydations, développement microbien etc...). Du coup, des technologies dites de conservation sous atmosphères modifiées, souvent mises en place pour réduire le taux d'oxygène par flush de gaz et/ou utilisation d'absorbants, sont utilisées depuis longtemps pour prolonger la durée de vie des produits et les DLC sont déterminées en fonction de ces conditions optimales de conservation. Les indicateurs d'oxygène permettent de garantir que l'atmosphère modifiée a été effective. On les appelle aussi **indicateurs de fuite**. S'il y a eu un problème d'étanchéité de l'emballage, ils permettent de le mettre en évidence. Les indicateurs de fuite d'O₂ fonctionnent généralement sur la base d'un indicateur coloré. Les systèmes les plus basiques fonctionnent sur la base d'une réaction d'oxydation (processus irréversible), d'autres systèmes apportent une information directement dépendante de la concentration, comme la technologie Ageless Eye.

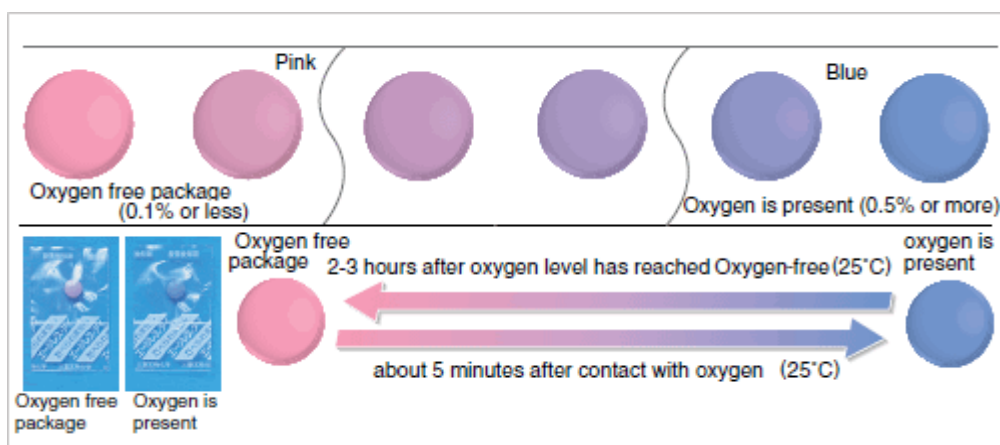


Figure 1 : Technologie Ageless Eye de Mitsubishi Gas & Chemical Inc (MGC)
 Source : Mitsubishi Gas & Chemical Inc., 2013¹

- **La détection du CO₂** peut avoir deux objectifs : soit apporter une alerte d'activité microbienne, si l'atmosphère initiale est très pauvre en CO₂, soit au contraire détecter une dérive sur une composition d'atmosphère modifiée. En effet, le CO₂ est couramment utilisé à forte concentration en MAP, en combinaison avec l'azote, pour limiter le développement des microorganismes. Le principe de détection du CO₂ repose généralement sur sa forte solubilité dans l'eau à qui il confère un caractère acide : le bleu de bromothymol, indicateur de pH, est fréquemment à la base de la conception des indicateurs CO₂. Il existe également des encres et pigments qui changent de couleur selon l'exposition au CO₂, suivant une réaction réversible.
- **La détection de l'éthylène** est préconisée en tant qu'alerte pour les processus de maturation des fruits. Plus généralement un certain nombre d'indicateurs fonctionnent sur le principe d'une réaction ou d'une interaction avec un composant organique émis au cours du processus de maturation. Ces indicateurs permettent d'avoir des indications sur la qualité (état de maturation) des produits (ici les poires) sans avoir à les toucher, la palpation des fruits et légumes par les consommateurs étant un facteur majeur de détérioration et donc de pertes. Par exemple, les puces de la technologie Ripesense® (photos ci-dessous), changent de couleur à partir des composés d'arômes dégagés par les fruits lors de leur maturation.



Figure 2 : Technologie RipeSens
 Source : RipSens Source 2013

¹ <http://www.mgc.co.jp/eng/products/abc/ageless/eye.html>

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Ces indicateurs ont des **effets contrastés** sur le gaspillage alimentaire :

- La détection sélective des anomalies en amont de la distribution (cas de la détection de fuites) peut permettre une gestion simplifiée et à moindres pertes de la majorité des produits. Actuellement, certains industriels réalisent un étuvage de l'ensemble de leur production de plats cuisinés appertisés afin de détecter des anomalies. Si cette méthode permet de repérer les produits ayant des défauts, elle engendre un vieillissement prématuré et systématique de l'ensemble de la production.
- Lorsque les indicateurs de qualité sont utilisés au niveau du circuit de distribution, deux conséquences sont attendues : une meilleure gestion des flux par les distributeurs, mais à l'inverse un acte d'achat découragé en cas de défaut du côté du consommateur. Le « tri » par les consommateurs dans les présentoirs de distribution, des produits qui présentent la DLC potentiellement la plus longue, est grandement facilité par l'apposition d'indicateurs lisibles et informatifs. Ce phénomène ne permet alors pas une rotation raisonnée « First In / First Out », mais au contraire laisse des produits arriver sans achat à leur fin de DLC : ils seront donc gaspillés.

Enfin le consommateur possède un outil quantitatif lui permettant de prioriser la consommation des produits après l'achat. Là encore, il est essentiel que les informations apportées par l'indicateur soient parfaitement « calées » sur la DLC étiquetée du produit, même dans un environnement de stockage domestique dans des réfrigérateurs généralement réglés entre 6 et 8°C. Dans le cas contraire, la confiance dans l'indicateur peut être remise en cause et un produit encore consommable peut être considéré, à tort, comme devant être jeté. L'information fournie au consommateur peut également porter sur la durée depuis l'ouverture de l'emballage. Dans ce cas, l'indicateur est placé dans l'emballage et son changement d'apparence (souvent de couleur) est visible de l'extérieur.

- En ce qui concerne les indicateurs de maturation, ceux-ci permettent une diminution de la « palpation » des fruits et légumes, facteur de détérioration et de gaspillage.

Globalement les effets négatifs de non-achat ont peu encouragé l'industrie à développer les emballages avec indicateur de qualité lisibles par le consommateur. Mais lorsque les expériences de la technologie ont été pleinement développées et associées à une optimisation de la qualité des produits et des circuits de distribution, la technologie s'avèrerait globalement positive.

1.3 Comparaison avec l'existant

Tout comme pour les indicateurs ITT, le caractère innovant consiste à gérer l'utilisation, la distribution et la consommation de produits, non pas en fonction de leur état de maturation ou d'altération théorique, mais dans leurs conditions d'ambiance effectives. Ceci conduit à envisager des durées de vie de produits qui soient adaptatives, c'est-à-dire supérieures ou inférieures aux données théoriques, et de gérer au mieux l'ensemble du cycle d'utilisation.

Des améliorations sont toutefois nécessaires pour que la technologie des indicateurs constitue un potentiel de réduction du gaspillage alimentaire.

En effet, le fait que le consommateur ait un accès trop détaillé aux informations de qualité du produit avant l'acte d'achat peut conduire à une augmentation du gaspillage alimentaire (non achat ou destruction prématurée). Une option consiste à revisiter le concept d'emballage intelligent, ne délivrant que des données numériques, lisibles chez le distributeur par l'unique distributeur, et par le consommateur à domicile via des outils adaptés tels que le réfrigérateur intelligent.

Mais dans des pays comme le Japon où le concept d'emballage intelligent a été très largement développé, c'est au contraire la diminution du gaspillage alimentaire qui a été observée, avec (i) une amélioration par la distribution de la qualité de conservation des produits et la gestion des flux et (ii) et une pleine intégration des outils par les consommateurs.

Il faudra donc faire un choix entre des technologies revisitées, et le plein essor des emballages indicateurs sur la base des technologies actuelles.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

La technologie est encadrée par le Règlement (CE) n° 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 concernant les matériaux et objets actifs et intelligents destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. Les indicateurs sensibles à la composition de l'espace de tête sont en interaction directe ou indirecte avec le produit alimentaire. Se pose alors la question de leur innocuité : à ce jour, en l'absence d'une liste établie de substances autorisées pour les emballages actifs et intelligents, tous les nouveaux produits doivent passer par la soumission d'un dossier à l'EFSA, ce qui constitue un frein provisoire au développement rapide des technologies.

D'un point de vue réglementaire, ces indicateurs, de la même façon que les ITT, n'apportent qu'une information complémentaire aux données de référence que constituent les DLC ou DLUO des produits.

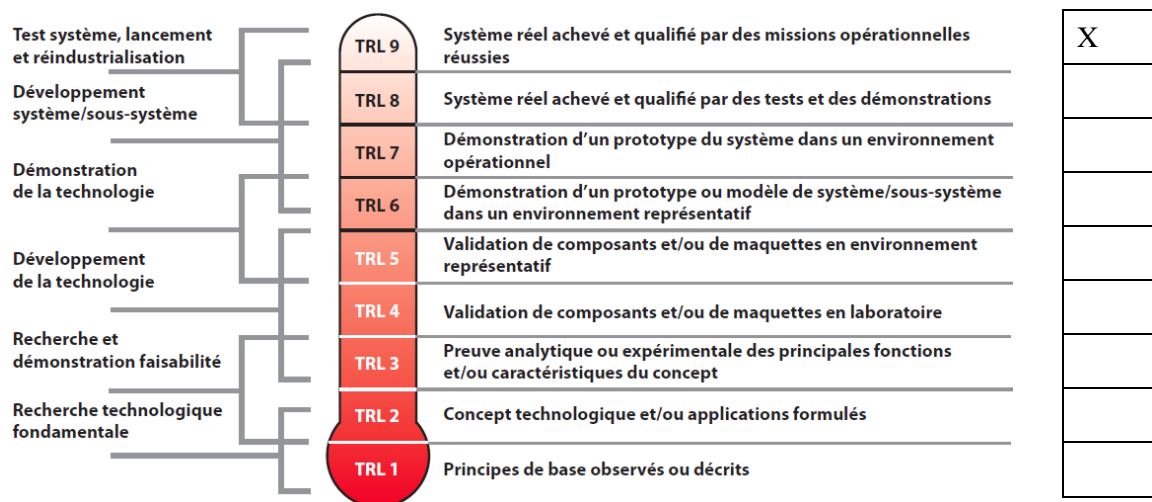
C'est pourquoi il est extrêmement délicat d'apporter à un distributeur, et qui plus est à un consommateur, une information double, combinant pour exemple DLC et information fraîcheur. Comment un consommateur gèrera-t-il une situation de DLC dépassée associée à une information « fresh » issue d'un indicateur ? Comment un distributeur doit-il gérer une situation de DLC non dépassée à une information « not fresh » issue d'un indicateur ? Qui certifie la conformité du produit ?

Pour les produits présentant une DLUO, la question est moins complexe, puisque la DLUO est une valeur de référence « indicative » : dans ce cas, les informations fraîcheur pourraient être utilisées par le consommateur en sus de la DLUO.

Dans tous les cas, la situation actuelle qui consiste à superposer, sans outil de compilation, des données de référence (DLC ou DLUO, réglementaires) à d'autres informations de qualité de produits, est a minima une source de confusion, d'où la nécessité de migrer vers une exploitation numérique de l'ensemble des données (capteurs et données réglementaires) qui apportera l'information la plus pertinente, ou préconisera directement la meilleure solution de gestion du produit en adéquation avec la réglementation.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Sur la base de la technologie actuelle, les indicateurs apportant des informations sur la composition de l'espace de tête peuvent être considérés en pleine maturité. En outre, les produits du marché reposent généralement sur des phénomènes simples et des technologies faciles à mettre en œuvre.

Au-delà de la détection de gaz courants, une très large palette de traceurs pourrait présenter un intérêt pour le monitoring de la maturation ou de l'altération des produits alimentaires. Dans ce domaine, tout reste à construire.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

- *L'efficacité sur le gaspillage alimentaire :*

La technologie risque de démotiver l'acte d'achat. Mais ce défaut, évoqué par les distributeurs, ne serait pas constaté dans les pays où les emballages indicateurs ont largement été développés

- *La complexité des informations à gérer :*

Ces indicateurs présentent une hétérogénéité des modes de communication de l'information : apparition d'un pictogramme, disparition d'un code barre, changement de couleur... Ce manque d'homogénéité rend leur utilisation difficile pour le consommateur, qui peut en outre être amené à gérer des informations contradictoires avec la DLUO ou la DLC.

- *Coût de la technologie :*

Ces technologies présentent un impact environnemental direct très limité étant donné leur faible complexité. Leur coût encore élevé est essentiellement dû à la faiblesse des volumes de production actuels.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

- a) *Elargissement de l'application de la technologie à un plus grand nombre de produits*
- Par le développement d'indicateurs fournissant une information non intégrée. Beaucoup d'indicateurs fonctionnent sur la base d'une réaction irréversible avec une réponse intégrée sur l'ensemble du temps d'utilisation, alors qu'un certain nombre d'applications appelleraient des indicateurs fournissant une *information instantanée* concernant la composition de l'espace de tête.
 - Par le développement d'indicateurs plus spécifiques (ex: détection de composants traceurs de maturation ou de sénescence des fruits et légumes, capteurs à seuil de déclenchement ajustables détectant de faibles traces d'amines biogènes ou de produits de dégradation volatils, pouvant être associées au tout début de dégradation des produits carnés ou des produits de la mer, autres applications ciblées...)
 - Par le développement de capteurs exploitant les variations relatives de concentrations de traceurs dans l'espace de tête au cours du temps. En effet, pour certains produits alimentaires, la composition de l'espace de tête présente une variabilité plus forte en fonction de la variété et des conditions de culture, qu'en fonction de l'altération du produit. Techniquement, ces technologies, qui nécessiteront l'exploitation globale d'un ensemble de données sur l'échelle des temps, reposeront forcément en partie sur l'exploitation d'une information numérique.
- b) *Diminution du coût de la technologie*
- Par le développement d'indicateurs directement intégrés à la *formulation du matériau* d'emballage, voire sollicitant les *propriétés intrinsèques du matériau* d'emballage : le surcoût des technologies s'explique par le fait qu'elles constituent une étape supplémentaire à la conception de l'emballage.
- c) *Simplification de l'information*
- Par une homogénéisation du mode de communication de l'information : homogénéisation des codes couleur, ou exploitation numérique centralisée comme le réfrigérateur intelligent.
 - Par l'utilisation de technologies permettant de (i) compiler les informations fraîcheur et DLC/DLUO éventuellement contradictoires (voir technologies numériques), (ii) afin de donner une seule information à l'utilisateur. Techniquement, cet objectif appelle l'exploitation d'une information numérique.

2.5 Principaux acteurs

Les acteurs de la recherche sont actuellement disséminés dans différentes spécialités :

- Grenoble (CEA LETI) pour le couplage de capteurs avec technologies de type RFID, la détection des COVs à l'aide de matériaux actifs ou de traceurs colorés.

- Université de Montpellier : développement de puce RFID avec l'IES et le Fraunhofer dans le cadre d'un projet ANR franco-allemand « NextGenPack »
- Les universités de Montpellier et de Lyon pour les matériaux d'emballages à réponse sensible à l'environnement,
- De nombreux acteurs interviennent sur des technologies de types traceurs colorés réactifs.

Certains acteurs industriels se sont distingués par leur capacité d'innovation en matière d'indicateurs :

- RipeSense® (Nouvelle-Zélande) :

Son indicateur de maturité des poires, primé en 2004 par le Time Magazine comme « technologie parmi les 50 plus innovantes de l'année », est désormais devenu une référence du secteur. Cet indicateur est actuellement en cours de transposition à d'autres fruits tels que les kiwis, mangues, melons et avocats.

- Mitsubishi Gas & Chemical Inc. (Japon) :

Ce leader des absorbeurs d'oxygène a complété sa technologie AGELESS d'un indicateur visuel, informant par un indicateur visuel de la teneur en oxygène d'un emballage.

- EMCO (Grande-Bretagne) :

La firme propose une technologie équivalente à la précédente, en offrant le choix entre un indicateur réversible ou irréversible.

- Insignia Technologies Ltd (Ecosse) :

L'entreprise propose des encres avec des pigments qui changent de couleur en fonction de l'exposition au CO₂ ou à l'air. La vitesse de changement de couleur peut être « programmée » en fonction du timing attendu.

- o Indicateur de délai depuis l'ouverture « Food Fresh » : l'indicateur est placé dans l'emballage. Le délai programmé peut varier de 1 jour à 3 mois en fonction de l'application.
- o Indicateur de fuite : utilisation pour les conditionnements sous MAP. L'emballage initialement blanc (transparent) devient violet en l'absence de CO₂.

Aucun acteur n'a été identifié à l'échelle nationale.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Contrairement au Fraunhofer en Allemagne et au TNO (NL) qui sont des structures suffisamment pluridisciplinaires pour appeler en interne l'ensemble des expertises nécessaires au soutien à l'innovation dans le domaine des capteurs (chimie, biochimie des aliments, microélectronique, sciences des matériaux), la France n'a pas encore fédéré l'ensemble des compétences au niveau national, même si le pôle de Grenoble représente déjà une bonne agrégation des compétences « aval ».

Les compétences étant plus internationales que nationales, les laboratoires experts du domaine privilégient les collaborations à échelle européenne (cf. INRA Montpellier et Fraunhofer IVV Munich, et alliance à d'autres partenaires européens prévue en 2014)

3- Impact environnemental

Les technologies possiblement déclinées sous le terme « emballages instrumentés par détection de traceurs » représentent un éventail trop large pour associer un impact environnemental donné.

Dans tous les cas c'est probablement la variété des technologies qui pourrait impacter négativement l'impact environnemental. En effet, il y a un risque que les technologies soient trop variées pour une bonne utilisation par le consommateur, et qu'il n'y ait pas de possibilité de gestion spécifique de la fin de vie des emballages intelligents.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de détection de traceurs a obtenu une note de 10 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclabilité	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	1	10

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

4- Perception des consommateurs

Dans le cas de ces emballages, l'acceptation par les consommateurs dépend principalement de leur impact sur l'aspect et la qualité finale du produit. Cette technologie est proche des emballages piègeurs d'éthylène mais elle est plus utile à l'industriel, au distributeur ou aux circuits B to B (cantines) qu'au consommateur final. Il est probable que cette technologie soit acceptée pour les aliments en vrac, mais les consommateurs risquent de ne pas percevoir de valeur ajoutée et de ne pas comprendre pourquoi cette information leur est communiquée. Cette technologie peut sembler trop complexe pour un emploi ménager.

5- Dimension économique

Couplé avec une puce RFID « adaptée », la réglementation pourrait favoriser son développement en permettant substitution de la DLC par des DLC « interactive ».

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de détection de traceurs :

<p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sécurité sanitaire - Diminution du gaspillage (Fruits) - Education du consommateur - Bonne perception des consommateurs - Bonne perception au niveau de la RHF - Détection des anomalies de la supply chain - Gestion des stocks 	<p>Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Retours produits au niveau industriel et distribution - Possibilité de confusion pour le consommateur - Coût additionnel
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Produits premium - Substitution de la DLC - Couplage avec d'autres détecteurs ou RFID - Demande de sécurité alimentaire des consommateurs - Homogénéisation du produit - Détections d'autres traceurs 	<p>Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement - Responsabilité du produit

Les détecteurs de traceurs créent une relation de confiance avec le client lui apportant une information supplémentaire sur le produit. Par exemple, le détecteur d'oxygène, en repérant une micro fuite de l'emballage (sous atmosphère modifiée), indique au consommateur la nécessité de consommer le produit rapidement. Pour le détecteur d'éthylène, il permet de donner le niveau de maturité du fruit

sans que le consommateur n'ait besoin de le palper, ce qui entraînait une accélération de la maturité du fruit et donc était source de gaspillage. La technologie est ciblée sur le bon acteur, puisque c'est en bout de chaîne que le gaspillage est le plus important. Tout comme au Japon, avec le temps, la puce sera acceptée et permettra d'éduquer le consommateur à réduire son gaspillage. Couplé avec une puce RFID « adaptée », la réglementation pourrait favoriser son développement en permettant substitution de la DLC par des DLC « interactive ». Cependant, il a été signalé lors des groupes de discussions que la technologie est encore trop complexe pour que le consommateur puisse la lire correctement et donc nécessite une simplification. En amont, les détecteurs semblent être une réelle valeur ajoutée pour une meilleure gestion des stocks par le distributeur. Des détecteurs d'autres substances sont encore à développer.

Bibliographie

Acteurs :

RipeSense (Nouvelle-Zélande), <http://www.ripesense.com/>

Mitsubishi Gas & Chemical Inc (Japon), <http://www.mgc.co.jp/eng/products/abc/ageless/eye.html>

EMCO (GB) <http://www.emcopackaging.com/index.php/products/oxygen-indicator-labels>

EMBALLAGES INSTRUMENTES PAR DETECTION DE MICROORGANISMES

Données clés

Résumé

Ces emballages instrumentés permettent une détection directe ou indirecte du développement des microorganismes. Les applications sont pour des produits types viande et poisson frais. Le coût que le capteur apporte à l'emballage semble être un frein à son développement.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La détection du développement des microorganismes peut être réalisée de deux manières :

- (i) Indirectement, par détection de composés volatils.

Ex : technologie Emballages instrumentés par détection de traceurs ;

- (ii) Directement, à l'aide de capteurs intégrant des anticorps de microorganismes ciblés.

Les capteurs présentent des sensibilités variées, en fonction du mode d'exploitation de l'interaction microorganisme / anticorps dans la technologie du capteur. Certains capteurs vont nécessiter l'accumulation d'un grand nombre d'interactions anticorps/microorganisme pour dépasser le seuil de détection, alors que d'autres capteurs, généralement basés sur des mesures de grandeurs physiques amplifiées, présenteront une très haute sensibilité.

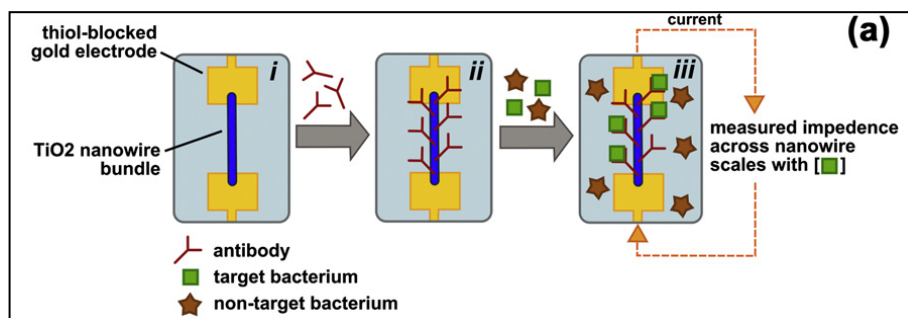


Figure 1 : Impédance modifiée en présence d'une bactérie ciblée

Source: *Sensors (Basel)*. 2012; 12(3): 3449–3471.

Published online 2012 March 12. doi: 10.3390/s120303449 PMID: PMC3376556

New Trends in Impedimetric Biosensors for the Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria

En fonction des types de capteurs, il est possible de recueillir des informations quantitatives. Toutefois les capteurs répondent uniquement dans une certaine gamme de concentration. On utilise le plus

souvent leur seuil de réponse en tant que capteur tout ou rien : ces outils sont donc principalement utilisés pour la simple détection de présence / absence d'une espèce donnée.

Une distinction est généralement faite entre les capteurs et les indicateurs. Les capteurs (capteurs d'impédance par exemple) sont plus performants mais nécessitent une alimentation pour fonctionner et ils n'affichent pas eux-mêmes l'information (lecteur externe), et sont donc plus coûteux. Les indicateurs sont plus simples (par exemple, une couche mince qui change de couleur), mais ne fournissent que de l'information simple : concentration accumulée, valeur maximale a été dépassée...

Les systèmes d'intérêt sont des capteurs et des indicateurs qui peuvent être fabriqués en utilisant des techniques à faible coût et fonctionnent à température ambiante, ce qui limite la gamme de matériaux et de technologies de fabrication qui peuvent être utilisées. En utilisant des matériaux à l'échelle nanométrique, qui fournissent une grande surface et favorisent les interactions avec leur environnement une performance plus élevée peut être obtenue.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

La détection « immédiate » des microorganismes présente un grand intérêt à différents niveaux de la chaîne de valeur :

- Caractérisation d'intrants et actions correctives éventuelles, immédiates et en amont de la chaîne agroalimentaire ;
- Caractérisation en cours de processus, et actions correctives immédiates sur le procédé industriel ;
- Caractérisation post processus et actions correctives immédiates de retraitement de lots ou d'aiguillage de lots différenciés ;
- Outils d'alerte pour rejet de références, au niveau du distributeur et du consommateur. La technologie ne constitue alors un plus que si elle est accompagnée d'une évaluation plus réaliste de la DLC, sans facteurs de sécurité.

1.3 Comparaison avec l'existant

La réalisation d'une analyse microbiologique quantitative nécessite le plus souvent une pré-étape de croissance destinée au développement de la population à analyser. Cette étape est généralement longue et constitue un frein à la réactivité attendue pour la gestion des intrants, des procédés, et des flux sortants.

Pour certaines denrées, la dangerosité de certains pathogènes incite en outre à l'utilisation de facteurs de sécurité sur la DLC.

Les analyses microbiologiques qualitatives rapides (présence / absence ; identification) peuvent être réalisées par technologie de biologie moléculaire (PCR), mais nécessitent généralement un environnement de laboratoire spécialisé.

Les méthodes de caractérisation microbiologique en développement visent (i) la rapidité d'obtention de la réponse, et (ii) la spécificité. A ce titre, les capteurs intégrant des anticorps répondent directement

à ces objectifs : le mode de détection permet une réponse instantanée et spécifique, à condition que la concentration à détecter se situe dans le domaine de sensibilité du capteur.

En outre le développement de technologies de bas coût permet d'envisager de porter ces modes de détection à l'échelle du produit élémentaire par intégration dans le système d'emballage.

2- Mise en œuvre de la technologie

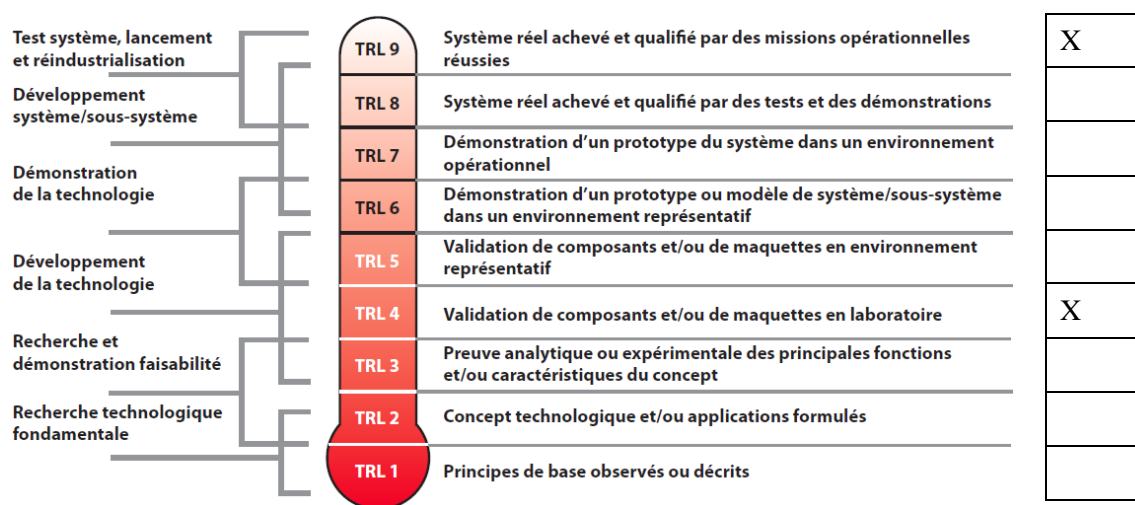
2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Les anticorps sont des substances biologiques pouvant entraîner une réponse de type allergique en cas d'ingestion accidentelle. La question de potentielles problématiques allergènes ou immunogènes causées par une ingestion répétée de ces produits est donc à adresser.

Les emballages intégrant des capteurs à base d'anticorps sont ainsi classés dans la catégorie des emballages actifs et intelligents destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires soumis au Règlement (CE) n° 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009, et doivent faire l'objet d'un dossier d'autorisation spécifique à l'EFSA², ce qui constitue un frein provisoire au développement rapide des technologies.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level (TRL) :



La technologie ne s'est développée que pour la détection de quelques pathogènes. Généralement, un capteur ne répond qu'à une espèce donnée (sauf si le capteur est basé sur la détection de COV, dans ce cas le spectre peut être au contraire très large).

Il paraît important de rappeler que le développement de cette technologie en agroalimentaire ne serait pas une innovation de rupture, mais de transfert, dans la mesure où elle est déjà très répandue et développée dans d'autres domaines comme le médical et les biotechnologies.

² European Food Safety Authority (EFSA)

Ainsi la technologie présente un TRL de 4 en agroalimentaire alors qu'elle présente un TRL de 9 dans le domaine médical.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Un des freins majeurs réside dans le coût des capteurs. Ces derniers répondent en effet à des caractéristiques plus complexes que les systèmes de détection « physico chimiques ». La production des anticorps et leur validation approfondie (spécificité, seuil de réponse, etc..) représente en outre une part importante du coût de développement. Le nombre d'anticorps monoclonaux différents à inclure suivant les espèces recherchées et le produit alimentaire concerné est à prendre en compte dans le calcul de ce coût de mise en place. Ce coût est bien évidemment à mettre en relation avec les éventuels gains que l'on pourrait faire en termes de réduction du gaspillage, et il semble nécessaire de faire une analyse au cas par cas suivant le type de produits alimentaires. La technologie, si elle est coûteuse à mettre en place, pourrait peut-être être adaptée pour des produits de luxe, à forte valeur ajoutée.

Par ailleurs, si la palette possible de détection des pathogènes est très large, le développement d'autant de capteurs spécifiques constitue un travail trop important.

La stabilité des anticorps est également une problématique qui peut constituer un frein technique au développement de cette technologie. En effet, les anticorps, qu'ils soient strictement spécifiques ou pas, n'ont pas une durée de vie illimitée. Leur réactivité est directement liée à leur activité intrinsèque, et il est essentiel d'étudier leur stabilité dans les conditions environnementales concernées.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Les évolutions souhaitables sont multiples et reposeront probablement sur des technologies sensiblement différentes :

- Capteurs multi-réponse, reposant sur un set d'anticorps (cf. technologie « langue électronique »), mais qui aussi fournissent des informations supplémentaires sur la température maximale / minimale, l'herméticité de l'emballage, etc.
- Capteurs spécifiques « à la carte » développés à façon et à bas coût
- Capteurs délivrant une réponse quantitative dans un large domaine de concentration

Systèmes qui perturbent le « quorum sensing » (mécanismes régulateurs qui contrôlent l'expression coordonnée de certains gènes) des bactéries et ralentissent la formation de biofilms.³

La technologie évoluera par ailleurs grâce à l'élargissement des outils qui permettent la reconnaissance spécifique, en substitut aux anticorps :

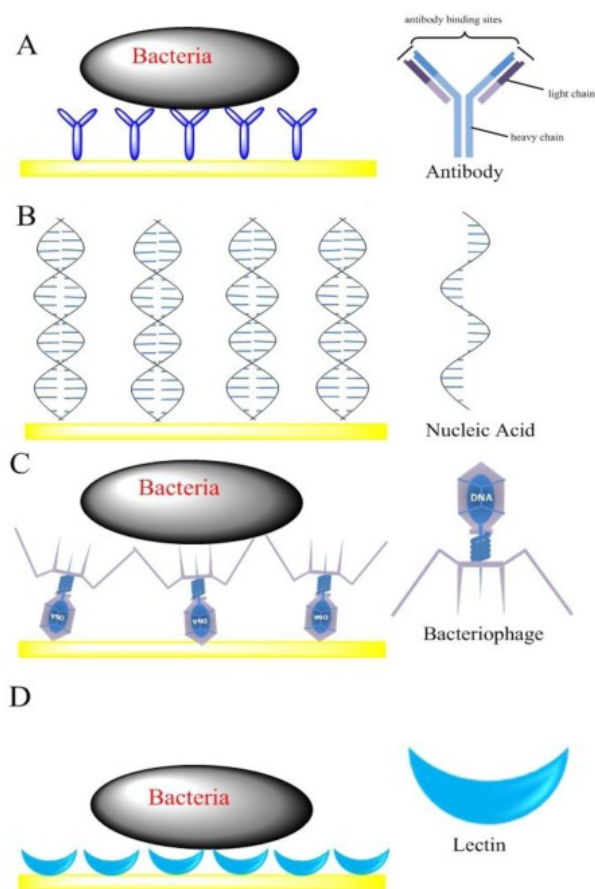
³ <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22706047>

Figure 2: *Sensors (Basel)*. 2012; 12(3): 3449–3471.

Published online 2012 March 12. doi: 10.3390/s120303449

PMCID: PMC3376556

New Trends in Impedimetric Biosensors for the Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria



2.5 Principaux acteurs

Les technologies les plus pointues, comme les capteurs multi-détection, sont actuellement développées pour le domaine médical, qui appelle comme pour le secteur IAA le développement de modes de détection instantané.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Les acteurs les plus actifs dans le domaine des capteurs évolués sont relativement bien concentrés sur les sites qui ont développé des plateformes en collaboration avec le CEA (Gardanne, Grenoble, sur la détection de micro-organismes : détection directe via anticorps ou PCR, ou indirecte via COVs). La collaboration avec le secteur biomédical est en particulier mise en œuvre dans le cadre de Lyon Biopôle.

La possibilité d'un codéveloppement des technologies entre le secteur médical et l'industrie agroalimentaire est tout à fait envisageable du fait du:

- cahier des charges commun
- des impératifs de coût plus contraignants dans le domaine IAA, mais également un besoin extrêmement plus large en volume de capteurs qui appelle à une banalisation rapide de la technologie.

3- Impact environnemental

L'impact environnemental est très dépendant du point d'application dans le processus technologique. L'instrumentation des procédés industriels en vue d'une meilleure gestion des flux et d'une adaptation des processus constituera en effet un plus indéniable. Les analyses étant réalisées sur des volumes importants, l'impact environnemental du capteur est sans nul doute faible au regard des gains directs attendus sur le gaspillage, qu'il soit un consommable ou non.

En revanche, l'apport de ces technologies au niveau de l'emballage nécessitera :

- (i) Soit des conceptions de capteurs très basiques ;
- (ii) Soit la possibilité de recycler tout ou partie des composants du système ;
- (iii) Soit un mode de lecture des informations reposant sur deux parties : l'une intégrée à l'emballage, et l'autre intégrée au système de stockage.

Ex : réfrigérateur intelligent.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie d'emballages instrumentés par détection de microorganisme a obtenu une note de 10 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclabilité	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	1	10

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans le cas de ces emballages, l'acceptation par les consommateurs dépend principalement de leur impact sur l'aspect et la qualité finale du produit.

Cette technologie est proche des emballages piègeurs d'éthylène mais elle est plus utile à l'industriel ou au distributeur qu'au consommateur final. Il est probable que cette technologie soit acceptée pour les aliments en vrac, mais les consommateurs risquent de ne pas percevoir de valeur ajoutée.

Les consommateurs s'interrogent sur l'intérêt de la sur-sécurisation de produits déjà bactériologiquement consommables. De plus, la réduction microbiologique est considérée comme une responsabilité des industriels; ce qui rend la détection de microorganismes non pertinente pour les consommateurs (il ne devrait pas y avoir de bactérie dans un produit proposé à la vente).

5- Dimension économique

Deux acteurs économiques ont été identifiés aux Etats-Unis (FQSI et SIRA technologies) mais ne sont plus actifs à l'heure actuelle.

Aucun acteur n'a été identifié en Europe. Dans ce contexte, aucune information n'est disponible sur l'aspect économique de cette technologie.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des emballages instrumentés par détection de microorganismes :

<p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire - Détection d'anomalie dans la supply chain - Rapidité de l'évaluation par rapport à l'existant 	<p>Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coûts - Réglementation - Spécificité des capteurs
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cahier des charges commun avec le domaine médical - Capteurs multi-réponses - DLC interactive - Diminution des coûts - Recyclabilité des capteurs 	<p>Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant son développement

Les emballages instrumentés par détection de micro-organismes correspondent à un transfert de technologie à partir du domaine médical. Ils permettent d'évaluer la sécurité sanitaire d'un produit beaucoup plus rapidement qu'en effectuant une analyse microbiologique. Il n'y a aujourd'hui pas d'acteurs agroalimentaires en France et la technologie n'est mature que pour quelques pathogènes. Le développement étant faible, elle est aujourd'hui chère et n'est envisagée que sur des produits premium. Cependant, elle est prometteuse si elle est associée à d'autres capteurs qui pourront permettre d'adapter la DLC au produit. De plus, ces capteurs permettront aux acteurs de détecter et corriger les anomalies de la chaîne alimentaire.

Bibliographie

Acteurs:

SensorQ, de FQSI, <http://www.fqsi.com/>

Food Sentinel System, de SIRA Technologies <http://www.siratechnologies.com/>

PixinBio, <http://www.pixinbio.com/> Pixinbio a fait faillite (leur technologie était basée sur une puce de STMicroelectronics qui a été abandonnée).

Article:

Article à la sortie de SensorQ, Packaging Europe, Novembre 2007, <http://www.packagingeurope.com/Packaging-Europe-News/17814/Breakthrough-SensorQ-Smart-Label-verifies-freshness-in-packaged-fresh-meat-and-poultry.html>

EMBALLAGES PIEGEURS

Intitulé complet : Emballages piègeurs (oxygène et composants de maturation)
Fiche consolidée par Nathalie Gontard (Université Montpellier), Sébastien Lurol et al (CTIFL)

Données clés

Résumé

L'emballage piègeur est une technologie très intéressante pour la conservation des aliments. Il connaît des difficultés d'acceptation en France mais représente un réel avantage pour l'exportation.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Les emballages absorbants interviennent dans les processus respiratoires, d'exsudation ou d'échanges avec le milieu extérieur,

- (i) soit pour limiter la pénétration ou l'accumulation d'un composant tel que l'oxygène,
- (ii) soit pour limiter les effets de l'évolution physique ou biochimique d'un produit, qui contribuent de façon auto accélérée à son altération (exsudats, dégagement d'éthylène)



Figure 1 : Absorbant d'O₂ de la firme Multisorb⁴

L'éthylène est produit par le métabolisme des végétaux. Il contribue à la maturation des fruits et légumes mais aussi à leur sénescence (perte de fermeté, brunissement...). La détérioration des fruits et légumes conditionnés dans des enceintes fermées est parfois liée à l'accumulation d'éthylène.

Une première solution est l'utilisation de permanganate de potassium (KMnO₄) très efficace, mais potentiellement nocive (ce composé ne doit pas rentrer en contact direct avec l'aliment emballé).

D'autres systèmes minéraux sont utilisés pour leurs propriétés de sorption : zéolites, les argiles, les aluminosilicates.

L'oxygène engendre l'oxydation des aliments, qui conduit à une modification de différentes caractéristiques : changement de goût, d'odeur, destruction de nutriments, modification d'apparence.

D'autre part l'oxygène permet la croissance des microorganismes aérobies (apparition de moisissures, dégradation bactérienne)

⁴ <http://www.multisorb.com/products-and-systems/freshmax-self-adhesive-oxygen-absorber/>

Différents systèmes peuvent être employés pour piéger l'oxygène via une réaction d'oxydoréduction : Oxydation du fer en milieu hydraté, Acide ascorbique, Pigments photo sensibles, Enzymes telles que la gluco-oxydase

Les systèmes peuvent se présenter sous forme de sachets ou étiquettes disposés à l'intérieur de l'emballage (sans contact direct avec l'aliment) ou être dispersés dans la masse du polymère (bouchons, films, barquettes). Dans ce dernier cas, le système absorbeur d'oxygène peut être activé par action des UV, afin de solliciter la fonction de l'emballage actif uniquement à partir de sa mise en œuvre.

Applications et aliments concernés

- Le fromage frais (conservation de 60 jours).
- Les laits infantiles (poudre) seront bientôt sous absorbeur, leurs minéraux étant très sensible à l'O₂.
- Les produits carnés. Cela permet de doubler la durée de vie (16 jours contre 9 avec vide gaz) et d'avoir une meilleure stabilité bactériologique.
- Les produits gras (fritures...) très sensibles à l'oxydation.
- La charcuterie. Cela permet d'éviter que les produits changent de couleur par photo oxydation en présence de néons.
- Les produits de la panification. Le producteur TarteFrais, industrie normande, a pu, grâce à l'absorbeur, proposer les premières tartes fraîches longue conservation (21 jours) et fournir de nombreux distributeurs qui n'avaient pas de boulangerie en magasin comme Liddle. A partir de là, elle a étendu sa gamme à toutes les pâtes à choux (éclair...) qui peuvent se conserver 12 jours et les pâtes jaunes.
- Les fruits
- La chocolaterie, pour éviter la congélation.

Les absorbeurs d'eau visent essentiellement à limiter les défauts d'aspect et les évolutions physicochimiques associés aux exsudats. Mais la maîtrise des exsudats permet également de ralentir le développement indésirable de la flore d'altération.

Les matériaux hydrophiles utilisés sont des minéraux ou des polymères organiques : Polyacrylate, Silicagel, Argile, Oxyde de calcium.

Les applications se situent le plus souvent dans le domaine de la viande et des produits de la mer.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Les emballages absorbeurs d'oxygène améliorent la performance du système d'emballage. La perméabilité apparente à l'oxygène est nettement diminuée par l'addition d'absorbeur. D'autre part l'absorbeur joue un rôle de capture de l'oxygène de l'espace de tête au cours des premières heures de stockage. Cette fraction initiale d'oxygène peut en effet être importante, même lorsque l'aliment a été conditionné sous atmosphère protectrice ; il s'agit d'une fraction solubilisée dans l'aliment, et/ou perméée au travers de l'emballage au cours du traitement thermique d'un produit emballé (conditions dans lesquelles l'emballage n'est transitoirement plus barrière).

Les emballages absorbeurs d'oxygène ont donc un impact direct sur la durée de vie des produits et sur les contraintes de propriétés barrière pesant sur l'emballage; étant donnée une activité limitée dans le temps ce sont principalement des produits stockés à froid qui bénéficient de cette technologie. L'utilisation d'un absorbeur d'oxygène peut généralement augmenter d'au moins 20% la Durée de Vie Microbiologique d'un aliment frais réfrigéré.

La maîtrise de l'eau ou de l'éthylène par l'utilisation de technologies d'absorption permet :

- (i) d'augmenter la durée de vie des produits, de par la limitation de phénomènes biochimiques ou microbiologiques,
- (ii) de limiter le gaspillage alimentaire, de par la meilleure maîtrise des défauts d'aspect.

1.2 Comparaison avec l'existant

Parmi les différents types d'emballages de nouvelle génération, qu'ils soient actifs ou intelligents, les absorbeurs représentent aujourd'hui une plus-value indéniable en terme de minimisation du gaspillage. La technologie est déjà presque généralisée pour certaines classes de produits.

La technologie est extrêmement simple à mettre en œuvre lorsqu'elle vient se surajouter à un système emballage produit déjà optimisé, notamment en ce qui concerne le niveau de barrière à l'oxygène et l'application d'atmosphère protectrice. Dans ce cas, la voie la plus simple consiste à insérer un sachet ou une étiquette absorbeur dans le packaging, sans que toute autre adaptation soit nécessaire.

L'absorbeur permet d'atteindre le point 0 en oxygène même sur des produits poreux et alvéolaires (les mousses ou les tartes au citron meringuée) qui seraient aplatis par un vide gaz. Les producteurs peuvent ainsi garder un aspect visuel attrayant à leurs produits tout en garantissant la sécurité bactériologique et une longue conservation.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Les emballages absorbeurs sont classés dans la catégorie des emballages actifs et intelligents soumis au Règlement (CE) n° 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 ; ils doivent faire l'objet d'un dossier d'autorisation spécifique à l'EFSA, en raison du risque de contact fortuit de l'aliment avec le dispositif contenant la substance chimique absorbante : l'innocuité doit être validée.

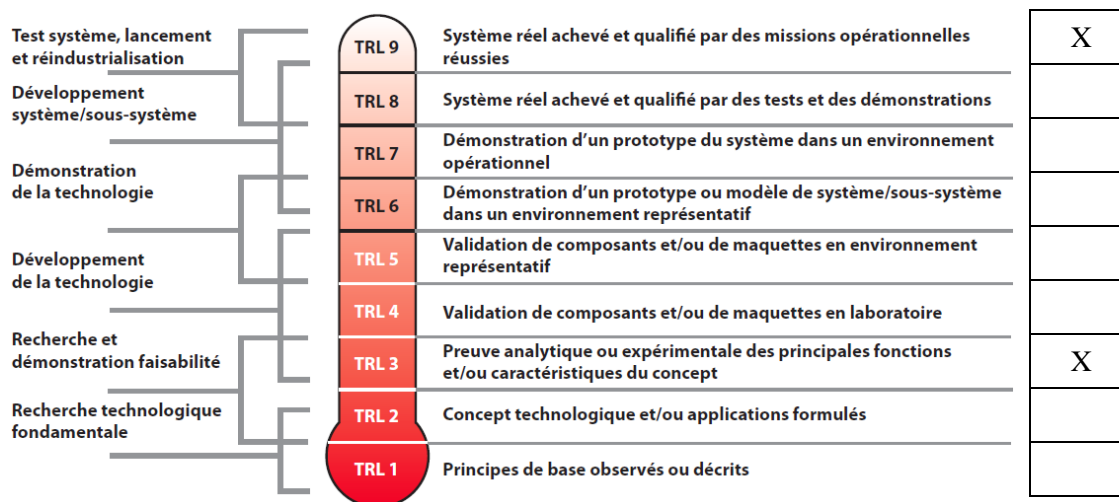
A ce jour cette procédure est longue; elle devrait être grandement simplifiée dans un futur relativement proche. L'EFSA est en cours de publication d'une liste de substances autorisées entrant dans la composition des emballages actifs. Lorsque cette liste positive sera disponible, ce ne seront que les nouvelles substances ou plus largement les nouvelles technologies qui devront faire l'objet d'un dossier spécifique.

L'utilisation de substances réactives appelle globalement deux types de questions, qui sont évaluées dans les dossiers de demandes d'autorisation EFSA:

- lorsque la substance ou le mélange de substances présente un danger potentiel, l'isolement dans un sachet, qui préserve à la fois la diffusion de substances indésirables dans l'aliment et l'ingestion par le consommateur, est-elle suffisante ? i.e. préserve-t-elle d'utilisations inappropriées du consommateur ?
- La réactivité des substances pose le problème (i) des réactions indésirables non identifiées, ainsi que, (ii) en cas de combinaisons d'actifs, des réactions entre composants qui auraient été individuellement autorisés.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level (TRL) :



Deux types de technologies présentent un développement distinct :

- Les technologies basées sur des étiquettes et sachets, grandement éprouvées et d'index TRL = 9, qui répondent directement aux exigences :
 - (i) De coût (faible)
 - (ii) D'adaptabilité de la capacité d'absorption
 - (iii) Système optionnel, à surajouter à un emballage existant
 Exemple type de technologie mature dont la recherche et le développement a été, et est toujours, pris à 100% par les industriels eux même. Le marché est historiquement occupé par le Japon et les USA et plus récemment par des pays montants comme la Corée du sud.
- Les technologies basées sur une formulation spécifique du matériau d'emballage, ou basées sur un polymère de synthèse original (cf. absorption d'oxygène via matériau activé par les UV). Ces technologies sont pointues, encore classées TRL = 3, mais elles présentent les biais suivants :
 - (i) la capacité d'absorption est limitée au volume de l'emballage ; elle est donc relativement restreinte
 - (ii) faute d'un standard de matériau absorbeur (peu probable même à terme) ces emballages ne sont pas recyclables d'un point de vue économique

Les étiquettes et sachets se développent donc préférentiellement et ont atteint leur stade de maturité sur certains marchés. Leur plus large développement dépendra d'adaptations techniques qui permettront l'application de la technologie à de nouveaux produits.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Il n'y pas de freins particuliers à la mise en œuvre des technologies de type matériaux absorbants, autre que l'encadrement réglementaire strict, mais qui n'est pas réellement une contrainte. Pour les distributeurs, la poudre de fer présent dans l'absorbant présente un risque d'interagir avec les détecteurs de métaux. C'est pourquoi STANDA a développé un absorbant sans fer mais il est plus coûteux et moins performant (seulement 5% des industriels équipés l'utilisent).

Il peut y avoir un problème de déformation de l'emballage par un abaissement de la pression. Il faut donc prévoir des emballages solides.

Il peut également y avoir des risques bactériologiques sur certains produits très sensibles car l'absorbeur prend 48h pour enlever l'oxygène contre 5 secondes pour le vide gaz.

Pour les produits carnés, la suppression d'O₂ dans l'atmosphère entraîne une perte de la couleur rouge sang pour une couleur plus foncée. Ce phénomène peut repousser le consommateur. Cependant à l'ouverture du sachet, la viande reprend sa couleur rouge (phénomène de reblooming). Ce frein est levé en rayon charcuterie où les produits sont sortis de l'emballage ou au niveau de la RHF puisque les acheteurs sont avertis.

Il est noté, pour finir, un problème de méconnaissance du produit. En effet, certains consommateurs appellent le service après-vente de Tartefrais pour signaler qu'ils ont saupoudrés la tarte avec le contenu du sachet absorbeur par confusion avec un sachet de sucre. Le problème est limité car le produit n'est pas toxique et une communication efficace sur le produit devrait apporter une solution.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Seuls des sauts technologiques marquants conduiront à une évolution du marché actuel, caractérisé par des systèmes très simples, performants, et de faible coût.

C'est dans le domaine des absorbeurs d'oxygène que des innovations majeures sont attendues :

- *sachets absorbeurs de plus forte capacité que les systèmes actuels*, permettant d'utiliser des matériaux de niveau barrière moins exigeant, ou permettant d'élargir les applications aux produits conservés à température ambiante,
- *absorbeurs présentant une activité en milieu humide*, d'intérêt tout particulier pour les aliments thermisés qui voient leur DLUO dépréciée par l'effet de « retorting » des couches barrières des matériaux stérilisables multicouches (les technologies barrières les plus courantes reposent sur des polymères polaires sensibles à l'eau, qui perdent leurs performances après stérilisation ou pasteurisation, et ne les recouvrent que très progressivement dans le temps)
- *matériaux d'emballage absorbeurs, plus efficaces que les matériaux proposés aujourd'hui*. Les substituts aux sachets absorbeurs ont un intérêt pour les produits qui présentent un contact intime avec l'emballage et dont l'oxydation n'est pas efficacement limitée par la seule intervention au niveau de l'espace de tête.

2.5 Principaux acteurs

• France

Le principal acteur du domaine en France est Standa, dont l'activité a débuté sur les sachets absorbeurs d'oxygène, et qui propose aujourd'hui une large gamme de produits à intégrer sur l'emballage ou directement sur l'aliment.

• International

Le marché comporte en outre de grands acteurs internationaux, particulièrement pour les absorbeurs d'oxygène :

- Mitsubishi Gas & Chemical Inc (Japon), leader mondial des absorbeurs d'O₂ avec sa gamme AGELESS.
- MultiSorb technologies (Etats-Unis), leader mondial des emballages actifs proposant les technologies d'absorption FreshCard / FreshPax.

- Sealed Air (Etats-Unis) et sa gamme Cryovac, leader mondial dans l’emballage d’aliments frais.

Les acteurs « recherche » mobilisés sur la thématique « matériaux piègeurs d’oxygène » se concentrent fréquemment sur des produits organiques de type antioxydants d’origine naturelle, de réactivité et capacité énormément plus faible que les standards « poudres métalliques » du marché.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

- **Force :**

Les acteurs industriels et académiques français du secteur ont une bonne visibilité au niveau international, à l’image de l’entreprise Standa, et de l’université de Montpellier.

- **Faiblesse :**

La commercialisation d’emballages actifs reste une spécialisation de quelques acteurs industriels qui l’affichent en tant que tout premier savoir-faire.

3- Impact environnemental

Les études d’impact environnemental n’ont jamais pris en compte l’effet réduction des pertes alimentaires (qui ont un coût environnemental très important), comme toutes les études concernant les emballages actifs et intelligents. Ces absorbeurs autorisent aujourd’hui de réduire les contraintes pesant sur les emballages primaires dont ils peuvent corriger les défauts de propriétés barrière, gain environnemental fort car les matériaux barrière sont toujours multicouches, consomment des matériaux coûteux, ne sont pas recyclables et sont à l’origine de rejets de CO₂.

L’impact environnemental des technologies de type sachets et étiquettes reste limité s’il y a possibilité d’isoler les éléments actifs lors des étapes de tri consommateur ou industriel. Les produits utilisés pour la fabrication de l’absorbeur subissent peu de transport car fabriqués en Europe (sauf pour la poudre de fer qui est importée).

En revanche les matériaux d’emballage absorbeur présenteront a priori toujours une niche pour laquelle les filières de tri dédiées ne pourront pas économiquement être envisagées. Selon les laboratoires STANDA, il est possible de faire évoluer le produit pour qu’il soit recyclable.

Suite à l’évaluation de toutes les technologies en termes d’impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d’après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de piègeurs a obtenu une note de 10 pour l’indice Coût environnemental par rapport à l’existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclabilité	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	1	10

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans le cas de ces emballages, l'acceptation par les consommateurs dépend principalement du produit auquel cet emballage est appliqué et de l'impact de celui-ci sur l'aspect et la qualité finale du produit.

Dans le cadre de notre étude, les consommateurs se sont interrogés sur l'utilité réelle des emballages piégeurs pour les fruits. Ils perçoivent un avantage considérable pour les industriels qui peuvent mieux maîtriser le murissement des fruits lors du transport si ceux-ci sont emballés en vrac dans un emballage de ce type. En revanche, ils ne perçoivent pas de valeur ajoutée pour eux, sauf dans le cas d'un départ en vacances.

Les participants voient plusieurs inconvénients à cet emballage. Tout d'abord, les consommateurs considèrent que l'ajout d'un emballage à un produit qui d'ordinaire n'en nécessite pas (les fruits) risque d'engendrer des déchets additionnels non alimentaires plutôt qu'une réduction du gaspillage alimentaire. Deuxièmement, concernant le matériau utilisé, les consommateurs craignent que le nouveau matériau n'ait des conséquences négatives sur l'environnement. Les consommateurs se demandent comment seront piégés les composés indésirables et si l'emballage ne sera pas considéré comme dangereux ensuite. Les consommateurs accepteraient mieux l'emballage s'il était biodégradable et/ou recyclable car cela écarterait les préoccupations environnementales.

La présence d'un corps étranger dans l'aliment perturbe les consommateurs. Les industriels cachent l'absorbant dans l'emballage pour éviter de susciter de la crainte. Cependant, certaines firmes font apparaître sur les paquets des phrases de prévention comme « conditionnement sous atmosphère protectrice, peut contenir des sachets fraîcheurs à ne pas consommer ». Tartefrais présente l'absorbant sur son site internet pour expliquer aux consommateurs curieux ses bénéfices, ce n'est pas pour autant un argument de vente.

En définitive, les consommateurs ne sont pas contre la mise en place de cet emballage à condition d'avoir des informations claires sur son fonctionnement et sur le rapport bénéfice/risque relatif à son utilisation.

5- Dimension économique

- **Absorbeurs d'oxygène**

Le marché actuel

La technologie est développée depuis 1988 en France par les laboratoires Standa. Encore aujourd'hui, ils sont les seuls fabricants français d'emballages actifs. Pour autant, les Allemands étaient les premiers à l'avoir développé dans les années 1950 mais leur brevet a été racheté par les japonais qui ont été les premiers à le commercialiser.

En Asie, le climat est plus favorable du fait d'une meilleure acceptation des consommateurs. En effet, les absorbeurs sont mis en évidence sur les emballages car ils rassurent le consommateur. Les absorbeurs sont commercialisés à grande échelle en Asie et leur prix est devenu nettement moins élevé qu'en Europe ce qui lui confère une avance concurrentielle.

Cependant, les pays européens conservent tout de même un avantage sur l'Asie du point de vue agro-alimentaire, comme le savoir-faire y est unique. De gros volumes de fromages sont exportés en Asie. L'absorbeur apporte une réelle valeur ajoutée pour les produits exportés, en permettant l'allongement de la DLC. A titre d'exemple, Bell utilise des conservateurs pour les Apericube en Europe alors que pour leur importation en Asie, l'entreprise utilise les absorbeurs OS dans l'emballage Flopac qui permettent aux produits d'avoir une durée de vie d'un an. L'ajout de ces absorbeurs a entraîné une progression considérable des exportations de ce produit alimentaire.

L'utilisation à l'export est un bon moyen de tester la technologie. Si les produits se vendent bien à l'étranger, alors l'industrie pourra les commercialiser sur le marché français.

En France, les IAA représentent le plus gros chiffre d'affaire de l'entreprise Standa. Cependant, les artisans et PME ont des utilisations plus diverses. Les produits certifiés « bio » représentent une bonne opportunité pour l'équipementier car l'absorbeur répond à leurs exigences : produits sans conservateurs et à DLC similaire.

La RHF est un secteur porteur pour la technologie. En effet, les acheteurs sont avertis, les consommateurs finaux ne sont pas en mesure de voir le sachet (le produit étant déjà sorti de son emballage) et les cuisiniers peuvent facilement l'expliquer.

Au niveau du consommateur final, celui-ci achète encore des produits avec conservateurs s'ils sont moins chers.

Perspectives

Si aujourd'hui le produit est encore méconnu du consommateur, on peut espérer un changement favorable au développement de la technologie, sachant que l'absorbeur est une solution de conservation sans additif.

L'absorbeur peut s'adapter à des produits premium français pour l'exportation. Standa semble être en bonne négociation pour vendre son produit à une société de macaron pour l'export au Japon.

Les piègeurs pourront également être utilisés sur les produits surgelés. Ils leur offriraient la possibilité d'être dans des emballages transparents, n'étant plus sensibles à la lumière.

Aux Etats-Unis, les bières et autres boissons pétillantes peuvent être vendus en bouteille plastique grâce à des piègeurs intégrés au bouchon. Il existe aussi des piègeurs intégrés au film plastique qui représentent un savoir-faire intéressant, le film ayant une perméabilité nulle et étant recyclable. Les équipementiers français ont donc des perspectives de développement pour proposer ces piègeurs.

Rentabilité économique

Pour une commande de 100 000 unités, les prix de marché sont inférieurs à 0.02€/unité pour des capacités d'absorption inférieures à 200ml, livraison incluse. Cependant, ces prix varient fortement

selon les capacités d'absorption et quantités commandées. A titre de comparaison, une commande de 200 absorbeurs de 50ml a un coût d'environ 0.15€/unité.

Sachets vendus par Standa pour élimer l'O₂ dans 1L d'air :

Modèle HV	Modèle SV	Modèle LH
Le plus rapide à mettre en place souvent ciblé sur les produits crus, peut être en contact direct avec l'aliment et le process	Coûts de production plus faible car le film est différent (PET micro-perforé)	1 ^{er} prix mais ne peut pas être en contact direct avec l'aliment
4cts	3cts	2 cts

Le prix est abordable surtout pour les petites structures qui pourront coller le timbre ou mettre le sachet à la main (ajout d'une étape). L'intégration dans le process d'une grosse entreprise peut représenter un investissement plus important et présente un risque de ralentissement de la cadence, à moins qu'elle l'intègre dès son installation.

Pour l'entreprise Tartefrais qui a toujours intégré l'absorbeur dans son process, le prix n'a jamais été un problème. Il représente entre 0.5 et 3 % du coût de revient à l'unité, suivant la taille. Pour enlever 1L d'O₂ (sous 5L d'emballage), il faut compter 15 cts. Or en GMS, on divise cette capacité par 5 environ. Tartefrais qui utilise sur d'autres produits le vide gaz ne peut pas comparer les prix des deux technologies étant donné que la consommation en gaz de ce dernier est difficile à mesurer (changement toujours approximatif de la bouteille).

- **Absorbeurs d'eau utilisés pour exsudats**

Perspectives :

Les producteurs de certains fromages sont intéressés par cette technologie.

Pour une commande 100 000 unités, les prix sont actuellement inférieurs à 0.20€ pour des sachets absorbeurs à base de silice d'une capacité de 15g.

- **Absorbeurs éthylène**

Le prix de ce type d'absorbeurs varie selon la technologie choisie (commande 100 000 unités):

Capacité	Matériau de base	Matériau Tyvek, Dupont
5g	~0.02€/unité	~0.05€/unité
10g	~0.04€/unité	~0.08€/unité

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie d’emballages piègeurs :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire et DLC - Economiquement intéressant - Utilisation sur des produits poreux fragiles - Diminution du gaspillage 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Investissement pour l’intégrer au process - Ralentissement possible de la cadence
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Exportation des produits haute gamme - Secteur porteur de la RHF - Diversification des applications - Demande de naturalité des consommateurs 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement - Peur de l’inconnu du consommateur

L’absorbeur est une technologie très intéressante pour avoir une bonne conservation des produits sans conservateurs chimiques. Il est en pleine expansion mais a du mal à s’imposer sur les marchés européens à cause de la peur de l’inconnu du consommateur ou des services marketing qui ne croient pas encore à l’avenir de cette technologie. Cependant, pour les producteurs européens cela reste très intéressant pour l’exportation de leurs produits en Asie. En France, le secteur de la RHF est porteur car le consommateur final n’est pas confronté directement à la technologie.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l’impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir des entretiens avec les équipementiers.

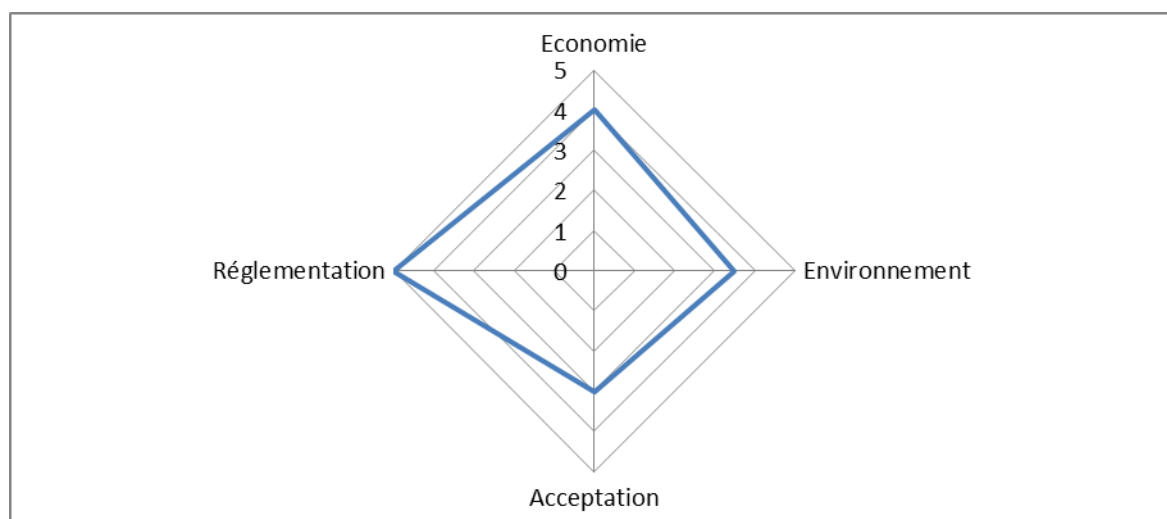


Figure 2 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Acteurs :

Laboratoires Standa, <http://www.standa-fr.com/a-propos/atco/>

Mitsubishi Gas & Chemical Inc (MGC), <http://www.mgc-a.com/AGELESS/OurProducts.html>

MultiSorb technologies, <http://www.multisorb.com/products-and-systems/>

Dupont, Tyvek Technologie,

http://www2.dupont.com/Tyvek_Industrial_Packaging/en_US/index.html

(Sites consultés en octobre 2013)

Annexe

Entreprise	Produit	Url	Devis
Gou Cheng, fabricant (Chine)	Absorbent d'eau	http://dg-chengfeng.en.alibaba.com/product/339733274-212824500/silica_gel_moisture_absorber_for_food.html	Pour 100 000 unités : De 0.0057 \$/pièce pour des sachets silice de 3g, à 0.029 \$/pièce pour des sachets 15g (hors transport)
Conserva, revendeur (Allemagne)	Absorbent d'oxygène	http://shop.conserva.de/fr/absorbent-d-oxygene-263-200-x-absorbent-d-oxygene-200-x-50cc-2000100000157.html	Pour 200 unités : 0.15\$ par sachet absorbant de 50ml
Oukpak Technology Co.,Ltd (GB)	Absorbent d'oxygène	http://jsoukpak.en.alibaba.com/product/740910281-217025935/food_used_oxy_free_oxygen_absorber.html?edm_src=sys&edm_type=fdbk&edm_grp=0&edm_cta=read_msg&edm_time=realtime&edm_ver=e	Pour 100 000 unités : De 0.008\$ à 0.128\$ pour les modèles de 20 à 2500ml
Fraken, revendeur (Chine)	Absorbent d'oxygène	http://fraken.en.alibaba.com/product/206299888-50341609/Food_used_Oxygen_Absorber.html?edm_src=sys&edm_type=fdbk&edm_grp=0&edm_cta=read_msg&edm_time=realtime&edm_ver=e	Pour 100 000 unités : De 0.008\$ à 0.015\$ pour les modèles de 20 à 200ml (avec transport)
Dalian Xinlian xin Preservative Co., Ltd. (Chine)	Absorbent d'oxygène	http://laodiganguo.en.alibaba.com/product/1035994841-219099403/foods_used_oxygen_absorber.html	Pour 100 000 unités : 30cc: US\$0.006/pc 50cc: US\$0.007/pc 100cc: US\$0.013/pc
Dalian Xinlian xin Preservative Co., Ltd. (Chine)	Absorbent éthylène	http://www.dl-xinyang.com/	Pour 100 000 unités : Matière classique : 5g: US\$0.025/pc 10g: US\$0.042/pc Matière Tyvek : 5g: US\$0.05/pc 10g: US\$0.08/pc

EMBALLAGES EMETTEURS

Intitulé complet : Emballages émetteurs de CO₂, emballages émetteurs d'éthanol

Fiche consolidée par Nathalie Gontard (Université Montpellier)

Données clés

Résumé

Les emballages émetteurs de CO₂ et d'éthanol permettent un allongement de la DLC, notamment sur les produits de panification. Cependant, ils présentent un développement limité à cause de l'émergence de technologies concurrentes, de la méfiance du consommateur et du prix du sachet.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

- **Emballages émetteurs de CO₂**

Le CO₂ est un bactériostatique potentiel dès lors qu'il atteint une concentration de 20% dans l'espace de tête. La plupart du temps, le CO₂ est utilisé en MAP (Modified Atmosphere Packaging, atmosphère protectrice appliquée au cours du conditionnement). Sa concentration décroît au cours du temps, d'autant plus lentement que les propriétés barrières sont bonnes. En effet, le CO₂ n'est produit naturellement dans l'emballage que par les végétaux crus non transformés : fruits et légumes frais, dont les végétaux de IVème gamme.

Le CO₂ peut toutefois être généré en continu à travers le processus suivant :

- **Système acide organique/carbonate**
- **R-COOH + NaHCO₃ ----> R-COONa + CO₂ + H₂O**

Par ailleurs le CO₂ est également souvent utilisé pour compenser une absorption d'oxygène et éviter une rétraction de l'emballage associée à une consommation d'oxygène.

Les acides organiques généralement utilisés sont les acides citrique, malique, tartrique. L'acide ascorbique possède en outre un caractère antioxydant. L'utilisation de ce dernier présente donc un double avantage : le système carbonate acide ascorbique peut être considéré comme un piègeur d'O₂ ET un générateur de CO₂.

Outre l'effet bactériostatique recherché, le CO₂ peut induire des effets négatifs. Le dégagement de CO₂ gazeux dans l'espace de tête conduit à un gonflement de l'emballage. Il est donc nécessaire d'adapter la perméabilité de l'emballage au flux de CO₂ généré par le carbonate. La présence renouvelée de CO₂ conduit également à une acidification du produit, plus importante que lorsque le CO₂ est utilisé en technologie MAP.

Les applications concernées par cette technologie sont les pâtes fraîches, les pains et croissants précuits, les saucisses et viandes fraîches, les plats cuisinés et plateaux repas.

- **Dispositifs émettant de l'éthanol**

L'éthanol présente un effet bactériostatique dès quelques dixièmes de % dans l'atmosphère au contact des aliments. Les dispositifs émetteurs d'éthanol se présentent :

- sous forme d'étiquettes auto adhésives

- Sous forme de sachets contenant de l'éthanol encapsulé, et qui génère une atmosphère à 0.5% éthanol

Les applications se situent principalement dans le domaine de la boulangerie

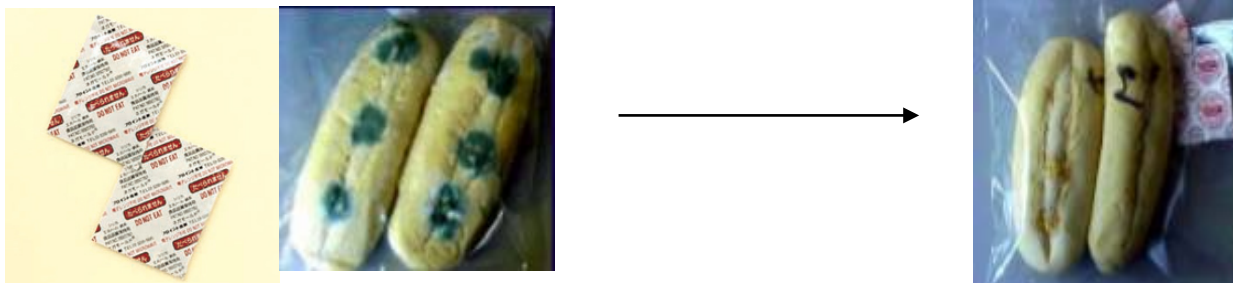


Figure 2 Sachet émetteur d'éthanol de Freund Co. et étiquettes auto-adhésives

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Si les émetteurs de CO₂ sont moins utilisés que le simple MAP, les émetteurs d'éthanol qui ont montré leur efficacité se sont largement développés en particulier dans le domaine de la boulangerie préemballée.

Leur utilisation n'est aujourd'hui pourtant pas généralisée, les industriels l'ayant pour la plupart remplacée par une modification de la technologie qui permet d'obtenir une phase de chaleur dans l'emballage suffisante pour détruire les moisissures. En France, les produits de boulangerie non préemballés sont largement préférés.

Même si la technologie est mature, elle a donc une marge de progression importante, avec un impact possiblement très sensible sur le gaspillage alimentaire. Par rapport aux durées de vie en absence de stabilisation, ce sont des facteurs de 200 à 1000% qui peuvent être obtenus en présence d'éthanol.

1.3 Comparaison avec l'existant

Avec de tels facteurs d'augmentation de la durée de vie des produits stabilisés à l'éthanol, l'ensemble de la filière bénéficierait d'une meilleure gestion des flux de fabrication, de distribution et de consommation.

2. Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

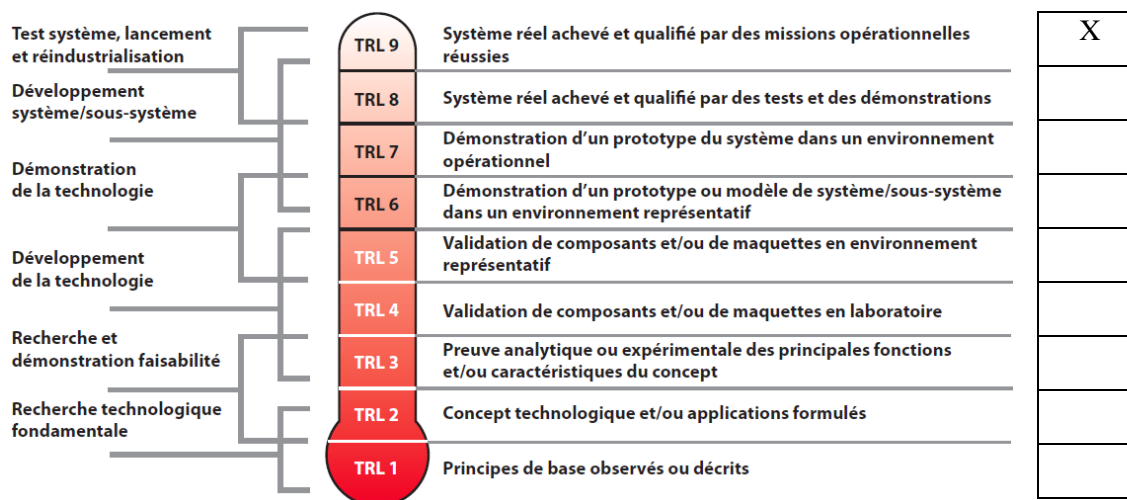
Les emballages émetteurs sont classés dans la catégorie des emballages actifs et intelligents soumis au Règlement (CE) n° 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 ; ils doivent faire l'objet d'un dossier d'autorisation spécifique à l'EFSA, en raison du contact avec aliment : l'innocuité doit être validée.

A ce jour cette procédure est longue; elle devrait être grandement simplifiée dans un futur relativement proche. L'EFSA est en cours de publication d'une liste de substances autorisées entrant dans la composition des emballages actifs. Lorsque cette liste positive sera disponible, ce ne seront que les nouvelles substances ou plus largement les nouvelles technologies qui devront faire l'objet d'un dossier spécifique.

La présence de faibles quantités d'éthanol dans les produits préemballés est une tolérance, mais elle est généralement étiquetée.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie est mature et n'appelle pas de nouvelles adaptations. Son intérêt est par ailleurs aujourd'hui discutable en ce qui concerne l'utilisation du CO₂ dans le pain de mie: Les absorbeurs de CO₂ sont le plus souvent utilisés pour compenser une absorption d'oxygène et éviter une « rétraction » de l'emballage. Son effet antimicrobien est "théorique" car les teneurs à utiliser seraient suffisamment élevées pour entraîner des modifications des propriétés organoleptiques des aliments, notamment des produits gras. Les émetteurs d'éthanol ont été utilisés pour limiter le développement de moisissures, premier facteur de détérioration du pain de mie, *jusqu'à ce que l'on trouve une façon d'obtenir une phase de chaleur dans l'emballage suffisante pour détruire les moisissures*. Ils sont aujourd'hui en phase décroissante. Là aussi le marché est occupé par les USA et le Japon.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Les technologies d'introduction / production in situ d'éthanol ou de CO₂ par un élément introduit dans le packaging sont en concurrence avec des techniques beaucoup plus simples utilisées plus couramment dans les IAA.

- Le MAP CO₂ par exemple permet une stabilisation microbiologique aux temps courts dans un emballage barrière. Le CO₂ est très soluble, il est donc en partie « consommé » par dissolution dans les aliments aqueux. Ainsi, pour les durées de vie plus longues, l'emballage émetteur de CO₂ pourrait trouver un intérêt, mais force est de constater que la technologie a très peu été développée.
- La « piqure » d'éthanol est une pratique courante en boulangerie, extrêmement simple à mettre en œuvre et tout aussi efficace que les sachets ou étiquettes émettrices d'éthanol. L'avantage que peut cependant lui opposer l'emballage émetteur d'éthanol est la meilleure adéquation de la quantité d'éthanol introduite dans l'aliment. Aux temps courts, celle-ci est faible et l'aliment peut être consommé dans sa composition quasi originale. Aux temps longs, la quantité d'éthanol dans le produit alimentaire répond à la plus forte exigence de stabilisation microbiologique du produit. Des réserves d'ordre éthique, sur la présence d'éthanol, peuvent enfin être soulevées par certains consommateurs.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

La technologie est mature et n'appelle pas d'amélioration sous sa forme actuelle.

La mutation d'une partie du marché des emballages actifs vers des emballages indicateurs/actifs, qui interagiront en fonction d'un paramètre critique dans le produit, ne s'appliquera probablement pas aux emballages émetteurs de gaz simples tels que l'éthanol, utilisés pour la stabilisation de produits à très faible valeur ajoutée.

Une seule évolution pourrait être possible puisque déjà observée sur quelques produits commerciaux : des sachets actifs combinant des propriétés de piégeage (d'oxygène par exemple) et d'émission (CO₂ ou éthanol).

2.5 Principaux acteurs

Il n'y a pas d'acteurs connus travaillant sur cette technologie en France et en Europe.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Le coût de cette technologie semble trop élevé dans un contexte de compétition avec des d'autres techniques aboutissant à des résultats similaires en France.

3- Impact environnemental

Les technologies d'émission de CO₂ et d'éthanol reposent sur des phénomènes extrêmement simples et présentent un surcoût à la fois économique et environnemental peu important. Mais évidemment, les technologies « concurrentes » qui consistent à traiter, de façon analogue, directement l'aliment sont encore moins impactantes.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie des emballages émetteurs a obtenu une note de 10 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	1	10

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

- Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans le cas de ces emballages, l'acceptation par les consommateurs dépend principalement de son impact sur l'aspect et la qualité finale du produit.

Dans l'ensemble, les consommateurs n'ont pas d'opinion tranchée en faveur ou contre l'usage d'emballages émetteurs d'éthanol. Les plus fortes objections font référence aux associations avec l'abus d'alcool et ce même si la quantité d'éthanol est minime.

En ce qui concerne les emballages émetteurs de CO₂ les consommateurs les associent à des mots tels que « propulsion » ou « aérosol ». Ils s'interrogent sur la façon de réaliser l'émission de CO₂. Les consommateurs ne souhaitent pas qu'une réaction chimique se produise dans l'emballage, ni que l'aliment soit en contact avec un produit chimique. Enfin, ils s'interrogent également sur l'utilité du système dès lors que l'emballage a été ouvert.

5- Dimension économique

Etant donné qu'il n'y a pas d'acteurs connus travaillant sur cette technologie en France et en Europe, aucune information n'est disponible sur l'aspect économique de cette technologie.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie d'emballages émetteurs :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la DLC 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Changement des qualités organoleptiques (CO₂) - Méfiance du consommateur - Préférence du consommateur pour des produits de panification non emballés - Coût élevé - Fort impact environnemental
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couplage avec les piègeurs - Secteur porteur de la RHF 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Technologies concurrentes - Marché occupé par les USA et le Japon

Bien que l'efficacité de la technologie ait été démontrée sur les produits de panification, son développement est limité. En effet, il présente un coût non négligeable et attire la méfiance du consommateur. L'émetteur de CO₂ peut être intéressant quand il est couplé à un piègeur à O₂.

EMBALLAGES A LIBERATION CONTROLEE D'ACTIFS ANTIMICROBIENS

Fiche consolidée par Nathalie Gontard (Université Montpellier), Philippe Saillard (CTCPA) et Sébastien Lurol et al (CTIFL)

Données clés

Résumé

L'incorporation de substances à effets antimicrobiens dans les emballages (par exemple acides organiques, huiles essentielles...) permet de limiter ou d'inhiber la croissance microbienne. Les principales applications concernent les produits carnés et le poisson.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Différents types de substances présentent un effet de limitation ou d'inhibition de la croissance microbienne (effet bactériostatique sur bactéries, levures, moisissures), ou même des effets biocides :

- Les acides organiques (acide propionique, benzoïque, acétique, sorbique...)
- Les bactériocines : nisine, natamycine
- Le lysozyme
- Certaines huiles essentielles telles que le romarin, la cannelle, l'origan, l'eugénol
- Les ions argent issus ou non de nanocharges, le nano TiO₂

L'incorporation de ces substances dans les emballages, ou leur greffage sur la face interne des emballages, permet d'une part une action progressive au cours du temps, d'autre part une action concentrée sur la surface de l'emballage et donc sur celle de l'aliment. Pour retarder ou empêcher le relargage des substances, différentes méthodes sont employées : l'encapsulation, l'incorporation dans des couches internes de matériaux multicouches, l'immobilisation sur des charges minérales de haute surface spécifique, l'incorporation dans des films de protéines qui libèrent l'actif après contact avec un aliment de forte activité d'eau.



Les huiles essentielles présentent un mode d'action facilité grâce à la volatilité des actifs, ce qui dispense de la nécessité d'un contact avec l'emballage. Mais à ce jour toutes les substances naturelles n'apportent qu'une réponse technologique partielle :

- Faible ratio entre l'efficacité des huiles essentielles et leur effet organoleptique.
- Faible activité des acides organiques,
- Coût trop élevé des bactériocines,

D'un point de vue uniquement technologique, les composés minéraux apportent la meilleure réponse.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Les antimicrobiens offrent des perspectives d'amélioration très sensibles de la DLC, avec un impact direct attendu sur le gaspillage alimentaire.

1.3 Comparaison avec l'existant

Avec un impact envisagé jusqu'à 50 % de gain de DLC pour certains produits, la technologie est susceptible d'offrir à l'ensemble de la chaîne de valeur, une marge de manœuvre plus que large pour un meilleur écoulement et la consommation des produits. Toutefois les performances sont très contrastées entre les différents types d'actifs. Tout particulièrement, les produits alimentaires qui présentent un contact intime avec l'emballage sont très favorablement impactés par l'utilisation d'ions argent.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Un certain nombre de substances antimicrobiennes (acides organiques, peptides, enzymes, huiles essentielles) peuvent déjà entrer dans la composition des aliments, soit comme ingrédient, soit comme additifs ; il n'y a donc pas d'obstacle formel à les utiliser en formulation d'emballage.

Toutefois, la réglementation sur les additifs alimentaire utilisés comme conservateurs identifie clairement certaines substances comme des additifs autorisés (acides sorbique, benzoïque, propionique, et leur sels). Leur utilisation est autorisée :

- dans certaines denrées seulement
- avec des doses d'emploi limitées
- et assortie d'un étiquetage obligatoire dans la liste de composition de l'aliment

Le statut des substances antimicrobiennes est donc très mal défini actuellement, dès lors qu'elle sont, fixées à la surface interne d'un emballage ou incorporée dans la couche interne de l'emballage, mais susceptible de migrer dans l'aliment, d'autant plus que cette migration est intentionnelle pour garantir un effet conservateur.

La notion de dose d'emploi en particulier pose un problème de concept, la substance réagissant en surface mais n'étant pas dispersée dans la masse de l'aliment. Il faut néanmoins rester vigilant sur l'impact organoleptique des huiles essentielles : le profil aromatique de la denrée alimentaire ne doit pas être modifié conformément à la réglementation.

La réglementation n'est pas non plus encore clairement établie pour les antimicrobiens de type ions métalliques. En effet :

- Pour l'argent, à ce jour il n'y a pas de NOAEL définie au sens strict des lignes directrices de l'EFSA (comme on le fait pour un nouvel additif par exemple). La NOAEL acceptée par l'EFSA est basée sur l'historique épidémiologique et pharmacocinétique mené dans le monde de l'eau potable (WHO "Guidelines for drinkingwater quality" (WHO, 2004). Historiquement les ions argent sont employés dans le monde du traitement de l'eau ; une personne ingère 10 g d'ions argent dans sa vie de 70 ans sans « risque » épidémiologiquement démontré, d'où la NOAEL extrapolée par l'EFSA = $10000 / (70 \times 365) = 0.39 \text{ mg / jour/ personne}$. Dans le traitement de l'eau potable les concentrations en ions argent vont jusqu'à à 0.1 mg/l pour garantir une efficacité bactéricide sans risque pour la santé, soit une exposition et ingestion de d'argent de 2l/jour/ personne et une exposition au cours de la vie de 5.1 g d'ion argent soit 50% de la NOAEL estimée.

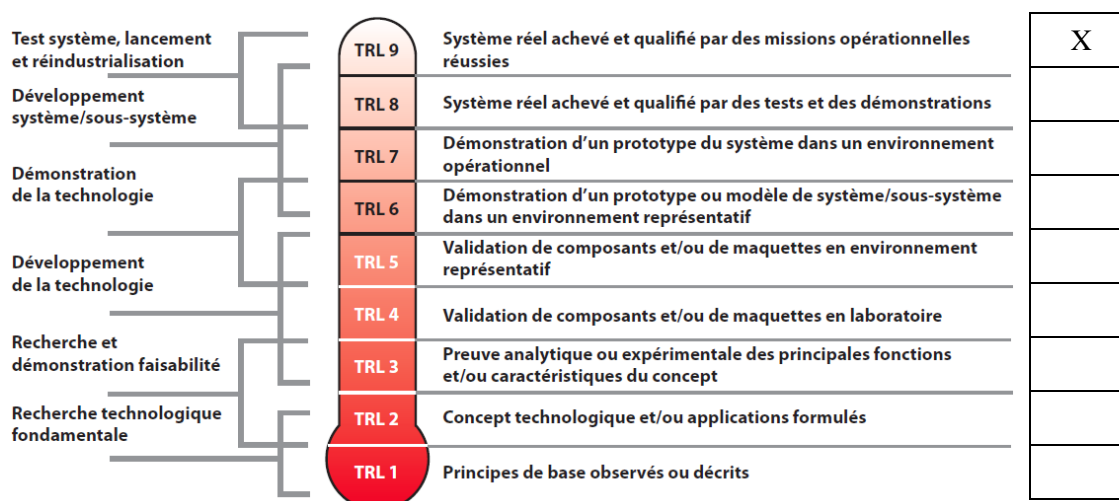
Considérant les données ci-dessus pour le domaine de l’emballage la décision a été de pondérer l’exposition du consommateur à l’argent par l’emballage. Aussi, une restriction de 50 µg/kg d’aliment a été fixée en tant qu’LMS. Ceci correspond à 13% de la NOAEL telle que définie ci-dessus. De manière générale tous les biocides base argent en lien avec l’emballage sont soumis à cette restriction de groupe.

- Le dioxyde de titane est présent dans la liste positive et à ce titre utilisable en tant que composant d’emballage. Toutefois, il n’est actif qu’à l’état de nanocharge et à ce jour, la nanocharge TiO₂ n’est pas inscrite sur la liste positive. La définition d’une substance à l’état nanoparticulaire est en outre *provisoirement* définie par l’Europe comme une substance qui comporte plus de la moitié de sa distribution en taille inférieure aux dimensions de 100 nm. Il est notamment prévu une révision possible du seuil de 50% dans cette définition.

Certaines agences nationales ont en outre émis un avis défavorable quant à la généralisation de l’utilisation d’antimicrobiens, en raison du développement des phénomènes de bactériorésistance aux éventuels futurs grands standards du marché.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l’échelle Technology Readiness Level (TRL) :



Les technologies ont été d’abord développées pour le secteur cosmétique, et ont aujourd’hui une bonne maturité. La question pour le secteur agroalimentaire est d’anticiper si toutes les voies développées seront éligibles pour une utilisation « telle quelle » dans le domaine agroalimentaire, ou bien si des adaptations devront être réalisées.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Les freins à la mise en œuvre de la technologie dépendent du type d’actif sélectionné pour le mécanisme de protection antimicrobienne :

- Les peptides et protéines à activité antimicrobienne ne pourront se développer qu’à partir d’une production industrielle dédiée, ainsi qu’à partir de voies d’isolement/purification des produits à grande échelle. Ces molécules naturelles ne posent aucun problème technique d’activité (forte), d’effet organoleptique (quasi nul), ni aucun effet de toxicité connu. En outre, le recours à des substances naturelles se heurte moins au verrou d’acceptabilité

consommateur. **Le verrou à lever est donc essentiellement économique, pour la production des substances actives.**

- Le développement de matériaux à base d'huiles essentielles devrait rester cantonné à des applications produits compatibles avec leur fort effet organoleptique. Leur utilisation reste soumise à la levée de **freins réglementaires**, et à l'avis des experts quant à l'**innocuité**.
- Le développement de matériaux à base de charges métalliques d'argent ou TiO₂ se heurte à ce jour à des **problèmes réglementaires**.
- Les substances de type acides organiques, déjà largement employées en tant qu'additifs alimentaires, devront trouver un statut particulier leur permettant d'être utilisés comme antimicrobiens « de surface » sans être soumis à la réglementation sur les additifs, mais plutôt comme substances admises dans la fabrication des matériaux d'emballage.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Deux évolutions majeures sont attendues en lien avec la technologie des matériaux antimicrobiens :

- La possibilité de produire des antimicrobiens de type peptides ou enzymes en quantité industrielle ;
- Le croisement des technologies de détection des emballages indicateurs, et de libération contrôlées des matériaux antimicrobiens, afin de ne solliciter les fonctions actives de l'emballage que lorsqu'elles s'avèreraient nécessaires.

2.5 Principaux acteurs

Beaucoup d'acteurs académiques interviennent dans le domaine des antimicrobiens : l'université de Lyon Biodymia, l'université de Montpellier, l'école Agrosup Dijon et l'ENSAIA Nancy.

Certains industriels européens mettent d'ors et déjà l'accent sur les propriétés antibactériennes de leurs emballages, tels le leader anglais Mondi avec sa gamme Sanocoat, ou la firme autrichienne Linpac. La société Polymix propose un matériau contenant des ions argent piégés dans de la zéolite avec un relargage progressif.

Le marché de la nisine, antibactérien chimique leader sur le marché, est quant à lui actuellement dominé par des acteurs asiatiques, et particulièrement chinois.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

- Forces :

Les forces au niveau national se situent au niveau du nombre d'acteurs intervenant dans le domaine, qui ont réalisé ces dernières années des efforts de dissémination des connaissances dans le secteur industriel.

- Faiblesses :

Malgré cet effort de visibilité, une animation nationale reste à développer, afin de structurer et mettre en synergie les différents acteurs académiques.

3- Impact environnemental

Deux types d'impacts sont discutés :

- En lien global avec la stratégie d'utilisation d'antimicrobiens : la recrudescence des phénomènes de bactériorésistance
- En lien avec la généralisation possible de l'utilisation de matériaux à libération contrôlée d'ions argent, la problématique de gestion de fin de vie

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie d'emballages à libération contrôlée d'actifs antimicrobiens a obtenu une note de 3 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclabilité	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	0	0	3

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

En considérant l'opinion plutôt négative qu'ont les consommateurs sur les conservateurs, il est à penser que l'image "high tech" et peu naturelle de cette technologie, combinée à la libération de substances mal perçues sera acceptée sous certaines conditions par les consommateurs. A priori ceux-ci réagiront de façon très distincte entre des allégations de type « antimicrobien » vs « antimicrobien d'origine naturelle », comme c'est déjà le cas dans le domaine cosmétique (réactions consommateurs littéralement opposées).

Les consommateurs risquent également de s'interroger sur les risques potentiels de la libération de substances qui interagissent avec le produit. Cependant si ces emballages remplacent les conservateurs ajoutés au produit, cette technologie sera sans doute acceptée.

5- Dimension économique

Le prix de marché de la nisine est actuellement inférieur à 0,10€/g.

Egalement, les ions argent sont largement utilisés de par le monde dans le domaine de l'emballage alimentaire mais aucune information chiffrée n'a été obtenue dans le cadre de cette étude.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie d'emballages à libération contrôlée d'actifs antimicrobiens:

Forces - Augmentation de la DLC - Qualité Sanitaire	Faiblesses - Les coûts - Méfiance du consommateur - Coût (peptides) - Réglementation (huiles essentielles) - Changement de la qualité organoleptique (huiles essentielles)
Opportunités - Développement industriel de la technologie	Menaces - Réglementation

La technologie est développée dans le domaine cosmétique, mais encore peu développée par les IAA.

Bibliographie

Acteurs :

Mondi, Sanocoat, <http://www.mondigroup.com/products/desktopdefault.aspx/tabid-1250>

Linpac, technologie antibactérienne, <http://www.linpacpackaging.com/en/news/201205/linpac-packaging-launches-innovative-solution-deliver-food-packaging-safety-and-drive>

(Sites consultés en octobre 2013)

Annexe

Entreprise	Produit	Url	Devis
Shangqiu Kangmeida Bio-Technology Co (Chine)	Nisine	http://chinaaowe.en.alibaba.com/product/246651378-200246263/NISIN.html	Pour 1 tonne achetée : Pureté 99% 130\$/kg
Hangzhou Focus International Trading Corporation (Chine)	Nisine	http://hzfocus.en.alibaba.com/product/999161993-218091337/Good_Price_Food_Preservative_Nisin_E234.html	Pour 1 tonne achetée : 56\$/kg
Hangzhou Uniwise International Co., Ltd. (Chine)	Nisine	http://cnuniwise.en.alibaba.com/product/953159249-209462678/Food_preservation_Nisin_1414_45_5.html?edm_src=sys&edm_type=fdbk&edm_grp=0&edm_cta=read_msg&edm_time=realtime&edm_ver=e	Pour 1 tonne achetée : 57.3\$/kg

BIOPRESERVATION

Fiche consolidée par Pascal Degraeve (Université Lyon)

Données clés

Résumé

La biopréservation est déjà utilisée industriellement sur des produits frais et fermentés en Europe. Le marché de la biopréservation est en pleine extension.

L'absence de cadre législatif et la manque d'exemples industriels font de la biopréservation une technologie risquée qui requière une bonne maîtrise bactériologique.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La biopréservation ou bioconservation vise à prolonger la durée de vie des aliments en maîtrisant la croissance des flores pathogènes ou d'altération par l'utilisation de flores bioprotectrices sélectionnées dans ce but. Ces micro-organismes bioprotecteurs peuvent inhiber/contrôler le développement de flores d'altération ou pathogènes par un ensemble de mécanismes tels que leur compétition vis-à-vis des nutriments, la colonisation d'une surface, la production de métabolites antimicrobiens plus ou moins spécifiques (acides organiques, peroxyde d'hydrogène, bactériocines...). Les bactéries lactiques impliquées dans la conservation de la plupart des aliments fermentés traditionnels (fromages, laits fermentés, produits de charcuterie, olives, choucroute...) constituent la source potentielle de souches bioprotectrices la mieux explorée.

La mise en œuvre de ces bactéries lactiques bioprotectrices peut être réalisée par pulvérisation ou trempage dans une suspension de ces bactéries commercialisées sous forme sèche (lyophilisée). Cela permet d'installer une flore de compétition à la surface des aliments qui est précisément le lieu des contaminations post-process par des flores altérantes ou pathogènes.

Un premier intérêt de la pulvérisation de micro-organismes bioprotecteurs à la surface des aliments par rapport à celle de conservateurs naturels réside dans le fait que la multiplication et l'activité métabolique (donc potentiellement la production de métabolites antimicrobiens) des micro-organismes vont être favorisés par des événements tels qu'une rupture de la chaîne du froid qui stimulent également le développement des micro-organismes d'altération ou pathogènes. En ce sens, ces systèmes de biopréservation peuvent être considérés comme intelligents. Un second intérêt des micro-organismes bioprotecteurs par rapport à des conservateurs peut résider dans la pluralité des mécanismes d'action d'un micro-organisme bioprotecteur et dans sa capacité à libérer simultanément plusieurs métabolites antimicrobiens : ceci peut rendre plus difficile l'adaptation des micro-organismes cibles (altérants ou pathogènes) au stress correspondant et limiter les risques d'apparition de souches devenues plus résistantes.

Comme toutes les techniques permettant d'améliorer la conservation des aliments, la biopréservation doit être vue comme un levier supplémentaire pour gagner encore en maîtrise des risques

microbiologiques par rapport à une démarche de base reposant sur les piliers du paquet Hygiène et de la démarche HACCP. Elle doit aussi être vue comme une technique de conservation reposant sur la théorie des barrières (« hurdle technology », Leistner, 1982) dans le sens où en elle-même, elle peut induire plusieurs facteurs constituant des barrières au développement d'autres micro-organismes (ex : baisse de pH résultant de la production d'acide lactique et production de bactériocines) et où elle peut être combinée à d'autres techniques de conservation déjà bien installées (atmosphères protectrices) ou au contraire également émergentes et jusqu'à présent sur des niches (traitements athermiques tels que traitements hyperbares).

Un challenge clé de la biopréservation réside dans le fait que l'implantation de micro-organismes bioprotecteurs en surface des aliments ne doit pas s'accompagner de modification notable des qualités organoleptiques (goût, odeur, texture, aspect...) des aliments. C'est une différence considérable par rapport aux aliments fermentés. Dans ce contexte, outre la sélection de souches présentant le meilleur compromis possible entre efficacité en termes de biopréservation et modifications non ou peu notables des qualités organoleptiques, une stratégie complémentaire peut consister à mettre en œuvre ces micro-organismes de façon à créer un microenvironnement qui leur soit favorable (Léonard *et al.*, 2013) et/ou qui ralentisse la colonisation « en profondeur » des matrices alimentaires. Plutôt qu'une pulvérisation directe des micro-organismes, il est ainsi proposé d'encapsuler ces micro-organismes, de les disperser dans une solution filmogène comestible qui formera en séchant un enrobage comestible autour des aliments trempés dans/ou pulvérisés par cette solution filmogène ou encore d'enduire la (les) face(s) en contact direct avec les aliments de films (ex : sac de conditionnement sous vide ou intercalaire placé entre 2 tranches de saumon fumé) ou barquettes de conditionnement avec cette solution filmogène. Enfin, il est aussi envisageable d'intégrer des micro-organismes dans des matériaux d'emballage et de jouer sur les propriétés barrière et/ou le microenvironnement de ces matériaux pour que les micro-organismes restent prioritairement dans ces matériaux et relarguent des métabolites antimicrobiens vers la surface des aliments en contact direct, à condition cependant que les techniques d'élaboration des matériaux puis le microenvironnement obtenu soient compatibles avec la survie des micro-organismes (Iseppi *et al.*, 2011, Léonard *et al.*, 2013 et 2014). Pour cette raison, les matériaux incorporant des micro-organismes bioprotecteurs ont été élaborés à l'échelle laboratoire par voie solvant (Gialamas *et al.*, 2010 ; Concha-Meyer *et al.*, 2011, Sanchez-Gonzales *et al.*, 2013). Dans ce contexte, former un biofilm microbien constitué de flores bioprotectrices à la surface des matériaux en contact des aliments tels que certains emballages est aussi une possibilité séduisante de mise en œuvre. Cette approche nécessiterait alors la maîtrise de l'adhésion et de la cohésion du biofilm ainsi formé à la surface de l'emballage

La bioconservation peut donc être également envisagée à partir de **L'inoculation des surfaces en contact avec l'aliment, généralement les parois de l'emballage. Dans ce cas, une moindre déviation organoleptique des aliments est attendue**, avec cependant également une moindre efficacité si le produit alimentaire n'est pas en contact direct avec l'emballage sur l'ensemble de sa surface.

Application et aliments concernés :

La biopréservation est une approche prometteuse pour allonger la durée de vie de denrées alimentaires hautement périssables (produits frais et ultra-frais, produits prêts à consommer (plats cuisinés, sandwichs, salades...)...). C'est probablement une des raisons pour lesquelles, le premier exemple de

son application industrielle (société MITI en utilisant les ferments développés par la start-up Biocéane en collaboration avec l'IFREMER et ONIRIS à Nantes) concerne les produits de la mer avec la commercialisation de crevettes cuites depuis 2002 (MITI). Les ferments permettent le passage d'une DLC de 10 à 20 jours sur ce produit. Les autres exemples actuels concernent la biopréservation de noix de St Jacques fraîches ou encore le ralentissement de la formation d'histamine dans des longes de thon, cela permet une amélioration à la fois de la fraîcheur du produit jusqu'à sa vente, et de sa qualité sanitaire.



Figure 1 : Applications de Biocéane

<http://www.bioceane.com/fr/bio-preservation>

Dans le domaine de la charcuterie, le procédé permet d'améliorer nettement la conservation du jambon entier, andouillettes, rôtis cuits conditionnés sous vide. Le ferment proposé est particulièrement efficace pour limiter la prolifération des bactéries lactiques rendant la viande poisseuse, ou des coliformes. Le procédé permet d'augmenter les dates limites de consommation de 40 à 90 jours avec une nette amélioration de la fraîcheur et des qualités sanitaires (Biocéane).

Pour d'autres produits comme des œufs de poisson fumé, le risque *Listeria* devait être mieux maîtrisé. Ce produit qui avait initialement une DLC de 10 jours, a aujourd'hui 18 jours de DLC et aucune présence de *Listeria* n'a été détectée depuis la mise en place de la biopréservation en 2011. Egalement, la biopréservation est utilisée sur la viande, mais les effets des ferments protecteurs se limitent le plus souvent à leur action anti *Listeria*. Les industriels préfèrent dans la majorité des cas utiliser les additifs chimiques moins chers, ou faire appel à des techniques de pasteurisation, stérilisation (Biocéane).

Par ailleurs, la société Biocéane a développé un service de contrôle qualité pour les brasseurs artisanaux (mesure de la quantité de contaminants, description des bactéries et évaluation du risque de conservation de leurs produits) qui a permis aux brasseurs d'améliorer la qualité de leurs bières, évitant des pertes coûteuses, et d'augmenter leur production. Parallèlement, elle a développé un service Biocépage qui permet aux viticulteurs sélectionner des souches de levures pour une bonne fermentation de leurs vins. Les viticulteurs évitent ainsi l'utilisation de levures industrielles standardisées (laboratoires Biocéane, <http://www.bioceane.com>).

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Le procédé permet d'augmenter très sensiblement la DLC de produits ultra-frais tels que les poissons ou crustacés frais. Le gain correspondant peut résulter de la diminution des pertes avant achat sur ce rayon au niveau de la distribution (gestion des stocks plus souples) et post-achat chez le consommateur. En améliorant la maîtrise du développement de micro-organismes pathogènes, altérant ou favorisant la formation d'histamine, ces ferments bioprotecteurs peuvent aussi limiter les retraits de lots pour non conformités et contribuer à améliorer la maîtrise du risque microbiologique par la filière des produits de la mer. Ce concept de biopréservation peut être étendu à la conservation d'autres produits alimentaires particulièrement sensibles : viandes fraîches, plats cuisinés prêts à consommer... Au-delà du marché européen, la stratégie de biopréservation pourrait être particulièrement pertinente dans des circuits sans chaîne du froid ou avec une chaîne du froid partiellement maîtrisée pour limiter les pertes et accroître la sécurité microbiologique.

1.3 Comparaison avec l'existant

L'innovation consiste à valoriser de façon contrôlée un mécanisme qui a naturellement lieu pour la conservation des produits fermentés traditionnels : on peut citer les produits laitiers, ou les aliments conservés en contact avec des surfaces naturellement riches en microorganismes à effet bioprotecteur (cf. le bois, Mariani *et al.*, 2011).

Contrairement aux stratégies d'utilisation d'antimicrobiens tels que l'argent qui ne reposent pas sur des mécanismes naturels, la biopréservation consiste uniquement à favoriser un développement microbien au détriment d'un autre en se basant sur les principes de base de l'écologie microbienne.

Par rapport à l'emploi d'extraits ou de molécules antimicrobien(nes) naturel(le)s qui nécessitent une extraction ou une purification relativement coûteuses après leur production, la production en masse de micro-organismes bioprotecteurs est nettement moins coûteuse ce qui constitue un avantage pour les industriels. Pour le consommateur, comme le distributeur et l'industriel, l'allongement de DLC est avantageux. Une des limites à un développement rapide et plus large réside dans le fait que les micro-organismes bioprotecteurs et leurs modes de mise en œuvre doivent être adaptés à l'aliment à conserver ce qui nécessite un important travail de R & D pour chacune des applications envisageables.

2- Mise en œuvre de la technologie

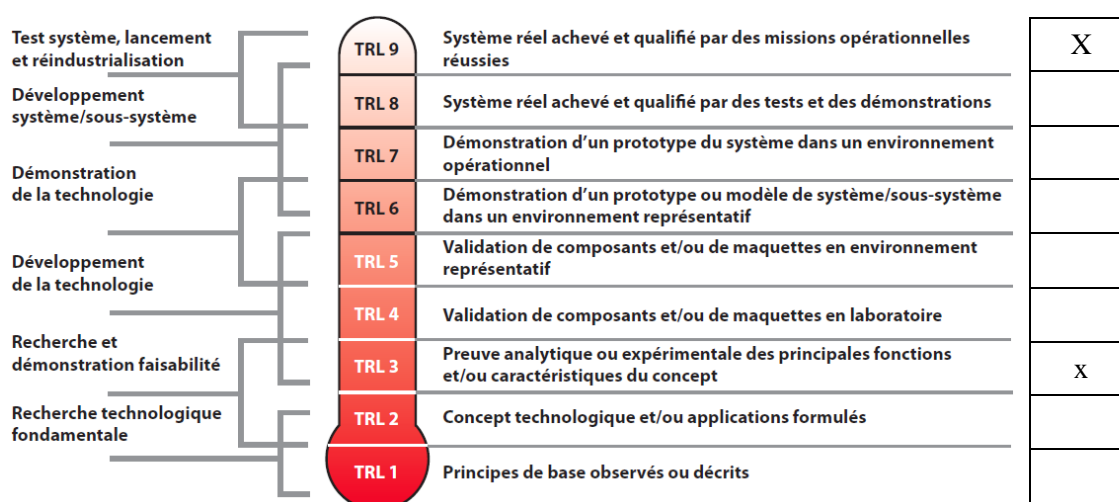
2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Le ferment LLO a obtenu un accord d'utilisation en France par la DGCCRF en 2002. A ce jour les utilisateurs de la technologie l'utilisent en temps qu'ingrédient : à ce titre le ferment n'est pas un additif mais un ingrédient de l'aliment. Les bactéries lactiques bioprotectrices apparaissent ainsi dans la liste des ingrédients des crevettes cuites commercialisées par la société MITI sous la forme « ferments lactiques ». Evidemment, dans ce cas la communication sur la bioprotection n'est pas possible. En outre, ce contour réglementaire ne permet pas pour le moment l'utilisation des ferments sur les surfaces d'emballage.

La plupart des bactéries lactiques ont un statut GRAS (Generally Recognised As Safe) aux USA et un statut QPS (Qualified Presumption of Safety) dans l'Union Européenne. Notons cependant que le statut QPS concerne les micro-organismes utilisés dans des procédés biotechnologiques de production d'ingrédients/additifs alimentaires mais pas leur incorporation directe dans les aliments. Depuis 2007, c'est l'Europe via l'EFSA qui gère les autorisations d'utilisation des micro-organismes dans l'alimentation humaine et animale. Il n'existe cependant aujourd'hui aucune réglementation européenne concernant la biopréservation. Il n'y a en théorie pas de frein mais chaque entreprise se doit de prouver l'innocuité des souches utilisées et leur efficacité. Un dossier a été déposé par Biocéane dans ce sens en 2009 auprès de l'EFSA, aucune suite n'a été donnée à ce jour. L'émergence du secteur pourrait amener à une évolution du contexte réglementaire. En effet, en lien avec l'élargissement prévisible des applications de la biopréservation, il est probable que des souches sélectionnées feront l'objet de dossiers administratifs d'autorisation d'usage, et pourraient donc alors être utilisées ouvertement pour leur fonction de stabilisation.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Technique ancestrale pour son application à certains aliments traditionnels fermentés, les premiers développements commerciaux concernant la biopréservation des crevettes cuites par la société MITI ont désormais plus de 10 ans et un nombre croissant de laboratoires privés et publics s'intéressent au développement de la biopréservation des aliments. C'est donc une technologie mûre (TRL9).

Cependant, la biopréservation est une méthode difficile à maîtriser pour la conservation des produits frais et ultra-frais et encore mal valorisée par rapport à ses capacités (TRL 3). Elle a de grandes perspectives d'évolution à ce jour. Elle pourra bénéficier des développements de la biofertilisation par des micro-organismes dans le domaine agronomique ou encore de l'encapsulation de bactéries probiotiques dans le domaine de l'alimentation-santé. La biopréservation pourra également tirer profit des développements technologiques et conceptuels réalisés dans ces domaines comme elle tire déjà profit des acquis sur les bioréacteurs à cellules immobilisées résultant du développement des procédés biotechnologiques pour élaborer des matériaux intégrant des micro-organismes bioprotecteurs.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Comme pour tous les mécanismes de protection antimicrobienne se pose la question de base de l'adaptation, la résistance progressive des flores pathogènes et d'altération.

Mais même si la question mérite d'être posée, il convient de souligner que les mécanismes de bioprotection sont eux-mêmes modulables et adaptables, via la sélection des souches, mais également de par le comportement dynamique spontané des populations microbiennes.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Les recherches à venir pour les 10 prochaines années pour diversifier les applications porteront principalement sur :

- Elargissement du spectre des applications produits
- Elargissement de l'offre de souches sélectionnées
- Maîtrise des consortia microbiens, et possibilité de combinaisons synergiques de différentes flores
- Maîtrise des modes d'inoculation des surfaces d'emballages, adaptation des couples flore/surface
- Nouveaux modes de préservation avec les bactériophages qui auraient des comportements plus sélectifs et spécifiques, mais évidemment qui appellent à une connaissance et une maîtrise plus pointue des mécanismes mis en jeu

2.5 Principaux acteurs

Au niveau national, le Réseau Mixte Thématique FlorePro a pour ambition de rassembler un ensemble de laboratoires publics (INRA Jouy en Josas & Aurillac, Secalim, GMPA AgroParis Tec) et de centres techniques agro-alimentaires (ADIV, Actalia, Aérial, IFIP) œuvrant à favoriser l'exploitation des micro-organismes bioprotecteurs pour la conservation des aliments. La région de Nantes qui rassemble le laboratoire Secalim ONIRIS-INRA (Contact : Dr Marie-France PILET), l'IFREMER (contact : Dr Françoise LEROI), la start-up Biocéane et la société MITI est le berceau du développement des travaux sur les micro-organismes bioprotecteurs. Au niveau national, l'incorporation de micro-organismes dans des solutions filmogènes est abordée conjointement par les laboratoires BioDyMIA (Université Lyon 1, site de Bourg en Bresse) et PAM (équipe PAPC, AgroSup Dijon-Université de

Bourgogne) notamment dans le cadre de la thèse de Lucie LEONARD codirigée par le Dr Nadia OULAHAL (BioDyMIA) et le Pr Rémi SAUREL (PAM). L'encapsulation de micro-organismes bioprotecteurs est un sujet en cours de développement au LiBio (Université de Lorraine, contact : Pr Anne-Marie REVOL-JUNELLES).

Au niveau industriel, au-delà de la start-up Biocéane, d'autres producteurs nationaux (Standa) ou mondiaux de ferments (Chr Hansen, DSM Food Specialties, Danisco, Cargill, DuPont, Lallemand etc...) et d'ingrédients ou d'additifs pour les industries alimentaires s'intéressent aux développements dans les domaines de la biopréservation et proposent déjà pour nombre d'entre eux des souches bioprotectrices pour différentes applications dans leurs gammes.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

- Le réseau de recherche est très dynamique et en lien avec les professions pour la production des ferments. Cela constitue une force. Cependant, il n'y a plus d'acteurs français jouant un rôle majeur sur le marché des ferments pour les industries alimentaires. La nécessité de développer les ferments à façon pour chaque catégorie d'aliment et les modes de mise en œuvre adaptés peut désintéresser des acteurs mondiaux et permettre l'émergence de start-ups comme Biocéane.
- Des recherches dans ce domaine sont également menées en Espagne (INIA et Universitat Politècnica de Valencia), Italie, Grèce au niveau public et par toutes les sociétés fournissant des ferments aux industries alimentaires
- La combinaison avec les matériaux d'emballages devra être poussée pour émerger.

3- Impact environnemental

Le gain environnemental est favorable dans la mesure où la production de micro-organismes bioprotecteurs est moins coûteuse en prix comme en énergie, eau et CO₂ que celle d'extraits ou de molécules naturelles antimicrobiennes. De plus, une diminution de quelques degrés de certaines températures de réfrigération peut être réalisée en présence de micro-organismes bioprotecteurs tout en conservant la même maîtrise du développement des micro-organismes altérants ou pathogènes ce qui peut constituer un autre bénéfice de cette technologie.

D'une manière générale, les ferments ajoutés sont naturels et utilisés en quantité infime ce qui conduit à un impact environnemental faible. Le ferment LLO disparaît au profit des germes altérants ordinaires, au même titre que les flores lactiques du lait. En évitant l'usage des additifs comme les polyphosphates (habituellement utilisés dans la conservation des crevettes décortiquées), la biopréservation contribue à diminuer l'usage et l'absorption de produits nocifs pour la santé.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de Biopréservation a obtenu une note de 4 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	1	0	4

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans l'ensemble, les consommateurs se montrent assez favorables vis à vis de cette technologie. Favorables dans le sens où il s'agit d'une technologie considérée comme naturelle et bien comprise. Les consommateurs connaissent les bactéries lactiques pour leur utilisation en fromagerie, et même dans l'élaboration de compléments alimentaires à vertus probiotiques (Cf. laits fermentés par *Lactobacillus*, *Bifidus*...). Ils savent que ce sont de « bonnes » bactéries et peuvent ainsi concevoir que ces « bonnes » bactéries éliminent les « mauvaises ». Cependant, un doute persiste quant à la quantité de bactéries qui serait nécessaire et suffisante pour empêcher totalement les autres bactéries de proliférer. De plus, le fait qu'il s'agisse d'une technologie associée à l'emballage et non d'un emballage « complexe » est perçu positivement par les consommateurs.

Quelques interrogations ont été soulevées et, en particulier, l'idée d'ajouter des bactéries dans certains aliments, qui semble être peu naturelle (si il s'agit de bactéries qui ne sont pas présentes naturellement dans l'aliment) et quelque peu effrayante. L'impact de la présence de bactéries sur la qualité de la nourriture, qu'il soit sensoriel et/ou visuel, est considéré comme étant un risque. Enfin, des consommateurs se sont interrogés sur la mesure dans laquelle des personnes intolérantes au lactose pourraient consommer un produit ainsi conservé.

Cependant, les consommateurs de produits bio-préservés sont en majorité ignorants de la présence du ferment protecteur. Le choix est porté sur le prix et le goût, jugé en général meilleur.

5- Dimension économique

Marché actuel

Environ 1000 tonnes de produits alimentaires sont bio-préservés par an en France ce qui est peu par rapport au potentiel de cette technologie. La France est pionnière sur ce marché. La biopréservation est utilisée principalement sur les produits fermentés soit les produits laitiers avec des emballages étanches types fromages frais, fromages avec croûte naturelle, produits à lait crus et les charcuteries. Biocéane est actuellement la seule société à proposer son utilisation sur les produits de la mer. D'autres sociétés concurrentes l'appliquent à la viande pour éviter les risques de *Listeria*. L'Europe reste prudente dans ce domaine comparée aux Etats-Unis qui ont une réglementation très souple et des consommateurs plus ouverts qui leur permettent de pulvériser de la viande avec des bactéries dès la sortie de l'abattoir.

Le marché des brasseries artisanales est actuellement en pleine expansion avec une demande de plus en plus accrue des consommateurs. De même, les viticulteurs ont de plus en plus le désir de travailler avec des levures issues de leurs propres raisins, autant pour améliorer la qualité du vin et éviter les pertes, que pour avoir une image de terroir plus forte. Les grands groupes producteurs de levures, ne sont pas intéressés pour produire à façon des levures en petites quantités, ce service sur mesure proposé par Biocéane connaît peu de concurrents (3 actuellement pour la sélection de levures, mais ils ne font pas les productions). La demande est croissante, Biocéane sera limitée dans sa capacité à produire des levures, elle envisage un maximum de 150 clients (20 aujourd'hui). Elle envisage de s'installer en Italie, Espagne, Portugal et Allemagne.

Les industriels sont de moins en moins réticents à utiliser des ferments, c'est un marché qui s'ouvrira progressivement.

Perspectives

Ces dernières années, l'évolution de la législation européenne limitant l'usage des conservateurs chimiques et une attente des consommateurs en faveur d'aliments peu traités et dépourvus d'additifs chimiques ont favorisé l'émergence de stratégies alternatives pour la conservation des aliments. L'utilisation de cultures bioprotectrices actives contre les champignons d'altération apparaît comme la meilleure façon de répondre à ces attentes.

Le programme de recherche ANR Funginib coordonné par l'Université de Bretagne Occidentale s'intéresse à cette thématique et vise au développement de cultures bactériennes protectrices antifongiques pour améliorer la conservation des produits laitiers fermentés pour trouver des solutions naturelles à la conservation.

Selon la société STANDA, la biopréservation est en phase de progression et représente l'avenir de leur entreprise en termes d'évolution de leur chiffre d'affaires même si pour l'instant elle représente moins de 10% de leur CA.

Le cadre législatif aujourd'hui très vague tend vers une meilleure visibilité pour les industries agro-alimentaires. L'évolution de la législation associée à des attentes consommateurs de produits plus naturels positionne la biopréservation comme une solution très pratique et présentant aussi un avantage pour l'exportation étant donné que cette technique permet un allongement de la DLC.

Par ailleurs, des études sont actuellement en cours pour coupler la biopréservation des crevettes avec la haute-pression, ce qui pourrait avoir des effets de synergies positives sur le marché des produits de la mer. Des essais sont actuellement en cours chez un cuiseur de crevettes entières régulièrement confronté à la présence de *Listeria*. Il ne s'agit pas d'augmenter la DLC des produits qui est de 11 jours, mais d'arriver à mieux maîtriser le risque *Listeria*, en utilisant le ferment protecteur comme barrière pour limiter les risques de prolifération du germe pathogène pendant la DLC (Biocéane).

Rentabilité économique

Dans le cas classique, la biopréservation consiste en l'ajout d'une faible population de ferments en début de process et constitue une technologie à bas coût extrêmement rentable avec un faible coût par produit et une marge importante pour les producteurs de ferments. D'après la société STANDA, le coût de traitement par produit est de l'ordre du millième de centimes d'euros.

Pour des process innovants ou à façon comme en propose Biocéane, le prix reste un frein pour le développement de la biopréservation dans les industries agro-alimentaire.

Le coût moyen est de

- 10 centimes/kg traité. Il est fonction de la quantité de ferment à rajouter et du tonnage annuel du produit ainsi traité.
- entre 12 et 24 €par échantillon pour des analyses dans les brasseries.
- 4000 €pour une recherche de levures dans une parcelle de viticulture
- 1,05 €bouteille pour production d'une levure

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de biopréservation :

Forces - Qualité sanitaire et DLC - Bonne perception des consommateurs - Economiquement intéressante	Faiblesses - Réglementation - Nécessite un emballage étanche - Nécessite des compétences en microbiologie
Opportunités - Diversification des applications - Réglementation plus claire - Demande de naturalité des consommateurs	Menaces - Marché de niche limitant le développement - Technique qui va à l'encontre du principe d'aseptisation

L'utilisation de microorganismes sur les produits alimentaires fermentés est un principe ancestral bien maîtrisé. Cependant, la biopréservation est novatrice dans le sens où des industries spécialisées proposent des souches ou des services d'analyse pour améliorer la qualité des produits et leur conservation. Les applications se diversifient de plus en plus sur toute la gamme des produits fermentés mais aussi sur les produits frais et ultrafrais. Le secteur est porté par le contexte du « clean label » où le consommateur rejette l'usage d'additifs alimentaires fussent-ils naturels. Les industries

agro-alimentaires recherchent les mentions « sans conservateur » et peuvent se tourner vers la biopréservation.

La réglementation aujourd'hui est quasiment absente sur ce procédé. Cela peut être perçu comme un avantage, dans le sens où le secteur est libre d'innover, ou comme un inconvénient. Les sociétés ne sont pas à l'abri de faire des erreurs qui terniraient l'image du secteur. Il est donc indispensable d'avoir une très bonne maîtrise bactériologique pour se lancer dans cette méthode de conservation. De plus, les entreprises ont besoin d'avoir une vision à long terme sur le marché, la réglementation pouvant se durcir à tout moment.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir des entretiens avec les équipementiers.

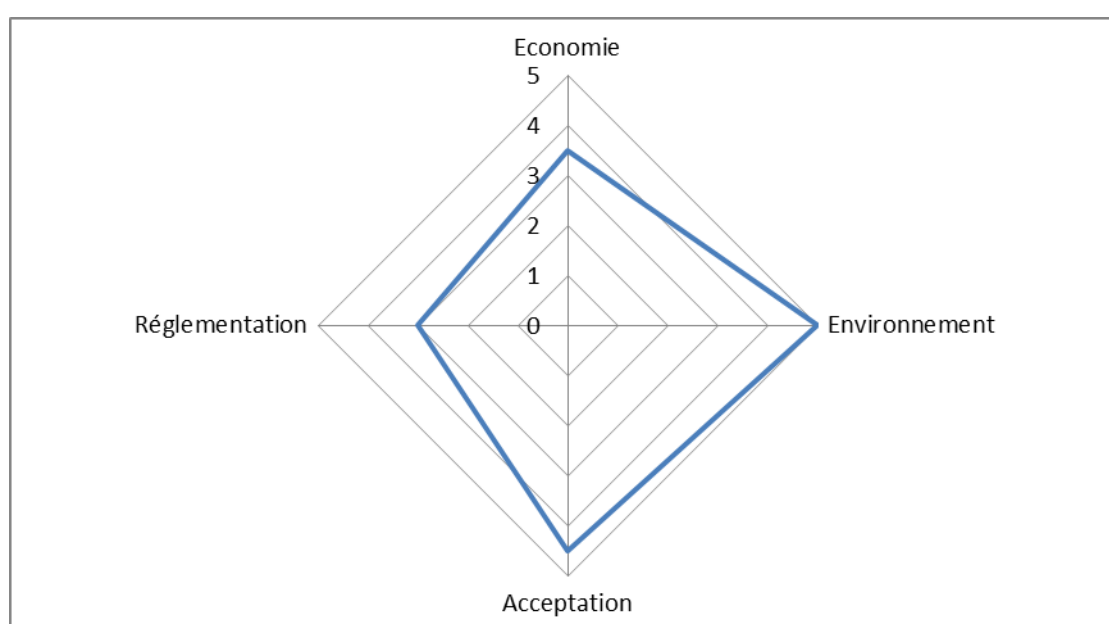


Figure 2 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Concha-Meyer, A., Schöbitz, R., Brito, C., & Fuentes, R. (2011). Lactic acid bacteria in an alginate film inhibit *Listeria monocytogenes* growth on smoked salmon. *Food Control*, 22(3-4), 485-489.

Gialamas, H., Zinoviadou, K. G., Biliaderis, C. G., & Koutsoumanis, K. P. (2010). Development of a novel bioactive packaging based on the incorporation of *Lactobacillus sakei* into sodium-caseinate films for controlling *Listeria monocytogenes* in foods. *Food Research International*, 43(10), 2402-2408.

Iseppi, R., De Nierhäusern, S., Anacarso, I., Messi, P., Sabia, C., Pilati, F., Toselli, M., Esposti, M. D., & Bondi, M. (2011). Anti-listerial activity of coatings entrapping living bacteria. *Soft Matter*, 7, 8542-8548.

Léonard, L., Gharsallaoui, A., Ouaali, F., Degraeve, P., Waché, Y., Saurel, R., & Oulahal, N. (2013). Preferential localization of *Lactococcus lactis* cells entrapped in a caseinate/alginate phase separated system. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 109, 266-272.

Léonard L., Degraeve P., Gharsallaoui A., Saurel R., Oulahal N. (2014). Design of biopolymeric matrices entrapping bioprotective lactic acid bacteria to control *Listeria monocytogenes* growth: comparison of alginate and alginate-caseinate matrices entrapping *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* cells. *Food Control*, 37, 200-209.

Mariani C., Oulahal N., Chamba J.-F., Dubois-Brissonnet F., Notz E., Briandet R. (2011). Inhibition of *Listeria monocytogenes* by resident biofilms present on wooden shelves used for cheese ripening. *Food Control*, 22, 1357-1362.

Sanchez-Gonzalez, L., Quintero-Saavedra, J. I., & Chiralt A. (2013). Physical properties and antilisterial activity of bioactive edible films containing *Lactobacillus plantarum*. *Food Hydrocolloids*, 33, 92-98.

BIOPRESERVATION PAR LES PHAGES

Données clés

Résumé

La biopréservation par les phages consiste en l'introduction de virus qui sont les bactériophages sur des produits alimentaires. Les bactériophages vont aller attaquer des bactéries type *Listeria monocytogenes* présentes sur les produits alimentaires. Cette technologie permet d'augmenter les qualités sanitaires des produits sans affecter ses propriétés organoleptiques. La recherche avancée sur cette technologie dans le domaine médical laisse envisager des possibilités de transfert intéressantes pour le secteur des IAA.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

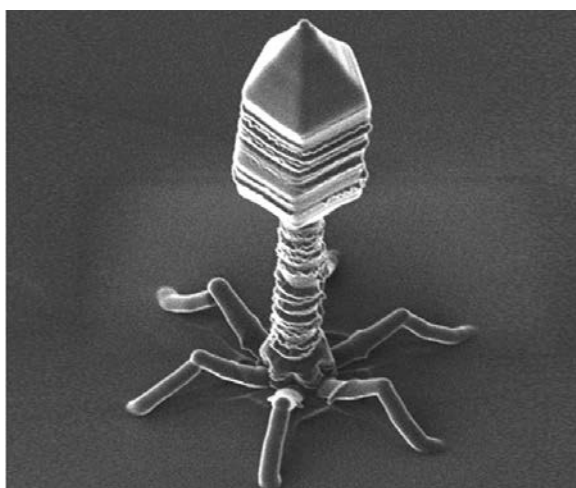


Figure 1 : Bactériophage (source <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bacteriophage>)

Les bactériophages sont des virus attaquant spécifiquement les bactéries. Ils sont naturellement présents en très grande quantité dans l'environnement. Leur action peut être extrêmement rapide puisque quelques heures d'action peuvent suffire à détruire l'ensemble d'une population bactérienne. Cette activité est à associer à une vitesse de reproduction très rapide, spécifiquement élevée pendant la phase de croissance des bactéries.

Sans effet sur l'homme, les animaux et les plantes, on envisage leur utilisation à la biopréservation des denrées alimentaires.

Les bactériophages sont caractérisés par une très forte spécificité (adhérence et récepteurs spécifiques) ; en dehors de leur cible, ils ne sont donc pas censés modifier les écosystèmes microbiens.

Des cultures phagiques de 10^9 phages par g sont préconisées pour une utilisation à des fins de biopréservation.

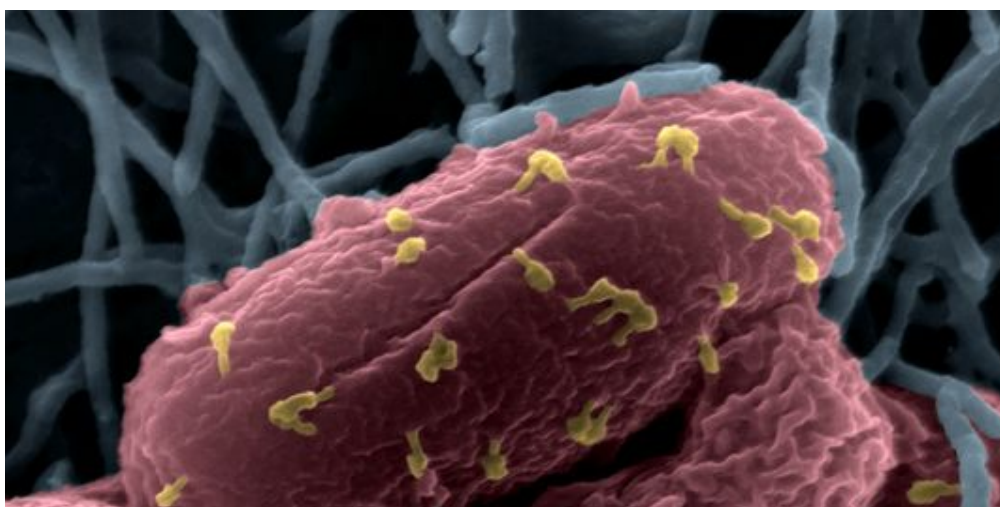


Figure 2 : Bactériophages sur la bactérie "Escherichia Coli" ; source <http://www.lemonde.fr/>

Exemples d'applications

- Activité anti *Listeria monocytogenes* : Viande crue, Fromages à pâte molle lavée, filets de saumon frais
- Activité anti *E. Coli* O157 :H7 : viande hachée, laitue, tomate, épinard, brocolis
- Activité anti *S. Typhimurium* et *Campylobacter jejuni* : viande crue

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

L'impact de la technologie est une stabilisation des aliments du point de vue microbiologique avec (i) globalement une amélioration de la DLC (ii) et ou plus spécifiquement une action sur des souches fortement indésirables

Le procédé est donc susceptible d'augmenter très sensiblement la DLC de produits frais. Le gain correspondant peut résulter en une diminution des pertes avant achat au niveau de la distribution (gestion des stocks plus souples) et chez le consommateur. En améliorant la maîtrise du développement de micro-organismes pathogènes, les bactériophages peuvent aussi limiter les retraits de lots pour non conformités et contribuer à améliorer la maîtrise du risque microbiologique.

1.3 Comparaison avec l'existant

Les phages présentent trois intérêts majeurs par rapport aux voies de biopréservation classiques :

- Leur spécificité
- L'absence de modification des propriétés organoleptiques des produits alimentaires (du fait de leur composition et de leur action directe sur les bactéries)
- Leur efficacité, aussi bien en termes de cinétique d'action que d'intensité

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

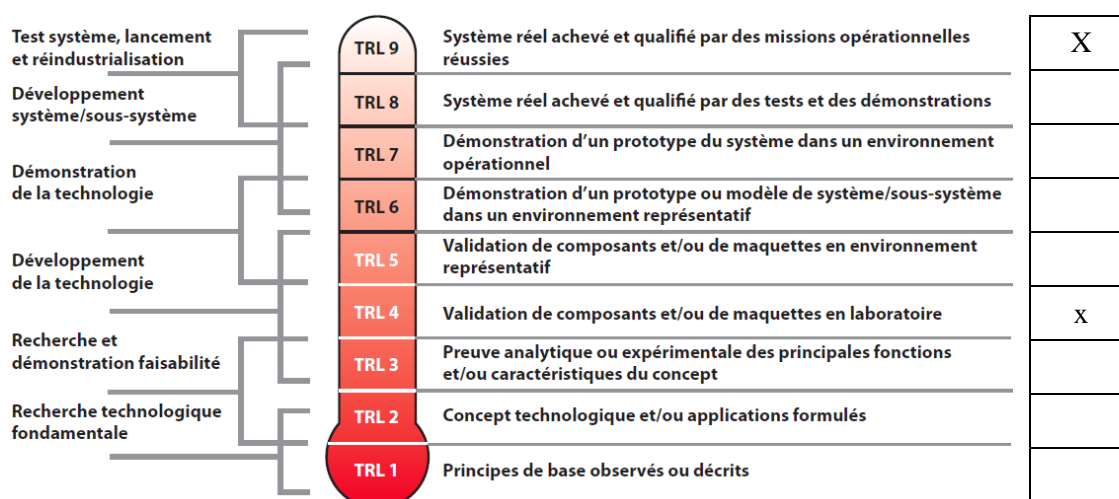
La limite de la technologie pourrait être l'acquisition de résistance par les bactéries. Ce sont donc des cocktails de bactériophages qui sont envisagés pour application dans le domaine de la biopréservation des aliments.

A ce jour la technologie n'est pas utilisée en Europe ; elle a en revanche été validée par la FDA ; plusieurs cocktails ont été ainsi validés, pour utilisation par voie de pulvérisation sur équipements et sur aliments.

L'EFSA a publié un avis validant l'efficacité des bactériophages pour éliminer certains pathogènes dans les produits alimentaires ; en revanche l'EFSA recommande la poursuite des recherches sur la persistance des bactériophages et leur activité en cas de recontamination.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Si la maturité de la technologie peut être considérée au plus haut niveau pour certaines applications, il est certain que la technologie ne peut pas être considérée comme aboutie car :

- En attente de connaissances scientifiques plus abouties en Europe
- Limitée à ce jour à des applications bien ciblées, bien en deçà du large spectre d'applications possibles

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

En amont des freins réglementaires et des impacts sur la résistance bactérienne en cas d'une généralisation de leur usage, les bactériophages se heurteront évidemment à des questionnements d'acceptabilité sociétale.

2.4 Evolution possible de la technologie à l’horizon 2025

Désormais en application pratique aux Etats Unis c’est le spectre des usages, adapté à toutes les spécificités de produits alimentaires, qui va s’élargir à moyen terme.

2.5 Principaux acteurs

- Intralix (Etats Unis)
- Micros food safety (Pays Bas)

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

- **Faiblesses :**

Réglementation européenne

- **Forces :**

La recherche sur les bactériophages est fortement développée au niveau médical avec de nombreux laboratoires impliqués dans le développement de la technologie, en substitut de l’usage des antibiotiques.

Depuis quelques années certains laboratoires historiquement focalisés sur la biopréservation des aliments s’intéressent désormais à la voie bactériophage.

3- Impact environnemental

Du point de vue de l’impact environnemental de la production des bactériophages et de leurs voies d’application, la technologie peut être considérée comme très peu impactante sur l’environnement.

Les questions posées concernent plutôt l’impact long terme sur la résistance des bactéries et sur les écosystèmes ; l’usage de cocktails complexes permettrait de répondre à ces limitations.

Suite à l’évaluation de toutes les technologies en termes d’impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d’après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de Biopréservation par les phages a obtenu une note de 4 pour l’indice Coût environnemental par rapport à l’existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	1	0	4

L’échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d’emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d’emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d’emballage -1: la technologie réduit la quantité d’emballage

•**Intensité ressource par kg d’emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

•**Recyclage**: 1: l’emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l’emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L’échelle pour l’indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d’impact sur l’environnement sur les trois critères qu’une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d’impact sur l’environnement sur les trois critères qu’une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

La biopréservation microbienne étant bien acceptée par les consommateurs, on peut supposer que la biopréservation par les phages le sera également. Cependant, l’utilisation de bactériophages peut sembler moins naturelle et entraîner des craintes chez le consommateur, même si l’usage du terme bactériophage est plus rassurant que la dénomination de virus.

5- Dimension économique

Les informations économiques ne sont pas disponibles sur les sites internet de Microos et Intralix. Des demandes de devis ont été envoyées.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de biopréservation par les phages :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire et DLC - Economiquement intéressante - Technologie naturelle 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Nécessite des compétences en microbiologie
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diversification des applications - Réglementation plus claire - Demande de naturalité des consommateurs - Transfert du domaine médical 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement - Acceptabilité sociale - Résistance des bactéries

Bibliographie

Flores protectrices pour la conservation des aliments, Monique Zagorec, Souad Christeians, Editions QUAE 2013

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Bacteriophage>

http://www.nutriweb.tv/gelezen.index.asp?TAAL_ID=2&LEVEL1_ID=18&ARTIKEL_ID=8

fr.wikipedia.org/wiki/Phagothérapie

Communications RMT Flore Pro

TRACABILITE ET TECHNOLOGIES RFID

Fiche consolidée par Coralie Gallis et al (CEA Grenoble), Olivier Rouxel (Ministère du redressement productif) et Sébastien Lurol et al (CTIFL)

Données clés

Résumé

Technologie d'étiquetage nouvelle génération, elle apporte une traçabilité extrêmement complète et de la praticité pour la gestion des stocks.

Aujourd'hui, elle est peu développée dans le domaine de l'industrie agro-alimentaire, bien que la réglementation lui soit favorable. Elle représente un coût important et requiert l'équipement simultané de toute la supply chain pour que les acteurs puissent ajouter et lire l'information.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La traçabilité alimentaire est une exigence des consommateurs en termes d'identification de la provenance et de la qualité des produits. Mais elle constitue également l'outil central de maîtrise de la qualité de la chaîne logistique. Sous exploitées aujourd'hui en raison des limites des outils en place, les technologies de traçabilité sont en voie de bénéficier des avancées techniques de la microélectronique.

- **Les codes à barres** utilisent divers systèmes de codification. Les trois types de codes-barres les plus utilisés sont les codes-barres unidimensionnels, les codes-barres linéaires empilés, et les codes-barres à deux dimensions. Les *codes à deux dimensions* permettent de coder un volume de données plus important.
- **Les étiquettes RFID** peuvent être considérées comme les codes-barres de nouvelle génération. Elles permettent de stocker un volume plus important d'informations, qui peuvent être dynamiquement implémentées ou modifiées tout au long du monitoring de la chaîne technologique. Conceptuellement, la RFID et le codage à barres n'ont pas de différence fondamentale en ce qui concerne leur fonction : toutes deux transportent des informations d'identification. La différence principale entre ces deux technologies est que le codage à barres se lit avec un laser optique tandis que le lecteur RFID (souvent sous forme de portique) interroge une étiquette en utilisant des signaux de fréquence radio. L'étiquette RFID se compose principalement d'une puce électronique et d'une antenne. Les *étiquettes passives* fonctionnent en lecture seule, elles captent certaines fréquences qui lui fournissent l'énergie nécessaire pour l'émission d'information. Les *étiquettes actives* sont alimentées par une batterie intégrée qui fournit l'énergie nécessaire à l'émission et l'écriture de données. Certaines étiquettes passives peuvent fonctionner en lecture/écriture. Il existe également la catégorie des étiquettes semi-actives (énergie embarquée uniquement pour enregistrer des informations en mémoire, mais utilisation de l'énergie induite par le lecteur pour lui répondre).

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

La traçabilité alimentaire n'a pas pour premier objectif de limiter le gaspillage alimentaire. Elle répond tout d'abord aux exigences réglementaires et aux attentes du consommateur (i) en termes de sécurité des aliments et afin d'avoir une meilleure réactivité en cas de crise sanitaire et opérer des retraits ou rappels ciblés de produits alimentaires.

Toutefois la traçabilité et la gestion de son historique sont un outil qualité potentiellement très riche pour limiter le gaspillage alimentaire :

- Détection des sources de pertes par la mise en place de bilan matière et mise en place d'*actions correctives*,
- Gestion affinée, à partir de données statistiques sur des historiques de pertes/gaspillage de produits, des durées de vie des produits en fonction de leurs parcours technologiques, et *priorisation de l'écoulement de lots* en fonction de leur provenance et de leur historique, par une gestion « First In / First Out ». C'est notamment l'objectif recherché par la SCARMOR dans sa plateforme logistique RFIDisée.

Au-delà de l'identification détaillée d'un lot et de ses différentes étapes logistiques et de transformations, les capteurs RFID peuvent permettre une *traçabilité complète de données physiques* de base telles que l'historique de température, ou le monitoring d'humidité relative. Comme précédemment, ces données peuvent être exploitées (i) dans une démarche de correction de défauts, ou (ii) pour prioriser ou orienter spécifiquement les flux de produits. Dans les deux cas, ce travail vise à réduire le gaspillage alimentaire tout en augmentant la profitabilité.

1.3 Comparaison avec l'existant

La maîtrise de la traçabilité n'est pas un nouvel impératif pour l'industrie agroalimentaire, mais les technologies d'aujourd'hui offrent via la palette des outils classiques et RFID

- La simplification de gestion des données, spontanément réalisée par la transmission automatique de données,
- Un volume de stockage d'information accru, et donc un élargissement des types de données possiblement enregistrées,
- La possibilité d'association à des capteurs pour le stockage de données physiques temporelles.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Exigences

La technologie est encadrée par le Règlement (CE) n° 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 concernant les matériaux et objets actifs et intelligents destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. Se pose alors la question de leur innocuité : à ce jour, en l'absence d'une liste établie de substances autorisées pour les emballages actifs et intelligents, tous les nouveaux produits doivent passer par la soumission d'un dossier à l'EFSA, ce qui constitue un frein provisoire au développement rapide des technologies.

Cependant, la réglementation européenne est relativement stricte en matière de traçabilité des denrées alimentaires. Les obligations varient selon les produits :

- Viande bovine : obligation de traçabilité en ce qui concerne l'élevage, l'abattage et la transformation.⁵
- Produits de la mer : origine des produits frais vendus en vrac
- Fruits et légumes : origine étiquetée, pour les produits non transformés

Depuis plusieurs années, la Commission européenne œuvre à la création d'un environnement politique qui encourage l'utilisation de la technologie RFID en Europe tout en garantissant la protection des données personnelles.

Après avoir adopté en novembre 2006 deux décisions relatives à l'harmonisation en Europe du spectre radioélectrique pour l'utilisation de dispositifs à courte portée et de faible puissance (en particulier l'ouverture de la bande 865-868MHz aux dispositifs RFID), et confortée par une grande consultation publique menée à l'été 2006, la Commission européenne a publié en mars 2007, sous l'impulsion de la commissaire Reding, un plan d'actions pour une politique européenne en matière de RFID qui s'est traduit par :

- La création du « RFID Experts Group » (auquel la France a participé) pour l'aider dans sa réflexion ;
- Le mandat 436 confié fin 2008 aux organismes de normalisation européens pour élaborer des normes améliorant la protection de la vie privée dès la conception des puces RFID. L'organisation entre CEN, CENELEC et ETSI est en cours de définition;
- Le lancement début 2009 du réseau thématique RFID européen « Race », animé par un consortium de 25 partenaires comprenant plusieurs acteurs français et chargé dans un premier temps de faire un inventaire des projets et déploiements RFID en Europe ;
- La publication le 12 mai 2009 (après consultation publique courant 2008) d'une recommandation sur le respect de la vie privée et la protection des données en RFID, qui pourrait fortement impacter tous les acteurs, en particulier ceux de la grande distribution.

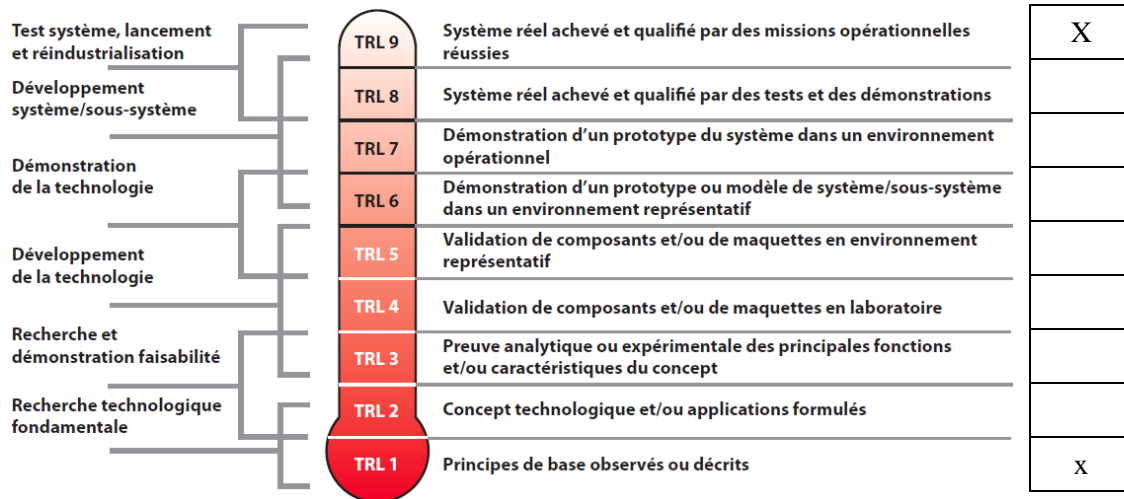
Risques sanitaires

Les technologies de traçabilité sont tout d'abord des outils de minimisation du risque sanitaire. Toutefois des contrexemples peuvent être cités, cf. l'exemple des médicaments dont les principes actifs pourraient être modifiés par certaines technologies de traçabilité, Cf. les ADN synthétiques, etc.

⁵ Ces obligations se sont particulièrement renforcées suite à la crise de l'Encéphalopathie Spongiforme Bovine (ESB) des années 1990

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level (TRL) :



Les technologies les plus courantes d'identification peuvent être considérées, du moins sous leur forme actuelle, au stade de pleine maturité.

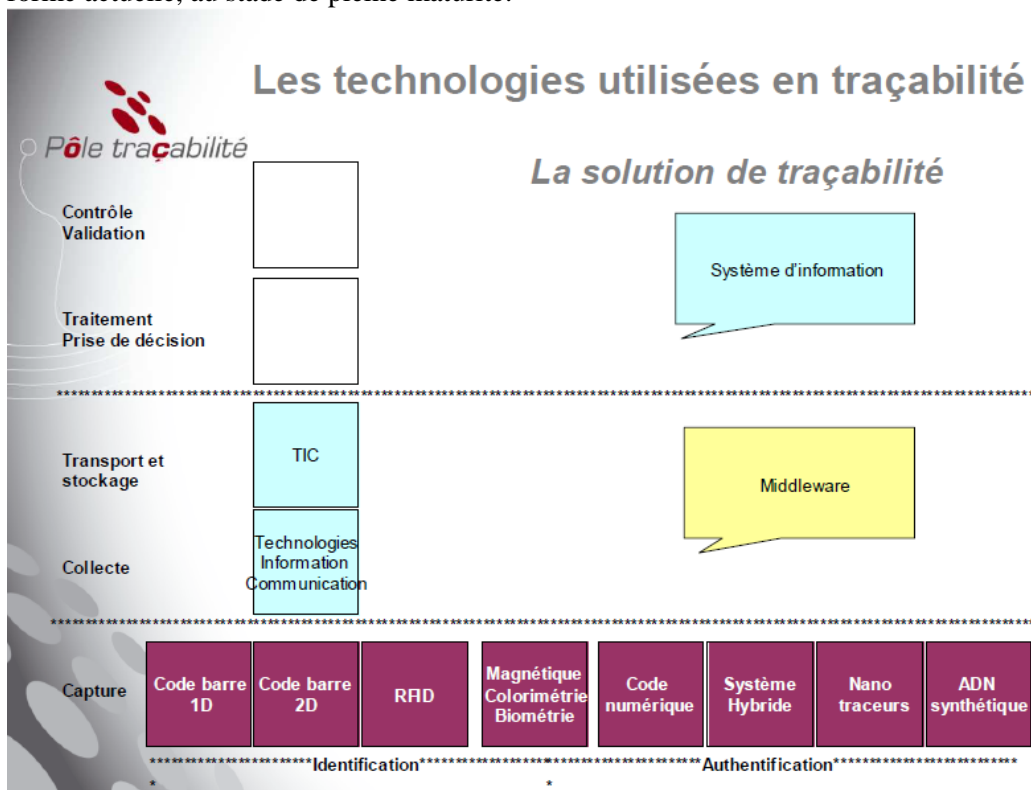


Figure 2 : Technologies utilisées en traçabilité
http://www.i-trans.org/mediatheque/pdf/Pres_tracab2_LOUBRY.pdf
 Capture d'écran effectuée : 12/01/2014 11:45

En revanche les technologies d'authentification plus pointues et difficiles à reproduire sont à des stades de développement plus contrastés.

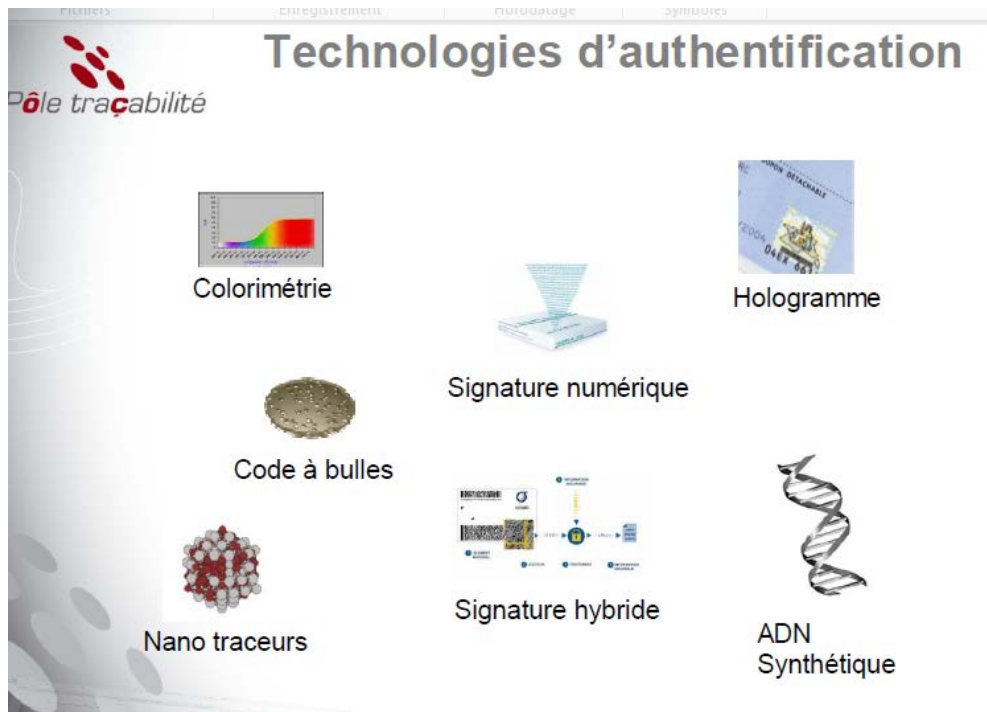


Figure 3 : Technologies d'identification
http://www.i-trans.org/mediatheque/pdf/Pres_tracab2_LOUBRY.pdf
 Capture d'écran effectuée : 12/01/2014 11:52

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Appliquée systématiquement aux emballages unitaires, la technologie RFID est trop lourde pour constituer un outil de base incontournable de l'industrie agroalimentaire. Elle est envisageable et déjà utilisée pour le marquage de lots sur containers réutilisés, mais le **marquage à l'échelle des unités de vente consommateur représente encore un coût trop élevé. Ce coût bloque ce qui constituerait une avancée majeure : la valorisation de cette technologie auprès du consommateur.** En effet, la place du consommateur dans la chaîne de valeur et la réduction du gaspillage peut être renforcée grâce aux outils de traçabilité :

- (i) en l'aidant à prioriser la consommation de ses produits ;
- (ii) en faisant remonter ses données de consommation et de rejet via des outils inexistants à ce jour (sous réserve d'acceptation par le consommateur lui-même).

Les outils doivent donc évoluer de manière à enrichir les fonctionnalités de la RFID, tout en les simplifiant ou/et miniaturisant afin de diminuer le coût de la technologie.

Toutefois, il ne faut pas oublier que les outils de traçabilité concernent avant tout la chaîne technologique amont où elle apporte une meilleure traçabilité/inventaires dans les flux logistiques, les entrepôts, les processus industriels. A l'heure actuelle, la RFID répond tout particulièrement à cette partie amont. D'ailleurs, si l'apport de la RFID aux industries de production, transformation, et

distribution est indiscutable (appliqués à des volumes importants), l'intérêt de la technologie en aval est souvent discuté, et le modèle du réfrigérateur intelligent considéré par certains comme une fausse bonne idée.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Quatre tendances d'évolution peuvent être prévues :

- Développement des technologies d'authentification
- Les technologies de marquage vont bénéficier de l'avancée des nanotechnologies : « nano » RFID, impression de circuits à partir de nanoencres (i.e. encres à base de nanoparticules métalliques à faible point de fusion), marquage dans la masse des matériaux avec des nanocharges
- L'application des métamatériaux à l'antenne RFID permet d'améliorer ses performances, grâce à un gain et une directivité améliorée
- Une possibilité d'utilisation des informations par le consommateur apportée par des moyens de lecture partielle des informations. L'interopérabilité de bout en bout et avec le consommateur en fin de chaîne requiert l'usage des standards GS1
- Une convergence des technologies de traçabilité avec d'autres moyens de qualification/quantification de la qualité des produits, et les outils de synthèse et exploitation des informations

2.5 Principaux acteurs

• France :

Le principal acteur académique français est le Laboratoire d'Electronique des Technologies de l'Information (LETI), rattaché au CEA de Grenoble. Le LETI est en effet l'une des plus grandes organisations de recherche appliquée en matière de microélectronique et de nanotechnologies dans le monde. Le CEA de Grenoble est en outre membre du Centre National de la RFID (CNR RFID) aux côtés de 14 autres membres académiques, dont le CNRS, l'école ISEN de Toulon, et l'Université d'Aix Marseille. Le CNR RFID compte également plus de 200 partenaires offreurs de solutions, présents sur le sol français, et particulièrement sur le campus Minatec.

L'institut Liten-CEA travaille sur l'électronique organique imprimée. Il est possible de faire avec cette technologie des tags d'authentification, des tags simples (le tag contient son code à l'origine). Pour des tags plus complexes, des tags RFID actifs, il faut passer par des technologies silicium, développées au LETI-CEA.

A titre d'exemple de la diversité des acteurs présents en France, on peut citer la solution de traçabilité du français QualiBoo, reposant sur un système passif à code-barres.

• International :

Le CNR RFID compte également des membres académiques européens tels que l'European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

A l'échelle industrielle, on remarque un grand nombre d'acteurs européens et américains, parmi lesquels : 3M (Etats-Unis), Metsä Board (Finlande), Acreo (Suède), SoMark (Etats-Unis). En complément de ces spécialistes, on remarque la présence de grandes firmes de l'électronique et de

l'impression : Philips, IBM, Epson, Canon, Xerox. Ces entreprises sont particulièrement actives en matière d'impression de circuits transistor sur films plastiques.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

- **Forces :**

La France présente un très fort potentiel, particulièrement grâce au succès du pôle de compétitivité Minalogic. Les nouvelles orientations du pôle grenoblois, associant technologies microélectroniques ET numériques, ouvrent de nouvelles perspectives. En effet, les innovations à venir dans le domaine de la traçabilité porteront autant sur des produits électroniques innovants que sur des standards de communication et d'exploitation de données.

- **Faiblesses :**

Toutefois, l'implication de tels acteurs dans le secteur de l'agroalimentaire n'est que très récente. Contrairement au secteur médical, qui a rapidement bénéficié du fort investissement public en faveur de Minalogic, les IAA n'ont pas constitué une priorité dans le développement et la déclinaison des technologies de traçabilité. A titre d'illustration, le projet européen PASTEUR, dédié aux technologies de limitation du gaspillage alimentaire, ne compte aucun partenaire français.

3- Impact environnemental

L'impact environnemental varie fortement selon les technologies envisagées. On notera cependant une série de critiques contre les technologies actuelles, qui reposent sur des objets complexes et non recyclables.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de RFID a obtenu une note de 10 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	1	10

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans l'ensemble, les consommateurs sont assez sceptiques quant à l'utilisation de la RFID. Ceci est en grande partie dû au fait qu'ils tiennent compte des risques non négligeables associés à la RFID. Ils pensent aux risques pour leur vie privée car la RFID pourrait être utilisée pour les suivre dans les magasins, ou après achat : les entreprises pourraient lister le contenu d'un réfrigérateur intelligent. Dans de tels cas, les consommateurs ont indiqué que les traceurs RFID auraient intérêt à être désactivés définitivement à la sortie du magasin, même si cela impliquait la suppression de toute offre de fidélité aux clients (Pramatari and Theotokis, 2009).

En outre, ils se demandent si les ondes radiologiques pourraient affecter leurs achats ou contaminer le produit. Les consommateurs s'interrogent également sur le type de données qui seront collectées et leur intérêt par rapport aux indications déjà présentes sur les étiquettes. En comparaison avec d'autres technologies, telles que les indicateurs temps/température, la RFID n'est pas perçue comme très informative puisque les renseignements portés par la puce sont fixes et ne varient pas en fonction de l'état du produit. Cela amène les consommateurs à se demander si la RFID présente un réel avantage par rapport aux autres techniques d'information « fixes », telles que les codes-barres par exemple. Bardaki, Kourouthanassis et Pramatari (2010) ont montré que la majorité des consommateurs était satisfaite des services exploitant la technologie RFID, mais qu'elle ne les considérait pas meilleurs que les services n'utilisant pas les TIC.

Par ailleurs, étant donné que le contenu de la puce n'est pas visible, à moins d'avoir des lecteurs spécifiques, les consommateurs se demandent dans quelle mesure la fraude par saisie de fausses informations dans la puce pourrait être rendue facile.

Les consommateurs reconnaissent néanmoins que cette technologie n'a pas d'impact direct sur la qualité de l'aliment. Si le suivi et le traçage RFID sont rendus accessibles et réalisés par de petites entreprises, si la vie privée des consommateurs est garantie et si une réglementation stricte concernant son utilisation abusive est mise en place alors les consommateurs accepteront la technologie.

Cette technologie sera sans doute de plus en plus usitée grâce notamment au développement des Smartphones. L'usage futur de la RFID pour assurer le contrôle d'aliments périssables dans les réfrigérateurs intelligents a été considéré comme étant une application intéressante, pouvant présenter de clairs avantages pour les consommateurs. S'il s'agit d'une application plus complexe à long terme, les bénéfices pour les consommateurs devront être mis en avant. Un autre avantage pourrait être de suivre les aliments en vrac (palettes) depuis la production jusqu'à la distribution.

En conclusion, l'opinion concernant la RFID et les autres méthodes de traçage semble ambivalente. Un attrait pour l'amélioration de la distribution et des services associés est certain, mais l'inquiétude concernant la protection des données personnelles semble prépondérante. La réglementation et la mise en place de contrôles de l'utilisation des informations sensibles collectées par le biais de la technologie RFID sont considérées comme des pré requis pour l'acceptation de cette technologie, car toute protection moins stricte est considérée insuffisamment prévoyante au vu du niveau actuel de confiance des consommateurs (Lee and O'Mahony, 2007).

La traçabilité et la diminution du gaspillage ne sont pas apparues comme des incitations majeures à l'utilisation de la RFID dans les publications étudiées.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Au lancement, la RFID était perçue comme la solution miracle. Cependant, aucun acteur majeur des IAA ne s'est lancé. Un acteur isolé rencontrerait des difficultés puisque toute la chaîne doit être équipée pour pouvoir ajouter de l'information et la lire.

Cette technologie a une dizaine d'années et a été poussée par la grande distribution (Métro) dans l'idée du magasin du futur. Elle permettrait au consommateur d'être débité directement en passant sous un portail (suppression du passage à la caisse ou au scanner).

Perspectives

Avec le temps, il y a de fortes probabilités pour que le consommateur soit demandeur de cette technologie, d'autant qu'elle facilitera le passage en caisse.

Rentabilité économique

La gamme de produits est tellement large qu'il est difficile d'évaluer le prix global.

Le prix des puces RFID se situe entre 5cts et 15 cts. Il dépend des volumes achetés et des UHS. Il est aujourd'hui un frein pour les industries. Le système RFID requiert des équipements sur toute la chaîne pour pouvoir ajouter l'information et la lire. Ces équipements sont un investissement trop important pour les industries agro-alimentaires.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la RFID:

Forces <ul style="list-style-type: none"> - Traçabilité - Réglementation - Répond aux exigences du consommateur - Gestion des stocks en amont 	Faiblesses <ul style="list-style-type: none"> - Prix - Méfiance des consommateurs (données privées) - Toute la supply chain doit être équipée
Opportunités <ul style="list-style-type: none"> - Avancées techniques de la microélectronique - Réduction du temps en caisse 	Menaces <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement

Sous la technologie traçabilité et RFID, on regroupe les codes à barres (1D et 2D) et les étiquettes RFID en voie de bénéficier des avancées techniques de la microélectronique, pour permettre d'apporter au consommateur plus de traçabilité. Elle répond à une demande des consommateurs, suite à de nombreux scandales médiatiques, et aux exigences réglementaires européennes. Aujourd'hui, la puce RFID n'est quasiment pas utilisée dans le domaine de l'agroalimentaire principalement à cause de son prix et du fait qu'elle requiert l'équipement de toute la supply chain pour que les acteurs puissent ajouter et lire l'information au fur et à mesure. Pourtant, elle permettrait une meilleure gestion des stocks pour les distributeurs, l'assurance d'une qualité de la chaîne de froid irréprochable

(intégration d'ITT ou autres détecteurs à la puce), une information complète pour le consommateur qui aura la possibilité de scanner la puce avec son smartphone et une réduction du passage en caisse. On note, cependant, une légère inquiétude du consommateur qui se sent de plus en plus espionné par ces puces.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

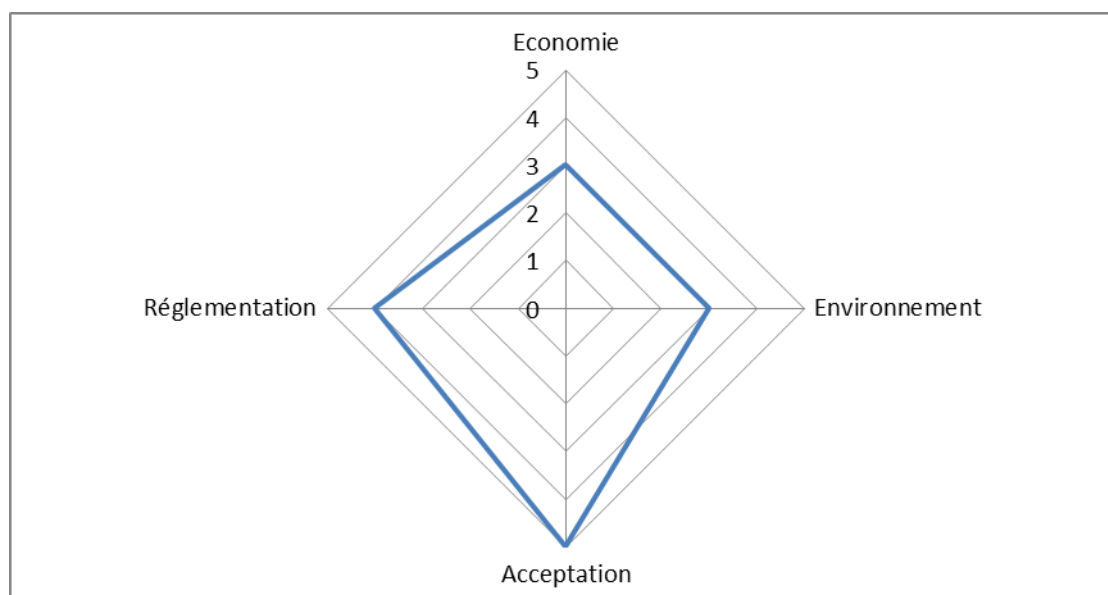


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Acteurs :

Qualiboo de Traceo, <http://www.traceo.com/fr/alimentaire/la-restauration-collective/chaîne-du-froid.html>

(Sites consultés en octobre 2013)

Institutionnel :

CNRFID, <http://www.centrenational-rfid.com>

<http://www.dgcis.gouv.fr/secteurs-professionnels/union-europeenne-rfid>

Études :

« Printed and Chipless RFID Forecasts, Technologies & Players 2011-2021 », 2010, par le Dr Peter Harrop et Raghu Das, <http://www.idtechex.com/research/reports/printed-and-chipless-rfid-forecasts-technologies-and-players-2011-2021-000254.asp>

« RFID in the Packaging World », IDTechEx, par le Dr Peter Harrop
http://www.packageprinting.com/common/items/biz/pp/pdf/RFID_in_Packaging.pdf

Consommateurs:

BARDAKI, C., KOUROUTHANASSIS, P. & PRAMATARI, K. 2010. Exploring the deployment and adoption of RFID-enabled retail promotions management. *International Journal of RF Technologies: Research and Applications*, 2, 91-115.

LEE, H. S. & O'MAHONY, M. 2007. Some new approaches to consumer acceptance measurement as a guide to marketing. *Food Science and Biotechnology*, 16, 863-867.

PRAMATARI, K. & THEOTOKIS, A. 2009. Consumer acceptance of RFID-enabled services: A model of multiple attitudes, perceived system characteristics and individual traits. *European Journal of Information Systems*, 18, 541-552.

NOUVEAUX POLYMERES D'EMBALLAGES AVEC HAUTES PROPRIETES BARRIERES

Fiche consolidée Marie loyaux (par pôle IAR) et Eliane Espuche (Université Lyon)

Données clés

Résumé

Cette catégorie concerne le développement de polymères originaux combinant de bonnes propriétés barrières et thermiques. Ces nouveaux polymères de spécialité pourraient par exemple être issus de la chimie verte (nouveaux monomères biosourcés). Ces matériaux sont encore au stade de recherche.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La perméabilité est la résultante de deux contributions, la solubilité et la diffusivité. Un matériau est une barrière de solubilité vis-à-vis d'un perméant si sa structure limite la solubilisation de l'espèce dans la matrice ; un matériau est une barrière de diffusion si sa mobilité et les tailles de volume libre limitent la diffusivité (la vitesse) du perméant au travers de l'emballage. Les meilleures barrières à l'oxygène sont des matériaux hydrophiles, qui en absence d'eau, présentent à la fois des effets barrières de diffusivité et de solubilité. Toutefois ces propriétés sont perdues en présence d'humidité.

- Par copolymérisation il est possible de développer de nouveaux polymères, avec une balance hydrophile / hydrophobe adaptée, conférant les avantages des barrières hydrophiles (barrière de solubilité et de diffusivité), tout en préservant une bonne résistance à l'eau.
- Par l'introduction de monomères cycliques dans la structure macromoléculaire, la mobilité des polymères est diminuée, avec une amélioration des propriétés barrière de diffusivité.
- Certaines familles de polymères confèrent de par les types de liaisons formées entre monomères, des structures macromoléculaires présentant de fortes interactions interchaînes contribuant à la diminution du volume libre (amélioration de la barrière de solubilité et barrière de diffusion) ; c'est notamment le cas des polyamides.
- L'aptitude à la biorientation est un facteur contribuant à un meilleur effet de barrière de diffusion.
- L'aptitude à la cristallisation est un facteur contribuant à un meilleur effet de barrière de solubilité, mais aussi de diffusivité.
- Enfin la présence de petites molécules à très fort pouvoir d'interaction avec le polymère peut contribuer à diminuer le volume libre et limiter la mobilité locale des chaînes de polymères ; cet effet d'« antiplastification » contribue à la fois à une diminution de la solubilité et de la diffusivité

Evidemment d'autres éléments essentiels entrent dans le cahier des charges du matériau barrière « idéal », notamment les propriétés mécaniques, la processabilité à l'état fondu, et le coût et la disponibilité des ressources monomères. Ces règles établies permettent aujourd'hui de concevoir « à la carte » des nouveaux polymères à l'aide de moyens simples de modélisation structure / propriétés.

C'est ainsi que des nouveaux polymères de structure relativement complexe entrent désormais sur le marché. On peut citer notamment le Tritan de la société Eastman, copolyester qui a très rapidement inondé le marché et est en voie de substituer totalement le polycarbonate (problématique de substitution du bisphénol A). Si le Tritan n'est pas une barrière très performante, ***des stratégies analogues de mise au point de polymères totalement originaux pourraient être utilisées pour mettre à disposition du marché de l'emballage des nouveaux polymères très performants.***

En outre les caractéristiques macromoléculaires qui permettent d'obtenir de bonnes propriétés barrières sont en grande partie communes aux caractéristiques macromoléculaires apportant la stabilité thermique des matériaux. Ainsi, les nouveaux matériaux barrières présenteraient de facto de bonnes propriétés thermiques, d'intérêt évident pour l'industrie agroalimentaire. A exclure toutefois les polymères hautement thermostables tels que les polyimides, qui présentent un coût matière et un coût de transformation non réaliste pour le marché de l'emballage

La cible souvent évoquée serait un matériau combinant les propriétés barrières à l'eau du LDPE (1 g / m² jour) et un ordre de grandeur au-dessus de celles du PET en ce qui concerne la barrière à l'oxygène (1 cm³ / m² jour 1 atm).

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Beaucoup de stratégies d'amélioration des durées de vie reposent sur l'utilisation d'emballages barrières à l'oxygène :

- Pour les produits à DLUO sensibles à l'oxydation ;
- Pour les produits à DLC moyenne ou longue, conditionnés ou non sous atmosphère protectrice.

1.3 Comparaison avec l'existant

Cette technologie s'inscrit dans la tendance de l'utilisation des matériaux barrières en étant destinée à substituer les matériaux à couche barrière interne à l'O₂ constituée d'EVOH. En effet, l'offre commerciale des matériaux d'emballage barrières peut être schématisée par

- Une offre à bas coût de matériaux avec des propriétés barrières moyennes (cf. PET et complexes PA/PE)
- Une offre à coût élevé de complexes avec des hautes propriétés barrières

L'objectif est d'apporter au marché une offre intermédiaire, autant en termes de coût que de performance.

En termes techniques, les complexes usuels PP/EVOH/PP ou PE/EVOH/PE ou PA présentent un biais qui pourrait être contourné par la mise sur le marché d'un matériau barrière peu hydrophile : lors des traitements thermiques de pasteurisation ou d'appertisation, les couches barrières internes sont hydratées et perdent leurs performances barrières ; après refroidissement, l'eau piégée dans le complexe est très lentement évacuée, les couches hydrophobes extérieures du complexe ralentissant le séchage de la couche interne.

Ce phénomène cause une altération des produits appertisés relativement rapide au cours des premières semaines de stockage des produits après traitement thermique.

Les matériaux de substitution devront, pour avoir la plus-value supplémentaire, ne pas présenter cette sensibilité à l'eau que les complexes EVOH présentent.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

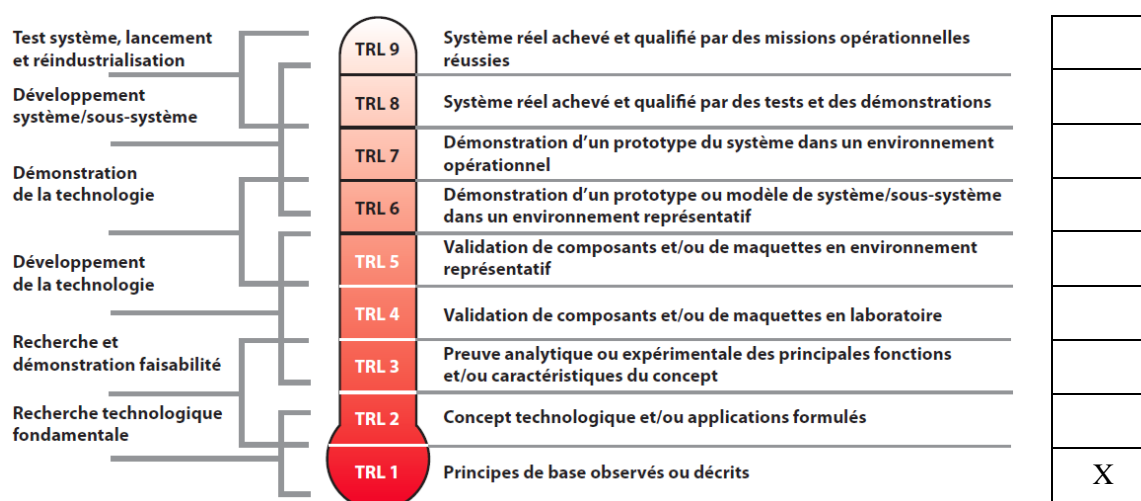
La mise au point de polymères originaux, lorsqu'elle ne passe pas par des nouveaux constituants de base, nécessite un dossier d'étude des impuretés et des composés non intentionnellement ajoutés. Autrement dit un dossier analytique sur la composition en migrants potentiels est établi, avec si nécessaire une étude toxicologique de produits ciblés.

La mise au point de polymères originaux à partir de nouvelles substances, nécessite un dossier plus lourd. La nouvelle substance doit être soumise à une étude toxicologique longue et coûteuse qui détermine si la substance peut être ajoutée sur la liste positive, ainsi que ses éventuelles restrictions (limite de migration spécifique en particulier).

Ici, la technologie sera soumise au Règlement (UE) n°10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et son utilisation passera par une évaluation du dossier par l'EFSA.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Il n'y a pas à notre connaissance de développement de matériaux en cours, répondant aux caractéristiques définies dans cette fiche.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Le frein est à la fois environnemental et économique.

A ce jour le marché de l'emballage alimentaire est contrôlé par quelques grandes références (LDPE, HDPE, PP, PS, PET, PA/PE, PP/EVOH, PE/EVOH).

Les productions de ces matières ne sont rentables qu'à très grande échelle, autant au niveau de la production des monomères qu'au niveau de la synthèse du polymère.

Le volet environnemental interfère également grandement avec les aspects économiques. En effet, l'organisation et la rentabilité des filières de tri post consommateur réclament la simplification des

gisements traités. De ce point de vue, une nouvelle référence dans le marché de l'emballage est avant tout un problème.

Par conséquent tout nouveau matériau dans le marché de l'emballage nécessite, pour être viable d'un point de vue économique et environnemental, un développement à grande échelle.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Une évolution possible consisterait à combiner des technologies barrières pour améliorer la technologie proposée ici mais cela n'est pas souhaitable.

Une nouvelle référence de polymère à proposer au marché doit présenter des performances suffisantes pour être utilisée sous forme de mono matériau et ainsi être aisément recyclable.

Le marché de la chimie verte va apporter des nouvelles « molécules portail » dont certaines (notamment les molécules cycliques) pourront être de bonnes candidates pour l'industrie de l'emballage.

Mais la piste des copolymères hydrophile/hydrophobe (cf. copolymères époxy thermoplastiques) pourrait constituer également un scénario majeur d'innovation

2.5 Principaux acteurs

Peu d'acteurs académiques interviennent dans le domaine de la polycondensation : Université Pierre et Marie Curie, IMP Lyon, Faculté de Pharmacie de Montpellier (mais applications santé principalement).

Les acteurs « chimie » intervenant dans le domaine des polymères de spécialité peuvent être approchés par l'intermédiaire des pôles de compétitivité IAR et AXELERA

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Les activités industrielles de synthèse de polymère peuvent être schématisées selon :

- Polymérisation radicalaire de polyoléfines (PE PP) : il y a de moins en moins de sites de production en Europe.
- Polymérisation radicalaire en émulsion : hors sujet pour cette fiche
- Polycondensation grande échelle, essentiellement PET : en forte diminution en France et en Europe
- Polymères de spécialité (tous types) : beaucoup d'activité en France et en Europe

Il y a donc deux voies pour initier le développement d'un standard polycondensat intéressant sur le territoire national : (i) convaincre un producteur de PET (peu probable) (ii) démarrer une activité de « niche » dans le domaine des polymères de spécialité.

3- Impact environnemental

Comme souligné précédemment, un nouveau polymère présentera des impacts environnementaux minimisés à partir du moment où sa production et sa valorisation en fin de vie seront envisagés à grande échelle. Les développements de « niche » ont de ce point de vue un bilan très défavorable.

L'utilisation de nouvelles ressources biosourcés (nouveaux monomères) n'est pas du tout incompatible avec le cahier des charges technique proposé pour cette innovation. Par exemple, le PEF envisagé par Danone et Coca Cola, utilisant des ressources biosourcés (dérivés furaniques) entre dans cette catégorie.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de nouveaux matériaux d'emballage avec hautes propriétés barrières a obtenu une note de 3 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	0	0	3

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Cette innovation est sans doute acceptable, bien que les consommateurs puissent s'interroger sur la recyclabilité des nouveaux matériaux utilisés, et qu'ils n'y voient que peu de bénéfices. Il faut néanmoins expliquer, dans des termes simples, aux consommateurs quels matériaux confèrent à l'emballage ces propriétés et les rassurer sur leur inertie.

5- Dimension économique

Il faudrait chiffrer le coût du Tritan en soulignant qu'il substitue un polymère cher (le polycarbonate), donc que le coût de la technologie est envisagé de façon très pessimiste,

Il faudrait préciser qu'il s'agit d'une illustration le polycarbonate n'étant pas un polymère d'emballage courant (utilisé pour contenants réutilisables très particuliers tels que les bonbonnes à eau).

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de nouveaux matériaux d'emballage avec hautes propriétés barrières :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible impact environnemental - Bonnes propriétés barrières 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stade R&D - Réglementation
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement de nouvelles filières de recyclage - Développement à grande échelle - Exigence de recyclabilité du consommateur 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Problèmes techniques

Aujourd'hui, les matériaux d'emballages sont soit à propriétés barrières médiocres soit à coût élevé. Il y a donc une nécessité de trouver de nouveaux matériaux à hautes propriétés barrières qui seraient vendus à prix abordable. Ces matériaux ne sont pas incompatibles avec des matériaux biosourcés qui pourraient permettre la diminution de l'impact environnemental des IAA. Cela passe par des investissements en R&D. Ces matériaux innovants nécessiteront la constitution de dossier par l'EFSA. Cependant, une fois le matériau accepté, il pourrait être développé à grande échelle par les IAA, ce qui facilitera le développement d'une filière de recyclage correspondante.

COATINGS MINÉRAUX TECHNOLOGIES PLASMA

Fiche consolidée par Fabienne Poncin Epailard (Université Le Mans)

Données clés

Résumé

Cette technologie consiste en un revêtement appliqué sur les emballages qui permet d'augmenter ses propriétés barrières. Il présente un réel avantage en termes d'allongement de la DLC pour les boissons carbonatées.

Le frein principal au développement de la technologie est le coût d'investissement des machines.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Les propriétés barrières des matériaux sont directement dépendantes de leur densité : plus la densité est élevée, plus la solubilisation dans les matériaux est faible, et plus la diffusion dans l'épaisseur des matériaux est difficile.

De ce point de vue, les matériaux plastiques organiques, de faible densité, présentent des caractéristiques beaucoup moins intéressantes que les matériaux minéraux et métalliques.

Cependant, la densité n'est pas un critère favorable d'un point de vue environnemental, si l'on considère que plus un matériau est dense plus il va être impactant sur toutes les étapes de transport de l'aliment emballé.

Ce constat amène à envisager la combinaison des deux types de matériaux afin d'allier les performances barrières aux exigences environnementales. La stratégie la plus courante consiste à associer un polymère barrière à l'oxygène tel que l'EVOH, en multicouche avec des polymères assurant les autres fonctions. Mais les multicouches ainsi obtenues sont généralement non recyclables et de coût matière relativement élevé.

Différentes technologies alternatives existent pour réaliser des **dépôts**, dont des technologies extrêmement matures.

Il existe 2 techniques principales de dépôt :

- (i) La Physical Vapor Deposition (PVD) est utilisée pour les dépôts de métal. Une source de métal est placée dans une chambre sous ultra-vide et portée à une température élevée : la phase vaporisée se condense alors sur le substrat polymère mis en mouvement. Une variante à cette vaporisation thermique consiste à bombarder la cible métallique par des ions de haute énergie (ou *sputtering*) créés à partir d'un plasma sous gaz inerte ou en atmosphère oxydante ou réductrice, des photons X ou des électrons. Cette technique permet d'obtenir des couches de meilleure qualité pour des objets de géométrie simple car le jet de vapeur est directionnel.
- (ii) La Chemical Vapor Deposition (CVD), contrairement au PVD, fait intervenir des mécanismes réactifs au sein d'une phase plasma. Il permet le dépôt d'oxyde ou de carbone amorphe à partir d'un grand nombre de précurseurs organiques. Le film déposé est formé par réaction chimique entre le substrat polymère et le(s) gaz précurseur(s) introduit(s) dans la chambre sous vide. Par exemple, la réaction $\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2$ (à 450°C), fait agir l'oxygène et le silane en

tant que précurseurs. La composition de la couche est contrôlée par les proportions relatives des différents gaz, inertes et réactifs. Parmi les process CVD, il existe de nombreuses variantes dont la LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition), fonctionnant à pression réduite afin de limiter les réactions non désirées et améliorer l'uniformité du film, la MOCVD, CVD utilisant des précurseurs organométalliques injectés sous forme d'aérosol et permettant de travailler à des températures plus basses ou bien encore la PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) qui améliore les vitesses de réaction des précurseurs et permet des dépôts à température proche de l'ambiante.

La technologie de dépôt plasma sous vide partiel, permet de déposer à la surface des matériaux plastiques des couches (semi)inorganiques extrêmement minces, mais en même temps relativement résistantes mécaniquement. Les structures formées présentent un comportement intermédiaire entre celui d'un polymère et un dépôt minéral structuré.



Actis™ : temps de process = 2,5 s

Figure 3 Bouteille traitée carbone amorphe hydrogéné à gauche, bouteille PET référence à droite

L'intérêt est de déposer une couche minérale « imparfaite » qui allie de bonnes performances barrières, et une souplesse mécanique apportée par la présence des défauts quelle que soit la géométrie de l'objet à traiter. Avec ce type de technologie, il n'y a pas de zones d'ombre non traitées. Ainsi les dépôts de silice (SiO_2) sont qualifiés de dépôts SiO_x ($x < 2$), les dépôts d'alumine (Al_2O_3) sont qualifiés de dépôts AlO_x ($x < 3/2$), et les dépôts de carbone sont qualifiés de dépôts C_xH_y .

Le carbone amorphe hydrogéné (C_xH_y) est utilisé en tant que barrière à l'oxygène et au CO_2 , barrière chimique revêtement de protection et anti-salissures.

Le carbone amorphe fluoré (C_xF_y) est utilisé en tant que barrière chimique et barrière aux hydrocarbures

Les dépôts SiO_x sont utilisés en tant que barrières à l'oxygène et au CO_2 , et anti-salissures.

La technique fait appel à des conditions de vide peu poussées (0.1 – 0.2 mbar, niveau de vide primaire) et peut être incorporée dans la ligne de production, juste après l'injection l'extrusion soufflage, le formage ou en reprise. Des réacteurs PECVD à la pression atmosphérique commencent à apparaître sur le marché mais quelques verrous existent liés notamment à une consommation importante de gaz précurseurs, des dépôts moins uniformes en épaisseur et en composition, et des zones d'ombre qui demeurent.

Applications et produits concernés

La technologie permet de limiter la perte des arômes en appliquant une couche d'environ un micron de silice (Tetrapack) ou de carbone hydrogéné (SIDEL) sur les emballages PET et PE en majorité. Les produits alimentaires concernés sont principalement les boissons, mais aussi d'autres produits comme les cornichons ou les petits pots pour bébés.

La société de conditionnement SIDEL commercialise ces coatings. En ce qui concerne l'application industrielle, la technologie de traitement des surfaces par le plasma peut être mise en place en continu sur la ligne industrielle, et doit être appliquée sur l'emballage juste avant remplissage.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Sous réserve de la levée d'un ensemble de verrous techniques, cette technologie est susceptible de conférer à tout matériau plastique de fortes propriétés barrières, à partir d'une très faible épaisseur déposée en surface. Les impacts sur le gaspillage peuvent être relativement larges si l'on considère les différents marchés potentiellement concernés. En effet, cette technologie est susceptible d'améliorer :

- Les packagings haute-barrière : on peut ainsi espérer dépasser les DLUO actuelles de 12 à 18 mois maximum pour les aliments appertisés en barquettes plastiques, ainsi que pour les sachets souples et opercules n'utilisant pas de couche d'aluminium. La DLUO est allongée d'un facteur 7 pour les boissons carbonatées, en limitant les pertes de CO₂ et diminuant de 30 à 50% l'entrée de l'oxygène.
- Les matériaux de type PET en leur conférant pour un moindre coût des performances équivalentes aux multicouches avec couche barrière interne d'EVOH (Ethylène Vinyl Alcool),
- Les emballages courants, afin d'étendre l'usage des matériaux barrières. On pourrait par exemple grâce à cette technologie étendre l'utilisation des technologies type MAP (Modified Atmosphere Packaging) à des produits à DLC longue.

Par ailleurs, les technologies plasma, lorsqu'elles sont appliquées aux faces internes des emballages, ont des effets d'aseptisation qui n'ont jamais été valorisés dans le domaine agroalimentaire (bien qu'utilisés dans le domaine biomédical). Ainsi, elles pourraient être associées aux technologies de conditionnement aseptique. (Voir fiche 3.8 sur la Décontamination par technologie plasma)

Ces barrières pourraient également limiter les migrations de composés indésirables néoformés issus de l'emballage plastique (effet de « barrière fonctionnelle »).

1.3 Comparaison avec l'existant

Très peu développées, ces technologies appellent des investissements très importants.

Au-delà de l'investissement, les coûts de fonctionnement sont extrêmement bas (gaz précurseur du matériau déposé, et dépenses énergétiques) par rapport aux gains de performance obtenus.

Le procédé de dépôt plasma sous vide partiel peut être réalisé sur toutes formes d'objets 2D ou 3D, et peut être effectué en dernière étape de la fabrication de l'emballage. Il constitue une étape supplémentaire dans le processus de fabrication, et ne nécessite donc pas d'autres modifications dans le parcours technologique du produit emballé.

Les autres technologies de dépôt ne sont en pratique applicables que sur film à plat, ce qui explique que les principaux développements industriels concernent les films fins hautes barrières qui ne sont pas destinés à être thermoformés par la suite.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

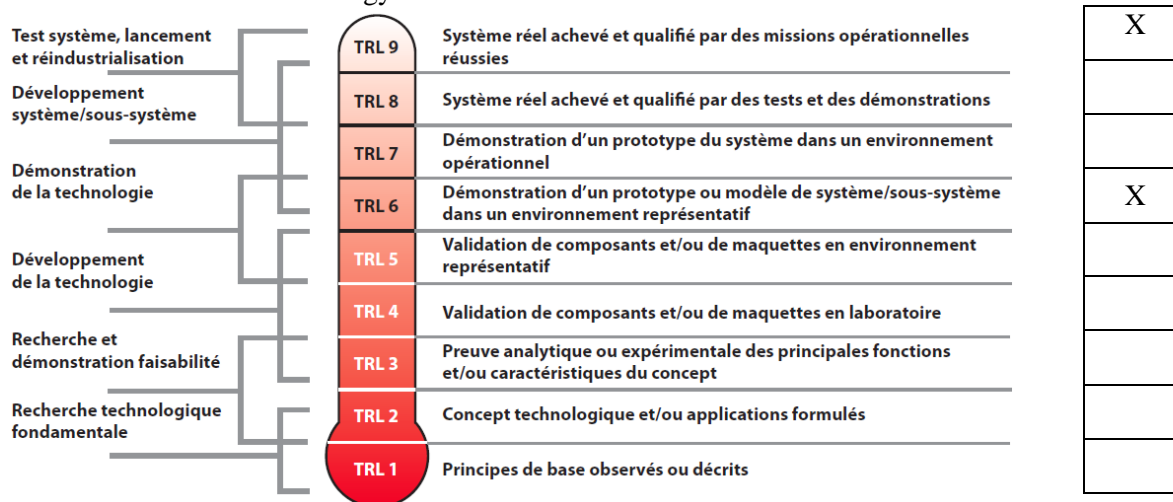
Les impacts sanitaires sont de différents ordres.

- En ce qui concerne l'alimentarité du dépôt, les trois types de dépôt ont déjà fait l'objet de dossiers d'autorisation, qui prennent en compte les composés néoformés générés. Une fraction de ces composés de faible masse existe, mais elle est extrêmement faible en quantité absolue en raison de la très faible épaisseur du dépôt.
- Les pertes d'adhérence des dépôts dans le temps ou suite à des traitements thermiques n'ont pas été évaluées. Il y a une génération possible de particules de dimension nanométrique (< 100 nm).
- En revanche, l'apport d'un coating par technologie plasma peut à la fois permettre l'aseptisation de la surface traitée de l'emballage et constituer une barrière fonctionnelle limitant ou inhibant les transferts entre l'emballage et l'aliment. (voir § 1.2).

Il existe actuellement un certain vide normatif lié au fait que la technologie est émergente. Etant donné que la couche est en contact avec l'aliment, elle sera soumise au Règlement (UE) n°10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et son utilisation passera par une évaluation du dossier par l'EFSA.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Sous sa forme actuelle, c'est à dire les dépôts sur films à plat, la technologie est mature (TRL9).

En revanche les technologies de dépôt sous vide partiel n'ont été développées que pour des applications ponctuelles (TRL6).

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Il existe deux principaux **freins techniques**.

- Les performances barrières des dépôts sont **variables en fonction des substrats**. La technologie est performante sur PET, mais moins sur les polyoléfines (polyéthylène et polypropylène). A noter cependant que la R&D académique et industrielle s'est particulièrement focalisée sur le PET ; les faibles performances rapportées sur les polyoléfines pourraient donc être notamment liées au manque d'effort de recherche sur le traitement de ces matériaux.
- Par ailleurs, les technologies de dépôt 3D ne sont actuellement pas applicables pour des **formats 3D** de type barquette. A remarquer toutefois que la technologie mise au point par Sidel pour le traitement des bouteilles plastiques pourrait tout à fait être adaptée aux géométries plus problématiques des barquettes.

Les **freins économiques** sont liés au coût élevé de l'investissement.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

La technologie devrait évoluer avec :

- Une démocratisation des technologies de dépôts sur film à plat : les dépôts d'oxydes devraient notamment devenir très concurrentiels des dépôts métalliques, de coût élevé (coût des cibles métalliques de haute pureté),
- Une utilisation très élargie des technologies de dépôt sur objets 3D,
- Des solutions techniques pour une meilleure maîtrise de l'adhérence sur substrat, notamment grâce à la possibilité de prétraitements d'activation, de la tenue aux contraintes thermo-hydrriques, de la résistance aux fortes déformations notamment via dépôts à gradient de composition, et des micro-défauts qui grèvent les performances théoriques des couches d'oxydes.

2.5 Principaux acteurs

Le principal acteur académique ayant la double compétence polymère et technologie plasma est **l'institut des molécules et matériaux du Mans, UMR CNRS-université du Mans 6283** (F Poncin Epailard). D'autres acteurs comme l'institut Laplace de Toulouse ou l'université de Perpignan ont développé des axes de recherche dans les dépôts plasma.

Le seul équipementier français intervenant dans le domaine des dépôts plasma sous vide partiel est la société **Isytech**, qui a mis au point le procédé de dépôt de carbone amorphe hydrogéné dans les bouteilles pour la société Sidel.

L'entreprise Acxys Technologies, spécialisée dans les traitements des surfaces par technologie plasma, travaille actuellement en R&D sur le dépôt de coatings.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Les activités de production de films de spécialité avec dépôt barrière se concentrent sur le territoire national au niveau des films métallisés. Nous n'avons pas inventorié d'acteurs français utilisant les technologies de dépôt d'oxydes. Dans ce domaine on trouve de rares acteurs en Europe, qui contrôlent ce marché.

3- Impact environnemental

L'impact environnemental direct des procédés de dépôt est **faible**, tous dépôts confondus, si l'on prend en compte le gain de performance qui leur est associé.

Les impacts sur le cycle d'utilisation de l'emballage sont améliorés, car la masse ajoutée à l'emballage est négligeable.

Les impacts sur la gestion de fin de vie diffèrent en fonction des types de dépôt : les dépôts métalliques empêchent le recyclage matière des matériaux plastiques, alors que les dépôts d'oxydes se transforment en particules de charges minérales après transformation par extrusion du substrat plastique revêtu.

Le gaz utilisé pour l'application de la technologie, l'acétylène, n'est pas nocif pour l'environnement.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie plasma de Coating minéraux a obtenu une note de 7 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	0	7

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

La perception consommateur est à priori bonne, car la dimension positive de la technicité du procédé devrait l'emporter sur toutes les autres appréciations.

Le caractère « nano » des revêtements, et leur possible transfert dans les aliments sous forme de fragments en cas de perte d'adhérence, aurait évidemment pour conséquence un rejet de la technologie. Ce point devra donc être appréhendé pour garantir l'absence de phénomènes de décohésion. Par ailleurs, l'ajout de composés chimiques à ces emballages peut être considéré comme peu naturel et donc être mal accepté.

Enfin si la technologie se révélait apporter des effets d'aseptisation et de barrière fonctionnelle (voir § 1.2 et 2.1), elle bénéficierait d'une perception très positive du consommateur.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Les coatings minéraux plasma sont en concurrence directe avec la technologie de dépôt multicouche « classique ». La technologie plasma utilisée pour le dépôt de coatings minéraux permet une plus grande recyclabilité puisqu'elle utilise moins de matériau d'emballage que la technologie multicouches (dépôt de couches d'environ 10 microns contre 1 micron pour la technologie plasma), mais son principal inconvénient est d'ordre économique. Les industriels désirant utiliser la technologie plasma pour leurs emballages doivent investir dans une ligne entière de soufflage et un conditionnement adaptée, puisque la technologie plasma n'est applicable que sur des emballages déjà formés et non sur des préformes comme pour le multicouche.

Il existe d'autres technologies concurrentes telles les technologies de dépôt de couches minces sans utilisation de la technologie plasma et les technologies de dépôt de coatings nanochargés.

Etant donné qu'il a fallu plus de 10 ans pour vendre la première machine dans le domaine de la chimie, il semble que le temps d'implantation sur le marché agro-alimentaire soit long. Sidel a déjà vendu des machines, surtout dans le cadre d'installation de nouvelles lignes de production, de nouvelles installations, mais essentiellement à l'export. Il paraît donc essentiel de s'implanter sur le marché intérieur.

Dans le domaine de l'agro-alimentaire, il y a environ 6 acteurs importants dans le monde. La France a une bonne avance sur cette technologie. En revanche, toutes les machines sont vendues à l'export, que ce soit en chimie ou en IAA.

L'équipementier Isytech contacté considère que le blocage au développement de la technologie à ce jour est son coût d'investissement.

Perspectives

Le principal enjeu est de convaincre les utilisateurs des emballages d'adopter cette technologie. Or, le domaine des IAA est assez frileux à l'innovation. De plus, les coûts d'investissement sont assez lourds. Selon Isytech, si le leader adopte une innovation, les concurrents et les plus petits suivront. Ce phénomène s'est vérifié pour le domaine de la chimie, dans lequel les technologies plasma ont observé une bonne pénétration du marché.

La nature dispersée du marché agroalimentaire ne favorise pourtant pas l'émergence de ce phénomène. De plus, le domaine des IAA fait l'objet d'un fort lobbying de la part des équipementiers proposant

des matériaux « nobles » en tant qu’emballages barrières. Les distributeurs doivent également être convaincus.

Rentabilité économique

L’entreprise Isytech ne pouvait nous renseigner uniquement sur les prix dans le domaine chimique car il ne commercialise pas la technologie pour l’agroalimentaire.

Une machine permettant de mettre en place le dépôt de coatings minéraux par technologie plasma coûte environ 1 million d’euros, pour un débit équivalent à 10 000 bouteilles type IAA traitées par heure. Les pompes à gaz représentent la plus grande part de cet investissement. Le coût d’investissement est donc assez important.

En revanche, en termes d’utilisation de matériau, la technologie plasma revient moins chère de 10 centimes par bouteille par rapport aux technologies multicouches, ce qui fait un prix de 20 centimes par bouteille.

En chimie, le traitement plasma revient à 1-2€ pour un bidon de 5L. En ce qui concerne l’utilisation des ressources (gaz et électricité), le coût s’élève à 1 centime par bouteille traitée. Les coûts de maintenance ne sont pas particulièrement élevés. Ainsi, globalement les coûts d’investissement sont compensés par des gains en coûts de fonctionnement.

Indirectement, la technologie plasma est avantageuse économiquement puisqu’elle permet de traiter des contenants de grand volume directement en ligne, et évite donc des manipulations et de l’espace supplémentaire.

La viabilité économique pour des applications d’emballages alimentaires est questionnée.

Il est noté plusieurs exemples d’échecs de coatings :

- Le procédé Sidel (PET avec coating) qui permettrait d’avoir de la bière conditionnée en bouteille plastique a été rejeté par les consommateurs
- Le traitement plasma pour film PLA d’Altran packaging proposait des produits finis trop cher.

Les coatings plasma marchent plus facilement sur d’autres applications à plus forte valeur ajoutée. L’emballage alimentaire vise un mass market avec une durée de vie courte ou moyenne et n’est pas un produit à forte valeur ajoutée. Le marché de l’emballage est très concurrentiel. Le moindre surcout est mal accepté par les acteurs de la chaîne.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie plasma de coating minéraux :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la DLC - Coût de fonctionnement 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût d'investissement - Conditionnement adaptée à la technologie
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couplage avec la décontamination aseptique - Diversification des applications - Développement de la technologie - Marketing sur les nouvelles formes d'emballage 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concurrence avec les technologies de dépôt multicouches ou de coatings nanochargés - Marché de niche limitant le développement - Durcissement de la réglementation - Peur du consommateur

La technologie est concurrentielle et déjà bien implantée dans le domaine de la chimie, et présente donc de bonnes perspectives pour les emballages dans les IAA à conditions de lever certains verrous essentiellement sociaux et liés à un coût d'investissement conséquent.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir des entretiens avec les équipementiers.

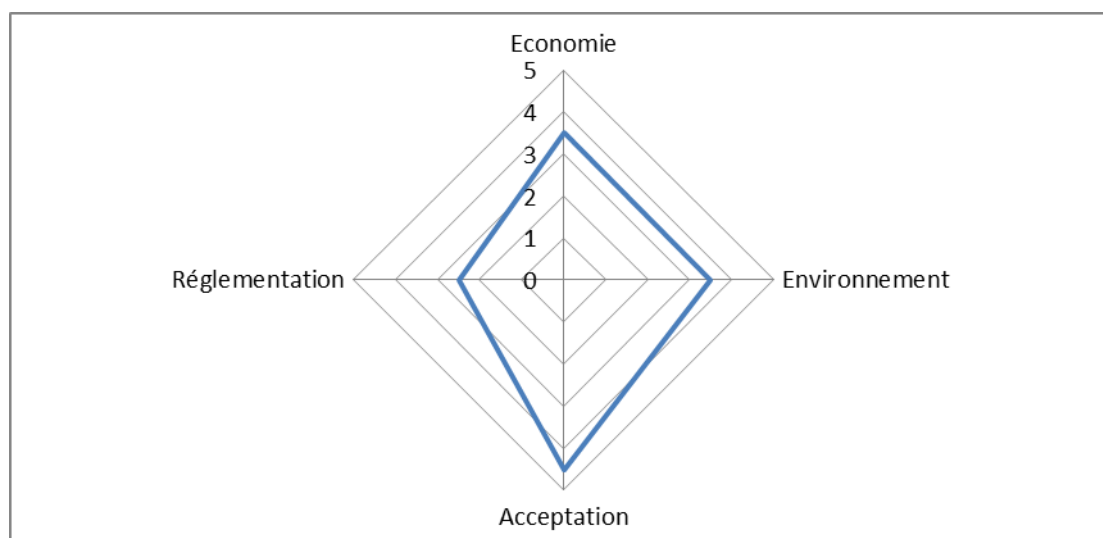


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

COATINGS ORGANIQUES NANOCHARGES

Fiche consolidée par Eliane Espuche (Université Lyon)

Données clés

Résumé

La technologie consiste à appliquer un coating nanochargé sur la face extérieure des emballages alimentaires afin d'augmenter leurs propriétés barrières. Elle permet ainsi l'augmentation des DLC et de la qualité sanitaire des produits. Son développement industriel entraînerait une diminution de son coût d'investissement.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Cette technologie s'inspire des « matériaux nanochargés dans la masse », mais gagne sensiblement en performance par rapport à ces derniers.

Tout comme les « matériaux chargés dans la masse », les coatings nanochargés reposent sur le phénomène d'**augmentation de la tortuosité**, qui confère aux diffusants comme le O₂ un chemin de diffusion plus long, et aux matériaux un gain de propriétés barrières.

De façon plus spécifique, les coatings nanochargés :

- (i) Sont **déposés** sous forme de couches fines, ou par évaporation de solvant qui induit une orientation anisotrope des nanocharges dans le sens perpendiculaire au chemin de diffusion,
- (ii) Présentent des **taux de charges très élevés**, rendus possibles par le mode d'application du coating,
- (iii) Sont généralement formulés à partir de **polymères polaires voire hydrosolubles**, qui présentent un pouvoir d'interaction très élevé avec les nanocharges à morphologie lamellaire

Ces éléments confèrent aux coatings nanochargés des performances barrières extrêmement élevées.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Beaucoup de stratégies d'amélioration des durées de vie reposent sur l'utilisation d'emballages barrières à l'oxygène que sont les coatings nanochargés. Les produits concernés sont les produits à DLUO sensibles à l'oxydation, et les produits à DLC moyenne ou longue, conditionnés ou non sous atmosphère protectrice.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le caractère innovant de la technologie est multiple :

- **Fortes propriétés barrières intrinsèques**, qui permettent d'envisager des gains de performance sensibles, après dépôt sous forme de couche fine sur un matériau
- **Simplicité** du mode de dépôt envisagé, par spray sur matériau à plat, ou par trempage ou spray sur matériau 3D
- **Technologie « verte »** lorsque la formulation du coating est réalisée sur une base aqueuse

- **Etape de mise en place du coating indépendante** dans le processus de fabrication de l'emballage, ne nécessitant pas l'adaptation des autres étapes

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Telle qu'envisagée, la technologie serait préférablement mise en œuvre sur la base d'un coating **sur la face extérieure** de l'emballage.

En effet, la technologie étant essentiellement orientée sur des coatings de base aqueuse, ceux-ci sont trop sensibles aux fortes activités d'eau, même lorsque la résine ou le mode de dépôt rend le coating insoluble en milieu aqueux.

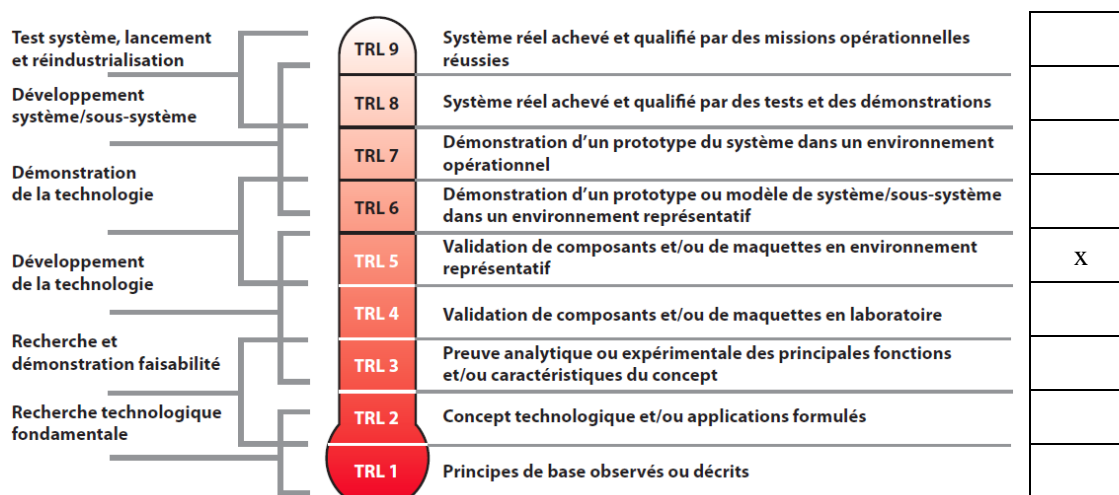
En outre, l'alcool polyvinylique est le liant majoritairement ciblé pour la formulation de ces coatings. La solubilité dans l'eau de ce composé conduirait à une libération spontanée de nanocharges dans les aliments aqueux, ce qui n'est pas envisageable d'un point de vue réglementaire.

Cependant, si le coating est appliqué sur la face extérieure de l'emballage, la nature polaire des composants ainsi que l'absence de contact direct avec l'aliment rendent inenvisageable tout transfert de composant vers l'aliment. Il y a dans ce cas un effet de barrière fonctionnelle, et aucun danger de passage de composés nanochargés dans l'aliment. La technologie sera néanmoins soumise au Règlement (UE) n°10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et son utilisation passera par une évaluation du dossier par l'EFSA.

Au niveau de la fabrication, la technologie implique la manipulation de nanocharges en milieu industriel. La nanosécurisation des postes de travail est donc obligatoire, et discutée dans la fiche 2.4« Matériaux d'emballage nanochargés dans la masse».

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Quelques formulations commerciales seulement sont proposées à l'échelle mondiale par des petits acteurs, et ne sont à notre connaissance pas encore utilisées pour des applications d'emballages alimentaires.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Il existe des freins **techniques** à la mise en place de cette technologie :

- Les coatings déposés par voie aqueuse posent, pour certains matériaux, des problèmes de mouillage et d'adhérence. Cependant, ces verrous peuvent être levés par l'utilisation de traitements de surface préalables, efficaces, mais qui retirent de l'intérêt à la technologie dont un des atouts est la simplicité de mise en œuvre
- La sensibilité à l'eau est un verrou technique réhibitoire pour certaines applications, en particulier lors de la fabrication de conserves avec étape de stérilisation thermique en autoclave.

Des freins de **savoir-faire** pourraient également être rencontrés lors de la mise en place de la technologie. En effet, les technologies coatings ne sont pas encore abordées dans la formation des plasturgistes. Si la méthode est simple à mettre en œuvre, son utilisation par les plasturgistes pourrait être longue à mettre en place.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Les évolutions possibles et intéressantes à l'horizon 2025 résident dans :

- la levée du verrou de **sensibilité à l'eau** par des formulations plus complexes
- une amélioration des **performances barrières**: les très hauts niveaux barrières théoriques ne sont apparemment pas encore approchés
- **Le développement industriel de la méthode de dépôt LBL** (layer by layer) qui, par le dépôt de couches successives ultrafines, permet l'obtention d'une structure très haute barrière, notamment grâce au niveau d'organisation et l'anisotropie de disposition des nanocharges. Cette technique peut en outre être utilisée à partir de bio-polymères naturels, tout comme à partir de matrices moins sensibles à l'eau

2.5 Principaux acteurs

Pour la technologie LBL, développée initialement à Strasbourg, les universités de Lyon et Grenoble sont actuellement les acteurs principaux.

Certaines entreprises comme Topchim en Belgique et Nanopack aux Etats-Unis développent cette technologie.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La faiblesse de la technologie réside principalement dans l'absence d'accompagnement de la part de la recherche académique. Les performances des nanocoatings de base aqueuse ont déjà été démontrées par ces acteurs « recherche », mais la mise au point de coatings moins sensibles à l'eau tient plus de la recherche industrielle et ne fera probablement pas appel à des nouveaux concepts d'un point de vue scientifique.

3- Impact environnemental

L'ajout d'un coating sur l'emballage entraîne une augmentation de l'impact environnemental par rapport aux solutions actuelles. Cependant, les recherches sont orientées de manière à minimiser cette augmentation.

En effet, outre le débat sur l'utilisation de nanoparticules, les stratégies de nanocoating par voie aqueuse présentent des intérêts environnementaux multiples, qui reposent sur :

- L'utilisation d'une base aqueuse
- Le procédé de fabrication qui se fait à température ambiante
- Les performances ramenées à l'épaisseur déposée

Enfin les polyols verts, destinés a priori à alimenter le marché des mousses polyuréthanes dans le secteur du transport, pourraient également entrer dans la composition des coatings nanochargés en tant que substituant de l'alcool polyvinylique.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de Coating organiques nanochargés a obtenu une note de 7 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
1	1	0	7

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

•**Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

•**Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Des études sur l'avis des consommateurs concernant les nanotechnologies ont récemment commencé à apparaître. L'accueil des nanotechnologies par les consommateurs dans le secteur agroalimentaire est généralement moins bon, ou du moins différent de celui qu'ils leur réservent dans les autres secteurs (Cobb and Macoubrie, 2004, Siegrist et al., 2007), où la majorité des gens est initialement neutre ou légèrement contre et clairement ambivalente (Fischer et al., 2013). Plusieurs chercheurs ont trouvé des analogies entre les applications des nanotechnologies à l'agroalimentaire et les technologies de modification génétique de la nourriture, considérant qu'elles suivront probablement les mêmes trajectoires de commercialisation et soulèveront par conséquent les mêmes préoccupations sociétales (Cushen et al., 2012, Kearnes et al., 2006, Mehta, 2004, Rollin et al., 2011, Gupta et al., 2012a). Toutefois, les consommateurs notent beaucoup moins cette analogie que les experts (Gupta, 2013, Van Dijk et al., submitted). L'acceptation des nanotechnologies dans l'agroalimentaire par les consommateurs est conditionnée par un nombre de facteurs socio-psychologiques accroissant la probabilité d'acceptation ou de rejet (e.g. Siegrist, 2008, Gupta et al., 2011).

Dans le cas des coatings organiques nanochargés, l'ajout de nano particules risque d'être considéré comme étant complexe et peu naturel. Le mot « nano » fait peur aux consommateurs car il est mal expliqué. Les consommateurs ne savent pas réellement de quoi il s'agit, ils ne comprennent pas. Comme pour l'amiante ils craignent que dans quelques années on ne découvre des dangers. De plus, le mot « organique » peut faire peur aux consommateurs car ils risquent de l'associer à « carbone, durée de vie... ».

Pour qu'elle soit acceptée cette technologie doit être expliquée en des termes simples aux consommateurs, il faut leur donner la preuve qu'il n'y a pas de risques pour la santé et que le prix du produit fini ne sera pas augmenté.

5- Dimension économique

Le marché actuel

D'un point de vue économique, le produit est déjà disponible sur le marché et fait concurrence au polyéthylène. Cependant, le plastique reste encore un peu moins cher que cette technologie limitant ainsi son développement.

Le marché de l'emballage barrière durable est concurrentiel mais les acteurs ont en général une spécificité en termes de technologies. Topchim possède de nombreux brevets sur ses technologies. La production des technologies est essentiellement réalisée en Europe et notamment en Europe Centrale.

Perspectives

Le marché est toujours en croissance et la tendance est positive pour le futur. En effet, la tendance est à l'emballage plus durable et à l'utilisation de moins de plastique. De plus, les industriels du graphisme sont en train de se réorienter vers le packaging face à la diminution des besoins en termes d'impression (les médias électroniques se développant) et d'adapter leurs outils de production.

Rentabilité actuel

L'émulsion liquide fournie par Topchim (50% de matières solides) appliquée ensuite comme coating coûte entre 1.5 et 2.5€/kg de liquide. Cette technique ne nécessite aucun équipement supplémentaire puisqu'elle peut être appliquée via les équipements existants. A long terme, cette technologie est rentable.

Cependant, le prix n'est pas le même suivant les coatings (atmosphériques, solides...). La viabilité économique pour des applications d'emballages alimentaires est questionnée. L'emballage alimentaire vise un mass market avec une durée de vie courte ou moyenne et n'est pas un produit à forte valeur ajoutée. Le marché de l'emballage est très concurrentiel. Le moindre surcoût est mal accepté par les acteurs de la chaîne.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des Coatings Organiques nanochargés:

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la DLC - Facile à intégrer dans le process 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un savoir faire - Réglementation - Nanosécurisation des postes de travail - Peur du consommateur
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement industriel - Développement sur des produits premiums - Technologie « verte » 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concurrence avec d'autres technologies barrières

L'application d'un revêtement nanochargé sur la face extérieure des emballages permet un gain de performance, soit un allongement de la DLC des produits. Les recherches s'orientent vers des coatings ayant moins d'impact sur l'environnement que les coating minéraux. La technologie n'est pas tout à fait mature à l'échelle industrielle, mais devrait se développer dans les années futures. Ils restent néanmoins des freins sociaux par l'utilisation de « nanocharges » et réglementaires par la constitution du dossier EFSA. De plus, la manipulation de nanocharges oblige les industriels à appliquer la nanosécurisation des postes de travail qui représente des coûts importants.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

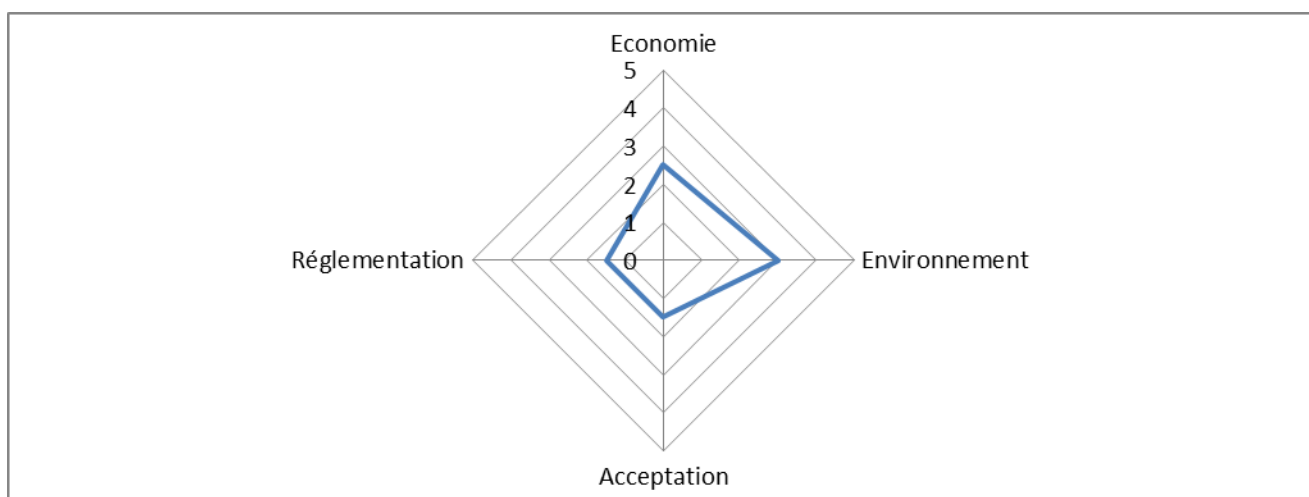


Figure 1 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

MATERIAUX D'EMBALLAGE NANOCHARGES DANS LA MASSE

Fiche consolidée par Eliane Espuche (Université Lyon)

Données clés

Résumé

Cette technologie d'ajout de nanocharges dans le matériau d'emballage vise à augmenter ses propriétés barrières. Elle est encore très peu développée industriellement mais son efficacité a été prouvée sur le PET et le polyamide.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La vitesse de transfert d'un gaz au travers d'un emballage est dépendante de l'épaisseur du matériau. Dans un matériau nanochargé, la tortuosité du chemin de diffusion conduit à un effet analogue aux effets d'épaisseur. La tortuosité augmente avec le taux de charge, mais est surtout dépendante du facteur de forme de la charge, d'où l'intérêt tout particulier des *charges lamellaires*.

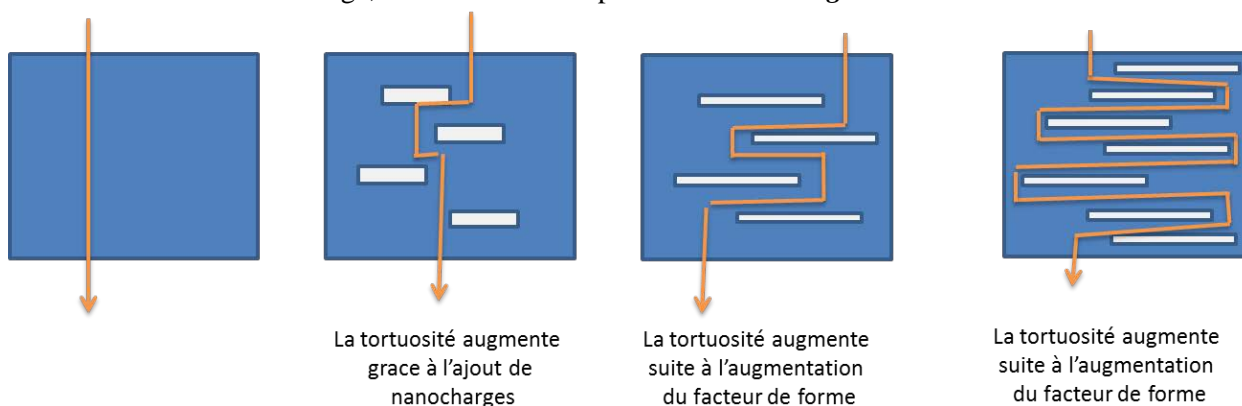


Figure 1 Effet du taux de nanocharges et du facteur de forme lamellaire sur la tortuosité du chemin de diffusion des gaz

En théorie, un facteur de réduction très élevé des perméabilités gazeuses pourrait donc être obtenu suivant ce principe.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Beaucoup de stratégies d'amélioration des durées de vie reposent sur l'utilisation d'emballages barrières à l'oxygène que sont les coatings nanochargés. Les produits concernés sont les produits à DLUO sensibles à l'oxydation, et les produits à DLC moyenne ou longue, conditionnés ou non sous atmosphère protectrice.

1.3 Comparaison avec l'existant

Théoriquement, la technologie des nanocharges dans la masse des matériaux est très séduisante pour les fabricants d'emballages, dans la mesure où la nanocharge n'est qu'un additif supplémentaire dans une formulation de matière et qu'elle n'influence que les propriétés finales du matériau.

En réalité :

(i) **Les performances barrières des matériaux sont rarement améliorées de façon sensible**, du moins pour les matériaux les plus couramment utilisés dans le domaine de l'emballage (voir Figure 4). Le polyéthylène (PP), le polypropylène (LDPE et HDPE) et le polystyrène (PS) présentent des facteurs d'amélioration des propriétés barrières inférieurs à un facteur 3 pour des taux d'introduction de charge d'au moins 5 %. Ces mauvaises performances sont liées au caractère apolaire de ces polymères, qui présentent une mauvaise compatibilité avec les nanocharges. Ainsi, les défauts d'interface entre nanoparticules et matrice polymère créent des chemins privilégiés pour la diffusion des gaz, d'où le moindre effet des nanocharges sur l'amélioration des propriétés barrières. **Seuls les propriétés barrières du PET et le polyamide (PA) peuvent être améliorées de façon sensible** : le facteur d'amélioration du PET est de 15 pour la barrière oxygène, et de plus de 1000 pour le polyamide. Ces performances sont là encore directement liées à la compatibilité entre charge et matrice. Là où le PET, semi polaire, présente une bonne compatibilité avec les nanocharges, le polyamide, très polaire, présente des interactions très fortes avec ces dernières, générant (i) un interphase de très faible mobilité moléculaire qui a pour effet de ralentir la diffusion des gaz bien au-delà de la théorie de la tortuosité (ii) un effet de germination susceptible de générer des structures cristallines originales (en particulier avec les polyamides).

(ii) **La processabilité des matériaux nanochargés peut être problématique**. Lorsque les nanocharges interagissent fortement avec la matrice, une augmentation importante de la viscosité à l'état fondu est observée. Ainsi, plus la nanocharge apporte un gain de performances barrières, moins la manipulation du matériau par le transformateur est aisée.

Le gain de performance est donc possible pour le PET et le polyamide, mais la technologie nécessite d'adapter les procédés de plasturgie.

Polymère	Charge	Quantité (%)	Barrière O ₂	Barrière H ₂ O
			(facteurs d'amélioration)	
PI	OM-MMT	8	13.0	7.4
	OM-MMT	2	19.8	
PS	OM-MMT	16.7	2.8	
PA	OM-MMT	5.5	>1100	
PET	Na-MMT	5	15.6	1.2
	MMT ^c	5	2.23	1.15
PEG	Na-MMT	3-5	10 ² -10 ³ ^d	
PU	OM-MMT	6	0.7-1.3	1.6-1.7
EVOH	Kaolinite	5	3.0-4.0	1.2
PMMA	OM-MMT	5	1.83	1.70
PLA	MMT ^c	5	1.16	1.21
	OM-MMT	5	1.2-1.9	1.7-2.0
	Syn. Mica	4	2.8	
PHB	Kaolinite ^c	5	1.26	1.06
PHBV	MMT ^c	5	1.36	2.16
PCL	OM-MMT	12		4.87
PVA	Graphite	5		1.1
	Na-MMT	6		~3
PVA ^e	Na-MMT	20	>21 ^f	
PVC	SiO ₂	3	~1.6	~2.8
PP	OM-MMT	5	~1.4	~1.7
	CaCO ₃	3	~1.4	
HDPE	OM-MMT	4	1.2-1.7	
	OM-MMT	5	2.8-2.9	1.8-2.4
LDPE	OM-MMT	4.76	2.2	
WG	Na-MMT	4.5		~8 ^g
CH	OM-MMT	30		1.44
TPS	Na-MMT	10		~1.7

Figure 4 Facteurs d'amélioration en termes de propriétés barrières par introduction de nanocharges dans différents polymères

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

A ce jour il y a un frein réglementaire *transitoire* pour l'utilisation de nanocharges à effet barrière en formulation d'emballages alimentaires, dans la mesure où aucune charge de ce type n'a été évaluée et inscrite sur la liste positive du règlement PIM. Elle sera soumise au Règlement (UE) n°10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et son utilisation passera par une évaluation du dossier par l'EFSA.

Il n'y a pour autant aucun frein réglementaire à l'**établissement de dossier** pour ces substances, puisque l'Europe a donné la définition des nanomatériaux et les différentes stratégies attendues pour les dossiers d'évaluation des différentes sous-classes de substances.

En outre, la phase d'inventaire au niveau national, correspondant à une obligation de déclaration à partir de juin 2013 de toute commercialisation de substances répondant à la définition de « nanoparticule », a révélé les points suivants :

- Un certain nombre de charges couramment utilisées en tant que pigments minéraux comme le TiO₂ répondant à la définition de « substance à l'état nanoparticulaire » a été déclaré. Autrement dit, des substances couramment utilisées pour d'autres propriétés présentent une fraction non négligeable de « particules ultrafines » considérées suivant la définition européenne comme « nano ».
- L'industrie agroalimentaire a été amenée à déclarer des substances comme certains antimottants, (la silice colloïdale par exemple) qui entrent directement dans les formulations de produits.

Ces inventaires menés à l'échelle nationale vont certainement contribuer à accélérer l'évaluation des substances.

D'un point de vue toxicologique, on considère que les nanocharges présentent un effet très différencié en fonction du mode d'exposition : le mode d'exposition le plus critique est le contact par inhalation, puis le contact cutané. Le mode d'exposition par ingestion représenterait un danger extrêmement plus faible. A partir de ce constat et faute de connaissances suffisamment pointues pour la quantification du danger, la minimisation de l'exposition à toute nanoparticule par inhalation constitue la priorité en termes de gestion des risques. C'est pourquoi une nanosécurisation des postes de travail associés à la manipulation des nanocharges est nécessaire.

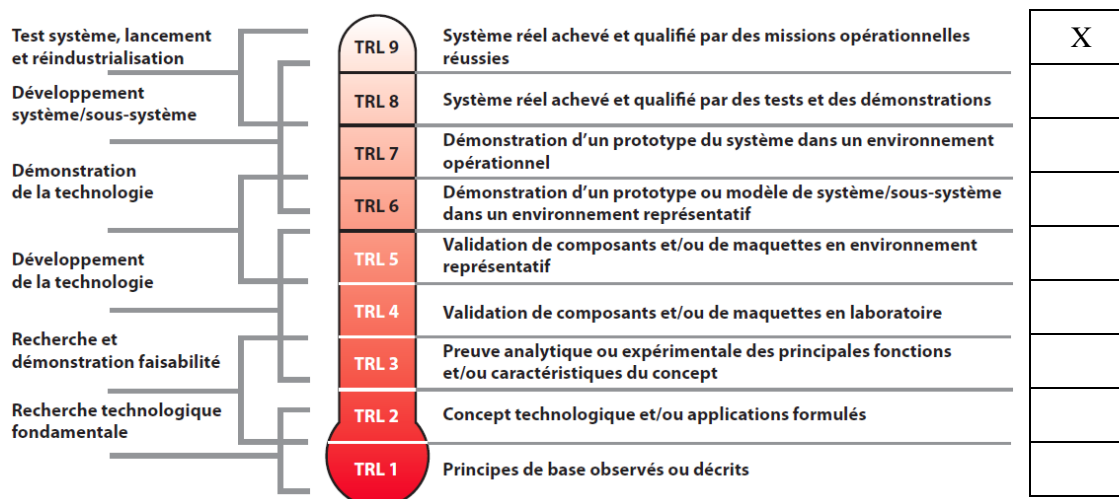
Ainsi, les industries manipulant des pulvérulents se doivent d'engager des démarches pour la sécurisation des travailleurs. Cette priorité concerne autant les manipulateurs de poudres communes jusqu'ici non réputées « nano » que les industries de produits innovants de dimension volontairement nanométrique.

Enfin, sans minimiser les dangers associés à la migration des nanocharges dans les aliments, dont la connaissance scientifique est encore limitée, il est important de souligner que:

- l'exposition par ingestion est associée à un moindre danger
- l'incorporation des nanoparticules *dans une matrice compatible* conduit à un matériau solide avec des nanocharges quasi immobilisées.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie peut être considérée comme mature dans le sens où des démonstrations techniques montrent la plus-value en termes de propriétés barrières pour certains matériaux.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Les **freins techniques** sont multiples.

- L'incorporation des nanocharges peut être totalement inopérante lorsqu'elle n'est pas réalisée dans des conditions optimales de dispersion.
- L'augmentation de la viscosité associée peut rendre problématique certaines voies de transformation (voir § 1.3 (ii))
- La nanosécurisation (voir § 1.2) des postes de travail nécessite des investissements relativement importants pour les industriels.

Les **freins sociétaux** sont associés à la manipulation des nanocharges. Ces freins seront d'autant plus importants dans le cas d'une clarification obligatoire trop globale à destination du consommateur qui donnerait aux « nanotechnologies » une connotation négative. Il faudrait apporter des nuances et des éléments de classification dans cette clarification. Il est ainsi nécessaire de différencier :

- les nanotechnologies utilisées dans le domaine de l'électronique manipulant des quantités d'objets « nano » très faibles et dans des conditions extrêmement sécurisées et
- les pulvérulents de dimensions nanométriques utilisés en grande quantité dans la formulation de produits industriels nécessitant un niveau de sécurisation des postes de travail qui n'est peut-être pas optimal à ce jour.

Les **freins économiques** sont liés au développement encore faible des matériaux nanochargés.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Le faible développement des matériaux nanochargés n'est pas seulement dû aux différents freins techniques, sociétaux et économiques.

La plasturgie en général, et plus particulièrement celle des matériaux d'emballages s'appuie sur de grands matériaux standards, des performances généralement reconnues, des domaines d'applications identifiés et stabilisés et des volumes de production permettant le développement de filières spécifiques de tri et de recyclage.

La filière devra identifier un ou deux matériaux nanochargés à développer industriellement. Le PET nanochargé pourrait répondre à un certain nombre de critères de choix, en tant que nouveau standard (voir les propriétés cibles définies dans la fiche « Nouveaux polymères barrières plus performants »).

La synthèse in situ de nanocharges en milieu aqueux (slurry) ouvre de très larges perspectives :

- pas de manipulation de pulvérulents « nano » par des opérateurs,
- cogénération possible de la charge et du polymère avec amélioration des interactions et de la dispersion,
- modulation des propriétés de surface pour l'amélioration de l'adhérence,
- accès à des morphologies de particules originales,
- meilleur contrôle de la pureté, par rapport aux charges naturelles.

2.5 Principaux acteurs

De nombreux acteurs académiques interviennent dans le domaine des matériaux nanochargés, notamment les universités de Rouen et de Lyon qui travaillent sur les propriétés barrières.

L'industrie de la plasturgie travaille actuellement sur cette technologie en R&D, mais de façon confidentielle.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Des expertises académiques et industrielles existent en France.

Pour que cette technologie se développe de façon déterminante, il faudrait un investissement de forte capacité d'un grand fabricant de matières premières formulées (ou compoundeur).

3- Impact environnemental

La généralisation de l'utilisation de nanocharges de type montmorillonite comme les argiles lamellaires soulèvera éventuellement des problématiques concernant la gestion de fin de vie de la part non recyclée du flux de matériaux, c'est-à-dire des déchets d'incinération. Toutefois, ces déchets seront de toute façon moins complexes à gérer que dans le cas d'une généralisation hypothétique de l'utilisation de matériaux nanochargés à l'argent.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie d'emballages nanochargés dans la masse a obtenu une note de 4 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	1	0	4

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

•**Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

•**Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

•**Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs⁶

Les consommateurs sont plutôt favorables à l'utilisation d'emballages barrières intégrant des nanocharges ou des nanorevêtements permettant de limiter la pénétration d'oxygène.

Ce résultat, en partie inattendu, est néanmoins conforté par plusieurs études qui indiquent que dans plusieurs pays européens les inquiétudes des experts en acceptation par les consommateurs sont parfois exagérées (Van Dijk et al., Soumis, Gupta, 2013, Gupta et al., 2013, Gupta et al., 2012b). La sensibilité des experts à propos de la réaction des consommateurs sur les nanotechnologies dans l'alimentation est sans doute davantage influencée par l'affaire des OGM plutôt que par les déclarations des consommateurs (Gupta et al., 2012b). L'opinion publique au sujet des nanotechnologies demeure incertaine et pourrait bien devenir positive si des produits appropriés et désirés arrivent sur le marché, ou généralement négative, ce qui résulterait en une réjection catégorique des nanotechnologies dans l'agroalimentaire (Ronteltap et al., 2011, Fischer et al., soumis, Fischer et al., en preparation).

La principale motivation des consommateurs provient du fait qu'ils comprennent que retirer l'oxygène permet de créer des produits plus sains et qui se conservent mieux. Ce qu'ils considèrent comme étant un avantage particulièrement intéressant est la faible quantité de matériaux utilisés, en comparaison aux autres emballages. Dans le même temps, ce nouveau produit sera perçu comme plus naturel puisque réduisant les besoins de traitement par la chaleur et la quantité de conservateurs. Les consommateurs estiment ces emballages particulièrement adaptés aux produits à longue conservation. La référence à un emballage créé à partir de matériaux naturels est perçue comme un grand avantage pour accorder plus de confiance à l'emballage et considérer que le risque est acceptable. En outre, les consommateurs préféreraient sans aucun doute que l'emballage soit biodégradable, ou tout du moins recyclable.

Certaines inquiétudes des consommateurs pourraient mener à un rejet de la technologie, à moins que des preuves scientifiques ne soient apportées. Tout d'abord, des preuves claires concernant l'efficacité de cet emballage et la non migration des particules de l'emballage vers l'aliment sont requises avant

⁶ Pour une bibliographie plus complète se reporter au rapport final « *Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire: enjeux pour les consommateurs et les entreprises* »

toute utilisation. Deuxièmement, il faut tenir compte du fait que les consommateurs savent que les nanoparticules sont très petites et même, en réalité, invisibles. Cela leur confère le sentiment qu'ils ont très peu de contrôle sur la présence de cette nanotechnologie dans l'emballage et ils réclament que le taux de nanoparticules présentes dans l'emballage apparaisse clairement sur l'étiquette. De plus, les consommateurs aimeraient être mieux renseignés quant au mécanisme qui permet à un tel nanomatériau d'assurer ce transfert de gaz, à savoir d'éliminer l'oxygène et de laisser les gaz inertes à l'intérieur.

De manière générale, les consommateurs estiment que la plupart des avantages bénéficient aux producteurs, qui peuvent ainsi fabriquer des produits durant plus longtemps, tout en utilisant moins de substances chimiques et de matériaux d'emballage, alors que le produit sera toujours le même. Ainsi, les consommateurs perçoivent de petites craintes mais pas de réel bénéfice pour eux. Par conséquent, leur volonté d'investir plus d'argent pour bénéficier de cette technologie est très limitée.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Si les nano-charges sont avantageuses d'un point de vue propriétés mécaniques et propriétés barrières, le point bloquant réside dans la reproductibilité entre l'échelle laboratoire et l'échelle industrielle. En effet, les nano-charges, notamment dans la masse, marchent très bien au niveau du laboratoire mais pose problème au niveau industriel car nécessite des équipements spécifiques et présente une mise en œuvre complexe. En effet, les problèmes techniques ainsi que les freins économiques (coût de transformation, prix du matériau, besoin d'équipements) limitent l'industrialisation.

Cependant, le marché est en cours d'évolution du fait de la diversification des formes de nano-charges. Des 'master batches' commencent à voir le jour même si la complexité de leur process reste encore un frein.

Perspectives

La mise sur le marché à grande échelle est prévue dans les 5 à 10 prochaines années, sachant que la faisabilité et les avantages technologiques sont prouvés. Il manque uniquement un maillon qui est le master batch. En effet, les compounders sont habitués à travailler d'une certaine manière. Sans master batch, l'industrialisation semble trop complexe.

Le master batch ou mélange maître consiste en l'incorporation à un taux élevé d'un additif dans un matériau qui puisse ensuite être utilisé facilement par le compounder sans qu'il n'ait à changer ses procédés de production.

Pour l'instant le taux d'incorporation est plutôt faible. Il faudrait également que ce master batch soit à un prix acceptable : 3-5€/kg pour le matériau intégré et non pas des 100-300€/kg comme pour les emballages actifs.

Rentabilité économique

Les Nano-fibrilles de cellulose (matière brute) sous forme de poudre ou de gel coûtent entre 3 et 5 €/kg.

En moyenne, 15-20% de nano-charges sont utilisées. Le prix du matériau intégrant des nanos varie suivant le cahier des charges. A titre d'exemple, avec le matériau PE, le prix monte à plus de 3€/kg.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie d’emballages nanochargés dans la masse :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la DLC pour le PET et PA 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût - Complication de la manipulation du matériau par les transformateurs - Nanosécurisation des postes de travail (coûts) - Crainte du consommateur
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Durcissement de la réglementation - Développement de Master batch - développement de la synthèse in situ de nanocharges en milieu aqueux 	<p style="text-align: center;">Menaces</p>

Ajouter des nanocharges dans la masse des matériaux d’emballages est un procédé séduisant pour les fabricants d’emballages puisqu’il permet d’augmenter les propriétés barrières du matériau. Néanmoins, il présente certains freins à la réalisation industrielle : l’augmentation de la viscosité associée peut rendre problématique certaines voies de transformations et la nanosécurisation pour les employés représente un coût non négligeable. Cependant, le développement de la synthèse in situ de nanocharges en milieu aqueux pourrait supprimer ces freins. Aujourd’hui, la technologie est performante sur le PET et le polyamide (PA), mais leur développement encore faible entraîne des investissements encore trop importants pour les industriels. En outre, le procédé novateur fait peur aux consommateurs.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l’impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir des entretiens avec les équipementiers.

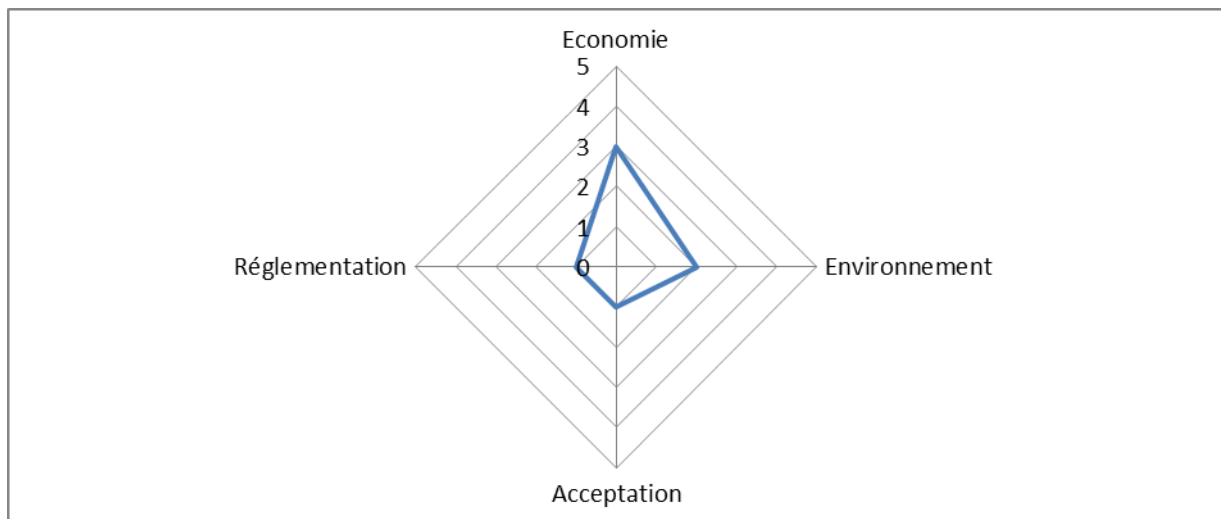


Figure 3 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Consommateurs :

FISCHER, A. R. H., RONTELTAP, A., MARVIN, H. J. P., VOORDOUW, J. & STIJNEN, D. submitted. Communicating nanotechnology: Talking about applications or the technology matters for public risk and benefit perceptions

FISCHER, A. R. H., TUDORAN, A. A., VAN TRIJP, H. C. M., HOFENK, D., RONTELTAP, A., ESJBERG, L. & GRUNERT, K. in preparation. Consumer Acceptance of New Food Technologies: Three roads to consumer choice.

GUPTA, N. 2013. *Factors influencing societal response to nanotechnology in the agrifood sector and beyond*. doctoral dissertation, Wageningen University.

GUPTA, N., FISCHER, A. R. H., GEORGE, S. & FREWER, L. J. 2013. Expert views on societal responses to different applications of nanotechnology: a comparative analysis of experts in countries with different economic and regulatory environments. *Journal of Nanoparticle Research*, 15, 1-15.

GUPTA, N., FISCHER, A. R. H., VAN DER LANS, I. A. & FREWER, L. J. 2012b. Factors influencing societal response of nanotechnology: An expert stakeholder analysis. *Journal of Nanoparticle Research*, 14, 857.

RONTELTAP, A., FISCHER, A. R. H. & TOBI, H. 2011. Societal response to nanotechnology: converging technologies-converging societal response research? *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 4399-4410.

VAN DIJK, H., FISCHER, A. R. H. & VAN TRIJP, H. C. M. submitted. Differing views between the public and experts about nanotechnology: The importance of application type

EMBALLAGES RESPIRANTS PAR TECHNOLOGIES DE MICROPERFORATION

Fiche consolidée par Florence Charles (Université d'Avignon) et Sébastien Lurol et al (CTIFL)

Données clés

Résumé

La microperforation est une technologie permettant de moduler les propriétés de transfert des films plastiques afin d'adapter leurs propriétés aux produits nécessitant une conservation sous respiration contrôlée. Les principaux produits concernés sont les fruits et légumes frais.

C'est une technologie très prometteuse.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La microperforation est une technologie mature permettant de moduler les propriétés de transfert des films plastiques afin d'adapter leurs propriétés aux produits alimentaires nécessitant une conservation sous respiration contrôlée. Les produits concernés sont essentiellement les fruits et légumes frais pour lesquels les niveaux de respiration souvent élevés rendent les microperforations nécessaires (fruits et légumes 4^{ème} gamme). Selon les utilisations et les matériaux, le diamètre des perforations est compris entre 0,05 mm et 3 mm, avec une densité de perforations pouvant aller jusqu'à 100 trous au centimètre-carré. Les perforations sont obtenues à l'aide de rouleaux à aiguilles, par poinçonnage, ou par microperforation laser. Cette dernière technologie permet la réalisation de perforations plus nettes, aux dimensions mieux maîtrisées, et peuvent être positionnées sur certaines zones du film non en contact avec le produit.

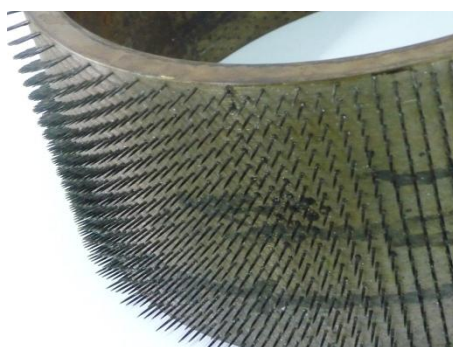


Figure 1: Films micro-perforés Helion Packaging⁷

Outre sa possibilité de contrôler des flux plus faibles, la microperforation laser permet également de perforer une couche superficielle d'un complexe, afin de faciliter l'ouverture sans créer de fuite. Un "guide" tracé au laser permet d'ouvrir le sachet suivant une forme bien définie.

⁷ http://www.helionpackaging.com/Microperforated_Films.html



Figure 2 : Solution Laseo⁸

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

La maîtrise de la conservation des fruits et légumes frais (FL) est un enjeu extrêmement important dans la lutte contre le gaspillage alimentaire. Les pertes peuvent atteindre 30 à 40 % en fonction des espèces et du mode de production.

Trois pratiques courantes sont utilisées pour la conservation des fruits et légumes :

- **Les emballages sous air ou macroporés** qui permettent la respiration des FL de façon strictement analogue à leur respiration en absence d'emballage. Dans ce cas, l'emballage a une fonction de contenant fermé facilitant et fiabilisant les manipulations distributeur et consommateur. Il permet une réduction des pertes d'eau et la plupart du temps une meilleure hygiène pour le consommateur en préservant le produit des manipulations successives.
- **Le conditionnement sous atmosphère protectrice** (cf. §1.3) permet de placer le produit dans des conditions plus favorables que le vieillissement naturel. Généralement, il s'agit de conditions d'atmosphère pauvre, mais non nulle, en oxygène, et en présence de CO₂. Toutefois ces conditions initiales ne peuvent être maintenues puisque des flux sont échangés entre l'espace de tête et le produit. Si la DLC⁹ est courte, l'utilisation d'un emballage barrière n'est pas nécessaire. Au contraire, le renouvellement partiel de l'oxygène peut être recherché. Ce mode de conservation des FL frais comporte deux défauts : (i) seul l'état initial de composition de l'espace de tête est ajusté, ce qui ne permet pas de maîtriser totalement le processus de conservation (ii) après ouverture, le produit est brutalement placé en conditions aérobies, ce qui conduit à un vieillissement très rapide du produit.
- **Le conditionnement en emballage microporé** permet la mise en place progressive d'une atmosphère modifiée résultant de l'équilibre entre la respiration des produits et les échanges gazeux. La respiration des produits est alors ralentie par rapport aux conditions de respiration sans emballage. **Seul le conditionnement en emballage microporé permet d'ajuster les flux d'échanges gazeux qui ont lieu tout au long du processus de conservation.**

⁸ <http://www.laseo.fr>

⁹ Date Limite de Consommation (DLC)



Figure 3 : Lien Intensité respiratoire/dégradation de quelques produits Source : Multivac¹⁰

1.3 Comparaison avec l'existant

L'existant : les technologies d'atmosphère protectrice.

Contrairement à la plupart des aliments, les fruits et légumes frais continuent de « respirer » après avoir été récoltés. Ce processus consomme de l'oxygène et produit du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Pour préserver la fraîcheur de ces aliments aussi longtemps que possible, il faut réduire leur taux de respiration sans que cela ne se répercute sur leur qualité (saveur, texture et apparence). De manière générale, le taux de respiration peut être limité en conservant les produits à basse température, en diminuant la teneur en oxygène de l'atmosphère de conditionnement et en augmentant la concentration de dioxyde de carbone. Néanmoins, les choses ne sont pas aussi simples qu'elles en ont l'air. Par exemple, une concentration d'oxygène trop basse dans l'atmosphère protectrice déclenche le processus de respiration anaérobie. Celui-ci est à l'origine du mauvais goût et des mauvaises odeurs des fruits et légumes et provoque leur dégradation. À l'inverse, une teneur extrêmement élevée en dioxyde de carbone peut compromettre certaines variétés. D'autre part, la haute teneur en eau de cette catégorie d'aliments et l'acidité naturelle des fruits peuvent entraîner une dégradation due aux levures et aux moisissures. De plus, la chair peut se ramollir sous l'effet des enzymes des microbes et finir par pourrir. Le type de matériau d'emballage utilisé pour les fruits et les légumes, notamment sa perméabilité et sa respirabilité sont autant de facteurs décisifs. Dans un emballage hermétique, la réserve d'oxygène s'épuise rapidement et des conditions anaérobies indésirables apparaissent. À l'inverse, dans un emballage trop poreux, l'atmosphère modifiée s'échappe et l'emballage perd tous ses avantages. Source : atmosphereprotectrice.fr

L'innovation de la technologie de microperforation est d'intervenir « à la carte » sur le processus d'échange entre l'espace de tête et l'extérieur, afin de maintenir dans l'espace de tête une composition gazeuse plus favorable, ralentissant les processus de dégradation.

Des fournisseurs tels que Multivac (procédé Freshsafe) apportent des solutions globales de conditionnement avec (i) couplage en ligne de microperforation modulable en fonction des caractéristiques du produit, et (ii) possibilité d'associer un conditionnement initial sous atmosphère protectrice. Une approche encore plus complète est apportée par l'entreprise néerlandaise PerfoTec, qui propose un respiromètre permettant d'adapter en ligne la perméabilité du film.

¹⁰ <http://www.multivac.fr/fileadmin/multivac/fr/pdf/download/multivac-freshsafe.pdf>

2- Mise en œuvre de la technologie

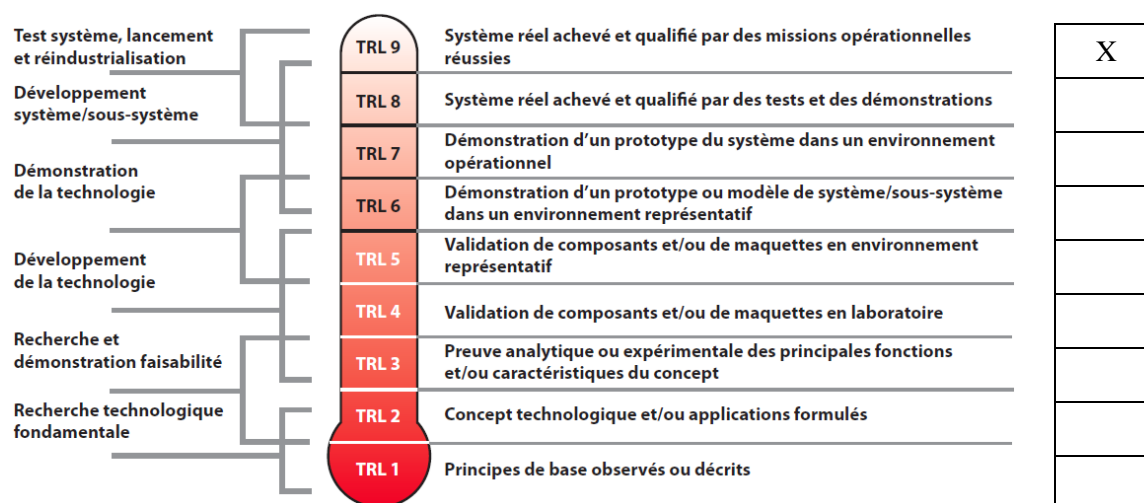
2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Aucun risque sanitaire n'est associé aux emballages microperforés.

L'emballage est autorisé sans frein réglementaire, si le MCDA est déjà autorisé.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level (TRL) :



La technologie est mature, **elle est en revanche généralement appliquée dans des conditions empiriques, sans mesures préalables sur les produits à conserver.**

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

La technologie est déjà mise en œuvre relativement couramment, mais les choix des matériaux sont réalisés avec des approches essais/erreur qui ne permettent pas d'utiliser au mieux la technologie. Une espèce donnée de FL présente en outre une variabilité de comportement très importante, selon les variétés, saisons, et conditions effectives de cultures. Faute de faculté d'adaptation d'un emballage à un lot donné, les conditionneurs s'orientent soit sur un choix unique de système microperforé, soit sur une autre méthode de conditionnement.

Par exemple, les fabricants de salades préparées préfèrent une solution de conditionnement sous MAP (atmosphère modifiée) en emballage OPP (polypropylène orienté), moins sensible aux variabilités de respiration des lots.

Le frein à l'élargissement de la technologie de microperforation est donc l'impossibilité de réalisation d'un conditionnement réellement à la carte. En d'autres termes, il est difficile de réaliser en ligne une réponse précalibrée en termes de microperforation (+éventuellement atmosphère protectrice) à partir de mesures de respiration sur un lot donné.

L'autre frein important au développement des emballages microperforés est la non maîtrise des conditions de température dans le circuit de distribution et de commercialisation des FL, en dehors des FL 4^{ème} gamme pour lesquels une température comprise entre 0 et 4 °C doit être maintenue. Or, ce facteur température impacte très fortement la respiration des produits et donc le choix du nombre de

perforations. Actuellement, les emballages sont trop perforés pour éviter les problèmes d'anoxie/fermentation en cas de variation de température et ne sont donc pas optimisés.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Pour mieux appréhender la conservation des FL frais, c'est un ensemble d'outils qu'il conviendra de faire converger au niveau de lignes de conditionnement de nouvelle génération comportant :

- Des outils de mesure de respiration sur le lot de produits
- Des outils logiciels de préconisation de conditions idéales de conditionnement
- Une maîtrise des conditions de température sur l'ensemble de la chaîne
- L'apport optionnel d'atmosphère modifiée
- Des outils de microperforation en ligne comportant de préférence la technologie laser qui permet une meilleure précision et une maîtrise des faibles flux.

2.5 Principaux acteurs

• France

La recherche sur les FL frais est réalisée principalement au Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), à l'Institut National de la Recherche Agricole (INRA), à l'université d'Avignon et au CIRAD pour les produits tropicaux. Le LPFL (laboratoire de Physiologie des Fruits et Légumes) de l'Université d'Avignon est un acteur important pour la conservation des fruits et légumes frais et 4^{ème} gamme. L'université de Montpellier intervient également sur l'assistance logicielle à la conception d'emballages respirants. Le LPFL (labo de Physiologie des Fruits et Légumes) de l'Université d'Avignon est désormais un acteur important pour la conservation des fruits et légumes frais et 4^{ème} gamme. Nous travaillons d'ailleurs de plus en plus avec le CTIFL.

La France compte également des acteurs industriels spécialisés dans la fabrication d'emballage micro perforés par techniques laser, tels que Laseo et UNI Packaging et cellpackaging CFS qui réalise la perforation avec aiguilles.

• International

De nombreux industriels proposent actuellement des emballages micro perforés : PerfoTec (Pays-Bas), KM Pack (GB) et Helion Packagin (Chine). En parallèle de ces producteurs, on remarque de grands fournisseurs de films performants, tels que l'américain Dupont, ainsi que de machines, tels que l'allemand Multivac.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Cette thématique scientifique était très dynamique dans les années 1990 (cf. INRA Avignon).

Terralia (pôle fruits et légumes) redynamisée à nouveau et fédère des industriels utilisateurs autour des questions de conditionnement de FL frais.

3- Impact environnemental

Aucun impact environnemental de la technologie n'est à noter au cours de son étape de fonctionnement.

Cette technique permet d'éviter les fuites et donc les suremballages.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie des emballages respirants microperforés a obtenu une note de 3 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	0	0	3

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Cette technologie est perçue favorablement par les consommateurs : il s'agit d'une innovation simple et aucune substance supplémentaire n'est ajoutée à l'emballage. En revanche, les consommateurs ne percevront sans doute pas de bénéfices directs à utiliser cet emballage.

5- Dimension économique

Le marché actuel

UNIPACKAGING est le leader du marché pour le laser Cut, proposé depuis 2,5 ans. Il dispose de matériel très performant et d'une expertise sur le sujet en tant que transformateur et extrudeur de film barrière. Il existe, cependant, 1 ou 2 concurrents en Europe.

La pelabilité des films (sur les magnums de glace par exemple) est une application alternative au laser Cut. Cette technique est visuellement plus difficile à voir et est donc applicable suivant le produit ou le type de contenu.

L'homologation du laser Cut prend environ 6 mois. Pour la microperforation, elle n'est que de 3 ans, environ.

Perspectives

Ces technologies ont de bonnes perspectives d'évolution, offrant la possibilité aux IAA d'enlever le suremballage.

Il est nécessaire de communiquer sur ces technologies autant aux IAA qu'au consommateur (ajout des pictogrammes d'ouverture facile pour mettre en avant cette fonctionnalité).

La technologie de microperforation mécanique encore au stade recherche nécessitera un cahier des charges plus complexe car il faudra mesurer les sélectivités.

Rentabilité économique

En moyenne, les premiers prix de films micro perforés alimentaires s'établissent aux alentours de 2 à 4€/le kg.

Le prix proposé par l'entreprise Unipackaging (laser Cut) pour les 100 m² d'emballage est de 60 centimes. Ce prix ne contient que le coût de traitement puisque les emballages sont livrés aux IAA.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des emballages respirants microperforés :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Diminution du gaspillage pour les F&L - Réglementation - Bonne acceptation du consommateur - Simplicité de la technologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque d'adaptation à chaque produit dû à un manque de recherches - Température sur toute la chaîne non maîtrisée
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Recherche sur la respiration des produits - Maîtrise de la température sur l'ensemble de la chaîne 	<ul style="list-style-type: none"> - Concurrence avec d'autres technologies

Les emballages respirants sont particulièrement efficaces sur les fruits et légumes. Ils préservent les produits de la manipulation du consommateur, ce qui permet une meilleure hygiène, et ralentit le processus de respiration du produit, ce qui a pour conséquence un allongement de la durée de vie. La technologie garantit donc une diminution du gaspillage sur les fruits et légumes. Par ailleurs, c'est une technologie simple qui ne suscite aucune crainte du consommateur et qui est facile à mettre en place par les industriels. Le développement de la recherche sur la respiration des différents fruits et légumes et la maîtrise de la température sur l'ensemble de la chaîne alimentaire permettront à la technologie d'être moins empirique et de gagner en performance.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

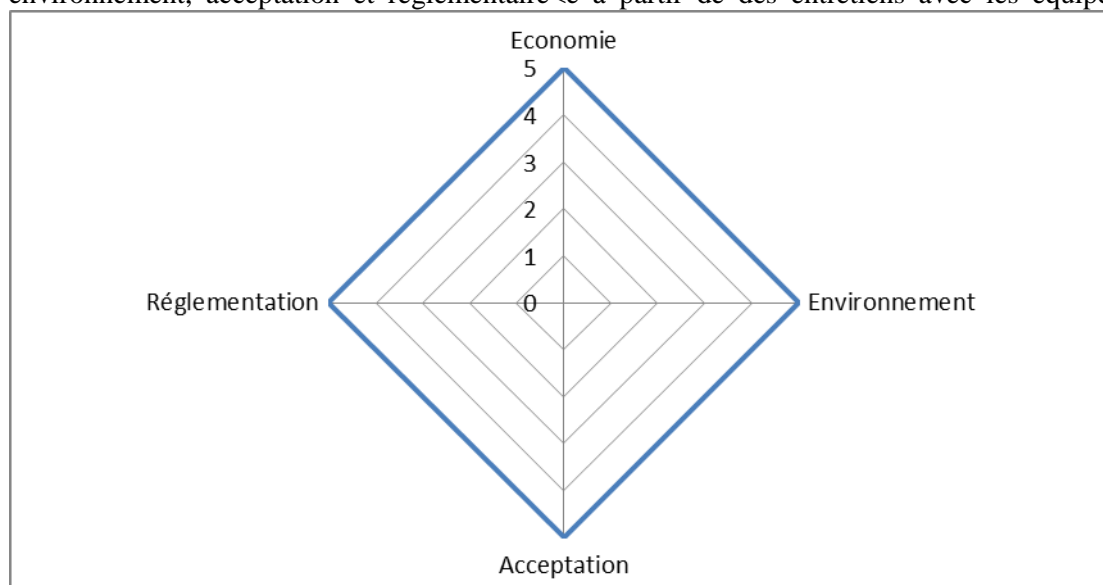


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Acteurs:

Films Helion Packaging, http://www.helionpackaging.com/Microperforated_Films.html

Laseo, <http://www.laseo-tech.com/application-emballages-innovants-micro-perforation-laser.html>

Tyvek, DuPont, http://www2.dupont.com/Food_Innovations/fr_FR/emballages/emballages-alimentaires.html

Multivac, <http://www.multivac-group.com/>

PerfoTec, <http://perfotec.com/how-it-works/>

KM Pack, <http://www.kmpack.co.uk/spec-lidding-films.aspx>

UNI Packaging, <http://www.uni-packaging.com/fr/produits-et-services/gravure-au-laser/>

(Sites consultés en octobre 2013)

Annexe

Entreprise	Produit	Url	Devis
Xiamen OMS Plastic Co., Ltd (Chine)	Film micro perforé alimentaire	http://french.alibaba.com/product-gs/norway-used-micro-perforated-film-for-vegetable-801664387.html	A partir de 5 tonnes : 3.19 - 4.5\$ / kg (transport inclus)
Jiangyin Bairuijia Plastics Science & Technology Co., Ltd (Chine)	Film rétractable micro perforé alimentaire	http://french.alibaba.com/product-gs/micro-perforated-film-polyolefin-shrink-film-1129148170.html	A partir de 4 tonnes : 2.2 - 2.5\$ / kg (transport inclus)
Laizhou Demeter Imports And Exports Co., Ltd. (Chine)	Film micro perforé alimentaire	http://www.alibaba.com/product-gs/1087513546/Micro_Perforated_Plastic_Sheet_For_Food.html	1.52 - 2.78 \$ / kg (transport inclus)
Shandong Kingson Packing Tech Co., Ltd. (Chine)	Film micro perforé alimentaire	http://www.alibaba.com/product-gs/1235331046/POF_shrink_film_micro_perforated_food.html	A partir d'1 tonne : 2.56 - 2.86 \$ / kg (transport inclus)

EMBALLAGES A PERMEABILITE SELECTIVE

Fiche consolidée par Florence Charles (Université d'Avignon), Carole Guillaume (Université de Montpellier) Sébastien Lurol et al. (CTIFL)

Données clés

Résumé

Technologie à inventer qui permettra la longue conservation des fruits et légumes grâce à une forte perméabilité au CO_2 et une faible perméabilité à l' O_2 .

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La protection des fruits et légumes frais contre une dégradation rapide repose essentiellement sur un contrôle précis de leur respiration, et donc de l'atmosphère avec laquelle ils sont en contact. On recherche généralement un apport d'oxygène limité mais non nul, et la possibilité d'évacuer le CO_2 en excès formé au cours des processus de respiration/dégradation : il convient d'assurer à la fois la survie du tissu végétal, d'éviter le développement de moisissures et bactéries aérobies, notamment en conservant une concentration élevée de CO_2 , mais aussi d'éviter la mise en anoxie totale, qui déclencherait des phénomènes fermentaires (notamment fermentation alcoolique) sous l'action des microorganismes. L'équilibre à établir est donc complexe.

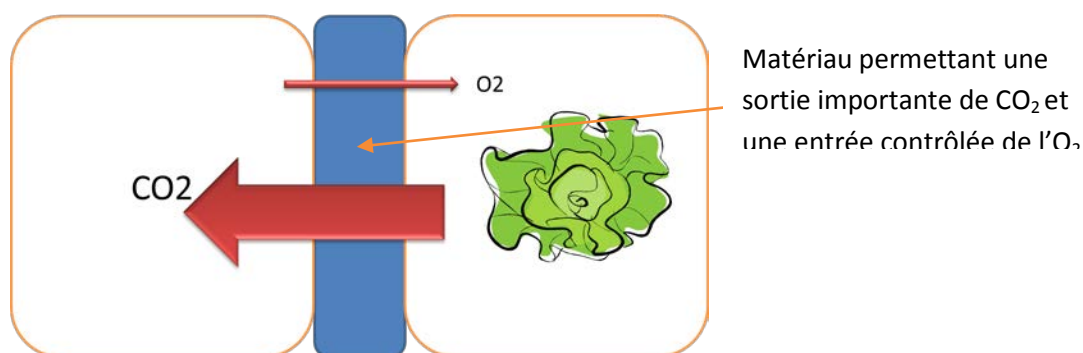


Figure 5 Caractéristiques recherchées pour un emballage de fruits et légumes frais

Les flux entrants et sortants étant contrôlés par un seul et unique matériau, le cahier des charges appelle donc des emballages présentant à la fois un petit effet de barrière à l'oxygène et au contraire, une forte perméabilité au CO_2 . La notion de spécificité de perméabilité exprime cet écart de comportement, en s'appuyant sur le ratio entre la perméabilité au CO_2 et la perméabilité à l'oxygène, ou sélectivité. Pour une sélectivité de 1, on dira que le matériau n'a aucune spécificité de perméabilité. Pour une sélectivité de 4, on dira que le matériau présente une spécificité de perméabilité en faveur du CO_2 . On cherche donc pour les fruits et légumes des emballages présentant la plus grande spécificité de perméabilité possible pour le CO_2 , tout en présentant des perméabilités suffisantes pour permettre les échanges gazeux.

Les polymères courants présentent une sélectivité moyenne de 3 mais sont globalement peu perméables.

Les matériaux faisant l'objet de la technologie de microperforation n'ont aucune spécificité de perméabilité (sélectivité de 1) mais permettent la modulation des flux gazeux aux forts niveaux de perméabilité nécessaires au contrôle de la respiration des FL frais. Cela évite notamment un gonflement des emballages par accumulation de CO₂.

La technologie à inventer consisterait à cumuler les avantages des deux méthodes précédentes, c'est-à-dire à associer des caractéristiques de forte perméabilité caractéristiques de la technologie de microperforation, à des caractéristiques de sélectivité CO₂/O₂.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

La maîtrise de la conservation des fruits et légumes frais (FL) est un enjeu extrêmement important contre le gaspillage alimentaire. Les technologies utilisées aujourd'hui permettent de prolonger de façon sensible la durée de vie des produits, mais il est possible d'envisager des gains supplémentaires par la réalisation d'emballages présentant des propriétés très finement ajustées, notamment en apportant la sélectivité CO₂ / O₂.

1.3 Comparaison avec l'existant

Il existe 3 voies courantes pour la conservation des fruits et légumes frais non transformés, incluant les végétaux de 4^{ème} gamme.

- **Les emballages sous air ou macroperforés** qui permettent la respiration des FL de façon strictement analogue à leur respiration en absence d'emballage. Dans ce cas, l'emballage a une fonction de contenant fermé facilitant et fiabilisant les manipulations distributeur et consommateur. Il permet une réduction des pertes d'eau et la plupart du temps une meilleure hygiène pour le consommateur en préservant le produit des manipulations successives.
- **Le conditionnement sous atmosphère protectrice** permet de placer le produit dans des conditions plus favorables que le vieillissement naturel. Généralement il s'agit de conditions d'atmosphère pauvre (mais non nulle) en oxygène, mais en présence de CO₂. Toutefois ces conditions initiales ne peuvent être maintenues puisque des flux sont échangés entre l'espace de tête et le produit. Si la DLC¹¹ est courte, l'utilisation d'un emballage barrière n'est pas nécessaire. Au contraire, le renouvellement partiel de l'oxygène peut être recherché. Ce mode de conservation des FL frais comporte deux défauts : (i) seul l'état initial de composition de l'espace de tête est ajusté, ce qui ne permet pas de maîtriser totalement le processus de conservation ; (ii) après ouverture, le produit est brutalement placé en conditions aérobies, ce qui conduit à un vieillissement très rapide du produit.
- **Le conditionnement en emballage microperforé** permet la mise en place progressive d'une atmosphère modifiée résultant de l'équilibre entre la respiration des produits et les échanges gazeux. La respiration des produits est alors ralentie par rapport aux conditions de respiration sans emballage.

¹¹ Date Limite de Consommation (DLC)

Seul le conditionnement en emballage microperforé permet d'ajuster les flux d'échanges gazeux qui ont lieu tout au long du processus de conservation.

La sélectivité CO_2/O_2 a depuis longtemps été démontrée d'intérêt pour les FL frais: elle pourrait constituer la 4eme voie permettant d'améliorer la durée de vie des FL frais.

Les matériaux polymères les plus courants présentent des niveaux de sélectivité CO_2/O_2 de l'ordre de 3. Mais cette valeur peut être beaucoup plus élevée lorsque les polymères présentent *une affinité spécifique avec le CO_2* . Les matériaux suivants possèdent cette caractéristique :

- les polyesters gras ainsi que tous les polymères caoutchoutiques de polarité « moyenne »
- les polymères naturels hydrophiles qui comportent de l'eau sous forme de clusters : dans ce cas c'est la forte solubilité du CO_2 dans l'eau qui contribue à l'augmentation de sélectivité
- certains polymères tels que les protéines qui engendrent des interactions de type acide/ base avec le CO_2

Si ces matériaux présentent une sélectivité importante, ils demeurent peu perméables. Il faudrait donc inventer des solutions techniques valorisant leur sélectivité, tout en leur procurant une perméabilité élevée. Parmi **les solutions à développer**, on peut citer :

- le **dépôt de polymères à forte sélectivité en couches fines sur des supports poreux** tel que le papier
- le **dépôt de polymères à forte sélectivité en couches fines sur des supports poreux à perméabilité modulable**, tel que les films microperforés
- les **mélanges de polymères de type latex, qui présentent intrinsèquement des perméabilités élevées, de perméabilité et sélectivité modulables** en fonction des composants et de leurs conditions de séchage.

Tous les concepts de modulation de propriétés appelleront nécessairement l'association de différents matériaux, ce qui complexifiera (i) la conception et le choix des matériaux candidats (lorsqu'on associe des barrières de performances différentes, c'est la plus haute barrière qui contrôle le processus) (ii) la recyclabilité.

2- Mise en œuvre de la technologie

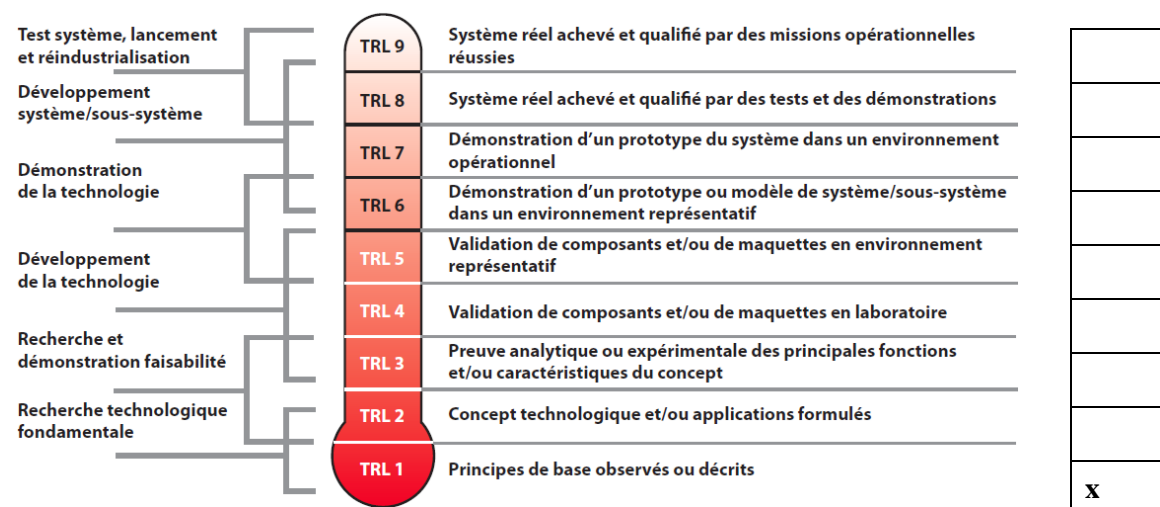
2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Il n'y a pas de risques sanitaires particuliers présentés par cette nouvelle technologie si l'on s'en tient à l'utilisation de combinaisons de matériaux couramment utilisés en contact alimentaire.

L'emballage est autorisé sans frein réglementaire, si le MCDA est déjà autorisé.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Si le principe est décrit depuis très longtemps dans la littérature scientifique, aucune solution technique convaincante n'a été développée dans l'industrie, ni même proposée au stade de démonstration de concept.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Les freins à l'adoption de la technologie par les industriels sont uniquement techniques :

- **absence de solution générique** permettant de moduler à la fois la perméabilité globale et la sélectivité
- **absence d'outils industriels de mesure et d'aide au choix**, permettant de définir un choix d'emballage optimal pour un lot donné à conditionner

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Emergence d'une technologie parmi ou en dehors des pistes suivantes :

- le dépôt de polymères à forte sélectivité sur des supports poreux tel que le papier,
- le dépôt de polymères à forte sélectivité sur des supports poreux à perméabilité modulable, tel que les films microperforés,
- les mélanges de polymères de type latex.

2.5 Principaux acteurs

Les acteurs académiques dans le domaine de la perméabilité gazeuse (universités de Rouen et de Montpellier), dont les recherches sont souvent orientées sur des technologies de séparation dans le domaine de la chimie industrielle pourraient cependant être mobilisés sur la thématique « Emballages »

Il n'existe pour le moment pas d'acteurs industriels spécialisés.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Les **réseaux académiques et des grands chimistes** (spécialisés dans les polymères) pourraient être faciles à mobiliser.

Terralia travaille sur ces thématiques.

3- Impact environnemental

Il est difficile d'arbitrer sur les impacts environnementaux d'une technologie mal définie. Toutefois, il est probable que les nouvelles technologies de packaging à sélectivité CO₂/O₂ reposent sur des films complexes, multicouches ou mélanges de polymères.

- En tant que complexes ou « blends », ces matériaux présenteront des difficultés de valorisation en recyclage matière.
- En tant qu'emballages souples, leur impact serait limité au regard du gain environnemental apporté par l'allongement de la durée de vie et la maîtrise du gaspillage associée.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie d'emballages à perméabilité sélective a obtenu une note de 4 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	1	0	4

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

•**Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

•**Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

De prime abord, la technologie peut sembler complexe mais si l'emballage n'interagit pas avec l'aliment et que les matériaux utilisés sont inertes alors les consommateurs devraient être favorables. Cependant, ils ne percevront sans doute pas de bénéfices directs à utiliser cet emballage.

Par ailleurs, l'éducation du consommateur sur les phénomènes mis en jeu lors d'une respiration « limitée » pourrait lui permettre de comprendre qu'il n'y a qu'une frontière floue entre :

- (i) Le conditionnement sous atmosphère protectrice, ou MAP¹², généralement considéré comme « chimique » et donc jugé négativement et
- (ii) Le conditionnement dans des emballages à perméabilité contrôlée qui conduit naturellement au cours du temps à des compositions gazeuses qui peuvent être analogues à une composition MAP.

Remarque : le conditionnement sous MAP est à déclaration obligatoire sur l'emballage. Les gaz d'emballage sont classés dans les additifs alimentaires, il n'y a pas de déclaration dans la liste d'ingrédients mais l'ajout de la mention « Conditionné sous atmosphère protectrice » est obligatoire. Dans le cas du conditionnement dans un film à perméabilité sélective sans ajout de gaz d'emballage, aucune déclaration sur l'étiquetage n'est obligatoire. Ainsi, cette technologie est transparente pour le consommateur.

5- Dimension économique

La dimension économique reste difficile à évaluer, mais les coûts pourraient être assez limités si les emballages étaient mis au point à partir de technologies existantes comme le couchage de latex sur substrat papier.

¹² En anglais : Modified Atmosphere Packaging

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des emballages à perméabilité sélective :

Forces <ul style="list-style-type: none">- Diminution du gaspillage pour les F&L	Faiblesses <ul style="list-style-type: none">- Stade R&D
Opportunités <ul style="list-style-type: none">- Recherche sur la respiration des produits	Menaces <ul style="list-style-type: none">- Frein technique

La technologie est à inventer et permettra une meilleure conservation des fruits et légumes que les solutions existantes.

EMBALLAGES BIO-SOURCES

Fiche consolidée par Marie Loyaux (Pôle IAR)

Données clés

Résumé

Ces technologies regroupent les procédés de transformation des agroressources pour la fabrication de nouveaux polymères. Deux principales innovations sont envisagées : le PBS (polymère biosourcé à base d'acide succinique) et le PEF (polyester furanique). Ces matériaux présentent des propriétés barrières à l'oxygène bien plus élevées que les emballages existants. Le PBS pourrait avoir un intérêt pour l'augmentation de DLC des produits à DLC longue. Le PEF pourrait avoir un intérêt pour l'emballage des produits à DLC longue conditionnés en MAP, ainsi que pour l'emballage des produits à DLUO moyenne et longue.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La perspective d'utilisation des coproduits des agro ressources pour la réalisation de matériaux d'origine renouvelable mobilise depuis une vingtaine d'années la communauté scientifique, et depuis maintenant une dizaine d'année l'industrie de la chimie.

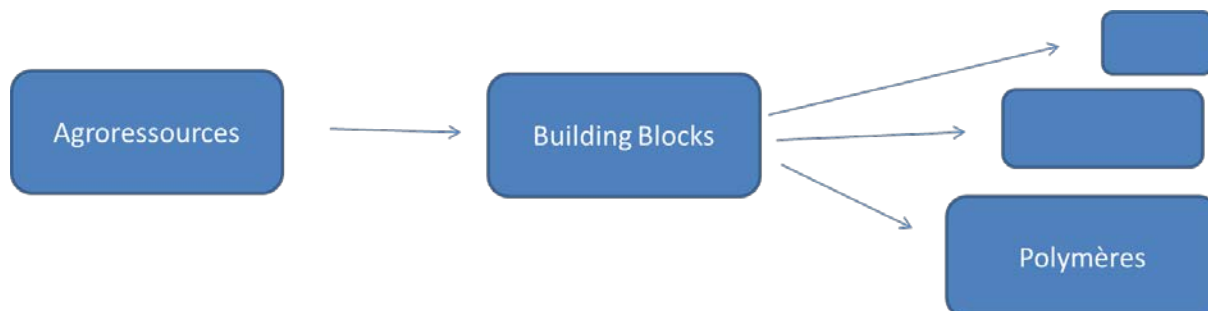


Figure 1 : Utilisation des agro ressources

Avant les années 2000, cette nouvelle filière a eu de grandes difficultés à trouver ses marques :

- faute de l'adhésion du secteur de la chimie, de grands acteurs « biotech » ont cherché à mettre en place des unités intégrées comportant aussi bien les étapes de procédés fermentaires que les étapes de synthèse de polymères. La notion de « building block », molécule portail servant plusieurs applications dans le domaine de la chimie, n'était pas intégrée. Par exemple la synthèse de l'acide lactique a principalement été orientée sur la synthèse du PLA.

- ses acteurs n'ont pas codéveloppé les nouveaux polymères « verts » avec leurs futurs utilisateurs ; ceci a conduit au fiasco de la commercialisation du PLA dans le domaine de l'emballage alimentaire. Ce matériau biosourcé ne répond en effet à aucune des caractéristiques recherchées pour un emballage ; il n'est pas barrière, il n'est pas respirant, sa transition vitreuse (son point de ramollissement) se situe autour de 60°C, et il est fragile mécaniquement. Bien que des PLA améliorés existent aujourd'hui (notamment à transition vitreuse plus élevée), les propriétés d'usage restent inadaptées.

Aujourd'hui c'est un tout autre modèle qui est imaginé :

- Les acteurs « biotech » s'orientent sur la production de *grands intermédiaires chimiques* qui serviront un spectre large d'application ;
- L'industrie de la chimie bénéficiera de ces « building blocks » (i) soit pour synthétiser des « bio » molécules qui existent déjà sur le marché sous une forme « pétrosourcée » (ii) soit pour réinventer de nouveaux produits.

On s'oriente donc sur deux catégories de nouveaux polymères d'emballages :

- ***Des matériaux biosourcés identiques aux matériaux historiques*** (l'éthylène vert, le propylène vert), qui permettent de synthétiser le polyéthylène « vert » et le PP « vert » ; le PET est également envisagé sous une forme biosourcée sous réserve d'une production verte rentable de l'acide téréphtalique
- ***Des nouveaux polymères, obtenus à partir de monomères nouveaux***, ou du moins nouvellement produits en grande quantité de par le développement de procédés de transformation des agroressources (par voie catalytique, ou voie fermentaire, principalement).

L'Europe a pris un retard énorme pour l'innovation dans la première catégorie de matériaux. Elle peut en revanche valoriser le gros effort recherche réalisé pour le développement de procédés originaux, en favorisant l'aboutissement de grands dossiers particulièrement porteurs. Notamment:

- Le développement du *PBS, polymère biosourcé à base d'acide succinique* ;
- Le développement d'une *filière de production de composés furaniques*, avec notamment la production du PEF possible substitut du PET.

Ces deux polymères présentent un intérêt bien différencié :

- Le PBS présente une combinaison originale de propriétés barrières à l'oxygène et de souplesse mécanique. **Le PBS pourrait donc s'imposer en tant que nouvelle référence**, qui offrirait de nouvelles opportunités de développement d'emballages originaux,
- Le PEF présente par rapport au PET, des propriétés optimisées : plus barrière à l'oxygène et à l'eau, plus stable thermiquement (plus haute température de transition vitreuse), engendrant moins d'énergie pour sa transformation à l'état fondu (plus faible température de fusion), il ne présente que des avantages par rapport au grand standard du marché que représente le PET. **Le PEF pourrait donc s'imposer en tant que substitut du PET.**

Substituts ou nouvelles références, les nouveaux polymères ne pourront donc pas uniquement s'imposer sur le marché grâce à un impact carbone minimisé. Pour répondre à un réel écobilan positif, les matériaux d'emballage doivent tout d'abord répondre à des exigences de fonctionnalité.

La figure suivante montre les impacts environnementaux comparés entre un emballage et son produit. Ces ratios faibles (le ratio moyen sur l'ensemble des produits alimentaires serait de l'ordre de 15%) montrent que **la fonction première d'un emballage consiste à « protéger les forts impacts environnementaux associés à la mise en œuvre d'un produit alimentaire, en évitant toutes les sources de gaspillage »**. ***Important, le caractère biosourcé reste secondaire devant cette exigence.***

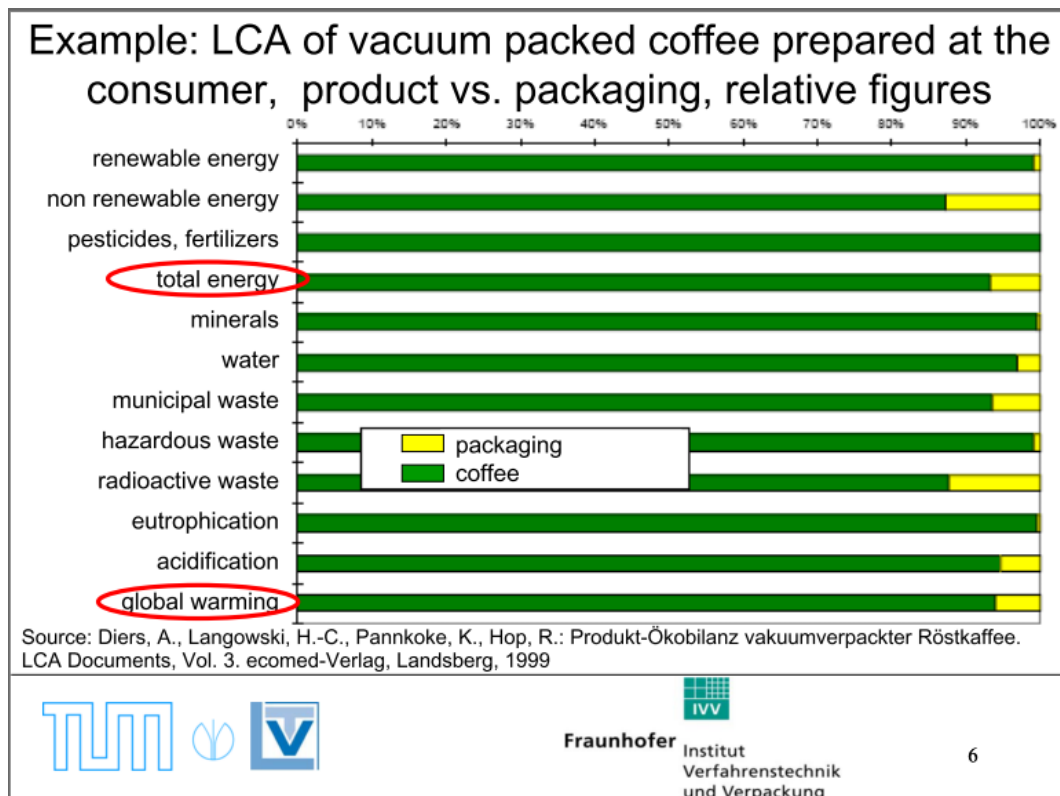


Figure 2 : Impacts environnementaux des emballages

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Les deux exemples du PBS et du PEF offrirait au marché des matériaux plus barrières à l'oxygène que des références existantes :

- Le PBS, d'aspect et de comportement mécanique proche du polypropylène, présente des propriétés barrières à l'oxygène au moins 50 fois plus élevées
- Le PEF, de comportement mécanique proche du PET, présente des propriétés barrières à l'oxygène 6 fois plus élevées

De par les niveaux de perméabilité, le PBS pourrait avoir un intérêt pour l'augmentation de DLC des produits à DLC longue.

Le PEF pourrait avoir un intérêt pour l'emballage des produits à DLC longue conditionnés en MAP, ainsi que pour l'emballage des produits à DLUO moyenne et longue.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le marché des polymères d'emballages pour les produits alimentaires est représenté par quelques références : le PP, le HDPE, le LLDPE, le LDPE, le PET, le PS, et en moindre quantités le PA6, l'EVOH, et des polymères scellant de spécialité.

L'introduction sur le marché d'une nouvelle référence est une situation exceptionnelle, pour certains hautement improbable, pour d'autres un bouleversement du marché à anticiper voire à accompagner. Le PEF et le PBS présentent de très sérieux atouts sur ce terrain.

Pour les consommateurs, ces polymères se présenteront comme d'autres références, mais avec des durées de vie de produit permettant une gestion des flux minimisant le gaspillage alimentaire ; pour les professionnels ces nouveaux matériaux apporteront de nouveaux avantages en termes de facilité de transformation ou de qualité des produits.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

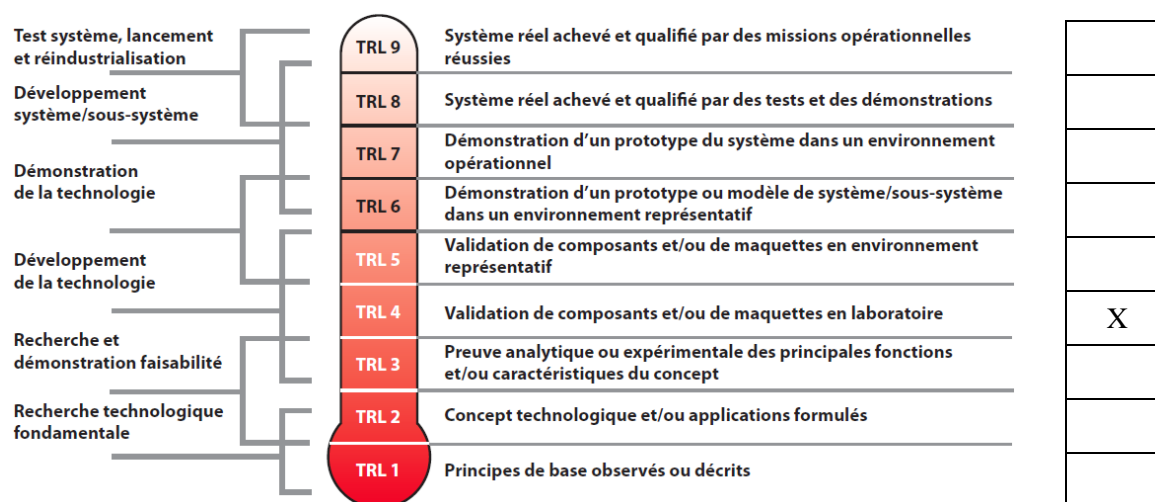
La technologie est encadrée par le Règlement (UE) n ° 10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires.

Les produits de base des nouveaux matériaux doivent être évalués d'un point de vue toxicologique par un dossier EFSA :

- Focus sur les impuretés pour des molécules répertoriées, mais issues d'un (bio) procédé original.
- Etude toxicologique de la nouvelle substance si la molécule n'est pas sur liste positive (c'est le cas du furane dicarboxylic acid), le monomère de base du PEF.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Le PBS et le PEF ne sont produits à ce jour qu'à échelle laboratoire. Les monomères sont quant à eux en cours de validation au stade de productions pilotes.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Parmi les points de blocages techniques identifiés :

- L'industrie polymère en place soutient les filières existantes, même si aujourd'hui les points de vue ont évolué et que les agroressources sont considérées comme une source nouvelle

d'innovation. Toutefois les stratégies de substitution telles que PET/PEF ne sont pas souhaitées.

- Seules les grandes échelles de production sont viables ; une unité de production de polymère de 10000 tonnes/an est considérée comme la valeur charnière pour le seuil de rentabilité. Une unité de 100000 tonnes par an serait la cible pour déclencher un réel intérêt sur le marché de l'emballage, et crédibiliser l'émergence d'une nouvelle filière. Ces chiffres ont fait reculer les investisseurs, du moins en Europe.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

A l'horizon 2025, les technologies vertes devraient voir 3 grandes évolutions

- a) La production de sources de glucose à partir de cellulose alimentera dans un premier temps les unités de production d'éthanol de seconde génération ; dans un second temps tout à fait compatible avec l'horizon 2025 les procédés mis au point pour l'éthanol seront déclinés pour les autres grands procédés fermentaires. En ce qui concerne les exemples donnés dans cette fiche technologique, le PBS devrait bénéficier à l'horizon 2025 d'une production d'acide succinique issue des sources (non alimentaires) lignocellulosique.
- b) Les technologies simples ne reposant pas sur des procédés fermentaires devraient se développer fortement. A ce jour les pays asiatiques, qui ont toujours été utilisateurs du génie fermentaire (contrairement aux pays développés qui avaient abandonné à la fin du 20^e siècle les biotechnologies au profit de la chimie), bénéficient d'une forte avance dans le domaine des technologies vertes. Mais des voies alternatives, plus économes en énergie se développent aux états unis et en Europe. Pour exemples, (i) les composés furaniques à la base desquels sera synthétisé le PEF sont issus d'un traitement thermique de polysaccharides en présence de catalyseur ; (ii) Roquette a mis au point un procédé simple de déshydratation du sorbitol en intermédiaire chimique difonctionnel (l'isosorbide) de grand intérêt dans différents secteurs de la chimie.
- c) Enfin les biotechnologies classiques devraient largement étendre leurs champs d'application, de par une palette de plus en plus large de production de building blocks (souches originales, mais également ressources originales / cf. plateforme « pivert » valorisation des huiles végétales via procédés fermentaire).

Ces évolutions sont susceptibles d'asseoir le développement attendu du PBS et du PEF ; elles pourraient évidemment apporter d'autres opportunités pour le développement de polymères originaux.

2.5 Principaux acteurs

Académiques : peu de recherche en synthèse de (bio)polymères originaux ; les activités de recherche se situent dans le domaine des building blocks, ou totalement en aval dans le domaine de la formulation des nouveaux matériaux ; les quelques acteurs « synthèse » doivent être stimulés (un peu d'activité à Paris VI et à Université lyon1).

Les principaux acteurs industriels sont :

- ARD - bioamber (acide succinique, PBS, chimie des composés furaniques) – futuro (éthanol seconde génération)
- Roquette – (isosorbide et acide succinique)
- La plateforme PIVERT (valorisation des huiles)

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

« + »

Les activités « amont » de la filière sont assez concentrées dans le nord-est (zone pôle IAR) et bien animées et structurées dans le cadre du pôle de compétitivité.

« - »

En revanche le maillage aval avec l'industrie de la chimie semble balbutiant. Pour exemple le pôle Axelera (chimie) semble avoir ses propres orientations, guidées par ses grands adhérents en dehors de la logique nationale.

« - »

Les grands acteurs de la chimie verte ont été très accompagnés par les fonds publics. Il ne semble pas qu'en retour aient été formulées des priorités qui permettraient à un réseau national de se constituer autour d'un projet clair (cf. la chimie des furaniques est-elle une opportunité ?).

« - »

Un certain retard de la France vis-à-vis des problématiques de recyclage est constaté, en comparaison avec l'Allemagne par exemple qui consigne les bouteilles en verre et en PET. Ce retard pourrait être dû à des questions de « mentalité » française, et à un manque de communication des acteurs publics sur ces problématiques.

3- Impact environnemental

Les impacts environnementaux des polymères biosourcés ont forcément pour vocation à être plus faibles que ceux de leurs homologues issus de ressources fossiles.

Mais (i) les procédés d'obtention d'un polymère peuvent totalement déprécier une plus-value environnementale uniquement associée à la ressource de départ (ii) comme souligné précédemment un matériau d'emballage présente avant tout un impact environnemental favorable de par sa faculté à minimiser le gaspillage du produit qu'il contient ; dans ce sens le PBS et le PEF ont été mis en avant dans cette fiche technologique car ils présentent des propriétés d'intérêt pour la conservation des produits alimentaires (iii) enfin les filières de recyclage et valorisations en fin de vie sont totalement à construire pour ces nouveaux matériaux.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie des emballages biosourcés a obtenu une note de 1.5 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	1.5

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

•**Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

•**Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

•**Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Il est difficile de déterminer dans quel cas l'ajout d'un emballage peut être perçu comme un avantage. Cependant, si ces emballages sont présentés comme étant naturels, simples, qu'ils ne portent pas atteinte à l'environnement (ne nécessitent pas de couper des forêts ou de gaspiller d'importants volumes d'eau pour faire pousser des cultures) alors le consommateur devrait être favorable. La mention « biodégradable » est un motif d'achat pour certaines personnes.

5- Dimension économique

Le marché dépendra majoritairement du coût du pétrole et des matières premières. A priori, sur le moyen terme les produits biosourcés resteront sur des marchés de niche. A long terme (15 ou 40 ans), il est possible que ces emballages soient produits à grande échelle.

Le PEF contrairement au PET dispose de meilleures propriétés barrières qui permettent de réduire la quantité de matière utilisée et donc de diminuer les coûts de transport et améliorer l'impact environnemental de l'emballage. De plus, un pilote existe actuellement aux Pays-Bas (société Aventium). Une production industrielle de PEF 100% biosourcé est attendue d'ici 2017-2020. Le timing est à peu près le même pour le PET 100% biosourcé.

L'une des difficultés relative à la mise sur le marché de ce nouveau matériau est lié à la fin de vie du produit. En effet, le PEF et PET 100% biosourcés devraient être disponibles au même moment, mais les filières de recyclage du PET sont opérationnelles et optimisées alors que ces filières restent à mettre en place pour le PEF. Ce point devrait faire que le PEF ne remplacera pas totalement le PET. Les voies du recyclage du PEF seront les mêmes que celles du PET (bouteille et textile).

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des emballages biosourcés :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Environnement - Bonne perception consommateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Retard de la France sur la recyclabilité - Prix
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du prix du pétrole - Emballages comestibles - Ecotaxe - Développement technologique 	

Les emballages biosourcés permettent la réduction de l'impact environnement par l'utilisation des coproduits des agro ressources pour la réalisation de matériaux d'origine renouvelable. Le PBS et le PEF, encore à l'échelle de laboratoire, sont les matériaux biosourcés prometteurs. En effet, ils présentent des propriétés barrières plus intéressantes que l'existant qui devrait faciliter l'augmentation de la DLC des produits emballés. Un plus faible impact environnemental peut répondre à la demande du consommateur qui sera prêt à payer un peu plus cher. Il existe cependant un retard en France sur le développement des filières de valorisation des déchets.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

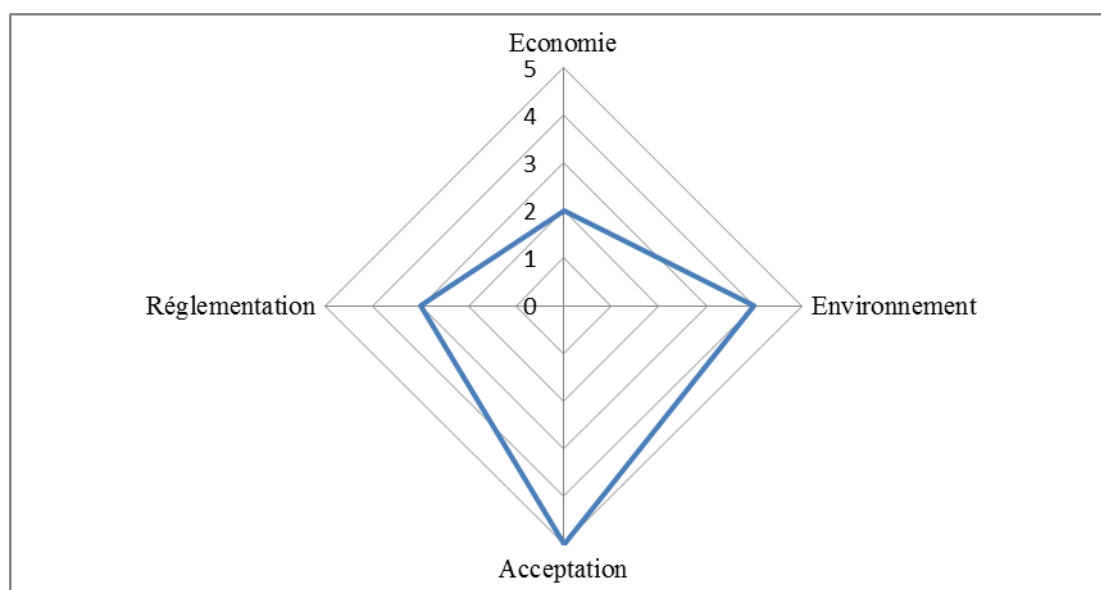


Figure 3 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

HAUTES PRESSIONS

Données clés

Résumé

Les hautes pressions permettent de décontaminer à température ambiante ou réfrigérée des aliments pré-emballés grâce à l'application d'une très forte pression hydrostatique. Par son action décontaminante, le procédé permet d'allonger significativement la DLC des produits réfrigérés préemballés, à valeur organoleptique égale y compris certains aliments pour lesquels aucun traitement thermique n'est techniquement possible : aliment crus et/ou fragiles, produits tranchés et reconditionnés (charcuteries, fromages). La technologie déjà utilisée industriellement en IAA pour des produits premium frais. Son développement est freiné par un ratio coût d'investissement/rendement élevé.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Les aliments liquides ou solides, préemballés dans un emballage souple étanche, sont soumis dans une solide enceinte d'acier fermée et remplie d'un fluide (de l'eau), à une très forte pression hydrostatique, obtenue à l'aide de pompes spéciales. Cf. figure ci-dessous :

La pression appliquée est isostatique : elle est identique instantanément dans toutes les directions de l'espace, en tous points de l'enceinte et donc du produit. L'intensité des pressions utilisées varie en application industrielle de 1000 à 7000 bars (soit 200 à 700 Mpa), durant quelques minutes à dizaines de minutes.

La pressurisation s'accompagne d'un échauffement modeste du produit (quelques °C), réversible lors de la dépressurisation.

La température de l'enceinte et du fluide peuvent être contrôlées mais les applications les plus usuelles sont réalisées à température ambiante (procédé moins coûteux).

Le procédé est discontinu : chargement / traitement / déchargement de l'enceinte

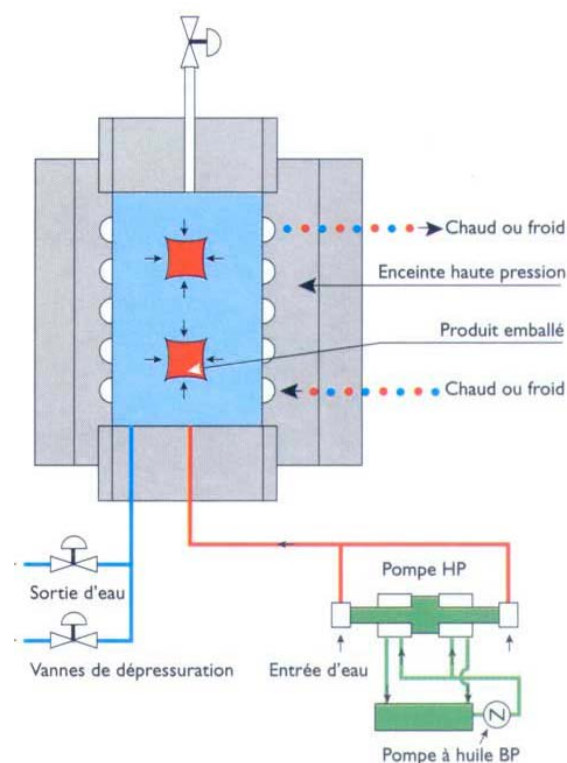


Figure 1 : Mécanisme des hautes pressions

Actions des hautes pressions sur les micro-organismes :

La plupart des formes végétatives de microorganismes sont sensibles aux très hautes pressions : procédé équivalent à une pasteurisation (destruction de plusieurs log UFC/g, variable suivant les espèces).

N.B. : en revanche, les activités enzymatiques ne sont pas systématiquement inhibées irréversiblement par les HP appliquées à froid.

Les spores bactériennes sont beaucoup plus résistantes et leur destruction nécessite de combiner le traitement HP avec un traitement thermique moyen à fort.

Action des hautes pressions sur les matrices alimentaires :

Globalement assez faible. Les petites molécules ne sont pas affectées (vitamines, arômes, lipides, sucres, etc.). Le procédé est ainsi respectueux de la valeur nutritionnelle et organoleptique des aliments.

Action modérée sur les macromolécules : dénaturation protéique partielle s'apparentant à un faible effet de cuisson.

Applications et aliments concernés :

D'une manière générale, les hautes pressions permettent de décontaminer à température ambiante ou réfrigérée, presque tous types d'aliments préemballés.

- Le cahier des charges « produit » est simple : aliment dégazé, préemballé en emballage étanche, conditionnement au moins partiellement souple, peu ou pas d'espace de tête.
La taille et la forme du produit ont peu d'influence.
- Les applications identifiées, potentielles et/ou déjà industrialisées sont nombreuses, essentiellement pour les produits frais, crus ou cuits, réfrigérés.
 - produits végétaux denses, crus ou cuits, pâteux ou liquides (Guacamole, jus de fruits et légumes, smoothies, préparation de fruits crus ou cuits, confitures, légumes cuisinés, etc.) ;
 - produits carnés simples : viandes fraîches et transformées, charcuteries crues ou cuites, notamment charcuteries tranchées (*application phare*) ;
 - produits complexes : plats cuisinés et plats préparés frais réfrigérés ;
 - sauces, condiments et assimilés (*produits classiquement acidifiés, à DLC longue, usuellement utilisés par les consommateurs sur des durées longues, propices au gaspillage*) ;
 - produits laitiers : desserts lactés, fromages, boissons lactées ;
 - produits de la mer : poissons crus (N.B. : *application plus délicate techniquement*), produits élaborés à base de poisson et fruits de mer, etc.
- Le procédé ne s'applique pas ou très mal aux fruits et légumes crus frais, entier ou découpés – *par exemple : des fraises fraîches* - (trop riches en vacuoles gazeuses, totalement compressibles) car leur structure et texture sont fortement endommagées par le traitement.
- Le procédé ne s'applique pas aux aliments en poudres, ou déshydratés

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Par son action décontaminante, **le procédé HP permet d'allonger significativement la DLC des produits réfrigérés préemballés**, à valeur organoleptique égale y compris certains aliments pour lesquels aucun traitement thermique n'est techniquement possible : aliment crus et/ou fragiles, produits tranchés et reconditionnés (charcuteries, fromages). *Ces produits représentent la majorité des applications économiquement intéressantes.*

Une DLC allongée avant ouverture et une meilleure qualité microbiologique à l'ouverture autorisent une meilleure gestion des flux et des stocks, et limitent ainsi les gaspillages au niveau de la distribution et du consommateur.

La HP permet une multiplication par 3 de la DLC du jambon cuit par rapport à un produit classique, et une moindre contamination en bactéries lactiques après tranchage/reconditionnement. Pour les boissons, la durée de conservation est multipliée de 3 à 10 en comparaison avec le même produit stocké à la même température mais sans les hautes pressions. Dans le cas de la viande, la durée de vie est multipliée par 2 ou 3. En plus d'une durée de vie allongée d'un point de vue microbien, la qualité organoleptique est maintenue beaucoup plus longtemps grâce à la forte réduction des microorganismes d'altération (bactéries lactiques) évitant ainsi l'apparition de goût acide avant la fin de la durée de conservation.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le procédé Hautes Pressions est classé parmi les procédés innovants, du fait de son développement industriel encore assez confidentiel et de son lent démarrage à partir de la fin des années 90 seulement, en UE.

La possibilité de décontaminer des aliments par un procédé purement physique, mais non thermique, est une technologie de rupture.

Ce procédé vient donc en alternative ou en complément à d'autres technologies plus impactantes pour le produit (pasteurisation thermique classique) ou également efficaces mais moins bien acceptées par les consommateurs (ionisation, utilisation d'additifs, etc..).

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs sont :

- des possibilités fortes d'innovation en termes de nouveaux produits (moins cuits, plus « frais », de qualité organoleptique et nutritionnelle préservée), etc...
- une garantie sanitaire améliorée : destruction efficace des flores pathogènes et d'altération
- Des DLC allongées pour ces produits réfrigérés

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Le risque sanitaire lié au procédé HP est surtout dû :

- à la très grande variabilité de résistance aux Hautes Pressions, pour les différentes espèces et même souches de microorganismes. A cela s'ajoute les interactions complexes contaminations / matrices ;
- à la possible identification et émergence de souches bactériennes potentiellement résistantes au traitement HP.
- au manque de moyens de mesure et contrôle : Il n'existe pas encore d'échelle d'intensité / efficacité pour ce traitement (l'équivalent d'une Valeur Pasteurisatrice classique par exemple) pour standardiser les procédés ; il est extrêmement difficile d'instrumenter les enceintes de traitement HP en capteurs (en raison de la pression extrême qui est utilisée)

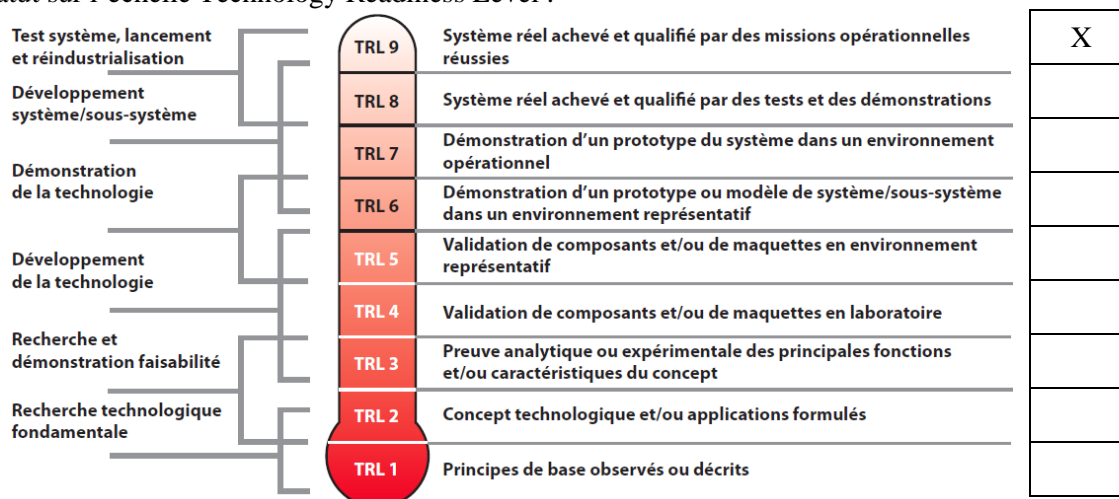
Pour ces raisons, une étude systématique de l'efficacité décontaminante du traitement doit être validée produit par produit avec les principaux germes d'intérêt, même si une abondante bibliographie scientifique est déjà disponible étant donné que le sujet est très étudié dans le monde. Egalement, l'impact des HP sur les caractéristiques biochimiques des aliments et des emballages mérite d'être mieux documenté, même si les chercheurs s'accordent sur le fait que les énergies – faibles - mises en jeu, excluent la formation de substances néoformées.

Le contexte réglementaire est plus contraignant : Ce procédé relève de la réglementation (CE) n° 258/97 du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 1997 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires (aliments obtenus avec des procédés nouveaux, non courants avant 1997)¹³ et les couples produits/procédé sont donc théoriquement soumis à expertise scientifique / sanitaire préalable.

En France, l'ANSES¹⁴ doit évaluer la technologie pour certaines conditions temps / pressions précises. Plusieurs agences sanitaires nationales, dont l'ANSES, ont toutefois rendu des avis favorables concluant à l'innocuité et à l'efficacité des traitements HP à froid, sur les aliments et leurs emballages : la plupart des applications industrielles sont maintenant possibles sans expertise préalable dans plusieurs pays de l'UE. Mais étonnamment, cette appréciation varie fortement entre les pays de l'UE...

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie Hautes Pressions est déjà au stade d'innovation en phase d'industrialisation.

En parallèle, une recherche académique intense se poursuit (avec plusieurs équipes françaises en pointe sur ces thématiques) et l'accompagnement des industriels par les Centres Techniques pour développer les produits, valider les process... Et rédiger les lourds dossiers technico-réglementaires souvent indispensables.

¹³ http://europa.eu/legislation_summaries/consumers/consumer_safety/l21119_fr.htm

¹⁴ <http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/MCDA2010sa0193.pdf>



Figure 2 : Equipement industriel (NC Hiperbaric – Espagne)
<http://www.hiperbaric.com/en>



Figure 3 : Exemple de produits carnés traités HP (lamelles viandes cuisinées – USA)

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Parmi les points de blocages techniques identifiés :

- Mise au point et validation microbiologique des process de décontamination, validation des DCL, challenges tests : parfois long et complexes. Le choix des souches microbiennes d'inoculum est mal documenté dans la bibliographie.
- Le comportement de certaines flores est mal connu. La résistance à la pression ne se compare pas simplement avec la résistance thermique ou chimique des flores
- Une forte résistance indésirable des enzymes, aux traitements HP, est souvent observée. Ce facteur est souvent limitant des DLC pour les produits végétaux, plus encore que la qualité microbiologique
- Peu d'information de la part des fabricant d'emballages, sur le comportement technique et sanitaire de leurs matériaux (alimentarité, fonctionnalité, etc...)
- Des effets de « cuisson » indésirables (modification de couleur et de texture sur viandes et poisson crus notamment) limitent certaines applications. Des recherches sont requises pour contourner ces difficultés
- Il est très difficile de surveiller à l'aide de sondes et de capteurs, les enceintes et encore plus les produits préemballés qui y sont placés, afin de valider la bonne application des traitements (homogénéité du traitement, températures réelles atteinte à cœur, etc..)

Les quelques freins techniques encore identifiés ne sont pas insurmontables.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Les recherches à venir pour les 10 prochaines années pour diversifier les applications porteront principalement sur :

- Les applications à température moyenne : pasteurisation thermique assistée par hautes pressions, dans une fourchette de température réduite (entre 50 et 70°C). Pour des produits nécessitant une cuisson modérée mais tout de même très fragiles thermiquement. L'utilisation combinée des HP autorise une réduction significative des températures appliquées (d'au moins 15°C), tout en augmentant l'efficacité décontaminante, et donc la DLC. Ce procédé est en cours de développement mais sa rentabilité économique n'est pas démontrée : *indice TRL estimé à 5-6.*
- Les applications à température de stérilisation : Appertisation assistée par Hautes pressions, dans une fourchette de température de 105 à 125° C. Le « pressure shift » de température, obtenu à la compression, permet d'atteindre quasi instantanément en tout point du produit la

température requise pour détruire les spores thermorésistantes. Le traitement combiné HP/HT reste théoriquement court, et est moins impactant en termes de cuisson. Application : conserves de produits alimentaires, stables à température ambiante pour DLUO 12 mois environ, avec qualités nutritionnelles et organoleptiques améliorées. *Ce procédé est très innovant mais pas encore au point, les aspects microbiologiques ne sont pas encore maîtrisés. L'indice TRL est estimé à 3-4. La mise au point des équipements est aussi plus complexe.*

- Des applications à très basse température (produits congelés) pour : la conservation à basse température sans congélation ; la décongélation rapide ; la décontamination microbiologique à l'état congelé sans dénaturation. *Très délicat techniquement à mettre au point, indice TRL estimé : 2 - 3. L'intérêt économique de ces applications est très discutable. Il existe peu de travaux et d'équipes qui s'y intéressent pour des applications alimentaires.*

2.5 Principaux acteurs

Equipementiers proposant des lignes industrielles en UE :

Nicolas Correa Hiperbaric : Espagne ; Depuis 1999 ; Enceintes horizontales

↳ Contacts : <http://www.hiperbaric.com/en>

Avure : États-Unis ; Depuis les années 50 ; Enceintes verticales et horizontales

↳ Contacts : <http://www.avure.com/>

Multivac : Allemagne ; Depuis 2012 ; Enceintes horizontales

(en association avec Uhde High Pressure Technologies, –ThyssenKrupp AG :

↳ Contacts : <http://www.multivac.fr/produits/hpp.html>

Equipes étrangères les plus significatives

- Université de Berlin (équipe du Pr D. Knorr) - Allemagne
- Université de Wageningen (équipe du Pr A. Matser) - Pays Bas
- AZTI-Tecnalia (Maria Lavilla) - Espagne

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La France est un des berceaux historiques des recherches sur l'application des Hautes Pressions à la stabilisation des aliments. Plusieurs équipes universitaires et Centres Techniques sont actifs et connus comme spécialistes du procédé, notamment :

- ONIRIS, Nantes – Laboratoire GPEA (A. Le Bail ; M. De Lamballerie)
- USTL Montpellier II / Polytec Montpellier / Supagro : UMR IATE (Hugo De Vries ; Eliane Dumay)
- Université de Bordeaux (Pr Demazeau)
- Université de Bourgogne - ENSBANA Dijon (Jean-Marie PERRIER-CORNET, Marwen MOUSSA, Patrick GERVAIS)
- Centres Techniques actif dans le développement des HP et disposant d'équipement pilotes

Entre 1990 et 2000, un équipementier Français a été pionnier et leader en UE : la société ACB, à Nantes (groupe GEC Alstom). Un prix de l'innovation avait été décerné à cette entreprise par le salon IPA. Un environnement réglementaire trop contraignant (par ailleurs mis en application de façon assez stricte par les autorités de tutelle, comparé à d'autres pays de l'UE) n'a pas permis le développement industriel du procédé en France au début des années 90 comme espéré, et ACB a finalement abandonné ses productions d'enceintes HP.

3- Impact environnemental

Les Hautes Pressions sont une technologie à fonctionnement essentiellement électrique (pompes intensificatrices de la pression). Le procédé consomme peu d'énergie/kg produit, pas de vapeur, peu de fluides en général, et ne génère quasiment aucun effluent.

L'empreinte CO₂ / kg produit reste extrêmement modeste, *pour la partie fonctionnement*.

En revanche, si on intègre dans le calcul la masse considérable d'acier forgé représentée par l'enceinte HP, le bilan carbone n'est favorable que pour une utilisation intensive et une durée de vie longue, garantie pour le matériel. Les enceintes HP sont généralement « garanties » pour un nombre de cycles prédéfini (plusieurs milliers de cycles).

La géométrie des enceintes actuelles favorise surtout le traitement de conditionnements unitaires petits à moyens (« portions »). Le ratio emballage / masse produit n'est donc pas systématiquement favorable, mais en revanche les matériaux utilisés sont minces et légers, souvent monomatériaux car ils n'ont pas à supporter de traitement thermique et favorise donc le recyclage.

De plus, l'eau utilisée dans le process d'HIPERBARIC est recyclée. Les seules ressources utilisées sont donc l'acier et l'électricité pour les pompes.

En conclusion l'impact environnemental n'est pas très fort et suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie des Hautes pressions a obtenu une note de 1.5 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	1.5

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Dans l'ensemble, les consommateurs sont favorables à cette technologie qui ne semble pas anxiogène. Il existe un nombre considérable d'ouvrages traitant de la réponse des consommateurs aux hautes pressions. Il est important de noter que les connaissances et la conscience des consommateurs à l'égard de cette technologie sont relativement pauvres (Hicks et al., 2009).

D'après les consommateurs, le principal avantage de cette technologie est la substitution des conservateurs chimiques (cf. Slovic, 1987). Il y a toutefois des doutes quant aux possibles effets négatifs qu'aurait la technologie sur les qualités nutritionnelles et organoleptiques des aliments. Cependant, il a été prouvé que les produits traités sous pression conservent les mêmes propriétés gustatives que les produits frais, ce qui rassure les consommateurs (Deliza et al., 2005). Les consommateurs australiens ont eu une perception positive des hautes pressions, comparée à d'autres technologies, car ils estiment qu'elle « interfère moins avec la nature » que d'autres technologies (Mireaux et al., 2007).

La croissance de la demande pour des produits de qualité supérieure en général, et pour des produits sains et traités au minimum en particulier, est apparue comme moteur pour le développement de la technologie (Abadio Finco et al., 2010, Ade-Omowaye et al., 2001, Deliza et al., 2005, Gao et al., 2011, Hicks et al., 2009).

Dans l'étude de Sorenson et Henchion, 2011, les consommateurs ont attribué une durée de vie allongée aux produits préparés congelés sous hautes pressions, ce qui a été associé à « faire les courses moins souvent », ce qui en retour a été associé à un gain de temps et à la commodité. La durée de vie allongée a aussi été associée à une diminution des déchets issus du gaspillage et, en définitive, moins de gaspillage, à un gain d'argent. Cependant, les installations à hautes pressions sont considérées comme « high-tech » par les consommateurs et probablement trop chères pour être utilisées de manière réaliste.

5- Dimension économique

Marché actuel

Les premiers produits « hautes pressions » ont vu le jour dans les années 90. Entre 1990 et 2000 peu de choses se sont passées mais par contre depuis 2000, la croissance est positive. Depuis 15 ans les hautes pressions sont donc utilisées en production en Europe.

La France était très en avance dans les années 90 mais la réglementation Novel Food a tout ralenti. Cependant, à l'heure actuelle la France est le pays le plus dynamique alors qu'aucun producteur n'est présent en France.

150 entreprises dans le monde sont actuellement équipées avec des équipements hautes pressions et 35 nouvelles machines ont été installées en 2013.

HIPERBARIC et AVURE représentent 95% du marché.

Le marché est à 50% aux Etats-Unis. 30 machines sont localisées en Europe sur les 120 utilisées en production et fournies par HIPERBARIC : 4 en France, 3 au UK, 2 en Hollande, 2 en Grèce, 3 en Allemagne, 1 en Suisse, 1 en CZ, et 5 machines dans centres techniques.

En France 2 des 4 machines sont dans des grands groupes, 2 dans des PME.

Une 5ème machine sera installée en 2014 dans un grand groupe.

4 à 10 machines de 55L devraient être vendues en 2014 par HIPERBARIC.

Le marché est en croissance pour les jus aux US.

Exemple d' « evolution fresh » : Starbucks souhaitait approvisionner l'ensemble de ses boutiques avec leurs jus car jugés les meilleurs des US (et bénéficiant de la technologie de HP). Seulement la société ne pouvait pas investir dans le nombre de machines nécessaire (rendement faible donc besoin de nombreuses machines). Starbucks a alors racheté la société Evolution fresh.

Perspectives

Petit à petit la gamme de produits va s'élargir aux jus et desserts sucrés. Il y a également peut-être de l'avenir sur le segment du lait avec l'augmentation des consommateurs de lait cru aux US.

Par ailleurs, un développement des machines pour traitement à façon /plateforme est à prévoir.

Finalement, le marché devrait se développer à l'export car les HP permettent d'augmenter la durée de vie ainsi que la qualité sanitaire.

Une évolution réglementaire très attendue sera la levée définitive par l'EFSA, de cette contrainte, qui de plus génère de forte distorsion de concurrence au sein des pays de l'UE et aussi hors UE. Une reconnaissance du procédé HP, ou au moins pour ses applications à froid, comme un « procédé usuel – hors Novel Food » donnerait un véritable essor à cette technologie pour laquelle l'UE est un peu en retard sur le monde, même si des équipementiers de premier plan y sont déjà présents (la Société Hiperbaric, Espagne, est leader mondial en applications alimentaires).

Rentabilité économique

Quelques éléments génériques de coûts (investissement, fonctionnement) et de rentabilité économique du procédé peuvent être obtenus auprès des équipementiers.

Le procédé batch impose des cadences modestes et le taux de remplissage est parfois difficile à optimiser. Les investissements sont lourds mais la consommation énergétique reste faible.

Les cycles de process doivent généralement ne pas dépasser 10 minutes pour assurer une rentabilité.

Exemple de coûts de production (avec l'amortissement) - Source Hiperbaric

Equipement	Débit	Prix équipement	Coût de traitement
Hiperbaric 55 (plus petite machine)	55L/h	0.5 millions €	Env. 30 cents/kg
Hiperbaric 525 (plus grande machine)	525/h	2.5 millions €	Env. 7-8 cents/kg

Le coût de l'investissement est très élevé par rapport au rendement.

Le coût de traitement se décompose en 1/2 amortissement, 1/4 pièces- maintenance, 1/4 travail.

Le seuil de rentabilité de la technologie HP est souvent décrit en termes de frontière entre « produits possibles / rentables » et « produits à faible valeur ajoutée, ne pouvant pas encore bénéficier de cette technologie ». Ce point de basculement est fréquemment exprimé avec comme échelle, la valeur marchande : prix de vente consommateur.

Par exemple : en 2013, un jus de fruit frais présentant une valeur de vente consommateur d'au moins 2,5 à 3 euros / litre environ, peut être rentablement traité par HP. En dessous de ce seuil, le prix du traitement devient excessif par rapport au prix de vente final.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie des hautes pressions :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire - Qualité organoleptique - Augmentation de la DLC 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts d'investissement - Faible rendement
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Diversification des applications - Amélioration de la productivité - Réglementation de plus en plus stricte 	<ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement - L'émergence de technologie quasi équivalente mais beaucoup moins chère

La Haute Pression est une technologie mature déjà commercialisée dans des domaines divers. Elle présente un réel avantage en termes de qualité sanitaire, organoleptique et allongement de la DLC. Cependant, le coût /kg de produit reste élevé pour un procédé en IAA. Les produits doivent présenter une valeur intrinsèque suffisante et le procédé doit leur conférer une valeur ajoutée significative pour rentabiliser ce choix. Le développement industriel régulier de cette technologie devrait se poursuivre, sur des produits / marché plutôt haute de gamme et marchés de niche. Si un effet de volume (en nombre de machine vendues / diversification des équipementiers) permet de faire baisser le coût/kg, des produits à moindre valeur ajoutées pourront être rentablement produits en complément des applications déjà existantes. Le statut « Novel Food » du procédé a longtemps effrayé et découragé les industriels. Cette situation a un peu évolué mais pas encore suffisamment en France. Un assouplissement de la réglementation donnerait de réelles opportunités pour les industries françaises, compte tenu du savoir-faire national.

Le développement actuel et futur de la HP repose essentiellement sur sa compétitivité économique, et sa facilité d'implantation (y compris réglementaire), et le rapport bénéfice/coût associé, principalement impacté par le coût élevé des investissements machine.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

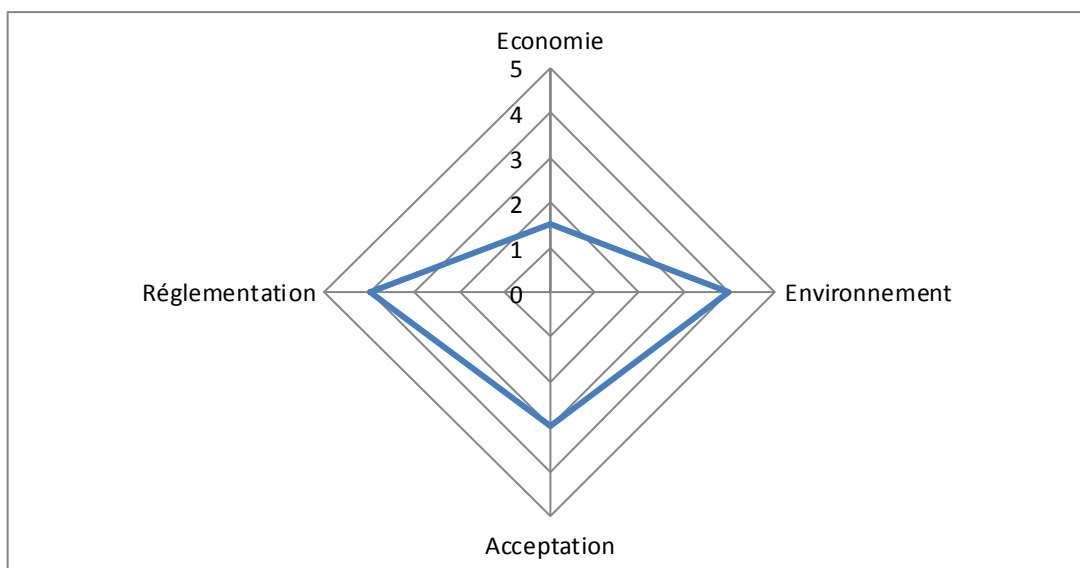


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Consommateurs :

ABADIO FINCO, F. D. B., DELIZA, R., ROSENTHAL, A. & SILVA, C. H. O. 2010. The effect of extrinsic product attributes of pineapple juice on consumer intention to purchase. *Journal of International Food and Agribusiness Marketing*, 22, 125-142.

ADE-OMOWAYE, B. I. O., ANGERSBACH, A., TAIWO, K. A. & KNORR, D. 2001. Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods. *Trends in Food Science and Technology*, 12, 285-295.

DELIZA, R., ROSENTHAL, A., ABADIO, F. B. D., SILVA, C. H. O. & CASTILLO, C. 2005. Application of high pressure technology in the fruit juice processing: Benefits perceived by consumers. *Journal of Food Engineering*, 67, 241-246.

GAO, Y., QIU, W., WU, D. & FU, Q. 2011. Assessment of clostridium perfringens spore response to high hydrostatic pressure and heat with nisin. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 164, 1083-1095.

HICKS, D. T., PIVARNIK, L. F., MCDERMOTT, R., RICHARD, N., HOOVER, D. G. & KNIEL, K. E. 2009. Consumer awareness and willingness to pay for high-pressure processing of ready-to-eat food. *Journal of Food Science Education*, 8, 32-38.

MIREAUX, M., COX, D. N., COTTON, A. & EVANS, G. 2007. An adaptation of repertory grid methodology to evaluate Australian consumers' perceptions of food products produced by novel technologies. *Food Quality and Preference*, 18, 834-848.

SLOVIC, P. 1987. Perception of risk. *Science*, 236, 280-285.

SORENSEN, D. & HENCHION, M. 2011. Understanding consumers' cognitive structures with regard to high pressure processing: A means-end chain application to the chilled ready meals category. *Food Quality And Preference*, 22, 271-280.

CHAUFFAGE MICROONDES

Données clés

Résumé

La technologie microonde permet d'obtenir, par génération interne de chaleur, un chauffage assez rapide du contenu de produits préemballés. Le chauffage par microonde s'applique principalement aux aliments humides préemballés en emballage non métallique. Par son action décontaminante par pasteurisation thermique, le chauffage microonde permet d'obtenir les DLC recherchées pour des produits préemballés cuits, pasteurisés puis réfrigérés, en particulier les plats cuisinés fragiles, les produits de la mer, etc. Le traitement s'accompagne d'une amélioration sensible du rendement matière et des qualités sensorielles. Elle reste chère à mettre en place et les industriels manquent encore de recul et de résultats pour l'adopter.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie microondes

Le chauffage par microonde s'applique en conditions industrielles principalement aux aliments humides (solides et/ou liquides) préemballés en emballage non métallique : sachet plastiques, barquettes operculées, etc.

L'énergie électrique est convertie en microonde par un magnétron, puis les microondes sont acheminées par des guides d'onde dans une cavité de géométrie calibrée où sont placés les produits. L'industrie alimentaire utilise les deux fréquences disponibles : 915 MHz, ou 2450 MHz. Le traitement peut être fait sur produits statiques, mais plus généralement en tunnel d'application, les produits circulant en continu sur un tapis, avec applicateurs microondes dessus et dessous : voir photo. La technologie microonde permet d'obtenir, par génération interne de chaleur, un chauffage assez rapide du contenu, en convertissant l'énergie des microondes pénétrant l'aliment humide, directement en chaleur.



Figure 1 : Tunnel microonde pilote (SAIREM) Application à la pasteurisation de plats cuisinés préemballés en barquettes avec opercule à valve.

Le traitement thermique délivre une puissance importante, et ciblée car ne chauffant directement que le contenu humide de l'emballage. Il est ainsi possible d'obtenir un chauffage assez rapide et d'appliquer une pasteurisation thermique intense en un temps court.

Cette technologie tunnel à pression atmosphérique doit être impérativement couplée avec des emballages aux caractéristiques bien adaptées : En l'absence de contre pression dans le tunnel, le chauffage du contenu génère de la vapeur qui fait gonfler l'emballage. La présence d'une valve permet de laisser échapper partiellement cette vapeur. Au cours du refroidissement pratiqué ensuite, le produit se met sous léger vide.

Les contraintes techniques à maîtriser sont la géométrie des emballages et la répartition des ondes dans la cavité de traitement, la puissance délivrée et les cycles de « pulses » microondes. **L'objectif, et la difficulté technique du procédé, sont d'obtenir le chauffage le plus homogène possible en tout point du produit :**

- sans zones excessivement chaudes qui génèrent surcuisson locale, ébullition du contenu avec risque d'endommager l'emballage, etc.. (car rien ne vient limiter la température en cas de point chaud),
- sans zones insuffisamment traitées : points froids où la pasteurisation souhaitée n'est pas obtenue

Avantages des microondes par rapport aux technologies traditionnelles de traitement (autoclaves, fours, tunnels d'eau surchauffée en spray, etc..) pour la pasteurisation thermique de produits préemballés en emballages plastiques :

- Un temps de traitement beaucoup plus court (surtout avec la technologie à 2 450 MHz) ;
- La pasteurisation est rapidement obtenue dans la masse, et si la géométrie est bien adaptée, le procédé limite la surcuisson en périphérie
- La réduction du temps de cuisson et donc de la Valeur Cuisatrice du produit préserve mieux ses qualités nutritionnelles et organoleptiques.
- pour les personnels, de meilleures conditions de travail (faible bruit, pas de brûlures avec l'appareil)
- Un traitement continu est possible en tunnel microondes, et ce tunnel est facilement adaptable sur une ligne. Etant donné que les tunnels prennent moins de place que des chambres autoclaves, l'industriel gagne également en **surface**, et fait des économies d'énergie.
- Le procédé est simple à piloter, nécessite moins de formation qu'un autoclave
- Ce procédé 100% électrique ne nécessite pas de chaufferie vapeur, ce qui contribue au développement durable

Applications et aliments concernés :

Les traitements industriels de chauffage par microondes en IAA (hormis les applications domestiques bien connues de réchauffage rapide) trouvent principalement deux applications :

- Le tempérage (opération qui consiste à maintenir un produit à une température voisine de son point de congélation de manière à obtenir une bonne cristallisation permettant le moulage) pour lequel on utilise préférentiellement d'autres fréquences (technologies dites Hautes Fréquences, mais dont le principe est le même)
- La cuisson / pasteurisation dans l'emballage de produits préemballés, qui seront ensuite rapidement réfrigérés et conservés / distribués en frais, avec une DLC.

Les autres applications sont multiples : décongélation, pré-cuisson, stérilisation, désinsectisation, réchauffage, déshydratation.

Le cahier des charges « produit » est simple :

- ✓ Assemblages d'ingrédients crus ou précuits (légumes justes blanchis par exemples) : viandes produits de la mer, légumes, fruits, plats cuisinés, sauces, desserts, produits laitiers, etc.

- ✓ Seule contrainte : les microondes chauffent essentiellement l'eau contenue. Le procédé ne s'applique donc pas aux aliments déshydratés, et très mal aux produits à très forte concentration de lipides (huiles).
 - ✓ Aliments préemballés en emballage étanche et perméable aux microondes (en général matériaux plastiques sans couches métalliques), mais : (i) résistant à une légère pression interne, ou (ii) : munis d'une valve de décompression laissant échapper la vapeur produite, et qui s'obturera après traitement pour éviter toute recontamination.
 - ✓ La taille et la forme du produit ont énormément d'influence sur l'homogénéité du traitement. Il est possible de traiter de petits (bol ou barquette « portions » par exemple comme de grands conditionnement : poches 5 – 10 kg pour la RHF, à condition que l'épaisseur reste modeste : moins de 10 cm en général.
- Les applications identifiées, potentielles et/ou déjà industrialisées sont nombreuses, essentiellement pour les produits frais, crus ou cuits, réfrigérés :
- produits végétaux cuits : légumes avec ou sans sauce, produits de fruits cuits, soupes et potages, sauces
 - produits carnés et produits de la mer cuits « nature »;
 - produits complexes : plats cuisinés et plats préparés frais réfrigérés : *application phare*
 - sauces, condiments et assimilés (*produits classiquement acidifiés, à DLC longue, usuellement utilisés par les consommateurs sur des durées longues, propices au gaspillage*) ;
 - produits laitiers pasteurisés : desserts lactés, boissons lactées ;

Les fours développés par SAIREM sont aussi une solution efficace et économique pour la désinsectisation des produits secs (farines, céréales, lentilles, champignons, semoules, cacao, noisettes, etc.).

- Ce procédé purement thermique ne s'applique pas aux produits crus.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Par son action décontaminante par pasteurisation thermique, le chauffage microonde permet d'obtenir les DLC recherchées pour des produits préemballés cuits, pasteurisés puis réfrigérés, en particulier les plats cuisinés fragiles, les produits de la mer, etc.

Le traitement très rapide et l'absence de surcuisson s'accompagne d'une amélioration sensible du rendement matière et des qualités sensorielles (jutosité des viandes et poisson, croquant des légumes, etc.), au bénéfice à la fois du fabricant et du consommateur.

Le chauffage microonde se prête tout particulièrement au traitement des emballages de tailles moyenne ou petite : portions individuelle notamment.

Ces produits représentent la majorité des applications économiquement intéressantes.

Exemple : DLC validée de 28 jours pour un plat cuisiné composé de saumon, légumes, sauce, présentant une très bonne qualité sensorielle.

Inversement, à qualité organoleptique équivalente (faible cuisson), la pasteurisation microonde permet d'obtenir des Valeur Pasteurisatrices à cœur plus élevées, et ainsi des DLC plus longues, que par traitement thermique conventionnel.

Par ailleurs il est important de noter que les plats cuisinés « portion », qui forment l'essentiel des applications, se réchauffent ensuite tout naturellement au four à microonde domestique dans ou hors de leur emballage, ce qui est un plus pour le consommateur en terme de praticité.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le chauffage par microondes est un procédé déjà ancien, et très largement utilisé à l'échelle domestique, mais plus délicat à maîtriser à l'échelle industrielle pour une pasteurisation dans l'emballage. C'est pourquoi, il est encore considéré comme procédé innovant du fait de son développement industriel encore modeste.

La mise au point des traitements industriels s'avère dans la pratique assez délicate et souvent un peu empirique, car la modélisation de l'absorption des ondes dans les aliments de composition complexe ET de géométrie complexe, n'a pas été possible jusqu'à présent. *L'homogénéité du chauffage, verrou technologique de la mise en œuvre industrielle aux cadences recherchées, est connue pour être difficile à obtenir.*

Ce procédé vient en alternative ou en complément à d'autres technologies plus impactantes pour le produit (pasteurisation thermique classique) ou également efficaces mais moins bien acceptées par les consommateurs (ionisation, utilisation d'additifs, etc..).

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs sont :

- des possibilités fortes d'innovation en termes de nouveaux produits (moins cuits, plus « frais », de qualité organoleptique et nutritionnelle préservée), etc...
- des traitements très rapides autorisant une productivité industrielle favorable
- une garantie sanitaire améliorée : destruction efficace des flores pathogènes et d'altération.
- emballage pratique pour le consommateur, à l'utilisation

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Le risque sanitaire lié au procédé de chauffage par microondes est surtout dû :

- à la difficile maîtrise de l'homogénéité de température dans tout le volume du produit, de façon à garantir l'application d'une Valeur Pasteurisatrice minimum en tous points, ET dans le même temps l'absence de points de surchauffe qui risqueraient d'endommager le conditionnement (avec perte d'étanchéité)
- à la difficile maîtrise de la pression générée dans l'emballage, phénomène qui nécessite un développement en parallèle du procédé ET du packaging. Un gonflement excessif peut générer des micro fuites sur les thermoscellages, sources de possible recontaminations.
- aux difficultés de mesures des températures et de leur homogénéité, car l'existence d'un puissant champ microonde dans la zone de traitement interdit l'utilisation de matériel de mesure classique type thermocouples ou capteurs embarqués classiques : les mesures de température nécessitent des matériels spéciaux type fibre optiques pour mesures IR, etc...

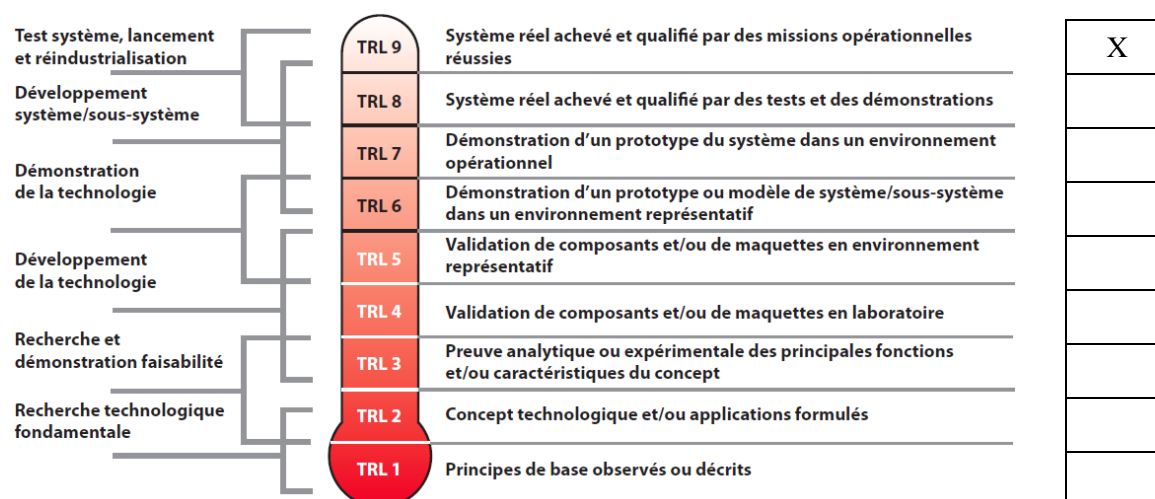
Pour ces raisons, il est recommandé de valider expérimentalement par techniques microbiologiques l'efficacité décontaminante du traitement de pasteurisation proposé, avec des techniques de challenges test et d'ensemencements contrôlés, avec les principaux germes d'intérêt.

- Il n'existe pas de risque spécifique connu des chauffages par microondes, relatif à la formation éventuelle de composés néoformés, autres que ceux rencontrés lors des traitements thermiques traditionnels. La rapidité des traitements limitant les effets de cuisson, cette caractéristique est plutôt favorable.
- Compte tenu de la susceptibilité que présentent certains matériaux d'emballage, d'absorber spécifiquement une fraction de l'énergie des microondes, et donc de s'échauffer, il convient dans certains cas de valider l'absence de migration globale et/ou spécifique qui pourrait être induite par l'utilisation des microondes.

Le contexte réglementaire n'est pas contraignant : Le chauffage par microondes est considéré comme un procédé thermique classique et **ne relève pas de la réglementation européenne Novel Food** (aliments obtenus avec des procédés nouveaux, non courants avant 1997)¹⁵. Les exigences de seuils de barèmes temps-température obligatoires, qui pourraient être renforcées dans le contexte actuel de recherche constante de sécurité sanitaire.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie de chauffage microondes est déjà en phase d'industrialisation.

Le procédé de pasteurisation par microondes étant purement thermique, la thermorésistance classique des flores pathogène et d'altération peut être utilisée, ce qui simplifie la définition des objectifs en termes de Valeur Pasteurisatrice à appliquer à cœur.

En parallèle, la recherche et la mise au point de produits se poursuivent principalement dans les centres techniques et sur les plateformes d'essais des équipementiers, afin d'optimiser les combinaisons « produit / packaging / paramètres de traitement », et de valider les procédés.

¹⁵ http://europa.eu/legislation_summaries/consumers/consumer_safety/121119_fr.htm

Figure 2 : Exemple de produit pasteurisé sous vide par microondes : jardinière de légumes (source : Sairem)



2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Parmi les points de blocages techniques identifiés :

- Des difficultés sont fréquemment rencontrées pour traiter les produits à forte ou au contraire faible teneur en eau, ou à forte teneur en matières grasses
- La limitation des matériaux d'emballages possibles (généralement pas de métal ni de plastiques thermosensibles). Des barquettes aluminium de géométrie spéciales sont toutefois possibles.
- La nécessité de gérer la pression interne, au moyen de dispositifs à valves un peu complexes et qui impactent le coût du packaging. Dans ce domaine, très peu d'acteurs français proposent des solutions utilisables pour gérer l'augmentation de pression. Seul le principal concurrent, suédois, propose un système de barquette avec valves qu'il vend avec les installations.
- La difficulté réelle à obtenir un traitement homogène : *ce point est le plus difficile à appréhender lors des mises au point de produits*
- Les nombreux paramètres à prendre en compte dans l'élaboration du procédé : nature de chaque composant de l'aliment, taille des particules, nombreux aspects liés à la géométrie des aliments et des packagings
- Les barèmes classiquement utilisés en autoclaves ne sont pas extrapolables : nécessité de déterminer entièrement un nouveau couple {puissance / temps}
- La difficulté à instrumenter les produits pour y mesurer les températures réelles

D'un point de vue technique, il est très complexe d'adapter la technologie aux produits. Enfin, par rapport à la stérilisation, la pasteurisation demande une certaine **adaptation logistique** de l'usine.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant déjà considérée comme mature (indice TRL = 9), son développement actuel et futur repose essentiellement sur :

- (i) sa compétitivité économique, plus exactement le rapport bénéfice/coût associé, principalement impacté par le coût élevé des investissements machine,
- (ii) la résolution des difficultés techniques identifiées, notamment l'homogénéité du traitement thermique.
- (iii) le développement de dispositifs nouveaux : tunnels sous pression, ou de packagings spéciaux, permettant de maîtriser l'effet de pression interne et ainsi de laisser augmenter les températures produits au-dessus de 100°C, ce qui ouvrirait le champ à des procédés de stérilisation, pour des produits stables à température ambiante.

Les quelques freins techniques encore identifiés ne sont pas insurmontables.

➔ Le développement industriel régulier de cette technologie devrait se poursuivre.

Les recherches à venir pour les 10 prochaines années pour diversifier les applications porteront principalement sur :

- Les applications à température moyenne : pasteurisation par microondes. Un travail de modélisation de la génération de chaleur dans la masse des produits en fonctions de leurs caractéristiques et de leur géométrie serait très utile pour progresser dans la mise au point des procédés. Des recherches sur les emballages mieux adaptés (matériaux, géométries, systèmes de valves, etc..) devront accompagner ce développement.
- Les applications à température de stérilisation : nécessite la conception d'équipement fonctionnant sous contre-pression et/ou de nouveaux packaging rigides et résistants à la pression interne, mais perméables aux microondes et/ou dispositifs de contention pour maîtriser la déformation de l'emballage. Application : conserves de produits alimentaires, stables à température ambiante pour DLUO 12 à 18 mois environ, avec qualités nutritionnelles et organoleptiques améliorées. *Ce procédé est innovant, ses freins technologiques sont identifiés, mais n'est pas encore au point. TRL est estimé à 4-5.*

2.5 Principaux acteurs

Equipementiers proposant des lignes industrielles en UE :

SAIREM - France

<http://www.sairem.com/your-partner-in-microwave-and-radio-frequency-professional-solution-1.html>

Micro-ondes Energie Système (MES) – Villejuif, France

Equipes étrangères les plus significatives

- Centre Technique SIK, Suède : leader européen en recherche académique et appliquée sur le procédé.

<http://engwww.sik.se/> Contact : *Lilia Ahrné*

- IRTA , Espagne <http://www.irta.cat/en-US/RIT/I/I1/Pages/I13.aspx>

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La France, avec ses deux équipementiers historiques, possède un savoir-faire reconnu.

Plusieurs équipes universitaires et Centres Techniques disposant d'équipements pilotes sont actifs et connus comme spécialistes du procédé, notamment :

- CTCPA Avignon

- CETIAT

- ONIRIS, Nantes – Laboratoire GPEA (A. Le Bail)

Selon la Sairem, des **pilotes industriels démonstratifs** manquent encore pour le développement de la technologie.

3- Impact environnemental

Le chauffage par microonde est une technologie à fonctionnement électrique, dont le rendement énergétique est satisfaisant lorsque les applicateurs sont optimisés en géométrie.

Le procédé ne consomme pas de vapeur, peu de fluides en général, et ne génère quasiment aucun effluent. L'empreinte CO₂ / kg produit reste donc acceptable. On ajoutera que les installations sont

recyclables, car composées à 99% de métal, de cuivre et de céramique. Il en est de même pour les tunnels plastiques.

Les applications actuelles sont principalement dédiées au traitement de conditionnements unitaires petits à moyens (« portions »). Le ratio emballage / masse produit n'est donc pas systématiquement favorable, mais en revanche les matériaux utilisés sont minces et légers : sachets ou barquettes plastiques.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de chauffage microonde a obtenu une note de 3 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	3

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Avec le temps, cette technique a été acceptée par les consommateurs et est maintenant très utilisée à domicile. Cependant certains consommateurs continuent de redouter la persistance d'ondes dans le produit. Cette technique appliquée au niveau industriel devrait être bien acceptée par les consommateurs même si ceux-ci risquent de s'interroger, comme pour le chauffage ohmique, sur l'impossibilité d'une décontamination totale.

Des études controversées sur le microonde domestique ont été publiées. Ces anciennes controverses ne concernent pas le microonde industriel pour lequel aucune publication récente n'a été trouvée.

Cependant, il n'y a aucune mention obligatoire et tant que les consommateurs ne sont pas au courant, il n'y a aucun risque de rejet d'autant plus que le traitement par micro-ondes permet une meilleure préservation des qualités organoleptiques lors de la pasteurisation par rapport aux autres méthodes.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Le marché de la technologie n'est pas très concurrentiel, les Etats-Unis développent en priorité les solutions « Batch » (fours) et pas le continu.

En revanche le traitement en tube est compétitif sur des gammes de produits plus étendues. Pour l'instant, cette technologie évolue sur un marché de niche, mais qui va se développer.

La technologie est concurrencée par d'autres technologies comme le chauffage ohmique.

Perspectives

La SAIREM prévoit un développement important de la technologie d'ici 5 ans. Etant donné que la technologie est avantageuse en termes d'impact environnemental, son avenir est positif. Cependant, il semble nécessaire d'envisager le développement de la technologie de façon intégrée, en proposant des solutions intégrées dans la Supply Chain. Ceci serait possible si l'on passait par *une mutualisation tripartite* des compétences des centres techniques, de l'industrie et de la recherche en France, comme c'est le cas pour le chauffage ohmique, et sur le modèle des barquettes proposées par l'entreprise suédoise en complément des installations de traitement micro-ondes.

Le chauffage microonde pourrait se positionner sur des gammes de produits « premium » et proposer leurs solutions à des clients comme les compagnies aériennes pour leurs produits de première classe etc...

Rentabilité économique

Quelques éléments génériques de coûts (investissement, fonctionnement) et de rentabilité économique du procédé peuvent être obtenus auprès des équipementiers.

A titre d'exemple : Comparatif (théorique) réalisé par SAIREM avec l'ADEME :

Comparaison autoclave / micro-ondes sur la base suivante :

- ❖ Sachets de pommes de terre de 3 kg
- ❖ Production : 1 T/h ; Production annuelle : 2 800 T
- ❖ Fonctionnement journalier : 14 h ; Nombre de jours travaillés : 200
- ❖ Consommation électrique avec autoclave..... 0,67 kWh/kg
- ❖ Consommation électrique avec système micro-ondes 0,32 kWh/kg
- ➔ *Le rapport est > 2 en faveur des micro-ondes.*
- ❖ Coût financier énergétique :
- ❖ Prix du kWh retenu : 0,08 €
 - ❖ Autoclave : 0,67 x 0,08 x 2 800 000 150 080 €
 - ❖ Micro-ondes : 0,32 x 0,08 x 2 800 000 71 680 €
 - ❖ **GAIN énergétique : 78 400 €/ an**
- ❖ EAU : avec les autoclaves, environ 1/3 de l'eau est perdue par cycle.
- ❖ Pour une production de 2 800 T/an, la perte en eau se chiffre à environ 8 000 € Il faut ajouter à cela qu'une partie de cette eau perdue est polluée et doit être retraitée en station d'épuration (ce coût n'est pas négligeable).

Gain total estimé :

Gain en électricité.....	78 400 €
Gain en eau.....	8 000 €
Gain en personnel.....	40 000 €
GAIN TOTAL	126 400 €



Figure 3 Barquette avec valve à fermeture retardée

La commercialisation et la mise en place de pilotes industriels est considérée comme chère par les industriels. En termes de coût de fonctionnement, la pasteurisation par tunnels est relativement peu chère, elle permet même des économies de consommation de ressources par rapport aux méthodes classiques. En effet, la consommation électrique est divisée par deux ou trois par rapport à une pasteurisation en autoclave. Les coûts de maintenance sont liés à des changements de circuits de chauffe et de certains composants.

Par ailleurs, la technologie permet de diminuer les pertes d'aliments puisque le traitement est moins fort, et donc de faire des bénéfices qui s'élèvent à 800 000-1 million d'€par an.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie du chauffage microondes:

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire - Qualité organoleptique - Augmentation de la DLC - Réglementation - Gain de productivité - Bonne acceptabilité par le consommateur - Faible impact environnemental 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coûts d'investissement - Changement de pression
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diversification des applications - Mutualisation des compétences 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement - Concurrence avec le chauffage ohmique

Le développement industriel du chauffage microonde est encore modeste. Il permet un chauffage rapide et notamment une pasteurisation thermique intense et courte. Cela a pour conséquence une augmentation de la productivité mais également une augmentation de la DLC, des qualités organoleptiques et de la sécurité sanitaire. Cependant, il peut être appliqué à diverses autres applications : tempérage, pré-cuisson, cuisson, désinsectisation, décongélation... Le chauffage microonde se prête tout particulièrement aux petites et moyennes portions (homogénéisation du chauffage) qui sont les applications économiquement intéressantes. Du point de vue technique, il peut y avoir un problème d'augmentation de la pression qui nécessite l'adaptation de l'emballage.

En outre, le chauffage microonde a un faible impact environnemental, une bonne acceptation par les consommateurs qui le connaissent déjà et pas de freins réglementaires. Mais les coûts d'investissement élevés limitent son développement. Par ailleurs, il est menacé par des technologies concurrentes similaires comme le chauffage ohmique.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

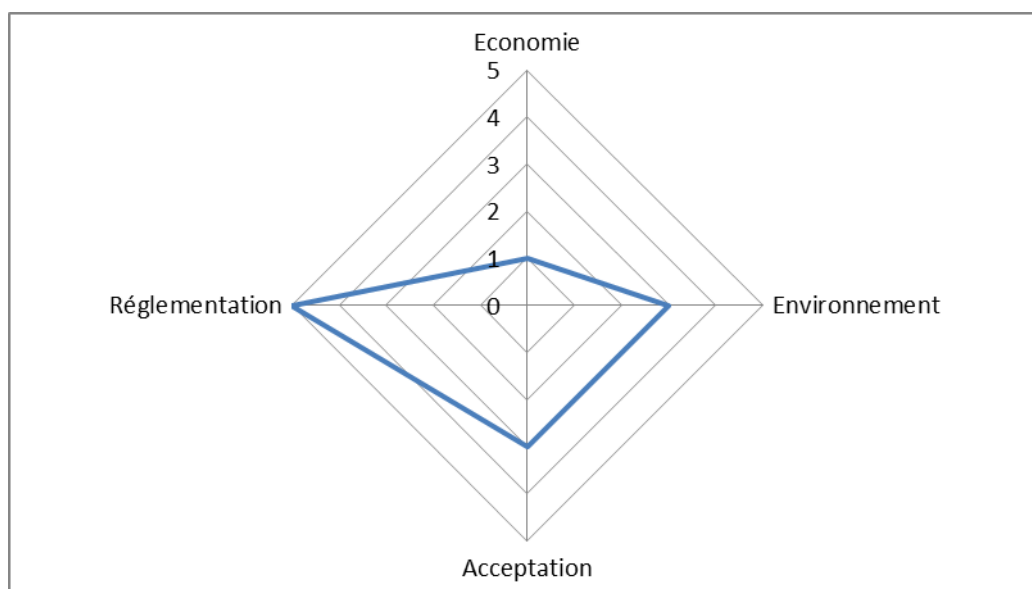


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

CONDITIONNEMENT ASEPTIQUE

Données clés

Résumé

Le conditionnement aseptique est appliqué en association après un traitement de stabilisation thermique d'un produit en vrac. La technique est notamment utilisée pour le lait UHT en brique, les potages, sauces ou compotes de fruits. Il permet la fabrication de produits stables à température ambiante, avec des DLUO de plusieurs mois. Il permet de réaliser des conditionnements de petite taille et autorise une utilisation facile avec un minimum de perte. Le produit est parfaitement décontaminé à l'ouverture, sa conservation réfrigérée après ouverture peut être optimisée par l'utilisation d'emballages refermables.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie de conditionnement aseptique

Pour la stabilisation de produits alimentaires périssables, afin de les rendre stables à température ambiante pour une durée longue (conserves), deux options technologiques sont possibles :

- l'emballage préalable des produits dans un emballage étanche, suivi du traitement thermique de stabilisation. C'est la fabrication des conserves traditionnelles (en emballage métal, verre ou plastique)
- l'ordre inverse : traitement de stabilisation thermique du produit en vrac, opération généralement réalisée en continu pour les produits pompables, suivie du conditionnement dans l'emballage final. Celui-ci doit alors être préalablement décontaminé, puis le remplissage du produit refroidi, et la fermeture étanche, doivent avoir lieu à l'abri de toute recontamination : c'est le conditionnement aseptique. Par cette technique sont par exemple réalisés depuis longtemps le lait UHT en brique, ainsi que des potages, des sauces ou des compotes de fruits.



Figure 1 : SIG COMBIBLOC



Figure 2 : GUALAPACK

Cette technique présente des avantages pour la fabrication de conserves, mais aussi des contraintes techniques fortes :

1) Le produit est traité thermiquement dans une installation continue réalisant chauffage, chambrage, puis refroidissement, avant stockage intermédiaire dans un tank stérile.

Le produit doit donc impérativement demeurer pompable, avant et après traitement, sans démélange, et cela quelle que soit sa viscosité. Il peut contenir des particules, à conditions que celles-

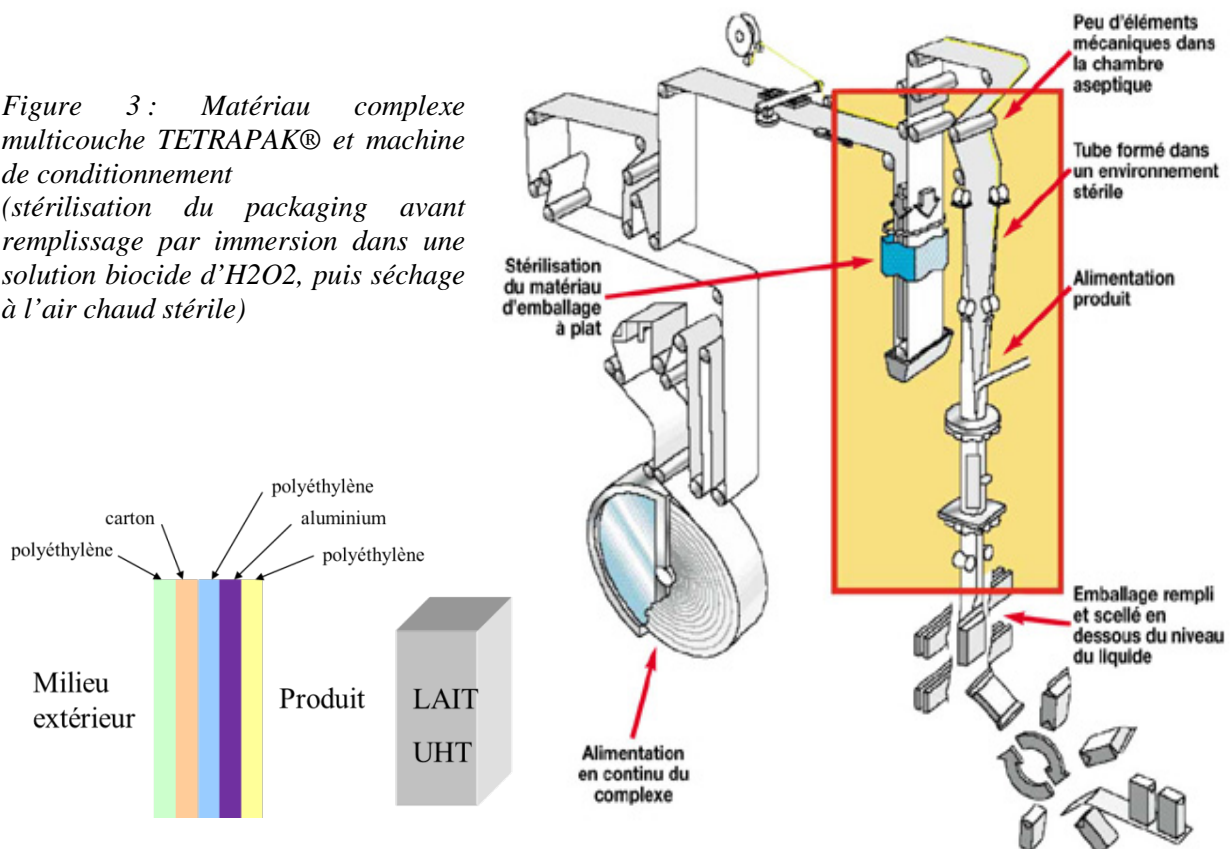
ci ne soient pas endommagées par le pompage ou le traitement, et restent en suspension dans le mélange, qui doit rester globalement homogène pour pouvoir être dosé dans l'emballage final avec une garantie de composition constante.

Cette contrainte exclut évidemment de nombreux produits. Le conditionnement aseptique propose un domaine d'application de facto limité, compte tenu des matériels et des technologies actuellement existantes pour le pompage, le traitement, le dosage/remplissage, enfin la fermeture aseptique des emballages.

2) Le produit est conditionné à froid dans son emballage final. Cet emballage ne subira alors plus aucun traitement visant à conserver le produit contenu. **Le conditionnement doit toutefois être parfaitement stérilisé sur sa face interne, par voie chimique, thermique ou par ionisation.**

L'obtention puis la maîtrise de l'asepsie durant l'opération de remplissage / fermeture est très technique et nécessite des matériels extrêmement complexes, assez coûteux. Il existe un effet de seuil en terme de cadence/ quantités produites : *les matériels couplés de traitement en continu + conditionnement aseptique, ne peuvent pas être rentablement proposés pour un usage à l'échelle artisanale ou pour une production modeste en volume.*

Figure 3 : Matériau complexe multicouche TETRAPAK® et machine de conditionnement (stérilisation du packaging avant remplissage par immersion dans une solution biocide d'H₂O₂, puis séchage à l'air chaud stérile)



Les principaux avantages du conditionnement aseptique, par rapport à la technologie traditionnelle de réalisation des conserves, sont :

- Le produit doit être stabilisé par un traitement thermique continu dans un échangeur tubulaire ou à plaque ou une autre technologie (voir la fiche « chauffage ohmique »), en utilisant un temps court et une température élevée. Cela permet de réduire très sensiblement l'impact de cuisson et de préserver les qualités nutritionnelles et organoleptiques ;

- Le matériau d'emballage n'a pas à subir de traitement thermique, on peut donc retenir des matériaux dont les caractéristiques sont moins contraignantes que pour une stérilisation thermique traditionnelle en autoclave : Complexe carton-alu plastiques (briques classiques TetraPak® ou Combibloc®), Complexe plastiques multicouches, etc.
- Le produit final proposé au consommateur présente les mêmes qualités, **quel que soit le volume conditionné** : des portions de 90g jusqu'au poches RHF de 10 kg. Une grande diversité de formes est possible : cylindres, briques, outres et « mini gourde » avec goulot-paille, sachets, pots, barquettes et bols, bouteilles, etc.

Il existe plusieurs variantes et applications un peu différentes du conditionnement aseptique : on les regroupe généralement sous la dénomination « **conditionnement ultra propre** ».

Sans rechercher impérativement la stérilité vraie des conditionnements mis en œuvre, ni le maintien en asepsie parfaite de la machine de remplissage-fermeture, il est possible de maintenir un niveau de décontamination des emballages, et une qualité hygiénique d'ambiance suffisante pour deux types d'applications voisines, lorsque qu'une simple pasteurisation du produit et de son emballage, sont requises :

- Le conditionnement ultra propre de **produits acides pompables**, réalisé à chaud ou à froid dans leur emballage final. *Larges applications aux compotes de fruits, sauces tomates, et bien sûr les jus de fruits et boissons acides.* Dans ce cas la chaleur du produit au remplissage suffit généralement à pasteuriser la face interne de l'emballage. Mais pour un remplissage à froid, il est en revanche indispensable de décontaminer l'emballage vide avant usage.
- Le conditionnement ultra propre de produits non acides pompables pasteurisés, qui seront ensuite réfrigérés et proposés avec une DLC, en chaîne de froid. Cette application est rare et très ciblée (par exemple : œuf liquide pasteurisé, pour les utilisateurs professionnels) car les moyens à mettre en œuvre sont disproportionnés avec les enjeux et cette technique n'est donc pas compétitive, comparée aux pasteurisations classiques dans l'emballage pour la plupart des produits.

Figure 4 : Outre Bag In Box multicouche avec bouchon inviolable 54 mm diam. (stérilisation à vide par ionisation)



Utilisation pour les gros conditionnements stables à l'ambiance, destinés à la RHF, et pour les produits industriels « B-to-B »

Applications et aliments concernés :

Les produits concernés par le conditionnement aseptique vrai, stabilisés thermiquement pour conservation à température ambiante avec DLUO de plusieurs mois, sont principalement :

- De très nombreux produits liquides ou semi-liquides lisses non acides :
 - Laits stérilisés UHT, crème, desserts lactés
 - Potages lisses
 - Sauces lisses,
 - Préparations pour pâtisserie
- Des produits pompables divers de viscosité élevée, non acides ou acides, avec des particules jusqu'à 20 à 25 mm de diamètre maximum :

- Légumes cuisinés en sauce
- Sauces avec morceaux
- Plats cuisinés avec particules moyennes : Chili con carne ; pâtes carbonara...
- Des produits infantiles, « baby food » de sevrage : purées de légumes, plats cuisinés, etc..
L'absence de grosses particules permettant à la fois la pompabilité ET le dosage conditionnement en portions unitaires. Machines de conditionnement aseptiques type Form/Fill/Seal, toutefois extrêmement chères et complexes

Les produits concernés par le conditionnement ultra propre sont principalement :

- Les produits acides à base de fruits ou de tomates : sauces, compotes
- Les jus de fruits et boissons acides

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Plusieurs caractéristiques contribuent à limiter le gaspillage alimentaire:

- Le conditionnement aseptique, couplé aux traitements thermiques pratiqués, permet la fabrication de produits stables à température ambiante, avec des DLUO de plusieurs mois, pouvant atteindre 24 mois environ.
- Des conditionnements de petite taille (portion unitaire pour un usage « unique », et /ou adaptés à l'usage familial par le consommateur : brique de potage 1 litre ou ½ litre par exemple) autorisent une utilisation facile avec un minimum de perte.
- Le produit étant généralement stérilisé, il est de fait parfaitement décontaminé à l'ouverture, et sa conservation réfrigérée après ouverture est donc facilitée et assez durable, surtout si un dispositif de bouchage refermable par l'utilisateur prévient au moins partiellement les recontaminations excessives lors de ce stockage (limité à quelques jours) dans le réfrigérateur du consommateur.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le conditionnement aseptique vient en alternative, pour certains produits, aux technologies traditionnelles de fabrication des conserves. Il a d'ailleurs totalement remplacé ces technologies pour certains produits, comme le lait UHT par exemple.

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs incluent :

- Des possibilités d'innovation en termes de nouveaux produits et de nouveaux packagings. Le conditionnement aseptique étant couplé avec des traitements « en vrac, continu » de produits pompables, les capacités d'innovation doivent être étudiées en tenant compte des possibilités de traitement amont des produits.
- L'obtention de produits moins cuits, aux qualités nutritionnelles et organoleptiques améliorées par rapport aux conserves classiques : Les traitements thermiques continus confèrent stabilité biologique tout en limitant l'impact de cuisson sur les produits (voir fiche « chauffage ohmique »).
- Des traitements très rapides et en continu de A à Z (conditionnement compris) autorisant une productivité industrielle optimale, des cadences élevées sur de gros volumes.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Le risque sanitaire lié au procédé de conditionnement aseptique est surtout dû :

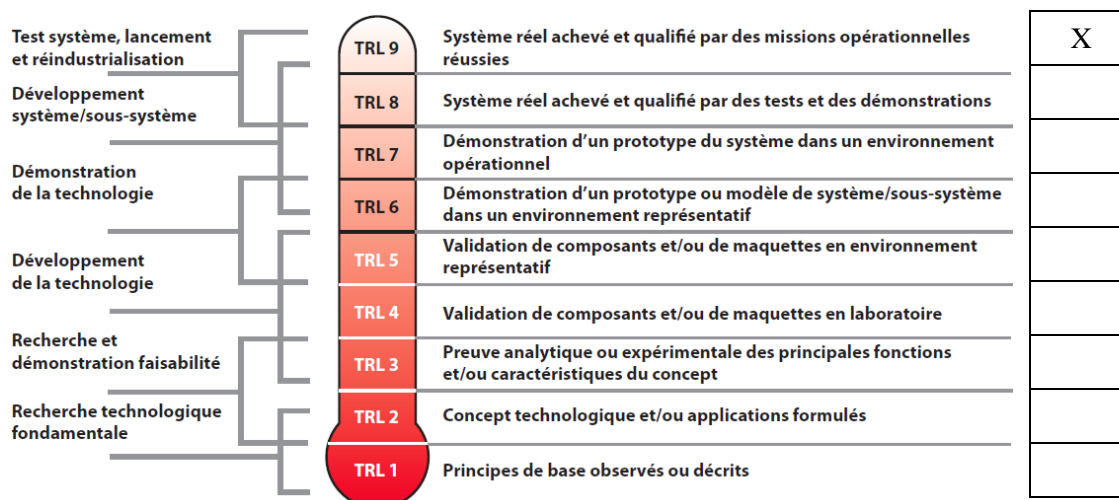
- à la difficile maîtrise de l'obtention puis du maintien de l'asepsie dans l'ensemble de l'équipement utilisé. Un savoir-faire particulier et une très grande rigueur dans la maîtrise des procédés est indispensable. Les équipements de traitement continu du produit doivent être parfaitement nettoyés et désinfectés avant production ; les matériels de conditionnement doivent être maintenus stériles durant des temps longs. Toute recontamination ou perte d'asepsie induit une perte de production considérable, et des quantités importantes de produits doivent alors être détruites.
- à la difficile mise au point des traitements de certains produits en termes de composition / viscosité, et « pompabilité » des mélanges, surtout avec particules.
- Au risque de micro fuites durant la phase de fermeture par thermoscellage ou pose de bouchon, étape délicate techniquement.

Le contexte réglementaire n'est pas contraignant : Le traitement thermique continu associé au conditionnement aseptique ne fait pas l'objet de réglementation particulière en UE.

Une démarche HACCP assez complexe est toutefois classiquement associée à ces techniques (pré validation des process thermiques, pré validation de l'asepsie des installation, etc..).

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie de conditionnement aseptique est déjà mature et en usage industriel très large pour de nombreux produits. En parallèle, la recherche et la mise au point produits se poursuivent principalement dans les centres techniques et sur les plateformes d'essais des équipementiers (peu nombreux à maîtriser cette technologie), afin d'élargir le conditionnement aseptique à de nouveaux packaging, format de dosage, utilisation de nouveaux matériaux, technique de décontamination préalable des emballages (et bien entendu en parallèle des recherches portant sur les traitements en amont pour les produits pompables destinés à ce mode de conditionnement).

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Les freins techniques actuellement identifiés pour le développement des technologies couplées de traitement en continu de produits pompables + conditionnement aseptique sont :

- L'absence de solution technologique permettant le traitement thermique aseptique de produits peu ou pas pompables (morceaux de viandes, de poisson, de légumes, supérieurs à 25 mm)
- L'absence d'équipement de conditionnement aseptique permettant le dosage quantitatif maîtrisé en nombre ou masse, de ces particules de grandes taille dans l'emballage final, en l'absence de sauce de viscosité élevée, et cela sans intervention humaine. *Cette difficulté ne permet pas pour le moment de réaliser par conditionnement aseptique tous les produits souhaités par les industriels, notamment des plats cuisinés avec peu de sauce.*
- L'absence d'équipement permettant le remplissage aseptique de produits très visqueux avec une proportion important de grosses particules, dans certains types d'emballages pourtant favorables en termes d'innovations et d'attente des consommateurs (par exemple : sachets souples autoportants type Doypack®).

Freins réglementaires identifiés :

Les produits conditionnés aseptiquement sont soumis aux mêmes règles d'étiquetage que les produits conditionnés avant traitement. *Mais l'opération de dosage étant réalisée en zone aseptique, entièrement, automatiquement et sans intervention humaine possible, la composition du produit conditionné est 100% dépendante de l'homogénéité du produit pompable après traitement, stockage intermédiaire et transfert, jusqu'au dosage final...*

Pour un produit avec particules, le respect de la composition étiquetée en termes de proportion des différents éléments (ratio particules / sauce) est généralement facile à maîtriser pour un produit conditionné en gros volume (à partir de 3 litres), pour une utilisation RHF par exemple.

Cela devient beaucoup plus difficile pour de petits conditionnements, pour lesquels la dispersion statistique de la répartition des particules devient critique d'une unité de vente à l'autre, et dépasse alors les tolérances d'étiquetage.

Par exemple pour un potage avec boulettes de viande devant contenir 15 % en masse de boulettes, pour chaque unité consommateur en format portion 400g. Cela n'est réalisable techniquement, avec les équipements actuellement disponibles que si :

- 1) les boulettes sont assez petites pour assurer une bonne répartition en masse
- 2) le potage est formulé avec une viscosité assez élevée (peu favorable), et enfin
- 3) l'homogénéité de composition est maintenue par brassage mécanique dans les tanks de stockage alimentant la doseuse (sans endommager les morceaux...)

Cette caractéristique incontournable du conditionnement aseptique est identifiée comme un frein technique, sur cahier des charges réglementaire, au développement de cette technologie.

Freins économiques :

Le coût d'investissement pour accéder aux technologies couplées de traitement en continu de produits pompables + conditionnement aseptique, est très élevé. Ce choix représente de plus une réelle rupture technologique et culturelle (formation indispensable et complexe des personnels), pour les industriels pratiquant la fabrication traditionnelle des conserves.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant déjà considérée comme mature (indice TRL = 9), son développement actuel et futur repose essentiellement sur :

- (iv) sa compétitivité économique, plus exactement le rapport bénéfice/coût associé, principalement impacté par le coût élevé des investissements machines,
- (v) la résolution des difficultés techniques identifiées, notamment le dosage quantitatif parfaitement contrôlé de produits complexes avec grosses particules, en conditionnement de petite taille (exemple : plats cuisiné « portion » avec quantité garantie de morceaux de viande, conforme à l'étiquetage)
- (vi) le développement de dispositifs nouveaux : doseuses / conditionneuses aseptiques pour de nouveaux formats d'emballage, et des produits plus complexes.

A ce jour, peu de problèmes d'acceptabilité consommateurs ont été rapportés.

Les quelques freins techniques encore identifiés ne sont pas insurmontables.

➔ Le développement industriel régulier de cette technologie devrait se poursuivre.

Les recherches à venir pour les 10 prochaines années pour faire évoluer la technologie et diversifier les applications porteront principalement sur :

- Les technologies de décontamination des emballages avant remplissage :
 - Utilisation de biocides chimiques de nouvelle génération, plus efficaces rapidement et à basse température, sur toutes les flores y compris sporulées ; moins contraignants (corrosifs) pour les équipements ; avec un moindre risque de persistance de résidus indésirables sur les emballages
 - Utilisation de technologies physiques : **plasmas froids, lumière pulsée**, ionisation in situ par faisceaux d'électrons, etc..
- Les technologies de pompage, transfert, dosage des produits complexes (point déjà expliqué précédemment)
- Le développement de nouveaux matériaux d'emballage, motivé notamment par le remplacement des complexes carton/alu/plastique, non recyclables, très mal valorisables, par des matériaux plus favorables en terme d'impact environnemental : plastiques monomatériaux par exemple.

2.5 Principaux acteurs

Equipementiers proposant des lignes industrielles en Europe :

- TETRA PAK
- SIG COMBIBLOC
- GUALAPACK
- SIDEL
- THIMONNIER

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La recherche sur le conditionnement aseptique (à part pour les aspects strictement microbiologique : résistance chimique, physique, thermique des flores), est faite quasi exclusivement par les équipementiers eux-mêmes. C'est un travail de bureau d'étude, il n'y a pas de thématique de recherche fondamentale intéressant les chercheurs et il n'y a que très peu de recherche académique sur le sujet, et donc peu de publications, surtout récentes. Toutes les avancées techniques sont protégées par brevets.

Quelques centres techniques (dont le CTCPA) et universités, disposent de matériels de conditionnement aseptique pilote, en général matériels italiens pour emballages de type « bag in box »

et autres souples préstérilisées, (seuls matériels de petite taille disponibles sur le marché - fournisseurs ASTEPO, ROSSI CATELLI, etc..).

De très nombreux acteurs industriels en IAA en France utilisent déjà le conditionnement aseptique. Ce sont pratiquement tous de grands groupes laitiers ou diversifiés, ou fabricant des boissons.

3- Impact environnemental

Le conditionnement aseptique, qui est nécessairement couplé à des technologies de traitement vrac continu des produits, est plutôt favorable en termes d'impact en empreinte CO₂ lorsque rapporté au kg de produit fini transformé, car le passage en continu permet de notables gains énergétiques. A titre d'exemple, une machine vendue par la société Thimonnier à 3 têtes produisant 10 000L/H de lait utilise 6kWatt. Par ailleurs, il est possible de choisir des matériaux recyclables pour le conditionnement aseptique comme le sachet coussin de Thimonnier, ne contenant que peu de matière en comparaison avec les Tetrapak actuels.

Les étapes de Nettoyage En Place des équipements continus consomment en revanche d'importantes quantités d'eau et génèrent classiquement des effluents en quantité importantes. Des biocides chimiques sont fréquemment employés.

L'impact environnemental défavorable des matériaux complexes (Carton/Alu/plastiques), assez spécifiques du conditionnement aseptique et représentant une part très importante des applications actuelles a souvent été souligné.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de conditionnement aseptique a obtenu une note de 1.5 pour l'indice « Coût environnemental » par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	1.5

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a

plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Il n'y a pas de d'objection forte concernant l'utilisation de H₂O₂ pour stériliser les emballages. La majorité des consommateurs considère la stérilisation (chimique) des emballages comme étant standard et ne voit pas la différence entre cette technologie et ce qu'ils considèrent comme étant des pratiques usuelles. Certains consommateurs associent l'utilisation de H₂O₂ avec le blanchiment des cheveux. Même si ils considèrent qu'une asepsie complète est impossible, le fait que les produits fabriqués avec conditionnement aseptique soient très répandus et très largement utilisés en UE par les consommateurs (briques de lait...) permet d'atténuer ces craintes.

Enfin, si les molécules d'H₂O₂ utilisées comme traitement chimique des emballages, contribuent à la réduction de particules chimiques dans les aliments alors les consommateurs seront favorables.

5- Dimension économique

Les lignes industrielles de traitement continu + conditionnement aseptique sont très coûteuses à l'investissement mais permettent des cadences de production très élevées, en fonctionnement 24/24 sur des durées longues.

Les coûts de fonctionnement sont très variables suivant les applications mais réputés moindre par kg produit, que les applications en batch pour des produits de nature et qualité équivalente. C'est toutefois une donnée économique stratégique, donc gardée secrète.

La société Thimonier indique des ordres de prix :

- Machine verticale de conditionnement du lait à 1 tête 25 000€
- Machine aseptique à plusieurs tête jusqu'à 350 000€(la plus chère).

Pour un client déjà équipé, ces montants représentent un investissement important. Pour une nouvelle installation, le prix est abordable.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire - Augmentation de la DLC - Augmentation de la productivité - Faible impact environnemental 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Investissement pour l'intégrer au process
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Exportation - Couplage avec le chauffage ohmique - Nombreuses formes d'emballages possibles - Diversification des applications (Yaourt) - Emballages refermables et portionnables - RHF pour les gros volumes 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marché de niche limitant le développement

Le conditionnement aseptique est une alternative à la fabrication traditionnelle des conserves par technologie Batch (aliments préemballés). Il offre la possibilité aux industriels de développer de nouvelles formes d'emballages pour des produits pompables, soit autant d'opportunités marketing. Il est intéressant de le coupler avec un traitement comme le chauffage ohmique, car cela permet un gain de productivité en plus d'un gain des qualités organoleptiques ; cependant les lignes de productions couplées représentent un investissement important pour les entreprises. Le conditionnement aseptique est déjà largement utilisé en France surtout dans les grands groupes laitiers et de boissons, et pour la fabrication de sauces et de potages. La technologie devrait évoluer pour être applicable à des produits contenant des morceaux. Les industries de produits laitiers (yaourts) travaillent depuis déjà quelques années pour appliquer cette technologie à leurs produits.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

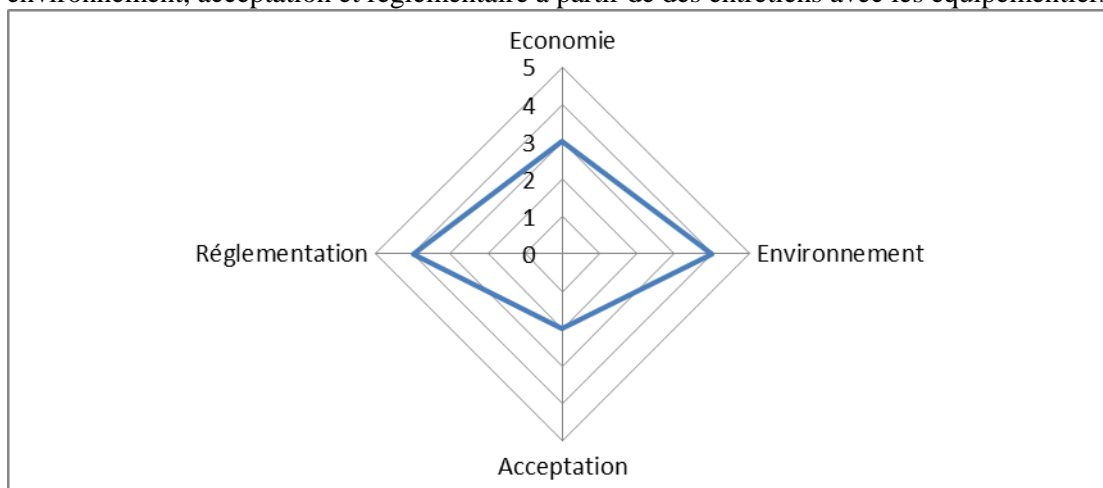


Figure 5 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

CHAUFFAGE OHMIQUE

Données clés

Résumé

Le chauffage ohmique est un traitement thermique innovant qui consiste à chauffer très rapidement un aliment, par circulation directe dans cet aliment d'un courant électrique alternatif de fort voltage et forte intensité. Ce traitement est essentiellement appliqué sur des produits pompables avec ou sans particules. Couplé au conditionnement aseptique, le procédé a les mêmes effets sur la conservation du produit : (i) possibilité de fabrication de produits stables à température ambiante avec des DLUO de plusieurs mois, (ii) possibilité de conditionnements de petite taille et (iii) augmentation de la durée de conservation dans le réfrigérateur du consommateur. Aujourd'hui, le faible développement industriel entraîne des coûts d'investissement encore importants, mais les perspectives de développement devraient entraîner une standardisation des machines et donc une diminution du prix.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

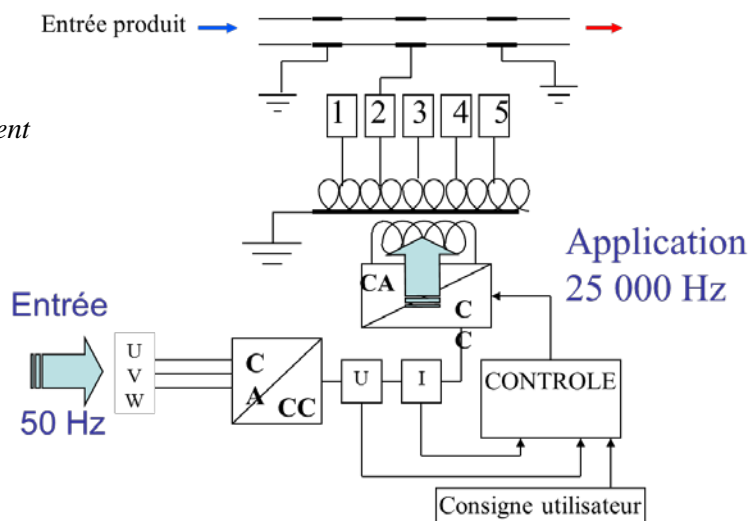
1.1 Présentation de la technologie du chauffage ohmique

La technologie de traitement thermique par chauffage ohmique direct consiste à obtenir le **chauffage d'un aliment par circulation directe dans cet aliment d'un courant électrique alternatif** de fort voltage (250 à 6000 Volt) et forte intensité. L'effet joule, lié à la résistance électrique du produit, transforme l'énergie électrique en chaleur. Cette technologie est essentiellement mise en œuvre comme procédé continu de traitement thermique de pasteurisation ou de stérilisation pour produits pompables et donc couplée à un conditionnement aseptique ou ultra propre (voir également la fiche 3.3 Conditionnement Aseptique).

Le produit est mis en circulation dans un tube isolant et isolé électriquement, équipé d'électrodes annulaires à ses extrémités (avec mise à la terre). Un courant électrique à haute fréquence est appliqué aux électrodes et circule ainsi dans la masse du produit en circulation, générant la chaleur par effet Joule.

Figure 1 : Dispositif industriel de traitement par chauffage ohmique en applicateur tubulaire

Source : Emmepiemme



Contrairement aux échangeurs tubulaires classiques dans lesquels la chaleur est transmise au produit par conduction à travers la paroi chaude de l'échangeur, puis à l'intérieur du produit par convection et/ou conduction thermique pure dans le produit pompable (et par conduction uniquement au sein des

particules), le chauffage ohmique permet la **génération de la chaleur au sein même du produit, y compris dans les particules solides**, très rapidement et avec une puissance élevée.

Les principales caractéristiques de cette technologie de traitement thermique sont :

- L'absence de paroi chaude utilisée pour transférer la chaleur au produit, et donc :
 - Peu ou pas de limite à la puissance délivrée : compacité des installations
 - Pas de convection requise : une proportion importante de particules est possible
 - Pas ou peu de conduction thermique requise : possibilité de chauffer rapidement à cœur des particules de taille importante
 - Paroi pas plus chaude que le produit lui-même : limitation de l'encrassement en paroi, ce qui autorise un fonctionnement sur de longue durée entre deux nettoyages de l'installation.
 - Aucune inertie thermique du procédé
- Un chauffage très rapide (vitesse d'échauffement typiquement de 3°C à 5°C/s) et homogène dans le volume du produit, et donc :
 - Peu ou pas de gradient de température entre périphérie et centre du tube (dépendant uniquement du profil de vitesse du produit en mouvement)
 - Pas de limite théorique au diamètre du tube de traitement ni à la taille des particules (dépendant uniquement de la pompabilité et de la viscosité)
 - Possibilité d'appliquer un traitement Haute Température / Courte Durée, y compris pour des produits de forte viscosité contenant des particules (*à condition toutefois de pouvoir refroidir le produit suffisamment rapidement en échangeur classique après traitement*). **Cela permet de réduire très sensiblement l'impact de cuisson et de préserver les qualités nutritionnelles et organoleptiques ;**
- Un procédé pour lequel la conductivité électrique et non plus la conductivité thermique est le paramètre principal de comportement du produit, et donc :
 - Nécessité de mesurer, et possibilités laissées dans certains cas d'ajuster **la conductivité électrique** du produit (exprimée en Siemens/m), et de chacun de ses constituants : phase porteuse continue et chaque type de particule.
Ce paramètre produit est très peu connu ni usuel en IAA.
 - Limitation du procédé aux aliments dans une fourchette exploitable de conductivité électrique (*certaines produits non conducteurs ou trop conducteurs ne peuvent pas être traités par chauffage ohmique*)
- Procédé 100% électrique pour lequel la régulation de l'énergie apportée est facile et le rendement énergétique excellent (> 95%). Le pilotage requiert toutefois une régulation PID très performante pour réguler la puissance par rapport à la température de consigne souhaitée. Le débit produit doit impérativement demeurer très régulier.

Exemple de paramètres de process observés en condition pilote :

- produit salé type plat cuisiné avec une conductivité voisine de 1,5 S/m ;
- traitement en installation pilote, diamètre 54 mm, puissance installée 50 kW
- chauffage de +70°C (de 60 à 130°C) en 15s sur une colonne de 1 mètre de long, pour un débit de 500 kg/h

Applications et aliments concernés :

Les produits alimentaires pouvant être traités par chauffage ohmique sont très divers, à condition de respecter le cahier de charges « produit » suivant :

- Pompabilité du produit : phase continue porteuse suffisamment visqueuse pour assurer le transport des particules sans décantation ni démélange ; la taille maximale des particules dépendant du diamètre de l'installation, mais aussi du dispositif de pompage, puis du conditionnement aseptique en aval ;
- Le produit ne doit pas prendre en masse au cours du traitement, et rester pompable dans toute l'installation
- Conductivité électrique de la phase continue et des particules, dans la fourchette adaptée au traitement. Usuellement entre 0,1 et 5 S/m. Les produits de très basse conductivité (produits sucrés non acides, par exemple) peuvent toutefois être traités avec des matériels spécifiques.
- La présence de bulles de gaz déstabilise fortement le process. Les particules ne doivent pas dégazer au cours du traitement : il est préférable de blanchir et/ou de dégazer les fruits et légumes en particulier.

Les applications les plus significatives sont des produits stabilisés thermiquement pour conservation à température ambiante avec DLUO de plusieurs mois après conditionnement aseptique :

- Produits pompables non acides (stérilisation flash HTST)
 - Plats cuisinés : viandes, pâtes, légumes, etc. , avec sauce (en particulier produits avec particules moyennes : Chili con carne ; pâtes carbonara...)
 - Légumes cuisinés en sauces (par exemple : ratatouille)
 - Potages et sauces avec ou sans particules
 - Produits laitiers
 - Produits infantiles, « baby food » de sevrage : purées de légumes, plats cuisinés, etc..
- Produits pompables acides (pasteurisation flash HTST) :
 - Fruits avec sirop, en purée, desserts de fruits, « fruits sur sucre » : préparation de fruits comme ingrédients industriels pour l'industrie laitière
 - Sauces acides avec ou sans morceaux (ex. : sauces et concentrés de tomates)
- Produits pompables, pasteurisés flash à plus basse température, puis réfrigérés
 - Tous les produits ci-dessus
 - Ovoproduits liquides (avec géométrie spéciale de l'applicateur ohmique)

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

- Le chauffage ohmique, couplé au conditionnement aseptique, permet la fabrication de produits stables à température ambiante, avec des DLUO de plusieurs mois, pouvant atteindre 24 mois environ.
- Des conditionnements de petite taille (portion unitaire pour un usage « unique », et /ou adaptés à l'usage familial par le consommateur : brique de potage 1 litre ou ½ litre par exemple) autorisent une utilisation facile avec un minimum de perte.
- Le produit étant généralement stérilisé, il est de fait parfaitement décontaminé à l'ouverture, et sa conservation réfrigérée après ouverture est donc facilitée et assez durable, surtout si un dispositif de bouchage refermable par l'utilisateur prévient au moins partiellement les recontaminations excessives lors de ce stockage (limité à quelques jours) dans le réfrigérateur du consommateur.

Ces caractéristiques contribuent à limiter le gaspillage.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le chauffage ohmique vient en alternative, pour certains produits, aux technologies thermiques traditionnelles de fabrication des conserves par procédés classiques : produits préemballés dans leur emballage final étanche, puis traités en autoclaves.

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs sont :

- Des possibilités d'innovation en termes de nouveaux produits et de nouveaux packagings. Le chauffage ohmique continu de produits pompables étant couplé à un conditionnement aseptique, les capacités d'innovation doivent être étudiées en tenant compte des possibilités de conditionnement des produits.
- L'obtention de produits moins cuits, aux qualités nutritionnelles et organoleptiques améliorées par rapport aux conserves classiques : obtention de la stabilité biologique (avec généralement des Valeurs Stérilisatrices ou Pasteurisatrices assez élevées) tout en limitant l'impact de cuisson sur les produits.
- Des traitements très rapides et en continu de A à Z (conditionnement compris) autorisant une productivité industrielle optimale, des cadences élevées sur de gros volumes.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Le risque sanitaire lié au procédé de chauffage ohmique est surtout dû :

- A la maîtrise de l'homogénéité du traitement thermique dans l'ensemble du produit. Le profil de vitesse dans le tube où s'écoule le produit doit être pris en compte pour calculer le temps de séjour minimum, et donc la Valeur Stérilisatrice minimale appliquée (y compris à cœur des particules). *Toutefois ce procédé HTST autorise l'application de Valeurs Stérilisatrices ou Pasteurisatrices nettement plus élevées qu'avec un procédé classique, ce qui laisse une marge de sécurité sanitaire assez large.*
- A la maîtrise indispensable des phénomènes d'électrolyses : électro-corrosion des électrodes d'application, où la densité de courant et de champ électrique sont très élevés. L'utilisation de **courant alternatif à haute fréquence** (> 10 KHz) supprime le phénomène parasite d'électrolyse, ce qui permet d'utiliser des électrodes annulaire à passage total en inox ordinaire pour contact alimentaire. Aucune électro-corrosion n'est observée.

Le contexte réglementaire n'est pas contraignant :

Le traitement thermique par chauffage ohmique continu ne fait pas l'objet de réglementation particulière en UE. Le mode de génération de la chaleur par effet Joule ne présente pas de caractéristiques particulières.

- Aucun autre effet, ni synergie avec d'autres phénomènes que la destruction purement thermique, ne sont revendiqués comme à l'origine de la décontamination microbiologique du produit (notamment aucun effet « électrique » spécifique sur les microorganismes)
- Des applications industrielles (plats cuisinés, produits de fruits) étaient déjà en usage en UE avant 1997 : le procédé est antérieur à la mise en application de la réglementation « Novel Food ».
- Les nouvelles générations d'équipements industriels à haute fréquence électrique ont apporté la solution aux phénomènes d'électrolyse des électrodes.

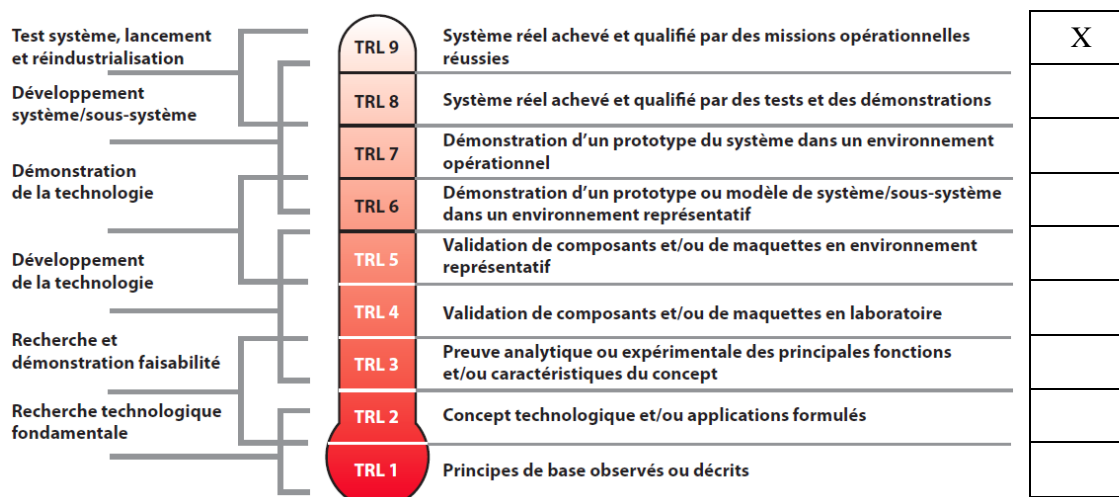
Aucune autorisation administrative n'est requise préalablement à l'utilisation du procédé.

2.2 Maturité de la technologie

La technologie du chauffage ohmique est déjà mature et en usage industriel très large pour de nombreux produits, notamment les lignes de traitement des préparations de fruits et les potages. En parallèle, la recherche et la mise au point de produits se poursuivent principalement dans les centres

techniques et sur les plateformes d'essais des équipementiers (peu nombreux à maîtriser cette technologie), afin d'élargir les applications possibles dans une fourchette plus large de conductivité électrique, principalement pour les produits très peu conducteurs (produits sucrés, émulsions, produits gras).

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Freins techniques actuellement identifiés, pour le développement du chauffage ohmique :
(voir également la fiche « conditionnement aseptique » pour ce qui relève des opérations en aval du process thermique)

- Peu de diversité de l'offre pour les solutions de pompage produit : seules des pompes à doubles pistons, assez onéreuses, sont pour le moment proposées.
- Les difficultés pour mesurer de façon fiable, maîtriser et le cas échéant, ajuster, les conductivités électriques des différentes phases.

Freins économiques :

Le coût d'investissement des lignes de chauffages ohmique + conditionnement aseptique est assez élevé. Ce choix représente de plus une réelle rupture technologique et culturelle (formation indispensable et complexe des personnels), pour les industriels pratiquant la fabrication traditionnelle des conserves. Notamment l'utilisation de la conductivité électrique des aliments comme paramètre de process. Le simple remplacement d'échangeurs tubulaires classiques par un dispositif ohmique, pour des entreprises maîtrisant déjà le conditionnement aseptique, est plus courant. En revanche, le saut qualitatif obtenu pour les produits peut être très important, ce qui représente une plus-value notable.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant déjà considérée comme mature (indice TRL = 9), son développement actuel et futur repose essentiellement sur :

- (i) Sa compétitivité économique, plus exactement le rapport bénéfice/coût associé, principalement impacté par le coût élevé des investissements machines,
- (ii) La résolution des difficultés techniques identifiées, notamment la formulation des produits complexes avec particules en utilisant la conductivité électrique des produits.

Les quelques freins techniques encore identifiés ne sont pas insurmontables.

→ Le développement industriel régulier de cette technologie devrait se poursuivre.

Les recherches à venir pour les 10 prochaines années pour faire évoluer la technologie et diversifier les applications, porteront principalement sur :

- Les techniques de formulation des produits
 - Utilisation de texturants hydrocolloïdes pour la formulation des phases continues
 - Modification volontaire de la conductivité électrique des phases.
- Les technologies de pompage, transfert, dosage des produits complexes

2.5 Principaux acteurs

Equipementiers proposant des lignes industrielles en UE :

- EMMEPIEMME (Italie)
- SIMACO (Italie)
- OPAL (France)
- GEA (France)



Figure 2 : Cubes de fruits pasteurisés par Chauffage ohmique (pêches, fraises)



Figure 3 : Installation de chauffage ohmique Multi-étage (source : Emmepiemme)

N.B. : Les industriels IAA utilisant le procédé de chauffage ohmique ne communiquent généralement pas sur ce procédé et souhaitent rester anonymes.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Recherche et développement :

Le chauffage ohmique est un sujet de recherche très important pour les équipes universitaires spécialisées en Génie Industriel Alimentaire et en nutrition appliquée, notamment en France, pour les aspects théoriques : modélisation des écoulements et du procédé de chauffage, optimisation, génie électrique, ainsi que pour l'amélioration des qualités nutritionnelles des produits végétaux et des aliments infantiles.

- AgroParisTech - UMR GeniAL , en collaboration avec le CTCPA

- Université Montpellier II (Equipe de Jean Pierre Pain)
- Centre de recherche EDF des Renardières.

Quelques centres techniques (dont le CTCPA) et universités, disposent de matériels de chauffage ohmique pour des applications sur produits alimentaires, et assurent la mise au point des procédés/produit pour les industriels.

3- Impact environnemental

Le chauffage ohmique, traitement vrac continu des produits, à fonctionnement 100% électrique avec un rendement énergétique très élevé et peu de pertes thermiques, est particulièrement économique en énergie (Alfa Laval : 3000 kg/h, 3*60kW) et donc plutôt favorable en termes d'empreinte CO₂ lorsque rapporté au kg de produit fini transformé

Les étapes de Nettoyage En Place des équipements tubulaires continus sont généralement consommatrices d'importantes quantités d'eau et génèrent des effluents en quantité importante. *Toutefois une des caractéristiques spécifique du chauffage ohmique, l'absence de paroi chaude limitant l'encrassement, permet d'espacer et de simplifier les nettoyages réalisés au moyen de détergents alcalins.*

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de chauffage ohmique a obtenu une note de 1.5 pour l'indice « Coût environnemental » par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	1.5

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

De manière générale, les consommateurs ont des avis partagés concernant la décontamination des aliments par chauffage ohmique. Cette technique est perçue comme étant « high-tech » et « non naturelle ». Les consommateurs craignent que le chauffage ne réduise les qualités nutritionnelles des aliments et que la décontamination soit incomplète. Néanmoins, si cette technique permet de réduire, ou encore mieux, remplacer totalement les conservateurs chimiques alors elle pourrait être acceptée en remplacement des technologies qui utilisent des conservateurs chimiques. On rappellera que la réglementation n'oblige pas à mentionner l'utilisation du chauffage ohmique sur les produits.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Un nombre de lignes ohmiques relativement réduit est installé en France. Le secteur est assez concurrentiel et demande des grandes compétences techniques pour l'utilisation industrielle et la mise au point des produits / process.

Le marché semble prometteur car le chauffage ohmique est de plus en plus connu et la technologie est facile à promouvoir. Le prix devrait diminuer grâce à une augmentation des volumes et une standardisation des machines.

Le marché semble prometteur car le chauffage ohmique est de plus en plus connu et la technologie est facile à promouvoir. Le prix devrait diminuer grâce à une augmentation des volumes et une standardisation des machines.

Rentabilité économique

Les lignes industrielles de traitement continu + conditionnement aseptique sont très coûteuses à l'investissement mais permettent des cadences de production très élevées, en fonctionnement 24/24 sur des durées longues, en particulier pour le chauffage ohmique.

Il n'y a pas de données précises disponibles car la technologie représente une part du marché encore trop faible. Les moyennes ne seraient pas pertinentes : les machines sont souvent fabriquées à façon pour les clients.

Les coûts de fonctionnement sont très variables suivant les applications mais réputés moindres par kg de produit par rapport aux applications en batch pour des produits de nature et qualité équivalente. Il s'agit toutefois d'une donnée économique stratégique, donc gardée secrète.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de chauffage ohmique :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Qualité organoleptique - Augmentation de la DLUO - Réduction du gaspillage - Augmentation de la productivité - Réglementation - Faible impact sur l'environnement 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compétences techniques - Lourd investissement
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Standardisation des machines - Diversification des applications - Couplage avec le conditionnement aseptique 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> -

Le chauffage ohmique présente un fort avantage en termes d'augmentation de la stabilité du produit quand il est couplé au conditionnement aseptique. Ce couplage permet notamment de nombreuses possibilités d'innovations en termes de packaging. Par ailleurs, le traitement en continu autorise des cadences élevées, soit un gain de productivité. La technologie est mature et en plein développement industriel. La réglementation favorable et le faible impact environnemental sont autant d'atouts pour la poursuite du développement de la technologie et la diversification des applications. Cependant, aujourd'hui, le nombre d'industriels encore trop faible n'autorise pas la standardisation des machines, soit la réduction du prix d'investissement (machines vendues à façon).

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

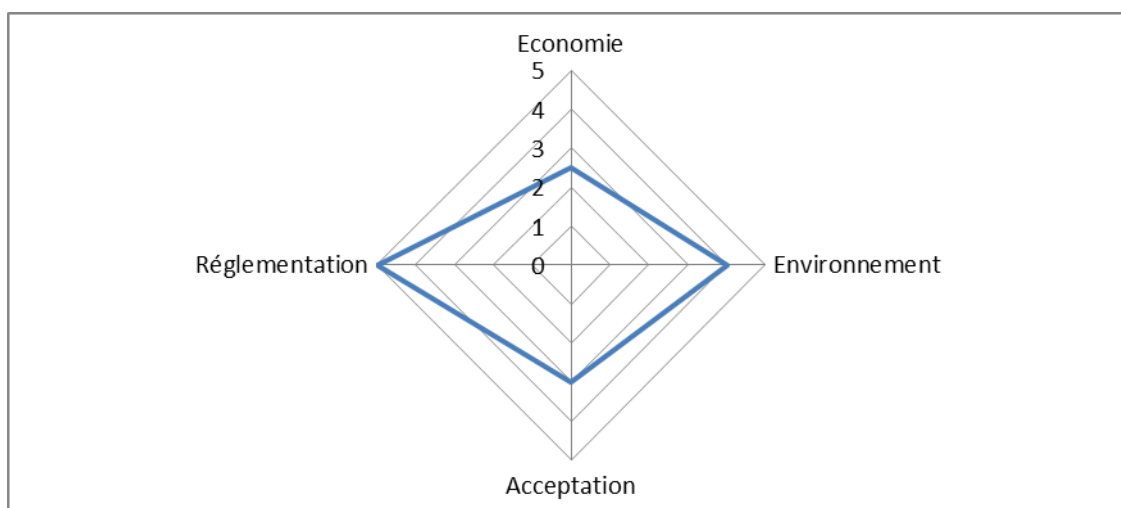


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

LUMIERE PULSEE - ILHDE

Intitulé complet : Lumière Pulsée, ou Impulsions Lumineuses à Haute Densité d'Énergie (ILHDE)

Données-clés

Résumé

Le traitement par Lumière Pulsée ou ILHDE (Impulsions Lumineuses à Haute Densité Énergétique) consiste à décontaminer une surface au moyen de flashes de lumière blanche de très haute intensité, générés par des lampes au xénon. Il permet la décontamination de surface des emballages et de matériels en contact alimentaire, la décontamination de surface d'aliments, la décontamination des liquides clairs ou peu colorés et la détoxification des molécules chimiques. Par son action décontaminante à froid et en surface des aliments, le procédé permet d'allonger significativement la DLC des produits préemballés tout en réduisant l'utilisation de certains conservateurs. Il s'applique aux aliments crus et/ou fragiles, produits tranchés et reconditionnés (charcuteries, fromages, produits de panification). Le procédé ILHDE peut facilement s'intégrer dans des lignes de fabrication existantes. De plus, rapportés aux coûts de production, l'investissement d'un équipement ILHDE et les consommables associés sont très abordables.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie ILHDE

Le procédé de décontamination par Lumière Pulsée, désormais désigné sous le terme **impulsions lumineuses à haute densité d'énergie**, ou ILHDE, consiste à décontaminer une surface (d'un emballage, d'un matériel ou directement d'un aliment), à décontaminer un liquide clair ou peu coloré, ou à détruire une molécule chimique (mycotoxine par exemple) au moyen de flashes de lumière de très haute intensité, générés par des lampes au xénon. C'est un procédé de décontamination microbiologique et de détoxification athermique.

Dans ce procédé 100% électrique, l'énergie est accumulée dans des condensateurs de stockage. Le courant à haute tension ainsi accumulé est déchargé très rapidement sous forme d'impulsions très brèves, et initie la formation d'un arc dans un gaz ionisé : lampes au xénon, gaz qui a la capacité de convertir l'énergie électrique en énergie lumineuse. L'arc génère ainsi un flash de luminosité intense : la puissance instantanée (pic d'un flash) est d'environ 10 MW (ou 10 kW/cm²/flash). L'énergie déposée sur la surface éclairée (fluence ou énergie de surface) s'exprime en Joule/cm².

La fréquence des flashes est ajustée en fonction de la vitesse de défilement des objets à traiter devant les lampes, par exemple : 2Hz ou 2 flashes par seconde.

La cavité optique est composée :

- d'une lampe protégée par une gaine fabriquée en quartz, afin de laisser passer les rayons UV
- de réflecteurs en aluminium, spécifiquement conçus pour chaque application et qui permettent de contrôler et de focaliser les flashes.



Figure 1 : Lampe xénon (500 x 140 mm)

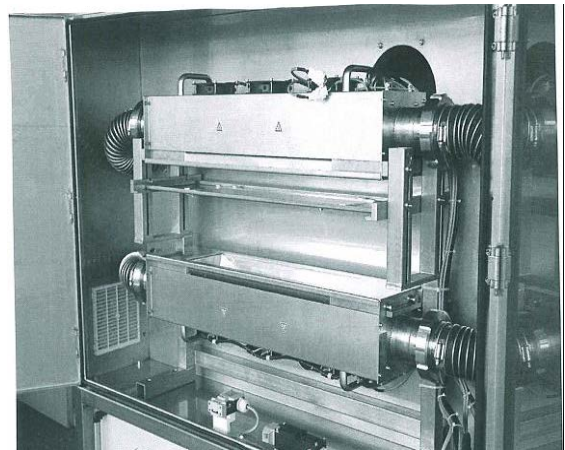


Figure 2 : Pilote du fabricant Montena
(Source : CTCPA)

Le flash présente un spectre large (UV, visible et IR) de lumière blanche, la durée du flash est de 100 à 500 μ s, ce qui délivre et concentre une grande quantité d'énergie en surface du produit traité.

Cette forte densité énergétique permet d'obtenir la décontamination de surface.

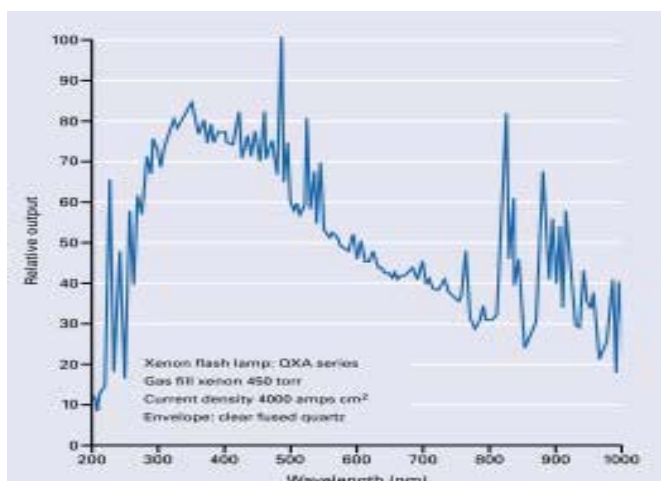


Figure 3 : Spectre large de lumière émise par une lampe xénon (Source : CTCPA)

Sur le pilote ILHDE de la société Montena, la lampe au xénon (500 x 140 mm) émet des impulsions de lumière de longueurs d'onde comprises entre l'ultraviolet et le proche infrarouge : environ 27 % d'ultraviolets (UV de 190 à 400 nm), 43 % de lumière visible (400 à 800 nm) et 30 % d'infrarouges (800 à 1200 nm). La lumière émise par le procédé lumière pulsée est 100 000 fois plus intense que la lumière émise par le soleil à la surface de la Terre.

Comparatif UV continu / ILHDE

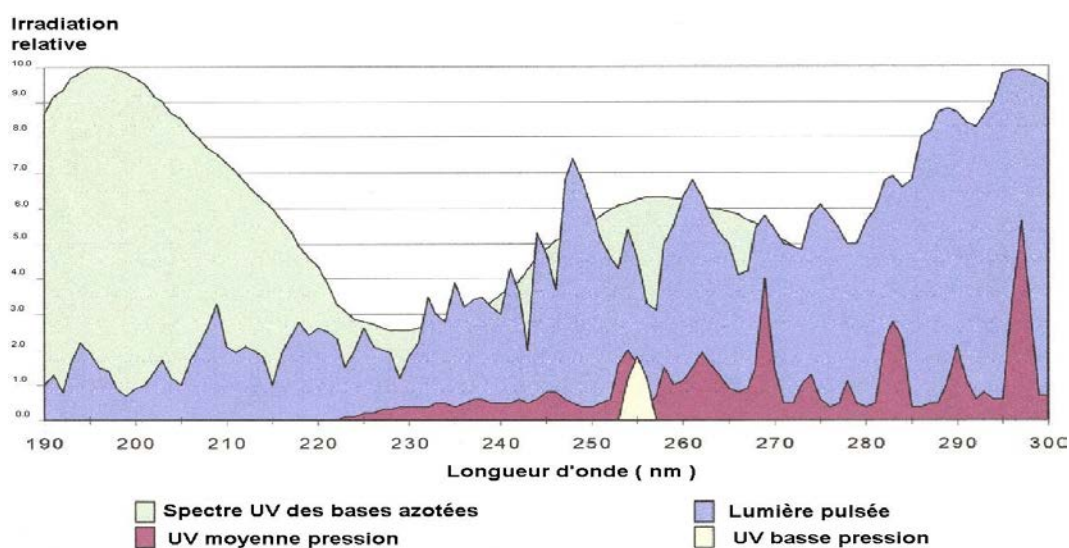


Figure 4 : Spectres comparés des lampes à mercure (UV basse et moyenne pression) et des lampes xénon dans la bande UV

Les caractéristiques du procédé ILHDE :

- Durée du flash : 100 à 500 μ s
- Energie maxi du flash : 1 800 J / flash
- Fluence (énergie transmise à l'objet éclairé) : 0,1 à 5 J / cm^2
- Puissance crête : 10 MW
- Fréquence de répétition : 0,5 à 3Hz
- Rendement énergétique : 60 % de l'énergie électrique est convertie.

Actions de la lumière pulsée sur les micro-organismes

La destruction des microorganismes par la lumière pulsée s'explique par un double mécanisme :

- **Mécanisme photochimique** : le spectre d'absorption de l'ADN est au maximum entre 190 et 305 nm, ce qui correspond aux UV émis par la lumière pulsée. Ce niveau d'énergie appliquée induit des dommages irréversibles sur les acides nucléiques et sur les systèmes enzymatiques de réparation de l'ADN.
- **Mécanisme photo-thermique** : la partie visible et surtout infrarouge du spectre provoque une élévation instantanée et très localisée de la température ($> 200^\circ\text{C}$) en surface, durant quelques microsecondes seulement, dénaturant la membrane plasmique et la paroi cellulaire des cellules microbiennes et ce sans transfert thermique excessif vers le produit.

Cette technologie agit ainsi sur une large gamme de microorganismes : bactéries, levures, moisissures, virus, mais aussi dans certaines configurations sur les parasites et les larves d'insectes.

Quelques exemples de germes sur lesquels l'efficacité est démontrée :

- *Klebsiella terrigena*
- *Salmonella enteritidis*
- *Cladosporium sp.*
- *Escherichia coli*
- *Escherichia coli O157:H7*
- *Listeria monocytogenes*
- *Cryptosporidium parvum*
- *Legionella*
- *Penicillium sp.*
- *Botrytis cinerea*
- Virus (poliovirus et rotavirus)
- Les spores de *Bacillus atropheus* ; *Geobacillus stearothermophilus* ; *Bacillus cereus* ; *Bacillus pumilus* ;
- Les spores d'*Aspergillus niger*

Par ailleurs les **impulsions lumineuses dénaturent par oxydation** des molécules organiques types « COV », des résidus phytosanitaires, des toxines et mycotoxines produites par les moisissures *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* (patuline, DON, ZEA, aflatoxines, fumonisines, etc...) ¹⁶

Les équipements ILHDE de nouvelle génération sont caractérisés par :

- Une électronique de puissance fiable et stable dans le temps,
- L'amélioration des fluctuations ou incertitudes temporelles entre la décharge électrique et l'impulsion lumineuse,
- Une meilleure reproductibilité des traitements,
- Un spectre de lumière émise large et équilibré,
- Des impulsions lumineuses pouvant atteindre 5 J/cm²/flash.

Action de la lumière pulsée sur les matrices alimentaires

La lumière pulsée ne pénètre que peu profondément dans les aliments solides, qui sont généralement opaques. Les UV pénètrent sur 1 à 2 µm de profondeur (ce qui est suffisant pour détruire les microorganismes présents en surface, mais aucune décontamination dans la masse du produit n'est à attendre...). La fraction visible et infrarouge pénètre elle plus profondément, jusqu'à quelques millimètres.

Les mécanismes photochimiques mis en œuvre peuvent avoir une faible action photo-oxydante sur les nutriments. Il convient de valider l'absence d'effet indésirable (voir le point 2.1).

Dans la pratique il est observé que l'application de lumière pulsée limite efficacement ces réactions d'oxydation. Cette différence entre le système lumière pulsée et les systèmes de traitements sous lumière UV en continu peut être expliquée par la courte durée de l'impulsion (en moyenne moins de 500 microsecondes) ainsi que la demi-vie des liaisons excitées (10⁻⁹ à 10⁻⁴ seconde) ce qui empêche un couplage efficace avec l'oxygène libre ou dissous. De plus, les réactions d'oxydation sont limitées car le nombre d'impulsions flash est faible (1 à 3) lors d'un traitement usuel.

Applications et aliments concernés

En IAA, quatre types d'applications très différentes sont développés :

1. Décontamination de la surface des emballages et de matériels en contact alimentaire
2. Décontamination de la surface d'aliments
3. Décontamination des liquides clairs ou peu colorés

¹⁶ Brevet Alain Mimouni 2009 - Détoxification des mycotoxines sur grains et fruits – INPI N°2941848
http://fr.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=FR&NR=2941848A1&KC=A1&FT=D&date=20100813&DB=fr.espacenet.com&locale=fr_FR

4. Détoxification des molécules chimiques (COV et toxines)

(1) Applications concernant la décontamination de surfaces de matériaux, en particulier emballages en vue d'un conditionnement aseptique

Cette application permet, dans un environnement microbiologiquement contrôlé (équipement totalement clos balayé par un flux d'air filtré stérile), de décontaminer, sans produits chimiques, à froid et en ambiance sèche, les **faces externes et internes des emballages** (notamment bols et barquettes, et films supérieurs d'opercule) avant remplissage et fermeture. Ce dispositif intervient ainsi en conditionnement ultra-propre ou aseptique (voir également la fiche « Conditionnement aseptique »).

Ce procédé est plus particulièrement intéressant pour la décontamination d'objets en plastique moulé (bouchons en PE destiné à fermer des conditionnement type poches ou gourdes, et les bouteilles) supportant très mal un traitement thermique, ou difficiles à traiter au moyen d'un traitement chimique biocide humide, et difficiles à sécher après un tel traitement. Le coût du traitement est très faible : maximum 0,1 €/ m² de surface décontaminée.

Décontamination de bouchons vissables

Pour cette application, le cadre réglementaire est celui des matériaux d'emballage. Il convient de s'assurer que le traitement ILHDE n'induit pas de modifications du matériau susceptibles de provoquer des migrations indésirables, notamment de monomères ou de produits de dégradation ou néoformé.

Exemples d'efficacité observée par procédé ILHDE :

Stérilisation d'un emballage : film plastique PA / PE

Inoculum : *Bacillus atropheus*, 10⁶ spores / cm²

Densité d'énergie : 2,2 J / cm² /flash ; distance lampe / surface : 30 mm

→ Réduction décimale en fluence Df = 0,29 J / cm²

→ Niveau de réduction microbienne obtenu : > 6 log

Stérilisation de capsules aluminium

Inoculum : *Aspergillus niger*, 1,8 10⁶ ascospores / capsule

Densité d'énergie : 2,2 J / cm² /flash; distance lampe / surface : 30 mm

Niveau de réduction microbienne obtenu : > 6 log

(2) Applications concernant la décontamination de surfaces des aliments

Le produit alimentaire peut être traité en vrac (poudres en fines couches < 4 mm d'épaisseur, graines et semences) ou en défilement sur un tapis, ou même à travers son emballage s'il est transparent aux UV (par exemple pâtisseries type madeleines en sachet PP).

Les matériaux d'emballage suivants, sous forme de fils minces, permettent le traitement à travers l'emballage : PE (LD, HD ou LLD), PP, Polybutylène, EVA, PA et EVOH).

La décontamination n'étant obtenue que sur la surface éclairée, la géométrie des applicateurs, des réflecteurs entourant les lampes, la disposition des lampes flash, la distance lampe / produit, etc., sont les paramètres clefs de ce type d'application.

De nouvelles applications sont proposées pour le traitement continu de liquides transparents circulants dans un tube en quartz laissant passer la bande UV.

La lumière pulsée permet de décontaminer, à froid, en ambiance sèche, en procédé continu sur ligne, la surface de nombreux types d'aliments. Toutefois, encore peu d'applications industrielles ont été validées et mises en œuvre. **L'éligibilité des aliments au traitement par lumière pulsée est principalement fonction de leur présentation physique et de leur géométrie** : au moins 80% des surfaces contaminées doivent pouvoir être « présentées » sous les lampes, dans une enceinte fermée et sans intervention humaine, c'est-à-

dire en flux continu et automatiquement ; en pratique dans un dispositif tunnel. **Chaque cas est donc à examiner séparément pour évaluer cette faisabilité.**

Produits alimentaires pouvant potentiellement être décontaminés par lumière pulsée :

- tout type d'aliments solides **pouvant être éclairés de façon régulière**. Le procédé s'applique particulièrement aux produits, qui présentent de larges surfaces planes : charcuteries, fromages, produits de panification et de viennoiseries, etc...
- tous types d'aliments dont la contamination est principalement localisée en surface, et dont l'altération est principalement initiée depuis leur surface : viandes et poissons frais, fruits et légumes frais, etc...

Parmi les applications décrites et validées jusqu'à l'application industrielle, la principale est la **décontamination de produits de panification et viennoiseries industrielles, tranchés ou non, préemballés**. Ces produits à $A_w > 0,8$ sont propices au développement de moisissures, qui constituent le facteur limitant leur DLC.

Le procédé de décontamination de surface par ILHDE permet de sécuriser, voire augmenter la DLC des produits. C'est une substitution à la pulvérisation d'éthanol, et il permet la réduction de l'utilisation de certains conservateurs. La DLC après traitement est supérieure à 40 jours pour les produits très moelleux ($A_w > 0,95$), en maîtrisant la contamination de surface par les germes d'altération (*Aspergillus niger* et *Pichia anomala*) de ces produits de panification.

Décontamination du pain par Lumière pulsée et tranchage sans confinement

Densité d'énergie : 3 J / cm² /flash ; Distance lampe / surface du pain : 30 mm

Augmentation de la DLC : 14 jours → 5 mois

Décontamination de mini cakes préemballés individuellement en sachets plastiques PE

Densité d'énergie : 2,2 J / cm² /flash ; Distance lampes / produit : 30 mm

Augmentation de la DLC : 26 jours → 6 mois

Remarque :

L'Afssa a émis un avis favorable en janvier 2008 ([Afssa – saisine n°2008-SA-0289](#)) pour le traitement par lumière pulsée des produits de panification et de viennoiserie.

Ces produits traités par lumière pulsée ne sont pas considérés comme de nouveaux aliments et ne sont pas soumis aux dispositions du règlement «Novel Food».

Autres applications décrites :

Décontamination du jambon, avant tranchage et conditionnement sous isolateur

Densité d'énergie : 9 J / cm² ; distance lampes / surface : 80 mm

→ Augmentation de la DLC : > 26 jours

Décontamination extérieure des coquilles des œufs avant casse industrielle :

Inoculum : *Bacillus subtilis*, 7 10⁶ spores / coquille

Densité d'énergie : 9 J / cm² ; distance lampes / coquilles : 150 mm

→ Niveau de réduction microbienne obtenu : > 6 log

(3) Applications concernant la décontamination des liquides clairs et peu colorés

Le procédé ILHDE peut également être utilisé pour la décontamination des liquides clairs et peu colorés. Le liquide à traiter circule alors dans un tube de quartz, la lampe xénon étant généralement disposée autour du tube.

Les liquides pouvant être traités sont des liquides comme les jus de fruit clairs, les liquides clairs (notamment ceux renfermant des principes actifs fragiles thermiquement), les eaux de forages (pour leur potabilisation) et différentes eaux de process utilisées en IAA.

En particulier, certains effluents agroalimentaires pourraient être recyclés en intégrant un traitement ILHDE pour limiter la consommation en eau tout en conservant une qualité microbiologique correcte pour l'usage qu'il en est fait.

(4) Applications concernant la détoxification de molécules chimiques

Les moisissures et leurs mycotoxines sont des contaminants naturels des produits céréaliers (blé, maïs, sorgho, etc...). Les mycotoxines peuvent être présentes sur les graines de céréales au champ ou bien être produites lors du stockage, de façon très variable. En raison de leur grande stabilité, les mycotoxines peuvent être retrouvées dans les aliments même après leur transformation.

La technologie ILHDE a démontré son efficacité pour la détoxification de molécules comme les mycotoxines. Cette application concerne particulièrement le secteur des céréales et des produits à base de pommes (contamination par la patuline) ou la teneur en mycotoxines est réglementée aussi bien pour l'alimentation humaine que pour l'alimentation animale.

Par ailleurs, le procédé ILHDE semble également pouvoir dégrader les résidus phytosanitaires (Baranda *et al*, 2012)

1.3 Impact sur le gaspillage alimentaire

Par son action décontaminante en surface des aliments, le procédé ILHDE permet d'allonger significativement la DLC des produits préemballés, y compris certains aliments pour lesquels aucun traitement thermique n'est techniquement possible : aliment crus et/ou fragiles, produits tranchés et reconditionnés (charcuteries, fromages, produits de panification). Ces produits représentent la majorité des applications économiquement intéressantes.

A titre d'exemple, une DLC allongée avant ouverture et une meilleure qualité microbiologique à l'ouverture autorisent une meilleure gestion des flux et des stocks, et limitent ainsi les gaspillages au niveau de la distribution et du consommateur. (Voir les exemples de décontamination obtenus et DLC correspondantes, décrits ci-dessus).

Les applications de décontamination d'emballages vides avant remplissage s'inscrivent dans la réflexion sur l'amélioration des techniques de conditionnement aseptique ou ultra-propre.

Une décontamination des emballages contribue à la maîtrise et à l'allongement de la durée de vie des produits conditionnés, puis réfrigérés (ou non), ce qui contribue à limiter le gaspillage.

1.4 Comparaison avec l'existant

Le procédé de décontamination des aliments par lumière pulsée est classé parmi les procédés innovants. La possibilité de décontaminer des aliments en surface, à froid, en ambiance sèche et par un procédé purement physique, mais non thermique, est une technologie de rupture.

Il ne peut être comparé avec aucun autre traitement du fait de ses spécificités, et vient non comme une alternative à des procédés existants, mais plutôt en complément des techniques de préservation des aliments déjà existantes, dans une démarche « *hurdle technology* », c'est-à-dire de combinaison de technologies :

- de formulation,
- de traitement avant conditionnement,
- de packaging,
- puis en fin de traitement final après packaging...

... chacune apportant un effet intéressant se combinant et se cumulant avec les autres (effet synergique).

Ce procédé vient ainsi en complément d'autres technologies plus impactantes pour le produit et également efficaces, mais moins bien acceptées par les consommateurs (ionisation, utilisation d'additifs, etc..).

Dans le cas, par exemple, des produits de panification traités par lumière pulsée, une DLC longue peut être obtenue tout en permettant de réduire la pulvérisation d'éthanol en surface.

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs sont :

- Une garantie sanitaire améliorée : destruction efficace des flores pathogènes et d'altération présentes en surface
- Des DLC allongées pour ces produits réfrigérés ou non.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Pour évaluer le risque sanitaire, il faut bien distinguer les deux types d'applications.

- Décontamination de surface des emballages

→ Le risque sanitaire lié au procédé est surtout dû à l'éventuelle résistance des différentes flores pathogènes, résistance au procédé qui est généralement peu ou mal documentée.

Une approche expérimentale au moyen d'indicateurs biologiques (inoculum de flores microbiennes déposées sur des échantillons du matériau à traiter) est indispensable pour mettre au point les process.

Le risque sanitaire est également lié aux problématiques d'alimentarité des matériaux : il faudrait valider l'absence d'impact du traitement sur les migrations globales et spécifiques pour les matériaux au contact des denrées alimentaire.

Les données actuelles montrent que le procédé ILHDE ne génère pas d'impact indésirable jusqu'à une fluence cumulée de 10 J/cm².

- Décontamination de la surface des aliments

→ Le risque est également de deux natures.

1) Risque microbiologique

- Risque de résistances spécifiques, mal connues, de flores pathogènes au traitement ILHDE. L'identification et l'émergence de souches bactériennes potentiellement résistantes au traitement est possible. Ce phénomène est toutefois peu probable car les mécanismes enzymatiques de réparation de l'ADN sont détruits par le traitement ILHDE.
- Grande variabilité de résistance au procédé, pour les différentes espèces et même différentes souches de microorganismes. A cela s'ajoute les interactions complexes contaminations / matrices. L'intensité du traitement peut être évaluée au moyen d'un Joule-mètre évaluant la fluence en J/cm², toutefois il existe peu de données permettant de relier cette intensité à l'efficacité décontaminante.

Pour ces raisons, une étude systématique de l'efficacité décontaminante du traitement doit être validée produit par produit avec les principaux germes d'intérêt, même si une bibliographie scientifique est déjà disponible étant donné que le sujet est très étudié dans le monde.

2) Risque chimique / nutritionnel

- Risque de destruction locale de nutriments et micronutriments,
- Risque de formation par réactions photochimiques, de composés indésirables.

L'impact de la lumière pulsée sur les caractéristiques biochimiques des aliments et des emballages mérite donc d'être mieux documenté, même si les chercheurs s'accordent sur le fait que les énergies – faibles – mises en jeux, ne favorisent pas la formation de substances néoformées.

- Cadre réglementaire

La lumière pulsée est une technologie innovante qui n'était pas courante avant 1997. A ce titre, elle est soumise au Règlement (CE) n° 258/97 du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 1997 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires. Il convient pour l'industriel de vérifier la présence ou absence de modifications significatives de l'aliment et, le cas échéant, de déposer une demande d'autorisation de l'aliment ainsi traité.

La constitution du dossier technique constitue un frein important pour l'industriel. Ce dernier doit démontrer que le procédé n'entraîne dans la composition ou dans la structure des aliments ou des ingrédients alimentaires :

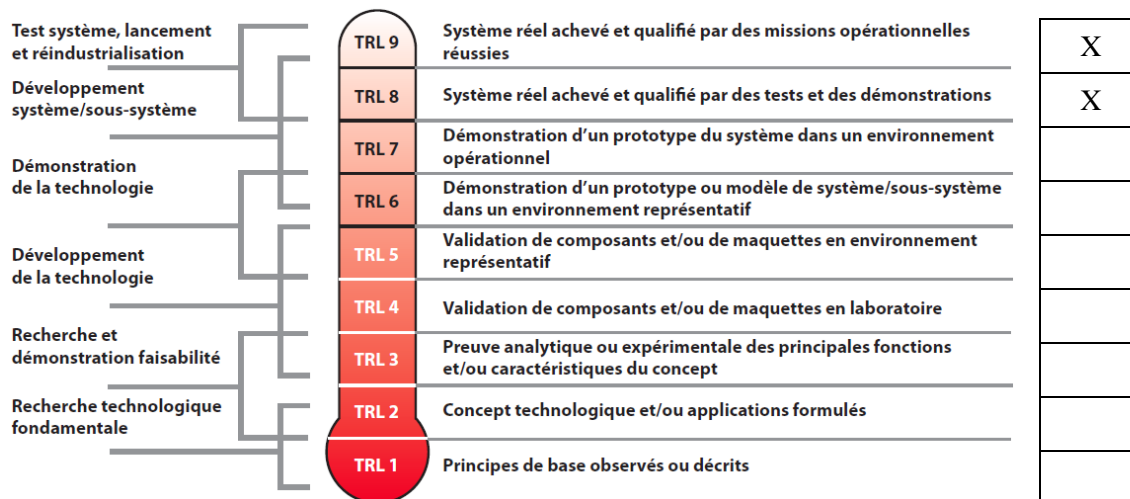
- aucune modification significative¹⁷ de leur valeur nutritive
- aucune modification significative de leur métabolisme
- aucune modification significative de leur teneur en substances indésirables.

Néanmoins, plusieurs agences sanitaires nationales dont l'Anses pour la France, ont rendu des avis favorables ponctuels concluant à l'innocuité et à l'efficacité de traitements par lumière pulsée sur certains groupes d'aliments et leurs emballages (produits de panification par exemple)¹⁸.

Les applications à la décontamination des emballages ne sont pas couvertes par le champ d'application de la réglementation *Novel Food*, qui ne s'applique qu'aux aliments.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie ILHDE est au stade du début d'industrialisation pour les applications aux décontaminations d'emballages, et encore en phase industrielle pour les applications à la décontamination d'aliments.

¹⁷ La notion de **différence significative** doit être comprise au sens statistique classique : les moyennes et les écarts types, des grandeurs analytiques caractéristiques de l'aliment innovant, et de l'aliment de référence, respectivement, permettent de conclure à une différence des moyennes, avec une probabilité de 95%.

¹⁸ <http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AAAT2008sa0289.pdf>

En parallèle, une recherche académique se poursuit, et l'accompagnement des industriels par les Centres Techniques pour développer les produits, valider les process...
Et rédiger les lourds dossiers technico-réglementaires souvent indispensables.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Parmi les difficultés techniques identifiées :

- La mise au point et la validation microbiologique des process de décontamination, la validation des DLC et les challenges tests sont parfois longs et complexes. Le comportement de certaines flores est mal connu. La résistance à l'énergie radiative de la lumière pulsée ne se compare pas simplement avec la résistance thermique ou chimique des flores. Toutefois le mécanisme de destruction agit surtout sur l'ADN, et donc est peu dépendant de la nature des microorganismes.
- Difficulté à appliquer la lumière émise par les flashes, sur toute la surface à traiter. C'est un problème de conception géométrique des applicateurs. **L'homogénéité du traitement en surface pour les aliments ou emballages de géométrie complexe est le point le plus difficile à maîtriser pour cette technologie**
- D'éventuels effets biochimiques indésirables peuvent limiter certaines applications.
- Un inconvénient de la technologie est le risque de bris de quartz. Un système de détection de bris de quartz a été rajouté aux machines il y a 2-3 ans.

Freins réglementaires identifiés :

Il incombe à l'industriel de définir le statut de l'aliment, comme « *Novel Food* ». La constitution des dossiers peut s'avérer longue et coûteuse. Une reconnaissance du procédé ILHDE, comme un « procédé usuel – hors Novel Food » par l'Efsa donnerait un véritable essor à cette technologie.

A noter : la protection des personnels doit être particulièrement soignée au moyen d'un capotage interdisant toute fuite de lumière.

Freins économiques :

Cette technologie n'est pas excessivement chère dans l'absolu, comparée à d'autres techniques innovantes, d'autant plus que le procédé est réalisé en continu, sans contraintes techniques fortes : à froid, à pression atmosphérique, sans effluent, et de façon 100% électrique.

La consommation énergétique reste faible, mais des coûts de fonctionnement notables en maintenance sont à prévoir : la durée de vie des lampes xénon est limitée (généralement garantie en nombre de flash) ainsi que celle des condensateurs d'accumulation électrique.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant déjà considérée comme mature (indice TRL = 8 ou 9), son développement actuel et futur repose essentiellement sur : (i) sa compétitivité économique, (ii) sa facilité d'implantation (y compris réglementaire) et (iii) le rapport bénéfice/coût associé, principalement impacté par le coût des investissements machine, et la nécessité de réaliser des dossiers de validation réglementaire pouvant s'avérer longs et coûteux. Les quelques freins techniques encore identifiés ne sont pas insurmontables, sauf sans doute l'impossibilité technique de traiter correctement et de façon homogène et répétable la surface de certains aliments (géométrie trop complexe ou état de surface non adapté), problème qui pourrait ne pas trouver de solution.

➔ Le développement industriel régulier de cette technologie devrait se poursuivre.

Les recherches à venir pour les dix prochaines années pour diversifier les applications porteront principalement sur :

- Le design de matériel par les équipementiers, permettant des applications à divers types d'aliments notamment les aliments préemballés. En effet, le traitement du produit « nu » avant emballage impose

le recours à des techniques de conditionnement en zone ultra-propre comme par exemple des installations avec un confinement rapproché qui sont généralement très onéreuses.

- L'évaluation quantitative de l'efficacité du traitement sur de nombreuses espèces et souches microbiennes
- Les mises au point d'applications sur produits humides frais préemballés, notamment les fruits et légumes frais. *Applications : augmenter la DLC des produits dits de 1^{ère} gamme améliorée (fruits et légumes non transformés, simplement préemballés)*
- Une amélioration technologique de la durée de vie des matériels : lampes, condensateurs.
- La démonstration de l'innocuité (pas de réaction photochimique indésirable) sur de nombreuses matrices alimentaires.

2.5 Principaux acteurs

Équipementiers proposant des lignes industrielles en UE

Eurofeedback - France <http://www.eurofeedback.com/pages/decontamination/presentation.html>

Claranor - France (en partenariat avec le fabricant de machine de conditionnement Serac)
<http://claranor.com/sterilisation-lumiere-pulsee?lang=fr>

Montena - Suisse
<http://www.montena.com/pulsed-light-technology/home/>

Et aussi :

Xenon Corporation- USA
<http://www.xenoncorp.com/>

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La France possède un savoir-faire reconnu pour la technologie ILDHE et ses applications. Plusieurs équipes universitaires et Centres Techniques sont actifs et connus comme spécialistes du procédé, notamment :

- Agrohall, Evreux - www.agrohall.fr/Technologie.html
- Laboratoire de Microbiologie du Froid, IUT d'Evreux,
- CTCPA, Paris (A. Mimouni et C. Lacoste) – www.ctcpa.org

Des équipementiers de premier plan sont déjà présents en UE, notamment en France, pour les applications à la décontamination des emballages, utilisations qui ne sont pas couvertes par le champ d'application de la réglementation *Novel Food*.

Équipes étrangères les plus significatives

Demirci A, Puri VM. - Department of Agricultural and Biological Engineering, The Pennsylvania State University, PA 16802, USA.

Frank Devliegherea - Laboratory of Food Microbiology and Food Preservation, Department of Food Safety and Food Quality, Ghent University, Coupure Links 653, 9000 Gent, Belgium

Iñigo Martínez de Marañón - AZTI-Tecnalia, Food Research Division, Parque Tecnológico de Bizkaia, Astondo bidea, Edificio 609, 48160 Derio (Bizkaia), Spain

3- Impact environnemental

La Lumière Pulsée est une technologie à fonctionnement 100% électrique. Le procédé consomme peu d'énergie/kg produit, pas de vapeur, peu de fluides en général, et ne génère aucun effluent. L'empreinte CO₂ kg produit reste donc extrêmement modeste.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de Lumière pulsée a obtenu une note de 1.5 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	1.5

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivalait au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

A ce jour, peu de problèmes d'acceptabilité consommateurs ont été rapportés. L'utilisation de rayons UV pour traiter les aliments n'a reçu ni objection ni argument fort de la part des consommateurs. La technologie est mal connue des consommateurs, mais peut être très facilement expliquée et ne semble pas anxiogène.

Les principaux aspects positifs soulignés par les consommateurs ont été : une application unique ainsi que l'absence de traces et de particules chimiques dans le produit. De plus, les rayons UV sont, dans une certaine mesure, considérés comme étant naturels (on en trouve dans la nature).

Les inquiétudes concernent la possible diminution des valeurs nutritionnelles et qualités organoleptiques du produit. Ce traitement semble être issu d'une technologie de pointe, imaginée par l'industrie agroalimentaire, alors qu'elle ne paraît pas indispensable. Enfin, le lien qui existe entre l'exposition aux rayons UV et le développement de cancers soulève quelques questions concernant une application sur des aliments. Des parallèles avec la technologie d'irradiation ont été mentionnés.

5- Dimension économique

Le marché

La lumière pulsée apparait comme une solution alternative aux traitements chimiques. Cette technologie adaptée aux produits alimentaires permettrait de prolonger la DLC des produits et ce jusqu'à une semaine pour les produits traiteurs. De plus, elle est facilement intégrable dans la chaîne de production en continu et compacte (possible d'intégrer même sur ligne existante).

Le marché de la technologie est essentiellement à l'export pour l'instant : sur les 40 machines commercialisées par la société Claranor en 2013, une seule était destinée au marché français. Le marché de cette technologie est peu concurrentiel en termes d'acteurs : la société Claranor se positionne comme leader. D'après cette société, le marché est en croissance. Il est important de noter que les produits de panification ont obtenus une validation *Novel Food* pour le procédé de traitement surface par lumière pulsée, ce qui explique pourquoi la technologie s'est développée uniquement pour le pain. A court terme, la problématique d'investissement général dans le secteur agroalimentaire en France limite l'adoption de la technologie.

Rentabilité économique

Une machine coûte entre 50 000 et 150 000€, soit en moyenne 70 000€ pour une machine. Pour les coûts unitaires la technologie coûte 150€/ million de pots et 25€ million de bouchons sachant que ce coût unitaire inclus les changements de pièce (coût de fonctionnement et maintenance). Concernant les unités industrielles installées dans le secteur de la panification et de la viennoiserie le coût de la technologie est estimé à environ 0,08 €/kg de produit traité, amortissement de l'investissement initial compris.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de Lumière Pulsée :

<p style="text-align: center;">Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Allongement de la DLC - Qualité sanitaire - Multiples applications - Intégration dans le process - Faible impact environnemental 	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Coût des machines
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement du conditionnement aseptique - Refus de conservateur par les consommateurs - Produits de la panification 	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Secteur des IAA en crise

Ce procédé de décontamination de surface applicable aussi bien sur l’emballage que sur les aliments (toutes textures) présente une multitude d’applications. Quand il concerne l’emballage, il constitue une étape de la décontamination aseptique. Bien que la technologie soit assez mature, elle est encore très innovante et soumise à la réglementation Novel Food quand elle s’applique aux aliments. Cela constitue un frein important au développement de la technologie. Néanmoins, la technologie a été validée pour les produits de la panification et devrait se développer dans ce secteur. En outre, la technologie est facilement intégrable au process industriel.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l’impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir des entretiens avec les équipementiers.

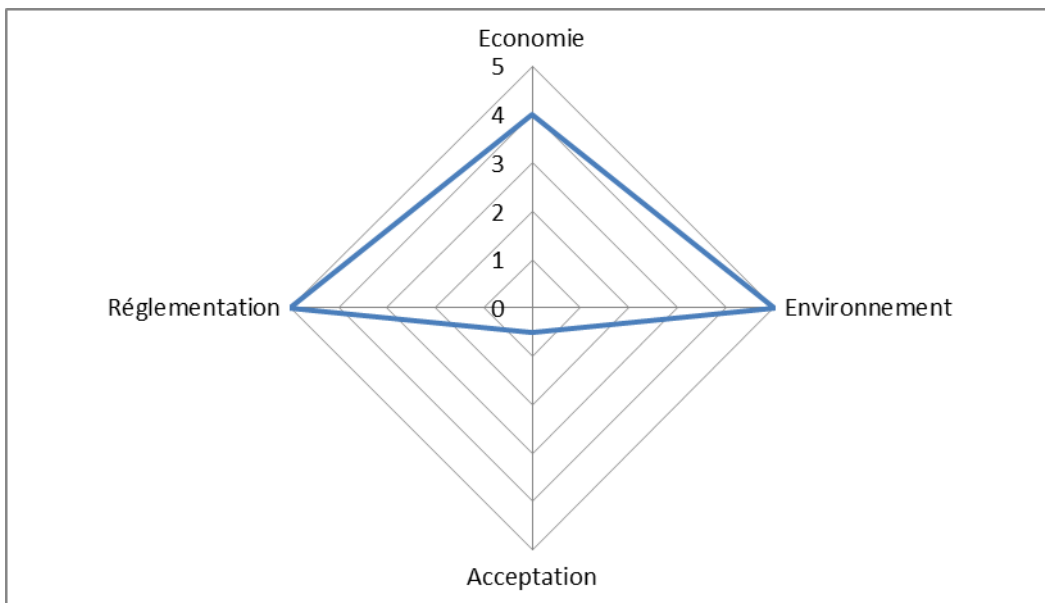


Figure 5 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Réglementation :

Réglementation UE sur les nouveaux aliments : note de synthèse réglementaire EURLEX

http://europa.eu/legislation_summaries/consumers/consumer_safety/121119_fr.htm

Reuves et Etat de l'art – Articles scientifiques

Document de la FDA – Center for Food Safety And Nutrition - Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies -- Pulsed Light Technology

<http://www.fda.gov/Food/FoodScienceResearch/SafePracticesforFoodProcesses/ucm103058.htm>

La lumière pulsée un nouveau procédé de conservation des aliments : revue bibliographique. *Revue Méd. Vét.*, 2007, 158, 6, 274-282

N. ELMNASSER, N. ORANGE, A. BAKHROUF et M. FEDERIGHI

Factors affecting microbial inactivation by pulsed light in a continuous flow-through unit for liquid products treatment. *Procedia Food Science*, 2011 vol1, p 786-791. Artiguez ML, Lasagabaster A, Martinez de Marañon

Comprehensive on-line HPLC-GC for screening potential migrants from polypropylene into food: The effect of pulsed light decontamination as an example Polymer. *Degradation and Stability*, 98 (9), p.1679-1687, Sep 2013. Castillo, Roberto / Biedermann, Maurus / Riquet, Anne-Marie / Grob, Koni,

Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation. *International journal of food microbiology* (2003) 85 p 151-158. Takeshita K, Shibato J, Sameshima T, Fukunaga S, Isobe S, Airhara K, Itoh M.

Aliments et emballages traités en surface par lumière pulsée. *Techniques de l'ingénieur* (2000) F3040 :p1-6. Mimouni A.

Pulsed light for food decontamination: a review. *Food Science & Technology*, 18 (9), p.464-473, Sept 2007. Gómez-López, Vicente M. / Ragaert, Peter / Debevere, Johan / Devlieghere, Frank, Trends in

Ultraviolet processing of liquid food : A review. Part 2 : Effects on microorganisms and on food components and properties. *Food Research International* 44 (2011) 1580-1588. Falguera V, Pagan J, Garza S, Garvin A, Ibarz A

Ultraviolet and Pulsed light processing of fluid foods (2012) Novel thermal and Non-thermal technologies for fluid foods – chapter 8, p 185-223. Gomez-Lopez VM, Koutchma T, Linden K.

Fast atrazine photodegradation in water by pulsed light technology. *Water Research*, 46 (2012) 669-678. Baranda AB, Barranco A, Martinez de Marañon I.

IONISATION

Données clés

Résumé

Procédé de décontamination des aliments par des rayons gamma, rayons X ou des faisceaux d'électrons. C'est un procédé complexe à mettre en œuvre mais très performant, utilisé depuis plusieurs décennies, et largement utilisé dans d'autres secteurs industriels comme technique de stérilisation ou d'amélioration de propriétés de matériaux. L'ionisation est freinée dans son développement en agro-alimentaire, par une réglementation européenne contraignante et une mauvaise perception par les consommateurs souvent insuffisamment informés.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

L'ionisation d'un produit alimentaire peut être gérée de deux façons. Soit en sous-traitance auprès d'une unité de prestation (cas le plus courant en IAA), soit sur le lieu même de production, voire en fin de ligne de production.

1.1 Présentation de la technologie d'ionisation

L'ionisation des aliments (également utilisée pour les emballages) consiste à soumettre les aliments à un rayonnement ionisant. On distingue deux méthodes utilisées industriellement :

- **Les rayonnements électromagnétiques (Gamma ou Rayons X).** Ils sont émis : ,
 - ✓ soit par une source radioactive de Cobalt 60 (rayonnement gamma, énergie moyenne : 1.25 MeV) émettant un rayonnement continu et multidirectionnel et qui est stockée immergée dans une piscine d'eau lorsqu'on ne l'utilise pas,
 - ✓ soit par un accélérateur d'électrons muni d'un dispositif de conversion des électrons en rayons X (Rayons X, énergie maximale : 5 MeV).

Très énergétiques, ces rayonnements pénètrent assez profondément (plusieurs dizaines de cm) dans une matière de densité 1.

- **Les faisceaux d'électrons** (Energie maximale : 10 MeV)

Ils sont produits par un accélérateur d'électrons (fonctionnant à l'électricité) : électrons produits par une cathode puis accélérés dans un générateur à champ électrique statique ou dynamique. Ce faisceau est unidirectionnel, il peut être obtenu et éteint à volonté, mais de par sa nature corpusculaire, celui-ci est beaucoup moins pénétrant et donc plutôt réservé aux traitements de produits fins ou peu denses.

Dans les deux cas, le rayonnement arrache des électrons périphériques des atomes constitutifs du produit, c'est l'ionisation.

N.B. : Ce type de rayonnement est de trop faible énergie pour interagir avec les noyaux des atomes, et aucune radioactivité ne peut être induite par le procédé.

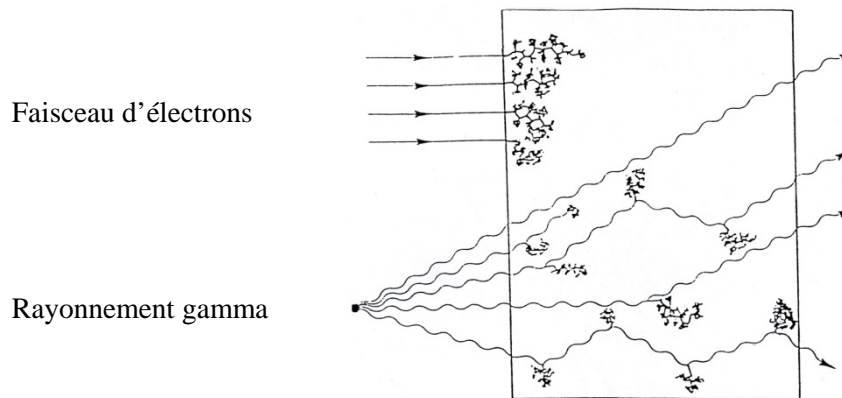


Figure 1 : Rayonnement de la Ionisation

L'effet sur les microorganismes et les organismes vivants est notamment une rupture de liaisons dans l'ADN, ce qui conduit à la mort de la cellule et une décontamination microbienne. Ce procédé est efficace sur les levures, moisissures, bactéries, spores et virus, aux doses autorisées (voir figure ci-dessous). La technologie permet également de mettre fin aux activités respiratoires et métaboliques d'organismes supérieurs : tissus des plantes, parasites, insectes, leurs larves et œufs.

L'échauffement du produit reste très faible : + 2,4 °C pour une irradiation de l'eau à une dose de 10 kGy.

Remarque : Les fruits et légumes frais (tissus vivants, respirants) étant tout ou partie « tués » par le traitement d'ionisation aux doses permettant une décontamination microbienne, les applications aux fruits et légumes crus prête à l'emploi – légumes dit de IVème gamme – et notamment les techniques d'emballage et de mise sous atmosphère modifiées, doivent être généralement repensées car le métabolisme respiratoire des produits est fortement réduit par le traitement.

La dose de rayonnement appliquée lors des traitements est mesurée en Gray (Gy) qui mesure l'énergie absorbée par unité de masse de matière : 1 Gy = 1 J/kg

Dose maximale moyenne admise pour le traitement des produits alimentaires : 10 kGy. Des doses supérieures peuvent également être mises en œuvre après validation dans la limite d'apparition d'impacts technologiques sur le produit en question.

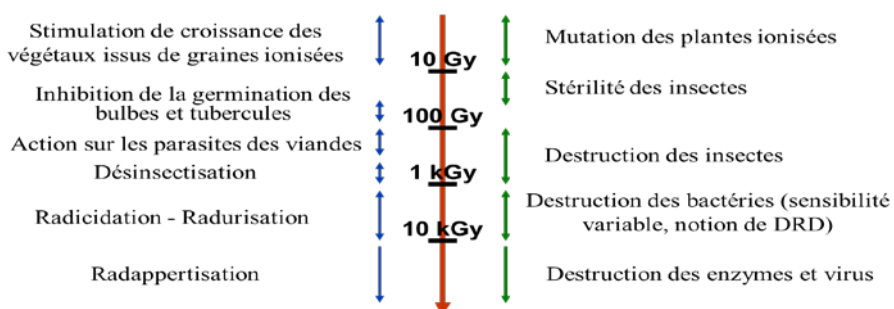


Figure 2 : effets des doses croissantes de rayonnement sur les organismes vivants

Les principales caractéristiques de cette technologie de décontamination (déjà ancienne et assez bien documentée dans la bibliographie), sont :

- Un traitement décontaminant purement physique et non thermique, et donc :

- La possibilité de traiter des aliments ou des emballages des toutes natures, à toutes les températures (dans la pratique : à température ambiante ou à l'état réfrigéré, ou même congelé) ;
 - La possibilité de traiter des aliments déshydratés ;
 - La possibilité de décontaminer le produit à travers son emballage, quelle que soit sa forme et sa nature. Les complexes plastiques multicouches avec aluminium en feuille mince peuvent être traités par rayons gamma comme par faisceau d'électron ou Rayons X. La taille des objets traités est limitée par la pénétration des rayonnements et par la dose maximale admissible en surface comme dans tout le volume du produit traité.
 - Une mise en œuvre à pression atmosphérique, sans consommation de fluides, et en conditions sèches.
- Une mise en œuvre industrielle assez complexe et nécessitant des moyens spécifiques :
- Aucune présence humaine ne peut évidemment être tolérée durant l'émission des rayonnements. La protection des personnels est assurée par une automatisation complète des installations de traitement. Les bâtiments et équipements sont des Installations Classées, soumises à inspections administratives et autorisation préalable avant mise en service.

Des protections biologiques de armé formant des chicanes permettent d'opérer le traitement sans risque de fuites rayonnement.

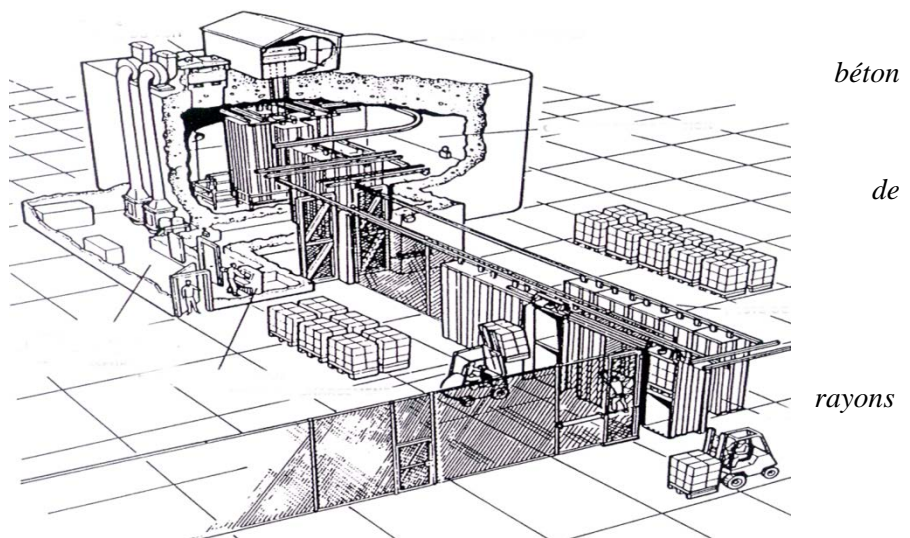


Figure 3 : Installation industrielle d'ionisation par gamma

La technologie par rayonnement gamma met en œuvre une source radioactive de Cobalt 60. En opération, les produits (souvent les palettes entières sinon des cartons) circulent sur balancelles autour de la source, dans une zone protégée et d'accès sécurisé. Pendant les opérations de maintenance, la source est plongée dans une piscine, l'eau servant d'écran de radioprotection.

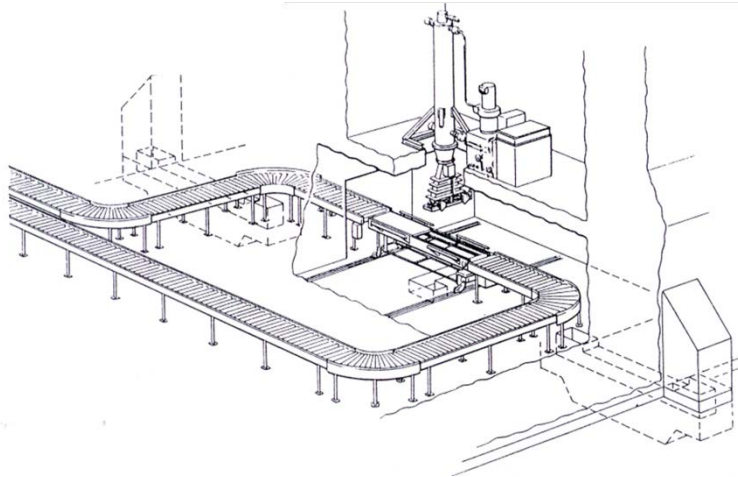
Avec ce procédé, le traitement est relativement lent (qq kGy/h à 10 kGy/h) et présente un rendement médiocre : 20-25%, mais la source Cobalt ne consomme aucune énergie. Son intensité diminue toutefois au fil du temps (-12% / an environ), et il faut alors la remplacer pour maintenir constante la capacité de traitement. Cette opération de rechargement de la source représente une partie importante du coût de fonctionnement d'une telle installation

La technologie par faisceau d'électrons est plus consommatrice d'énergie. Le principe du faisceau directionnel autorise en revanche une mise en œuvre par défilement sur un système de convoyage plus classique. Le débit de dose est nettement plus élevé et le traitement est ainsi très rapide : qq kGy/s à 10 kGy/s.

La technologie des accélérateurs et la géométrie conduit à un rendement énergétique important : 70 à 80% .

La faible pénétration du faisceau ne permet le traitement que de produits de faible épaisseur ou de densité faible.

Figure 4 : Installation industrielle d'ionisation par faisceau d'électrons



- Une action physicochimique par radiolyse sur les constituants de la matière, et notamment :
- A certaines doses (généralement à partir de 6 kGy), et selon le produit, une légère perte de valeur nutritionnelle peut être constatée par destruction partielle du capital vitaminique et d'autres nutriments
 - d'éventuels phénomènes de décoloration peuvent être observés
 - La formation de radicaux libre entraîne des initiations d'oxydation, particulièrement sur les lipides insaturés, avec rancissement plus rapide et plus précoce. Pour cette raison il est déconseillé de traiter les produits contenant plus de 5 % de lipides qui ne soient pas parfaitement protégés de l'oxygène.
 - Des effets sur les polymères constitutifs des matériaux d'emballage : dépolymérisation partielle ou au contraire réticulation. Ces effets sont trop faibles au niveau de dose mis en jeux, ce qui rend le procédé particulièrement intéressant pour décontaminer à froid et sans biocide chimique, les emballages neufs et vides, fermés, destinés au conditionnement aseptique.

Applications et aliments concernés :

Le procédé étant strictement encadré par une réglementation UE et nationale très contraignante ; le principe de la liste positive est adopté par l'UE, pour ce procédé : toute ionisation de produit alimentaire non autorisé, est interdite. Pour ioniser un produit ne faisant pas encore l'objet d'une autorisation, il est nécessaire de déposer un dossier auprès des pouvoirs publics.

L'étiquetage informatif du consommateur, de l'utilisation du procédé, est obligatoire, y compris pour l'utilisation dans une formulation, d'ingrédients ionisés. L'apposition du logo ci-contre, est encouragée :



Le procédé est autorisé dans les Etats Membres suivants : la [Belgique](#), la [France](#), les [Pays-Bas](#), l'[Italie](#) et le [Royaume-Uni](#).

Les applications faisant l'objet d'une autorisation sont :

- traitement des fruits et légumes frais pour retarder leur maturation, inhiber la germination des tubercules et bulbes, et décontaminer les levures, moisissures et bactéries. *Objectif : augmenter la durée de vie des aliments végétaux frais*
- réduction de la flore pathogène et /ou d'altération (équivalent d'une pasteurisation). *Objectif : augmentation de la durée de vie microbiologique*
- destruction des insectes et des parasites
- réduction de la flore pathogène présente en quantité excessive. *Objectif : rendre l'aliment acceptable d'un point de vue sanitaire, augmenter la sécurité microbiologique pour le consommateur*
- réduction des flores microbiennes végétatives et /ou sporulées dans des aliments pour lesquels tout autre traitement est techniquement impossible, ou connu pour rester inefficace. *Objectif : décontamination microbiologique de matières premières, notamment déshydratées ou surgelées pour lesquelles aucun autre traitement efficace n'existe.*

Certains pays de l'[Union Européenne](#) autorisent l'ionisation pour d'autres produits alimentaires que ceux qui sont autorisés par la France. Ainsi, le [Royaume-Uni](#) pratique l'ionisation pour les légumes, les fruits, les céréales et les poissons. Ces produits peuvent ensuite circuler librement dans l'UE ou bien être incorporés dans des plats cuisinés ou dans d'autres produits agro-alimentaires de pays n'autorisant pas l'ionisation de ces aliments (sous réserve du respect de l'étiquetage obligatoire).

Les produits ionisés suivants peuvent être commercialisés en France :

(D'autres aliments peuvent être traités dans d'autres pays de l'UE. Chaque pays membre dispose de sa propre réglementation.)

PRODUIT	OBJECTIF principal	DOSE maximale (kGy)
Herbes aromatiques séchées, épices et condiment végétaux	Pasteurisation	10
Herbes aromatiques surgelés	Pasteurisation	10
Oignon, ail, échalote	Antigermination	0.075
Légumes et fruits secs	Pasteurisation	1
Mélanges de flocons et germes de céréales destinés aux produits laitiers	Pasteurisation	10
Farines de riz et de légumineuses	Pasteurisation	4
Gomme arabique	Pasteurisation	3
Viande Volaille Séparée Mécaniquement, Viandes et abats de volaille,	Élimination des salmonelles	5
Cuisses de grenouille congelées	Élimination des salmonelles	5
Sang animal, plasma, cruor déshydratés	Pasteurisation	10
Crevettes congelées, décortiquées ou étêtées	Pasteurisation	5
Blanc d'œuf (liquide, déshydraté ou congelé)	Pasteurisation	3
Caséine et caséinates	Pasteurisation	6
Aliments composés irradiés pour animaux de laboratoire	Pasteurisation	60
Colostrum bovin pour l'alimentation des veaux	Pasteurisation	10

Source : Arrêté du 20 août 2002 relatif aux denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation

Une dose de 10kGy est également autorisée pour la stérilisation des emballages vides

Remarque : réglementairement, l'hétérogénéité de la dose absorbée doit être telle que le taux Dose max / Dose min ne peut être supérieur à 3.

Pour certains aliments autorisés au traitement, la réglementation française précise les critères microbiologiques auxquels doivent satisfaire les aliments avant et après traitement. Cette réglementation évite ainsi la mise sur le marché de produits insalubres et décontaminés par irradiation.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

- L'ionisation, par sa capacité technique de décontamination des bactéries, spores, levures, moisissures, sans échauffement, de pratiquement toutes les denrées alimentaire (fraîches ou transformées, y compris déshydratées ou congelées), permet techniquement de préparer des **aliments avec des durées de vies améliorées**, ce qui pourrait contribuer à limiter le gaspillage aux stades de la production, de la distribution, et chez les consommateurs. A titre d'exemple des résultats expérimentaux ont montré :
 - Durées de Vie Microbiologique très allongées par rapports aux denrées crues et frais réfrigérées non traitées (allongement de la DVM pouvant aller jusqu'à un facteur 3, par exemple plusieurs semaines à +4°C pour les fruits et légumes frais, sans développement de moisissures en surface).

Une DMV de 14 jours peut être obtenue pour des produits de IVème gamme.

- Dans le cas des produits cuits / pasteurisés, éventuellement reconditionnés puis réfrigérés (le traitement d'ionisation venant s'ajouter en fin de ligne, en complément du traitement existant, car il n'exerce aucun effet de cuisson), la DVM à +4 °C peut être également améliorée d'un facteur 2 à 3. Exemple possible d'application : le jambon cuit prétranché reconditionné. D'autres applications comme retarder la maturation d'un produit ou désinfecter les emballages multiples permettent une réduction du gaspillage.

Remarque : la plupart des applications citées ci-dessus, techniquement intéressantes et dont la faisabilité a déjà été démontrée expérimentalement, ne sont toutefois pas autorisées en UE.

Les autorisations existantes portent sur la décontamination de matières premières déshydratées et de produits congelés. Les applications réellement pratiquées avec un volume significatif en UE concernent des matières premières industrielles, et des produits destinés directement aux consommateurs, sur des marchés de niches.

Voir : RAPPORT DE LA COMMISSION SUR LES DENRÉES ET INGRÉDIENTS ALIMENTAIRES TRAITÉS PAR IONISATION POUR L'ANNÉE 2008 - Bruxelles, le 27.6.2011 - COM(2011) 359 final

Les conclusions de ce rapport mentionnent notamment :

- Les aliments déshydratés se conservent longtemps à température ambiante et les produits destinés aux consommateurs ne requièrent pas de décontamination microbiologique. Le traitement d'ionisation, en favorisant les réactions d'oxydation par radiolyse, a plutôt tendance à réduire les DLUO des produits secs.

Remarque : dans tous les cas, les produits secs font rarement l'objet de gaspillage alimentaire, leur DLUO étant assez longue, et ils sont perçus par les consommateurs comme des produits « stables » et « sans dangers ».

- Les produits congelés se conservent également longtemps et font l'objet d'une DLUO Les traitements d'ionisation pratiqués sur les produits congelés destinés aux consommateurs ne visent pas à allonger leur durée de vie, mais uniquement à réduire une contamination en pathogènes parfois excessive (notamment : Salmonelles). L'ionisation est peu impactante sur la DLUO des produits congelée, et seulement dans un sens défavorable (réduction) en favorisant l'oxydation des lipides.

Conclusion : Les denrées ionisées en UE avec les autorisations existantes n'ont qu'un faible impact sur le gaspillage alimentaire. En revanche, l'extension d'autorisation et d'usage du procédé aux produits frais ou transformés puis réfrigérés, aurait potentiellement un impact très significatif en permettant techniquement une conservation très améliorée des aliments.

1.3 Comparaison avec l'existant

L'ionisation pourrait venir en alternative avec les autres types de traitement de décontamination utilisant d'autres procédés physiques (la chaleur, la pression) ou chimique (utilisation de biocides) pour une très large gamme d'applications et de denrées alimentaires.

Le procédé est plus spécifiquement applicable à des aliments préemballés dans leur emballage final étanche, et plutôt aux aliments frais, et réfrigérés, voire même surgelés. Mais c'est également une technique particulièrement adaptée pour le traitement des produits secs tels que : épices, ingrédients et condiments végétaux.

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs sont :

- Une extension possible des DLC de produits d'origine végétale ou animale, non transformés ou transformés, réfrigérés ou non.
- Une sécurité accrue pour le consommateur du point de vue du risque microbiologique

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Le risque sanitaire lié au procédé d'ionisation est surtout dû :

- A la maîtrise de la décontamination avec la dose de rayonnement souhaitée à cœur, pour des produits de géométries diverses et compte tenu des propriétés d'interaction physique des rayonnements avec la matière. Des validations mettant en œuvre des systèmes dosimétriques adaptés et étalonnés sont systématiquement nécessaires pour s'assurer de l'homogénéité des traitements au sein du produit conditionné et de l'unité de traitement (carton, palette,...) La résistance des différentes flores pathogène et d'altération aux rayonnements ionisant n'est pas toujours parfaitement connue, même si une abondante littérature existe sur le sujet (l'ionisation est étudiée et utilisée en IAA depuis les années 60)

Remarque : les doses maximales moyennes autorisées en UE (10 kGy) ne permettent généralement pas de supprimer totalement le danger lié aux spores bactériennes résistantes. Toutefois pour les produits réfrigérés, ces doses permettent techniquement de réduire significativement la contamination en spores psychrotrophes d'intérêt sanitaire (notamment : Bac. Cereus, et clostridies psychrotrophes). Ce qui contribue à l'amélioration de la DVM.

Pour la même raison, les doses autorisées ne permettent pas d'obtenir avec la sécurité indispensable, des aliments humides « appertisés » c'est-à-dire stables à température ambiante. Des doses de 20 à 50 kGy doivent généralement être appliquées (Cf. la dose max de 60 kGy autorisée pour la stérilisation des aliments destinés aux animaux de laboratoire).

- A la formation de composés indésirables au cours des traitements, par radiolyse : en particulier formation de radicaux libres très réactifs chimiquement, induisant des réactions parasites d'oxydations et la formations de composés néoformés mal connus pouvant *éventuellement* présenter une toxicité, à évaluer au cas par cas. (avec aussi des impacts organoleptiques, notamment rancissement). Cela justifie la réglementation stricte mise en place en UE sur la base d'autorisations par listes positive aliment/dose.

En raison des effets secondaires connus sur la composition des aliments traités par ionisation et de la formation possible de composés néoformés ou de produits de dégradation pouvant présenter une toxicité et qu'il convient d'évaluer au cas par cas...

Le contexte réglementaire est spécifiquement contraignant (voir ci-dessus « applications et aliments concernés ») :

- Le procédé n'est autorisé que pour les aliments désignés dans une liste positive établie par chaque pays membre de l'UE. L'origine de la réglementation est communautaire, mais transcrite sous forme de décrets par chaque pays membre
- Cette technologie est encadrée par une réglementation totalement distincte de celle encadrant les Nouveaux Aliments (Novel Food).
- Une autorisation administrative préalable est requise pour toute nouvelle application (denrée et/ou dose appliquée)

La réglementation n'est pas un frein sur les applications aux emballages.

Réglementation de référence (au 08/12/2013) :

Directive 1999/3/CE du Parlement européen et du Conseil du 22 février 1999 établissant une liste communautaire de denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0003:FR:HTML>

Décret n°2001-1097 du 16 novembre 2001 relatif au traitement par ionisation des denrées destinées à l'alimentation humaine ou animale (Version consolidée au 14 avril 2011)

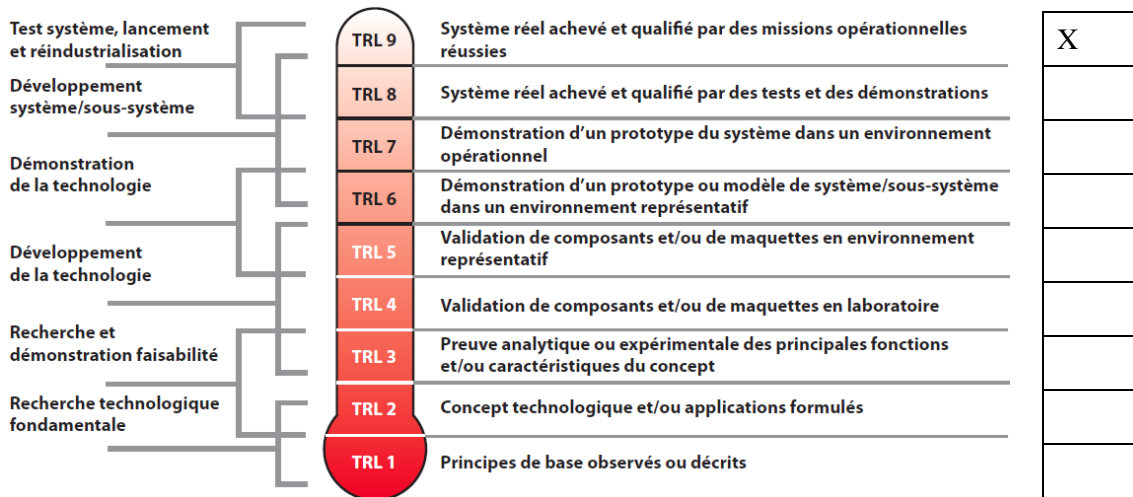
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000580693&fastPos=3&fastReqId=117662688&categorieLien=cid&oldAction=rechTexte>

Arrêté du 20 août 2002 relatif aux denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation (Version consolidée au 07 septembre 2002)

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000410150&fastPos=1&fastReqId=1278498867&categorieLien=cid&oldAction=rechTexte>

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie d'ionisation est déjà mature et en usage industriel très large pour des applications de stérilisation de dispositifs médicaux, de modification des propriétés physico-chimiques des polymères et dans l'agroalimentaire pour de nombreux produits, notamment pour l'UE au Pays bas, et en Belgique.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Le principal frein actuel au développement de la technologie d'ionisation dans l'union européenne est sa perception assez défavorable par les consommateurs souvent mal informés (voir point 4 ainsi que la législation contraignante sur l'étiquetage de ces produits).

Freins techniques actuellement identifiés, pour le développement de l'ionisation :

Assez peu de recherche (fondamentale et/ou appliquée) est désormais pratiquée au niveau international sur l'ionisation des aliments, surtout dans l'union européenne. Cependant, l'AIEA mène actuellement une réflexion sur l'utilisation des faisceaux d'électrons et des rayons X pour redynamiser l'ionisation des aliments au niveau international.

Au niveau de la recherche fondamentale (par exemple en microbiologie, science des matériaux, etc...), l'utilisation de sources radioactives est réservée à un petit nombre de laboratoire spécialisés : en France notamment le CEA.

Les accélérateurs d'électrons sont plus faciles à utiliser, mais la nécessité dans tous les cas de construire et de maintenir des installations classées pour conduire des recherches d'applications sur le procédé, peut constituer un frein financier et technique au développement de cette technologie en UE.

Malgré ces contraintes, aucun frein technique majeur qui pourrait s'opposer au développement de l'ionisation n'est identifié.

Freins réglementaires identifiés :

Procédé extrêmement encadré, voir plus haut.

Freins économiques :

Le coût d'**investissement** des installations d'ionisation est particulièrement élevé en raison des contraintes de sécurité pour les personnels, inhérentes au procédé (installation lourdes, autorisations administratives préalables pour les locaux et équipements, inspections régulières)

Le coût de **maintenance** est élevé pour les dispositifs à source cobalt.

Le coût **énergétique** de fonctionnement est assez impactant pour les dispositifs à faisceau d'électrons.

Si ces aspects sont coûteux pour l'exploitant, prestataire du traitement, ils ne se répercutent toutefois que peu sur le coût d'irradiation en raison des capacités de traitement très importantes des unités industrielles.

Enfin, frein économique identifié : le coût très élevé représenté par la **constitution des dossiers techniques requis** pour toute demande d'autorisation de traitement de nouveaux aliments. Dossier traité par l'UE, instruit techniquement par l'EFSA.

Toute la R&D comprenant les démonstrations d'innocuité doivent être conduites suivant les guidelines et recommandations établies par l'UE : en particulier études toxicologiques complètes sur l'animal, analyses physicochimiques approfondies, etc..).

=> Ce coût est souvent dissuasif pour de nombreux industriels, et même fédérations d'industriels.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant déjà considérée comme mature (indice TRL = 9), son développement actuel et futur repose essentiellement sur :

- (iii) Une **meilleure acceptation** du procédé par les consommateurs et indirectement par les distributeurs
- (iv) Une facilitation par **l'évolution de la réglementation** qui impose un étiquetage informatif sur l'utilisation du procédé, et cela même pour les ingrédients individuels entrant dans la composition des produits (par exemple : épices ionisées). Cette spécificité est unique en UE, aucun autre procédé autorisé n'étant soumis à un affichage obligatoire.
- (v) La constitution de dossiers pour faire autoriser le procédé à de nouvelles applications, notamment les fruits et légumes non transformés. *Mais aucun industriel n'investira dans une technologie susceptible de rejet par les consommateurs*
- (vi) La capacité des fabricants d'accélérateurs d'électrons et irradiateurs aux rayons X à améliorer encore les rendements des installations, réduire les surfaces au sol, leur impact environnemental et les coûts d'investissement.

La situation est pour le moment relativement bloquée dans l'union européenne, les distributeurs ayant majoritairement fait pression sur les fabricants d'aliments et fournisseurs d'ingrédients pour éliminer des formulations les ingrédients ionisés, compte tenu de l'obligation d'étiquetage, sauf pour de rares produits lorsque le procédé est incontournable pour raisons sanitaires (par exemple : cuisses de grenouilles d'importation, surgelées).

→ Le développement industriel de cette technologie appliquée à l'agroalimentaire est très incertain, surtout dans l'union européenne, mais pas pour des raisons techniques.

2.5 Principaux acteurs

En France, cinq établissements agréés de traitement par ionisation des denrées alimentaires sont en activité. La DGCCRF assure une surveillance annuelle de cette pratique, conformément aux exigences de la [directive 1999/2/CE](#).

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Recherche et développement :

L'ionisation a fait l'objet de nombreuse recherche jusque dans les années 80, principalement aux USA. Le procédé est autorisé par la FDA pour les USA.

L'Institut Technique Agro-Industriel, **Aérial** (67412 Illkirch) est une des rares structures à proposer compétence et possibilité d'essais en France et en Europe sur cette technologie, pour des applications en IAA, et dispose d'une station expérimentale d'ionisation à base d'un accélérateur d'électrons.

Contact : Mme Dalal AOUDE-WERNER – Mr Florent KUNTZ

Le marché national dépend de sa réglementation. La réglementation en France est plus souple qu'en Allemagne mais l'est moins qu'en Belgique ou aux USA.

3- Impact environnemental

L'ionisation est un traitement qui peut être mis en œuvre au moyen de trois types de rayonnement dont les technologies de production sont assez distinctes, et n'ayant pas le même impact environnemental :

- Faisceau d'électrons émis par une machine électrique. Dans ce cas l'impact environnemental est très faible (aucun effluent). Le rendement énergétique est important (70-80%).
- Rayons X : émis par conversion des électrons produits par une machine électrique. L'impact environnemental est bien plus important car le rendement de conversion est faible. Par contre, l'énergie non convertie en rayonnement peut être récupérée sous forme d'eau chaude.
- Rayons gamma issus d'une source radioactive de Cobalt 60. Dans ce cas la production de la source et son recyclage en déchet radioactif lorsque son activité devient trop faible, présentent évidemment un impact fort. Cependant, le cobalt est dans une piscine à eau, confiné par plusieurs barrières d'inox. Toutes les piscines sont contrôlées par des organismes certifiés comme la DREAL. Il n'y a jamais eu de quelconques accidents de contamination radioactive en Europe. Par ailleurs, ce procédé est moins consommateur d'énergie qu'un traitement thermique classique.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie d'ionisation a obtenu une note de 1.5 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	0	1.5

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

Remarque : un autre aspect à noter est que la technologie d'ionisation peut avoir un impact intéressant au niveau environnemental, en permettant de réduire les épaisseurs des films d'emballages, et donc les quantités de matières polymères utilisées...(amélioration par ionisation des propriétés thermomécaniques des matériaux).

4- Perception des consommateurs

Le procédé d'ionisation, lorsqu'il est présenté aux consommateurs, suscite généralement méfiance ou rejet, car il est souvent associé à tort à la radioactivité.

L'utilisation des rayonnements en général pour traiter des aliments est mal perçue et associée à des procédés médicaux (radiothérapie, dont le danger lors de surdosage est connu via les médias). L'expérience d'Aérial (Centre de Ressources Technologiques et Institut Technique Agro-Industriel) est toutefois que le rejet est présent *a priori* mais est moindre lorsque des explications objectives sont données.

Faute d'information du public, les consommateurs interrogés se font souvent une idée très fautive du procédé : beaucoup pensent que le rayonnement rend l'aliment faiblement radioactif. Cet argument peut être facilement contré, mais pas la défiance, qui perdure.

Cette technologie est également considérée comme étant trop complexe et pouvant faciliter les fraudes en permettant à des produits périmés de réintégrer la chaîne alimentaire. Les consommateurs sont très réticents face à cette technologie qu'ils ne comprennent pas bien. Le procédé, qui n'est pas connu par les consommateurs, ne fait pas peur mais en revanche le mot « ionisation » inquiète.

Par ailleurs plusieurs lobby se sont attachés à dénigrer le procédé, principalement parce que le rayonnement, lors de la décontamination microbienne, tue également les tissus végétaux : pour ces consommateurs, « il n'est pas sain de consommer des aliments morts ».

Cette position, qui s'appuie sur un élément factuel vrai, mais ne recouvre en réalité aucune notion de risque sanitaire, est plus difficile à contrer, car relevant d'une position / croyance dogmatique, non technique.

Comme précédemment indiqué, l'ionisation est un peu à part parmi les procédés de traitement des aliments, car elle s'accompagne d'un étiquetage obligatoire de l'usage du procédé sur les aliments traités (y compris chaque ingrédient individuel). Cette information est souvent perçue comme un avertissement contre un danger, au même titre que l'étiquetage obligatoire sur les allergènes ou encore de la présence d'OGM (N.B. : qui est un avertissement d'ordre éthique, non en relation avec un danger sanitaire identifié). Cette phrase obligatoire, du type « traité par irradiation », est souvent assimilée à un risque nucléaire.

Il a été montré que l'ionisation des aliments est efficace pour réduire la perte des nutriments pour certains groupes de produits, sans pour autant susciter d'infléchissement dans les évaluations des consommateurs (Singh, 1991). Bien que peu d'études aient été menées sur l'opinion des consommateurs sur l'ionisation des aliments, l'irradiation de la nourriture, de manière générale, a souvent été étudiée dans ce cadre et s'est révélée mal accueillie par les consommateurs (Frewer et al., en presse).

5- Dimension économique

Le marché actuel

Les applications de l'irradiation sont devenues très faibles en agro-alimentaire. En 2011, 695 tonnes seulement d'aliments ont été irradiés en France.

En Europe, seules les épices, les herbes et les aromates sont en libre échange. Cependant, seuls 3% des épices sont irradiées. Il existe d'autres applications sur les crevettes, les cuisses de grenouilles (la majorité), les abats de volailles. Les Japonais l'utilisent sur les oignons, les échalotes et les pommes de terre pour éviter la germination. Les premières utilisations en France étaient d'ailleurs sur ces produits, mais sont devenues interdites en 2006.

Certains utilisent l'irradiation pour l'emballage ou l'embouteillage comme le fait Tetrapak. Au niveau de l'aliment, les industriels préfèrent les produits chimiques plutôt qu'utiliser l'ionisation malgré la perte importante des qualités organoleptiques par un chauffage thermique.

Actuellement la plupart des enseignes de distribution refusent tous ces produits ionisés, avec quelques exceptions lorsque ce procédé n'a aucune alternative.

Rentabilité économique

Le prix est très variable. L'investissement peut aller de la centaine de milliers d'euros à la dizaine de millions d'euros. Les dispositifs de traitement à façon par ionisation restent rares et assez coûteux, notamment en infrastructures de sécurité (casemate en béton, etc..). Les coûts de fonctionnement sont une donnée économique stratégique, donc gardée secrète.

Il existe 5 sites de sous-traitance en France en faisceaux d'électrons et rayons gamma.

Le développement de petites unités à base d'accélérateurs d'électrons permettant le traitement en ligne de produits alimentaires ou d'emballages dans des conditionnements adaptés constitue sans aucun doute une piste d'avenir pour cette technologie largement utilisée dans d'autres secteurs industriels

L'investissement n'est pas le frein car les industriels seraient prêts à adopter cette technologie, la plus efficace en terme bactériologique, si l'acceptation auprès du consommateur était meilleure, et la position des enseignes de distribution, plus positive.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de l'ionisation :

<p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la DLC - Qualité Sanitaire - Diversification des applications - Faible impact environnemental 	<p>Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les coûts - La réglementation - Mauvaise acceptation des consommateurs
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Assouplissement de la réglementation - Meilleure acceptation des consommateurs - Application à l'emballage 	<p>Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> -

La technologie d'ionisation est très performante en termes d'allongement de la DLC par décontamination des aliments tout en préservant les qualités organoleptiques. Le principal frein au développement est d'ordre sociologique. En effet, le consommateur fait une confusion entre le terme « irradiation ou ionisation » et « nucléaire ». La réglementation est également un frein au développement de l'ionisation. Les applications en France sont donc très limitées bien que le savoir-faire y est important.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir des entretiens avec les équipementiers.

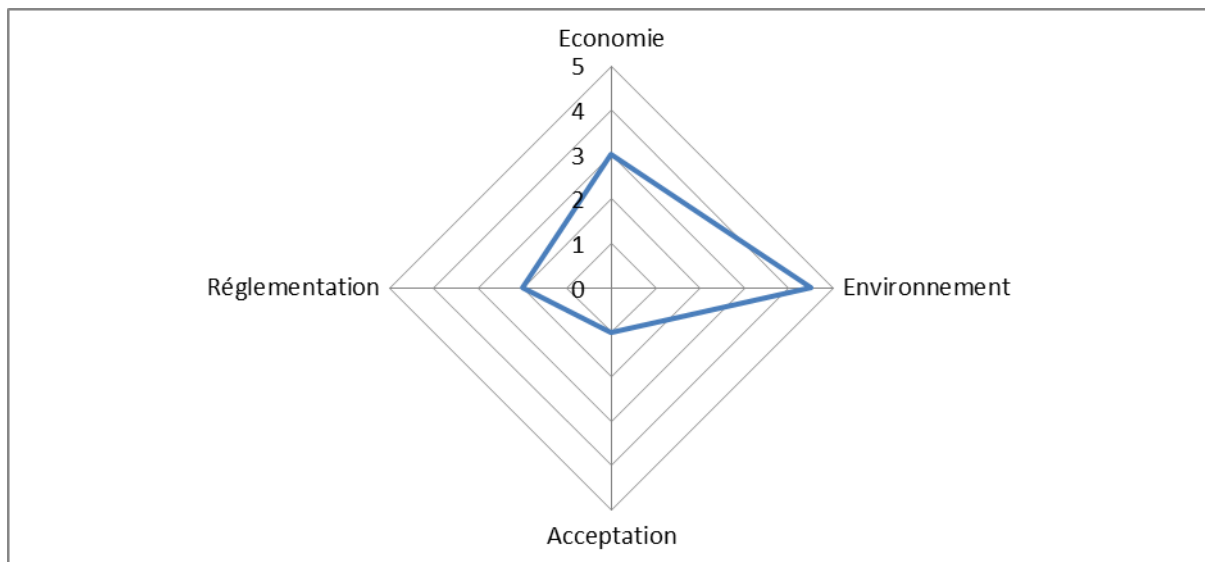


Figure 5 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Consommateurs :

FREWER, L. J., FISCHER, A. R. H., BRENNAN, M., BÁNÁTI, D., LION, R., MEERTENS, R. M., ROWE, G., SIEGRIST, M., VERBEKE, W. & VEREIJKEN, C. in press. Risk/benefit communication about food – a systematic review of the literature. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.

SINGH, H. 1991. Dose rate effect in food irradiation. A review. *Atomic Energy of Canada Limited, AECL (Report)*.

DECONTAMINATION CHIMIQUE DE SURFACE DES ALIMENTS

Intitulé complet : Décontamination de surface des aliments par biocides chimiques

Données clés

Résumé

La décontamination de surface à l'aide de substances biocides chimiques consiste à exposer l'aliment par contact direct à une substance chimique ayant des propriétés antimicrobiennes pour réduire la contamination de surface après une courte durée de contact, suivie d'une phase d'élimination du biocide. Il existe deux types de technologie : les biocides gazeux utilisés principalement pour décontaminer les solides secs divisés et les biocides liquides employés pour le lavage décontaminant des aliments. Les principales applications concernent les produits secs, les fruits et légumes, les poissons, les viandes crues, notamment carcasses. La technologie permet d'allonger significativement la DLC des produits préemballés. Elle est déjà notamment utilisée pour la décontamination des végétaux crus prêt à l'emploi (IV^{ème} gamme) pour lesquels aucun autre traitement n'est techniquement possible. La technologie est très prometteuse mais les verrous réglementaires freinent son développement.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation des technologies de décontamination chimiques

La décontamination microbiologique des aliments peut être effectuée par de nombreux moyens différents (le plus courant étant la chaleur). La décontamination à l'aide de substances biocides chimiques consiste à exposer l'aliment par contact direct à une substance chimique ayant des propriétés antimicrobiennes, pas simplement bactériostatiques, mais suffisamment biocides pour réellement réduire la contamination de surface après une courte durée de contact.

Parmi les substances actives, on trouve principalement des biocides oxydants : ces molécules chimiquement très réactives s'attaquent assez indifféremment à toute matière organique, et donc aussi aux microorganismes. Certains biocides non oxydants sont dit « cytotoxiques » : ils agissent directement de façon ciblée sur les microorganismes.

On distingue deux types de technologie, pour des applications différentes :

- Les biocides gazeux, utilisés pour décontaminer les solides secs divisés (poudres, produits déshydratés, graines de céréales).
- Les biocides liquides, utilisés en général en solution aqueuse. Ils sont employés pour le lavage décontaminant des aliments, par trempage ou en spray,

Dans tous les cas, il convient d'éliminer les traces de biocides résiduelles, les produits de dégradation des molécules actives, et les produits de dégradation de la matière organique et éventuels produits néoformés, par une étape spécifique d'élimination : rinçage, ventilation, etc...).

A noter : les deux types de biocide sont également utilisables pour la décontamination de surfaces de matériels et de faces internes d'emballages. Ils sont notamment très employés dans le cadre du conditionnement aseptique (voir la fiche 3.3 consacrée à cette technologie).

N.B. Les deux familles d'applications (décontamination des aliments et décontamination des surfaces), sont encadrées par des réglementations très différentes.

Toutes ces technologies ont en commun quelques paramètres pour leur utilisation, qui doivent faire l'objet de mises au point et de validation :

- la **concentration** de l'agent biocide dans le milieu au moment de la mise en contact avec l'aliment
- la **température** lors du traitement
- la **durée de contact** avant élimination

- les **paramètres physicochimiques** dans le milieu lors du contact, et en particulier pour les biocides en solution dans l'eau : le pH.

La décontamination chimique agit uniquement en surface, ce qui réduit l'impact sur la matrice alimentaire. Par nature, ces technologies ne peuvent que diminuer la contamination globale de l'aliment, n'ayant aucun effet en profondeur. En revanche si la contamination est présente uniquement en surface, l'efficacité peut être remarquable.

Les temps de contact employés étant généralement courts, ces procédés peuvent être appliqués pour des lignes de production continues.

La notion de « surface » doit être relativisée au regard de la porosité de certaines matrices, notamment en ce qui concerne les produits déshydratés traités par biocide gazeux : le rapport surface / volume peut être extrêmement élevé pour des produits poreux, à l'échelle microscopique.

Les biocides gazeux :

- Les biocides gazeux proprement dits : ce sont des gaz à température ambiante, ils ne sont pas obtenus par la vaporisation de liquides
 - L'ozone O_3 . Plus précisément : de l'air ozoné, obtenu par décharge électrique dans un courant d'air ou d'air enrichi en oxygène. C'est un biocide oxydant qui détruit les microorganismes en surface mais aussi certains contaminants chimiques comme les mycotoxines
 - Le Dioxyde de Chlore ClO_2 : il n'y a pas d'application en IAA à l'état gazeux, mais il est utilisable en solution.
 - Remarque : le Chlore gazeux Cl_2 n'est pas utilisable comme désinfectant de surface des aliments
- Les biocides gazeux obtenus par vaporisation
 - La Vapeur Sèche de Peroxyde d'Hydrogène (VSPH), qui est obtenue en vaporisant de l'eau oxygénée à 35% (H_2O_2) dans un courant d'air tiède et sec.
 - Le mélange Acide Peracétique + H_2O_2 , à la base un biocide liquide, peut également être vaporisé pour obtenir un biocide gazeux. Cette méthode n'est pas employée directement sur aliments, mais utilisée pour les emballages.

Les biocides en solution :

- Les biocides halogénés :
 - Chlore Cl_2 , Acide hypochloreux $HOCl$, hypochlorite de sodium $Na-OCl$ (eau de Javel). **Les biocides chlorés sont les plus employés dans la désinfection de surface des aliments.**
 - Dioxyde de Chlore en solution (ClO_2) : utilisable en théorie, mais n'est pas autorisé en France pour contact sur aliments.
 - Chlorite de sodium acidifié $NaClO_2$: utilisable en théorie, mais n'est pas autorisé en France pour contact sur aliments. Utilisé aux USA sur les volailles.
 - Biocides bromés, iodés : utilisables en théorie, mais ne font pas l'objet d'autorisation d'usage)
 - Dérivés du chlore : chloramines
- Les biocides non halogénés
 - Ozone en solution (eau ozonée) : utilisable en théorie, ne fait pas l'objet d'autorisation d'usage en France
 - Acide peracétique + H_2O_2 : utilisable sur aliments
 - Eau oxygénée H_2O_2 en solution diluée : utilisable sur aliments
 - Aldéhydes : le formol est largement utilisé mais uniquement en agro-industries (sucrierie, amidonnerie, etc..)
 - Trisodium orthophosphate : utilisable en théorie, mais n'est pas autorisé en France pour contact sur aliment. Utilisé aux USA sur volailles.
 - Les systèmes lactoperoxydase immobilisée, biocide : ions hypothiocyanate (système français CATALIX). Autorisé en France. Peu utilisé car jugé cher.

- Les acides organiques (lactique, citrique, acétique, etc..) : ce sont des additifs alimentaires *quantum satis*, pas spécifiquement des biocides mais présentant un caractère biocide à partir d'une certaine concentration.

La destruction des microorganismes :

Les biocides chimiques agissent sur une large gamme de microorganismes : bactéries, levures, moisissures, virus, mais aussi dans certaines configurations sur parasites et larves d'insectes.

Action des biocides chimiques sur les matrices alimentaires :

L'action oxydante peut générer des produits de dégradation, notamment avec les biocides halogénés : dérivés halométhanes, haloamines. Ces effets secondaires font l'objet de limites réglementaires, notamment pour la décontamination des végétaux crus par lavage.

Applications et aliments concernés :

Ne sont décrites dans cette fiche que les applications à la décontamination directe des aliments.

- Biocides gazeux
 - Applications surtout aux **produits secs** : céréales, épices, légumes déshydratés, pulvérulents divers.

Exemple 1 : procédé VSPH (Vapeur Sèche de Peroxyde d'Hydrogène) :

Vaporisation à 70°C de peroxyde d'hydrogène liquide à 35% d' H₂O₂ dans de l'air sec (<5% HR) et tiède grâce un générateur spécialement développé pour cette application.

Décontamination par biocide sporicide gazeux, à basse température (35 à 65°C).

Action décontaminante ultra rapide et homogène : la vapeur s'infiltré partout.

Peu ou pas de résidus, le peroxyde d'hydrogène se décomposant spontanément en eau et en oxygène

Effacité du procédé VSPH :

Micro-organisme	Température (°C)	Concentration (mg/L)	Concentration (ppm)	Valeur D (sec)
<i>Geobacillus stearothermophilus</i>	50	1,4	1000	2
<i>Aspergillus niger</i>	50	10	7200	3,5

Exemple 2 : Procédé autorisé OXYGREEN pour la décontamination à l'ozone des céréales

Le procédé utilise un réacteur vertical agité, les grains sont balayés par un courant d'air ozoné.

Ce procédé permet l'obtention de céréales très bien décontaminées pour la fabrication de farines de haute qualité microbiologiques. Il réduit le taux de bactéries d'un facteur 10000, de champignons d'un facteur 1000, induit la mortalité de 99% des insectes et élimine 60 à 90% des mycotoxines.



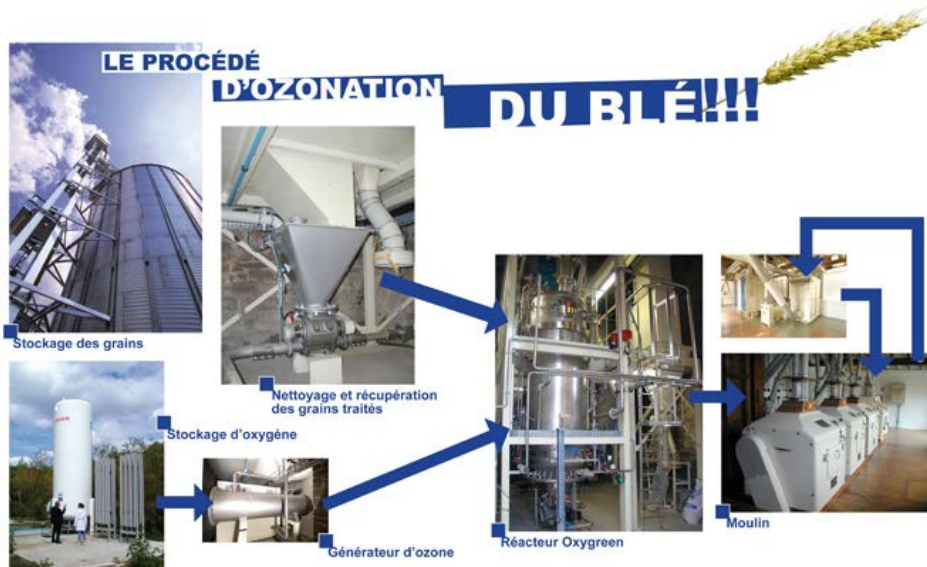


Figure 1 et 2 : Procédé OXYGEEEN pour la décontamination des blés à l'ozone gazeux

➤ Biocides liquides

- Applications aux produits végétaux crus prête à l'emploi (dit de **IVème gamme**) : lavages des fruits, légumes, salades, etc., suivi d'un rinçage à l'eau potable, pour assurer leur décontamination microbiologique (éliminer les flores pathogène et réduire les flores d'altération). *Cette décontamination est au cœur du process IVème gamme et autorise des DLC de plusieurs jours.*

Exemple : lavage des légumes IVème gamme avec une solution d'eau chlorée (HClO), usage autorisé, concentration maximale autorisée : 80 mg/l en chlore libre.

Une décontamination de 2 à 4 log de contamination est observable, suivant les flores.

- Applications aux produits animaux : décontamination des carcasses par pulvérisation de biocides, suivi d'un rinçage à l'eau potable : acide lactique. Utilisable pour les carcasses de porc. Ce procédé contribue à prolonger sensiblement la DCL des viandes crues^{19 20 21}

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Par son action décontaminante des aliments, l'utilisation de biocides chimiques en surface permet d'allonger significativement la DLC des produits préemballés.

En particulier c'est la seule technique courante et utilisée largement (en dehors de l'ionisation, moins répandue) qui permet de maîtriser la contamination microbiologiques des aliments crus non transformés pour lesquels aucun traitement, notamment thermique, n'est techniquement possible. *Ces produits représentent la majorité des applications économiquement intéressantes.*

¹⁹ Document de l'EFSA sur la décontamination des carcasses :

<http://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/decontamination.htm>

²⁰ Réglementation UE sur la décontamination des carcasses bovine par l'acide lactique :

<http://new.eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1387873041651&uri=CELEX:32013R0101>

²¹ Avis de l'EFSA sur l'efficacité et l'innocuité des biocides pour le lavage des volailles :

<http://www.efsa.europa.eu/fr/efsajournal/doc/659.pdf>

A titre d'exemple : une DLC allongée avant ouverture et une meilleure qualité microbiologique à l'ouverture autorisent une meilleure gestion des flux et des stocks, et limitent ainsi les gaspillages au niveau de la distribution et du consommateur.

Les applications à la décontamination d'emballages vides avant remplissage s'inscrivent dans la réflexion sur l'amélioration des techniques de conditionnement aseptiques ou ultra propres (voir la fiche consacrée à ces technologies).

Une décontamination des emballages contribue également à la maîtrise et à l'allongement de la durée de vie microbiologique des produits conditionnés, puis réfrigérés (ou non), ce qui contribue à limiter le gaspillage.

1.3 Comparaison avec l'existant

Certaines applications des biocides chimiques sont fortement et anciennement implantées dans les process actuels et ne peuvent donc pas être considérées comme des technologies innovantes. Par exemple, le lavage avec du chlore des végétaux de IVème gamme est le process industriel standard.

D'autres applications font l'objet de mises au point ou d'autorisations plus récentes et non encore généralisées, comme la décontamination des carcasses par exemple.

L'application aux produits de la mer crus (lavage décontaminant des poissons et filets de poisson par exemple) n'est pas encore développée.

Toutes les applications actuelles sont faites sur produits crus, mais rien ne s'oppose techniquement à leur utilisation sur produits semi transformés voire cuits, pour en améliorer la conservation, notamment pour les produits cuits, tranchés (et donc recontaminés à cette occasion), puis reconditionnés avant distribution réfrigérée sous DLC.

Les services rendus aux industriels, aux distributeurs, aux consommateurs sont :

- Une garantie sanitaire améliorée : destruction efficace des flores pathogènes et d'altération, présentes en surface, notamment des produits crus
- Des DLC allongées pour ces produits réfrigérés

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Les risques sanitaires liés aux procédés sont de deux natures :

1) Risque microbiologique

Il est surtout dû à l'éventuelle résistance des différentes flores pathogènes aux biocides chimiques. Les biocides oxydants sont puissants et à large spectre. Il n'y a pas ou peu de phénomènes d'accoutumance et aucune flore n'est réellement résistante à cette action oxydante, même si la sensibilité des flores végétatives varie suivant les espèces.

Les spores sont nettement plus résistantes et nécessitent pour leur destruction significative (plusieurs log) des concentrations en biocides élevées, et l'utilisation de biocides très oxydants (acide peracétique par exemple).

2) Risque chimique / nutritionnel

- Risque de destruction locale de nutriments et micronutriments (uniquement en surface, donc l'impact nutritionnel réel est très limité).
- **Risque de formation, par réactions chimiques, de composés indésirables.**

L'impact des biocides oxydants doit impérativement être évalué, en contact avec les matrices alimentaires concernées.

Le contexte réglementaire est plus contraignant :

L'utilisation des biocides pour la décontamination de surface des aliments (autres que d'origine animale) est strictement encadrée en France par la réglementation sur les Auxiliaires Technologiques²². Les applications autorisées font l'objet de listes positives et toute nouvelle application doit faire l'objet d'autorisations administratives préalables, accordées par le DGCCRF après instruction du dossier par l'ANSES.

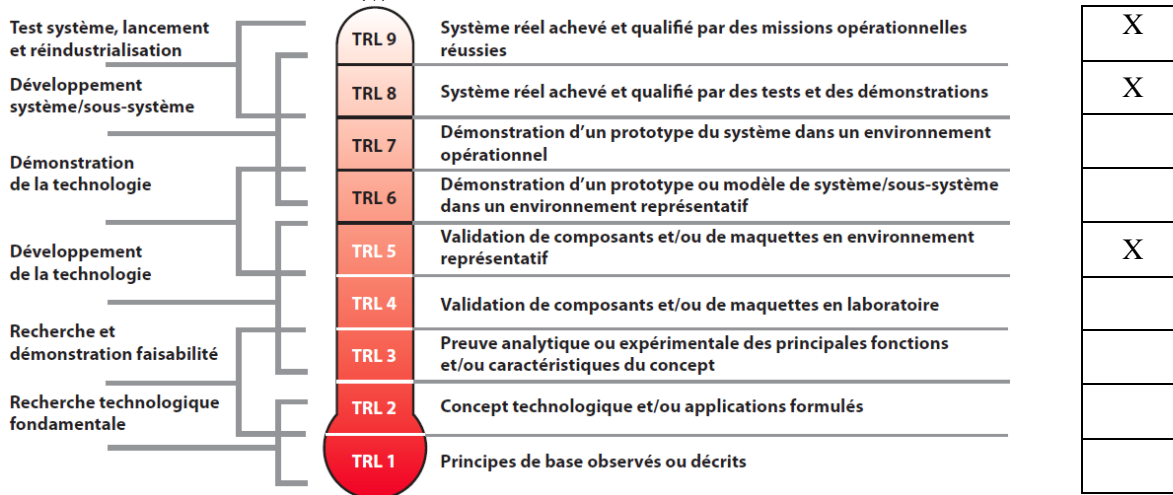
L'utilisation des biocides pour la décontamination de surface des aliments d'origine animale (notamment la décontamination des carcasses) est encadrée par une réglementation européenne (avec instruction technique des dossiers par l'EFSA). Le règlement (CE) n° 853/2004 permet d'utiliser des traitements de décontamination des denrées animale en tant que complément des bonnes pratiques d'hygiène, sous couvert d'une approbation préalable de la Commission.

Actuellement, seul l'acide lactique peut être utilisé sous certaines conditions sur les carcasses de bovins (cf. RÈGLEMENT (UE) N o 101/2013 DE LA COMMISSION du 4 février 2013 concernant l'utilisation de l'acide lactique pour réduire la contamination microbiologique de surface des carcasses de bovins).

Dans le cas du procédé Oxygreen développé par la société GOEMAR, le frein réglementaire est important. L'autorisation d'utilisation du procédé Oxygreen est restreinte aux farines de blé, et le procédé devrait faire l'objet d'une certification *Novel Food*. Par ailleurs, l'intérêt des autorités vis-à-vis des teneurs en mycotoxines est assez récent, et les teneurs autorisées actuellement sont hautes (1250 ppm). Ces teneurs seuils sont données en moyenne, et non par grain de blé. Ainsi, il est possible de mélanger des farines présentant un fort taux de mycotoxines, avec de la farine traitée pour atteindre la valeur seuil moyenne. La réglementation n'encourage donc pas l'action contre les mycotoxines du procédé Oxygreen.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Les technologies de décontamination chimique de surface des aliments sont diverses et d'implantation / développement assez inégales :

- Anciennement et largement implantées pour la décontamination des végétaux crus par lavages avec des biocides notamment chlorés (indice TRL : 9)

²² Réglementation Française sur les auxiliaires technologiques :

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000023982083&fastPos=7&fastReqId=1284876494&ccategorieLien=cid&oldAction=rechTexte>

- Moins répandues, mais en phase d'industrialisation : l'utilisation des biocides alternatifs au chlore, par exemple l'APA/H₂O₂, pour ces mêmes usages dans le lavage des végétaux (indice TRL : 8)
- Concept démontré et autorisations administratives obtenues mais en attente d'industrialisation en UE, pour la décontamination des carcasses animales par lavages / spray (indice TRL 8). Ce procédé est largement utilisé aux USA.
- Début d'industrialisation pour la décontamination, des céréales par l'ozone (indice TRL : 9)
- En phase de mise au point pour l'utilisation de la Vapeur Sèche de Peroxyde d'Hydrogène, pour le traitement des aliments secs (indice TRL : 4 à 5).

En parallèle, une recherche académique se poursuit, et l'accompagnement des industriels par les Centres Techniques pour développer les produits, valider les process *Et rédiger les lourds dossiers technico-réglementaires souvent indispensables* également.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Parmi les difficultés techniques identifiées :

- Mise au point et validation microbiologique des process de décontamination, validation des DCL (milieux de cultures ou DLC?), challenge tests, études des résidus et recherche des produits de dégradation : parfois long et complexe. Le comportement de certaines flores est mal connu. Toutefois le mécanisme de destruction, dans le cas des biocides oxydants, est très peu dépendant de la nature des microorganismes.
- **D'éventuels effets biochimiques indésirables sur les aliments peuvent limiter certaines applications.**
- La gestion des effluents liquides et/ou gazeux peut poser des difficultés techniques, notamment en station d'épuration.

Freins réglementaires identifiés :

En France, la réglementation spécifique encadrant l'utilisation des Auxiliaires Technologiques à autorisation préalable obligatoire, ***dont font partie les biocides*** (pour les applications sur aliments d'origine non animale), peut effrayer et décourager les industriels.

La question se pose de façon identique, voire encore plus complexe, pour les applications de produits biocides sur les denrées d'origine animale, sous réglementation UE.

La réglementation française est désormais stabilisée et ne devrait plus vraiment évoluer. La constitution des dossiers techniques constitue aussi un frein financier pour les entreprises moyennes, le coût des analyses de recherche de résidus étant généralement élevé.

Freins économiques :

Ces technologies sont techniquement assez simples, et ne sont pas excessivement chères dans l'absolu, surtout pour l'utilisation de biocides liquides non volatils en solution dans l'eau, par lavage ou par pulvérisation. Les biocides sont toutefois des produits consommables dont certains sont jugés onéreux (cas de l'APA par exemple) : même si les coûts d'investissement restent modestes, le coût de fonctionnement est impactant.

La mise en œuvre de biocides gaz nécessite en revanche des installations techniques complexes, souvent en Installations Classées du fait de la dangerosité pour les personnels et l'environnement (notamment l'utilisation de l'ozone). Cela ne peut être mis en place que par des unités de grande taille, plus rarement par des PME.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant déjà considérée pour la plupart des applications comme mature (indice TRL = 8 ou 9), son développement actuel et futur repose essentiellement sur : (i) sa compétitivité économique, et (ii) sa facilité d'implantation (y compris réglementaire), et (iii) le rapport bénéfice/coût associé, principalement

impacté par le coût des consommables ou des équipements pour produire à la demande le biocide (ozoneur par exemple), et la nécessité de réaliser des dossiers de validation réglementaire, pouvant s'avérer long et coûteux.

➔ Le développement industriel régulier de cette technologie devrait se poursuivre si les consommateurs lui font un accueil favorable (voir point 4).

Les recherches à venir pour les 10 prochaines années pour diversifier les applications porteront principalement sur :

- Le design de matériel par les équipementiers, permettant des applications plus diverses à différents types d'aliments ;
- Les mises au point d'applications sur produits humides frais préemballés, notamment via une diversification de l'utilisation des biocides liquides ou gazeux au-delà des applications déjà traditionnelles les fruits et légumes frais. *Application prioritaire : augmenter la DLC des produits dit de 1^{ère} gamme améliorée (fruits et légumes non transformés, simplement préemballés).*
- La démonstration de l'innocuité des nouveaux biocides (pas de réaction chimique indésirable) sur de nombreuses matrices alimentaires.

2.5 Principaux acteurs

- la société SOLVAY est leader dans les solutions biocides à base d'Acide Peracétique en UE

<http://www.solvaychemicals.com/EN/products/perox/PAA/PAA.aspx>

- Sté française GOEMAR pour le procédé Oxygreen de traitement à l'ozone gazeux

<http://www.oxygreen.com/fr/home.html>

- de nombreuses sociétés européennes spécialisées en désinfection médicale et hospitalière proposent des dispositifs de production des VSPH.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La France possède un savoir-faire reconnu pour les technologies de décontamination de surface des aliments par biocides chimiques.

Plusieurs équipes universitaires et Centres Techniques sont actifs et connus comme spécialistes de ces procédés, notamment :

- ACTALIA Normandie (Ex Adria Normandie) Equipe de B. Picoche , (Saint Lo - 50)
<http://www.adria-normandie.com/>
- CTCPA, Amiens (Clémence Millet)
- Institut Polytechnique Lasalle Beauvais (60)
<http://www.lasalle-beauvais.fr/-Sciences-et-techniques-Agro->

3- Impact environnemental

Comme tout procédé utilisant des substances chimiques actives, la décontamination par biocide génère des effluents. Toutefois, dans le cas des biocides oxydants, très réactifs, la demi-vie des substances actives est généralement courte (quelques heures maximum) et certaines substances se décomposent spontanément en résidus non toxiques pour l'environnement.

Les biocides halogénés posent plus de problèmes en termes de rejets, avec des produits de dégradation plus stables.

La mise en œuvre des biocides par lavage consomme beaucoup d'eau potable, y compris pour le rinçage après application.

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la

technologie de décontamination chimique de surface a obtenu une note de 4.4 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	1	0	4.4

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

•**Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

•**Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

•**Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

4- Perception des consommateurs

A ce jour, la situation est contrastée :

- Peu de problèmes d'acceptabilité par les consommateurs ont été rapportés concernant le lavage des végétaux de IVème gamme avec des biocides chlorés.

- En revanche, la décontamination des produits animaux (carcasses de bœufs) semble moins bien perçue, car parfois associée à des pratiques frauduleuses ayant fait l'objet de couvertures médiatiques (« remballe » de viandes après décontamination). Ce procédé souffre pour cette raison d'une mauvaise image...

Le mot chimique risque d'inquiéter les consommateurs, qui peuvent également craindre que l'ajout d'un composé chimique dénature l'aliment. Ils ne devraient percevoir spontanément aucun bénéfice par rapport aux autres techniques de décontamination utilisées et donc rejeter cette technologie.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Le marché est peu concurrentiel sur les céréales car le procédé OxyGreen® est unique et breveté.

Il existe actuellement un très fort lobby agricole sur les autorités, qui tend à laisser le taux de mycotoxines autorisé élevé, et rend moins nécessaire le développement du procédé Oxygreen. En effet, une diminution du seuil de mycotoxines obligerait les agriculteurs à investir dans des procédés de décontamination.

Il n'existe actuellement qu'une seule application industrielle du procédé sur le blé. Le nombre de clients des boulangeries fournies par cette farine est en croissance, et ces derniers semblent très satisfaits des produits, et sont informés du procédé que subissent les grains de blé.

Pour les autres technologies / applications, si les verrous réglementaires Français (règlement Auxiliaires Technologiques spécifique) et Européen persistent, et étant donné la réglementation plus souple à l'étranger (aux Etats-Unis notamment), l'Europe et surtout la France perdront leur avance.

Perspectives

Les perspectives d'évolution de la réglementation semblent faibles, même si le taux maximum de mycotoxines est passé de 2000 ppm en 2007 à 1250 ppm aujourd'hui.

Selon l'ex-président de Goëmar, la seule perspective d'évolution de la réglementation et de levée du lobby agricole serait un scandale médiatique révélant les véritables taux de mycotoxines cumulés.

Rentabilité économique

Si la technologie est coûteuse, les surcoûts sont compensés par des bénéfices très importants.

Les coûts du traitement sont estimés à **20€ la tonne**, plus les redevances des brevets. Grossièrement, ces coûts comprennent 50% d'amortissement machine, 25% pour l'électricité et 25% pour l'ozone. Les coûts de maintenance sont minimes, et il n'y a pas besoin de personnel supplémentaire.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de décontamination des surfaces par biocides:

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Sécurité sanitaire - Allongement de la DLC - Prix 	<ul style="list-style-type: none"> - Réglementation - Mise en place des machines
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Diversification des applications - Levée du lobby agricole 	<ul style="list-style-type: none"> - Peur du consommateur

Appliquée aux emballages, la technologie est une étape du conditionnement aseptique. Les principales applications sur les aliments concernent les produits secs, les fruits et légumes (chlore) et des aliments fragiles (crus et tranchés) pour lesquels aucun traitement, notamment thermique, n'est techniquement possible. Bien que cette technologie soit particulièrement facile à mettre en œuvre et économiquement intéressante, la réglementation bloque son développement. Un nombre très restreint de couples aliment/substance est autorisés et ne requière pas la constitution d'un dossier EFSA. Par ailleurs, le consommateur est très méfiant concernant l'utilisation de surface chimique sur les aliments.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

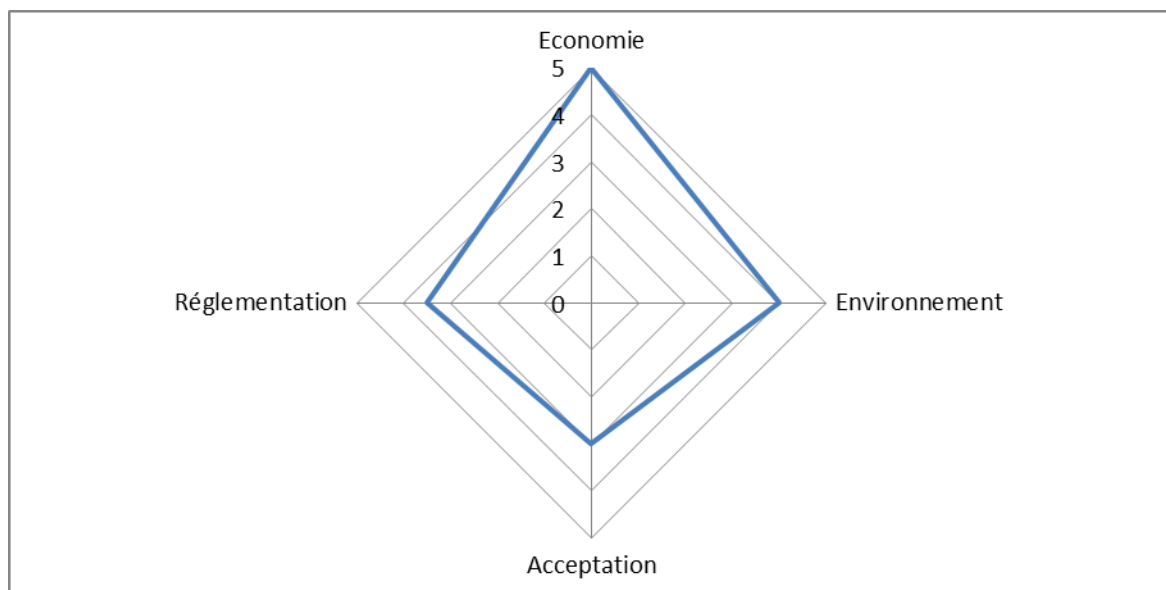


Figure 3 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Réglementation :

Voir notes de bas de page

Revue et Etat de l'art – Articles scientifiques

Document de la FDA – Center for Food Safety and Nutrition:

Analysis & Evaluation of Preventive Control Measures for the Control & Reduction/Elimination of Microbial Hazards on Fresh & Fresh-Cut Produce (Chapter V. Methods to Reduce/Eliminate Pathogens from Produce and Fresh-Cut Produce)

DECONTAMINATION DES EMBALLAGES PAR PLASMAS

Intitulé complet : Décontamination des emballages par traitement plasmas froids

Données clés

Résumé

Cette technologie utilise la génération d'un plasma de gaz froid mis en contact quelques secondes avec la surface interne d'un emballage pour le décontaminer microbiologiquement. Dans le domaine alimentaire, seules les applications sur les matériaux d'emballages sont maîtrisées et envisagées. Les aliments concernés sont donc indirectement, tous ceux qui sont périssables et qui pourraient bénéficier d'un conditionnement parfaitement décontaminé microbiologiquement. La technologie permettrait techniquement de conditionner des aliments avec des durées de vies améliorées. Le traitement plasma ne peut s'appliquer qu'à la face interne de l'emballage vide immédiatement avant conditionnement: cette technique est à associer avec le conditionnement aseptique et/ou ultra propre.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie de traitement par plasmas froids

Cette technologie utilise la génération d'un **plasma froid**, qui est mis en contact direct quelques secondes avec la surface d'un emballage (métallique, plus généralement plastique) pour le décontaminer microbiologiquement. *Le terme plasma désigne une matière de haut niveau d'énergie instable. Lorsque le plasma vient en contact avec des matériaux solides tels que les plastiques et les métaux, l'énergie de celui-ci agit sur les surfaces et entraîne des modifications importantes des propriétés de la surface telles que l'énergie de surface.* Un plasma froid est obtenu par décharge électrique à haute tension entre deux électrodes dans un gaz. Les gaz utilisés pour générer les espèces chimiques instables constituant le plasma réactif sont des gaz neutres inertes : azote, argon, hélium avec souvent une faible proportion d'oxygène et /ou d'hydrogène afin d'obtenir des radicaux réactifs, notamment des oxydants forts. L'ionisation maximale du gaz peut être obtenue avec l'aide de microondes, particulièrement utilisées pour l'obtention de plasmas froids.

Le courant de fort voltage arrache des électrons aux atomes de gaz, générant un état fortement ionisé du gaz, *créant ainsi un état tout à fait particulier de la matière, qui devient hautement réactive chimiquement* : des espèces chimiques instables à demi-vie courte sont formées par l'arrachement des électrons, tels que des radicaux hydroxyles, de l'oxygène radicalaire, etc.

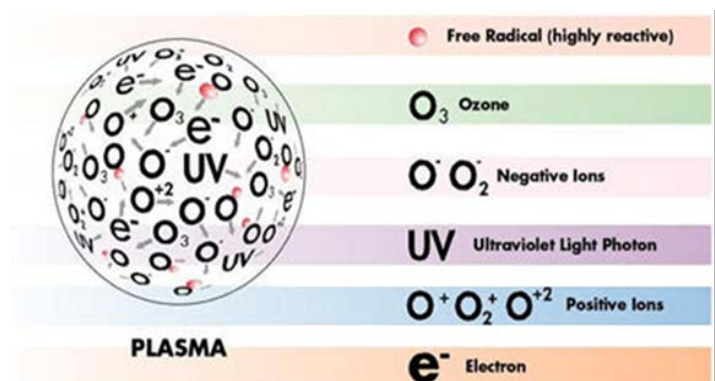


Figure 1 : Représentation d'un plasma

Ce phénomène s'accompagne d'une émission de lumière UV assez intense qui joue également un rôle prépondérant dans la décontamination microbiologique, ainsi que d'une lumière bleutée caractéristique. En atmosphère d'oxygène, les UV peuvent créer des molécules métastables, et en particulier l'oxygène singulet $O_2(1\Delta_g)$ qui possède une énergie interne de 0.98 eV et une très longue durée de vie (4 s). Une fois excité, le gaz est appliqué sur la surface à traiter. Ces opérations ont lieu successivement et de manière continue : le gaz est injecté dans une source, subit la décharge, puis sort de la source et s'applique sur la surface.

Voir l'animation sur le site de l'équipementier ACXYS : <http://www.acxys.fr/plasma.html>

La maîtrise de la décharge électrique permet de limiter la température du gaz en sortie de la source : on parle de plasma froid. De plus, les vitesses de traitement habituelles sont suffisamment élevées pour empêcher toute élévation de température de la surface traitée. Il est donc possible de traiter de nombreux matériaux sans risque de dégradation.

Par opposition aux plasmas chauds utilisés dans l'industrie pour réaliser des dépôts en phase vapeur, obtenus à plus haute température et surtout sous vide poussé, les plasmas froids sont générés à pression atmosphérique et peuvent ainsi être utilisés pour **décontaminer la surface d'emballage sans les endommager**.

Les applications industrielles sont surtout dans le domaine médical hospitalier (stérilisation d'instruments fragiles), mais peu encore dans le domaine IAA.



Figure 2 Décontamination interne d'une bouteille par plasma

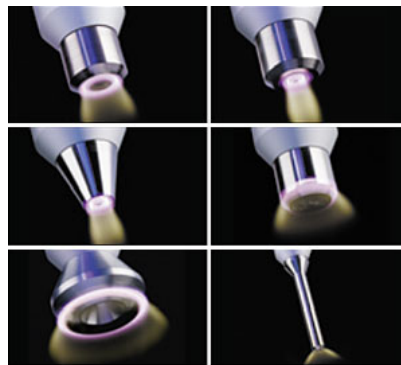


Figure 3 Buses de génération et d'émission de plasma froid (Source : Plasma Treat)

(Source : Procédé de traitement de bouteilles plastiques par plasma froid et dispositif permettant sa mise en œuvre ; Brevet européen EP 1 884 249 A1 (2008)²³)

La présente invention porte sur un procédé de traitement de bouteilles comprenant une opération de stérilisation par plasma froid à partir de gaz non germicides et/ou une opération de dépôt de couche barrière de diffusion par plasma froid, ledit procédé étant caractérisé par le fait que ledit plasma froid délivre une énergie non thermique maximale sur l'ensemble de la surface interne de la bouteille. Le plasma froid est généré par un applicateur de champ à ondes de surface alimenté par un générateur de micro-ondes ou par un système à anode creuse conformée à la bouteille et qui est alimentée en courant continu pulsé et/ou en tension radiofréquence. La paroi de la bouteille constitue le diélectrique à la surface duquel l'intensité du plasma est maximale.

Action des plasmas froids sur les microorganismes présents à la surface des emballages :

- Action décontaminante immédiate par voie physique mais uniquement en surface, par les UV générés dans le plasma. (voir la fiche « Lumière Pulsée ILHDE » pour plus d'information)
- Action en surface, plus durable et par voie chimique (pouvant traiter efficacement un biofilm), au moyen des espèces chimiques hautement réactives contenues dans le plasma (ions, électrons, radicaux oxygénés, radicaux hydroxyles etc...). *Les mécanismes chimiques à l'origine de la décontamination sont assez mal connus, difficiles à étudier du fait de la demi-vie courte des espèces chimiques mis en œuvre.*

²³ <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20080206/patents/EP1884249NWA1/document.html>

Action des plasmas froids sur le matériau constitutif de l'emballage :

Pour ce type d'application, le temps de contact plasma / matériau reste court et les énergies mise en jeu sont faibles. Les réactions chimiques sont évitées et quasiment aucun effet secondaire n'est observable sur le matériau : le procédé est par ailleurs utilisé pour cette raison sur dispositifs médicaux fragiles.

N.B. : pour d'autres applications courantes en plasturgie telles que le dépôt de nano couches par plasmas, la préparation de surface avant dépôt d'adhésifs etc... les interactions peuvent être volontairement obtenues (en jouant sur la nature du gaz, la température, la durée de contact, etc...)

Applications et aliments concernés :

Pour le moment et dans l'état des connaissances, seules les applications sur matériaux d'emballages sont maîtrisées, connues et envisageables industriellement pour le moment. *L'application des plasmas froids directement à la surface des aliments n'a pas fait l'objet de beaucoup de recherches, même si le concept est détecté comme potentiellement très intéressant. Les interactions plasma / aliments sont encore très mal connues.*

Les aliments concernés sont donc **indirectement**, tous ceux qui sont périssables et qui pourraient bénéficier d'un conditionnement parfaitement décontaminé microbiologiquement.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

- La technologie des plasmas froids, par sa capacité à décontaminer les emballages notamment plastiques, permettrait techniquement de préparer des **aliments avec des durées de vie améliorées**, ce qui pourrait contribuer à limiter le gaspillage aux stades de la production, de la distribution, et chez les consommateurs.
- Le traitement plasma ne peut s'appliquer qu'à la face interne de l'emballage vide immédiatement avant conditionnement. Cette technique est à associer avec le conditionnement aseptique (voir la fiche consacrée à cette technologie) et/ou ultra propre, ou le conditionnement en salles blanches.

1.3 Comparaison avec l'existant

Les plasmas froids peuvent être comparés avec d'autres technologies utilisées pour la décontamination microbiologique des emballages, et présentent des avantages spécifiques par rapport à d'autres techniques :

- utilisation en phase sèche, à pression atmosphérique, à température ambiante en application, très localisée : pas besoin de rinçage (par comparaison avec un biocide en solution)
- le plasma, de nature « gazeuse », vient en contact intime avec toute la surface de l'objet à traiter : il n'y a pas d'effets d'ombrage (par comparaison avec la technologie ILHDE-lumière pulsée)
- les espèces chimiques réactives existent dans le plasma avec une durée de vie courte : il n'y a pas de résidu chimique indésirable à gérer, les gaz employés sont non toxiques (par comparaison avec une décontamination par biocides gaz).

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et cadre réglementaire

Le risque sanitaire lié au procédé de décontamination des emballages par plasmas froids est surtout dû :

- A la maîtrise de la décontamination avec l'intensité souhaitée en surface compte tenu des contraintes liées aux dispositifs de traitements. La résistance des différentes flores pathogènes et d'altération aux plasmas froids est mal connue. Peu de littérature existe sur le sujet en applications agro-alimentaires : Une validation complète au cas par cas est requise.
- A la formation éventuelle de composés indésirables au cours des traitements, là encore à évaluer au cas par cas. *Le manque d'informations en l'état de l'art actuel ne permet pas d'utiliser directement cette technique sur les aliments, sans études approfondies préalables.*

Cadre réglementaire

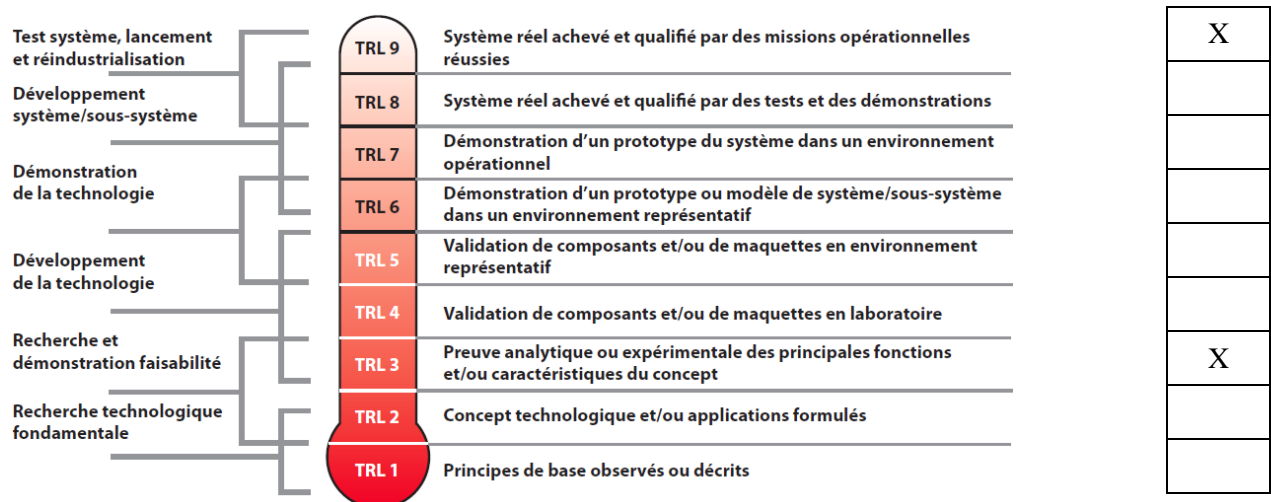
Pour une application à la décontamination de matériaux, en particulier sur plastiques, la réglementation qui s'applique est celle régissant l'alimentarité des matériaux au contact des denrées alimentaires. Il n'y a donc aucun frein réglementaire à la mise en œuvre de cette technologie, au contraire la réglementation lui est plutôt favorable d'autant que la technologie permet de diminuer les émissions de COV et d'eau.

De plus, étant donné qu'il s'agit d'un traitement à la surface par des gaz simples comme l'azote et l'oxygène, les risques sanitaires sont très peu élevés. La seule contrainte réglementaire pourrait être liée à l'utilisation de gaz plus complexes ce qui impliquerait des risques de recombinaisons entre des radicaux instables formés au sein du plasma, et la surface. Cependant, la probabilité d'un tel phénomène semble faible.

Pour une éventuelle application des plasmas en surface d'aliments pour les décontaminer, la réglementation de référence est celle relative aux Nouveaux Aliments.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



La technologie de décontamination par plasma froid est déjà mature et en usage assez largement pour la décontamination de dispositifs médicaux (TRL = 9), mais n'est pas ou peu utilisée actuellement pour la décontamination des emballages destinés aux aliments. Les applications sur aliments sont à l'échelle de la recherche (TRL = 3).

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Freins techniques actuellement identifiés, pour le développement des plasmas froids :

Compte tenu des applications déjà existantes en plasturgie, traitement de surfaces, décontamination médicale, etc..., le transfert de technologie vers des applications en IAA ne pose à priori pas de difficultés particulières autres que les risques identifiés plus haut.

Aucun frein technique majeur n'est identifié qui pourrait s'opposer au développement des plasmas froids.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Cette technologie étant à ce jour très peu utilisée en IAA, son développement actuel et futur repose essentiellement sur :

- (i) Une poursuite des études de R&D, d'application, de transfert de technologie, pour évaluer l'efficacité décontaminante du procédé sur les flores pathogène et d'altération présentes sur les faces internes d'emballages (en particulier vis-à-vis des spores résistantes), **et en parallèle une recherche sur les applications directes sur aliments, potentiellement très intéressantes.**
- (ii) L'adaptation / scale up des dispositifs industriels existants, pour les applications souhaitées.

➔ Le développement industriel de cette technologie est jugé très prometteur.

2.5 Principaux acteurs

Equipementiers Français ou présents en France :

PLASMATREAT SAS 1, rue de Terre Neuve - bât i ZA Courtabœuf 91940 Les Ulis
Tél: +33 160 92 41 56 Fax: +33 160 92 41 57 <http://www.plasmatreat.fr/>

AcXYS France AcXys Technologies (Headquarter)
148 Rue des Vingt Toises 38950 ST MARTIN LE VINOUX Phone: +33 476 756 079
Fax: +33 476 759 275 info@acxys.com <http://www.acxys.fr/plasma.html>

BORÉAL Plasmas 16 rue Aristide Bergès - 38800 Le-Pont-de-Claix Tél. 04 76 71 22 78 - Fax 04 76 71 68 11 <http://www.borealplasma.com/contact/>

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

Recherche et développement :

Plusieurs équipes universitaires disposent de compétences et de matériels pour l'étude des plasmas en général.

GREMI (Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés) : unité mixte de recherche de l'Université d'Orléans et du département des Sciences et Technologies de l'Information et de l'Ingénierie ST2I du CNRS.

<http://www.univ-orleans.fr/gremi/Francais/Presentation.htm>

Ecole polytechnique : Voir dossier FlashX sur les plasmas :

La lettre scientifique de l'École Polytechnique N° 12 JUIN 2010

<https://gargantua.polytechnique.fr/siatel-web/linkto/mICYYYYeyY6>

CNRS : anime un réseau des laboratoires impliqués dans les plasmas froids, listés sur la page : <http://plasmasfroids.cnrs.fr/spip.php?rubrique18>

3- Impact environnemental

L'utilisation des plasmas froid génère un impact environnemental assez réduit, mais difficile à évaluer :

- Technologie à fonctionnement électrique (puissances installées usuelles 1-5 kW) mais qui consomme souvent des gaz purs (azote, argon, hélium avec souvent une faible proportion d'oxygène et /ou d'hydrogène) : l'obtention de ces gaz est généralement assez consommatrice d'énergie.
- Des émissions d'oxydes d'azote sont également observées. Un calcul a été effectué par Acxys, qui quantifie les émissions d'oxydes d'azote en 1 an de fonctionnement, équivalentes aux émissions d'une voiture pendant 200 km.
- L'absence de phase de séchage constitue une importante économie d'énergie.
- Pas d'effluent impactant généré

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de décontamination des emballages par plasma a obtenu une note de 4.4 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	1	0	4.4

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel:** 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage :** 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Ce procédé est à priori peu ou pas connu des consommateurs, pour lesquels la perception des plasmas froid n'est pas documentée pour le moment. Le plasma est sans doute considéré comme une application complexe, ce qui réduit son acceptabilité. De plus, les consommateurs risquent de s'interroger sur de possibles changements dans le produit. Ce procédé peut toutefois être expliqué assez simplement comme une technologie associant gaz neutres et électricité. L'utilisation de gaz « ordinaires » (azote, oxygène..), qui sont généralement moins rejetés par les consommateurs que d'autres substances chimiques, présente un atout.

5- Dimension économique

Le marché actuel

Le marché du traitement des surfaces par plasma à pression atmosphérique semble très peu concurrentiel, avec une petite dizaine de concurrents directs dans le monde. La France se positionne plutôt bien pour cette technologie, avec le Danemark, l'Allemagne (acteur important), la Corée, le Japon et les Etats-Unis. Il n'y a que deux entreprises à rayonnement mondial, dont une française, Acxys Technologies. La société réalise environ la moitié de son chiffre d'affaire à l'export.

Perspectives

Le marché des technologies de traitement de surface par plasma atmosphérique est en croissance. Acxys Technologies prévoit un développement important de celle-ci dans les 5-10 ans à venir, avec un chiffre d'affaire qui passerait de 1 à 2 ou 5 millions d'ici 5 ans, et à environ 10 millions en 10 ans. Des variations importantes du prix de la technologie ne sont pas prévues.

Rentabilité économique

Les coûts d'investissement de la technologie sont importants.

Données de l'entreprise Acxys Technologies :

Un module standard vendu seul (torche plasma) : 12 500€

Une solution clé en main nécessite un investissement de 60 000 à 200 000 €

Si le gaz utilisé pour la mise en œuvre de la technologie est de l'azote, on estime le coût à 2 cts d'euro le m².

Pour la technologie à air comprimé, la technologie est environ 5 fois moins chère, donc inférieure à 1ct d'€le m².

Cependant, la technologie est plus intéressante au niveau des coûts d'utilisation. Elle permet de faire des économies au niveau des coûts de fonctionnement par rapport à des technologies classiques. De plus, les coûts de maintenance sont relativement peu importants, et sont liés à des changements ponctuels d'électrodes sur les torches plasma. Les circuits de refroidissement doivent également être vérifiés une fois par an.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de décontamination des emballages par traitement plasma:

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Qualité sanitaire - Augmentation de la DLC - Domaines d'applications - Réglementation - Avance de la France 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts d'investissement - Mauvaise perception des consommateurs
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Développement industriel - Développement du conditionnement aseptique 	

La technologie est utilisée dans le domaine hospitalier. Aujourd'hui, peu d'IAA l'utilisent. La décontamination des emballages par traitement plasma peut constituer une étape du conditionnement aseptique, notamment pour les bouteilles. On ne peut pas encore l'utiliser directement sur la surface des aliments car l'innocuité n'a pas encore été testée. Sur les emballages, la réglementation est favorable à la technologie. Le frein est d'ordre économique. Cependant, le développement industriel devrait entraîner une baisse des coûts d'investissement. Un inconvénient de la technologie est lié au nombre très important et à la diversité des applications possibles. Cela peut impliquer pour les industriels une méconnaissance du spectre d'action de la technologie, ou au contraire une tendance à croire qu'elle peut avoir toutes les applications. De plus, il est assez difficile de maîtriser la composition d'un gaz, contrairement à celle d'un liquide.

Le graphique radar ci-dessous synthétise l'impact de la technologie sur les axes économie, environnement, acceptation et réglementaire à partir de des entretiens avec les équipementiers.

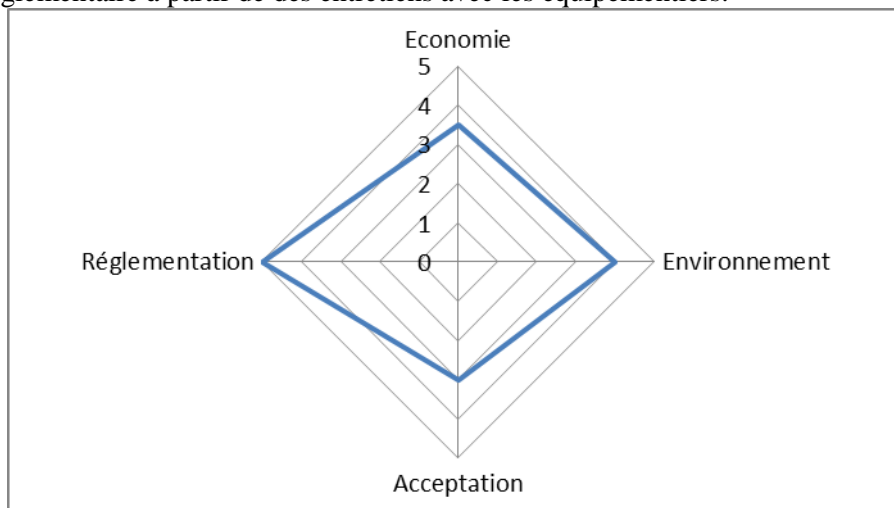


Figure 4 : Echelle 0 = peu intéressant économiquement, impact environnemental négatif, mauvaise acceptation, frein réglementaire ; 5 = intéressant économiquement, impact environnemental faible, bonne acceptation, réglementation favorable

Bibliographie

Gilbert Shama, Michael G. Kong, 2012. *Prospects for Treating Foods with Cold Atmospheric Gas Plasmas*. In : Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security
NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology 2012, pp 433-443 [en ligne]
Disponible sur: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-007-2852-3_33 (consulté le 06.01.2013)

Reuves et Etat de l'art – Articles scientifiques

Berthout G., 2012. Titre de la thèse ?
http://tel.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=4ra8b8laebfoce5agac95vqp21&view_this_doc=tel-00512414&version=1

Roya Afshari , Hedayat Hosseini

Non-thermal plasma as a new food preservation method, its present and future prospect

Mini Review Article : Journal of Paramedical Sciences (JPS) Winter 2014 Vol.5, No.1 ISSN 2008-4978 116

TECHNOLOGIES MONOCOUCHEs RECYCLABLES

Fiche consolidée par Benoît Lefebvre (Ellipso)

Données clés

Résumé

Pour consolider l'intérêt environnemental des emballages portionnables il convient d'améliorer leur recyclabilité et leur fin de vie : les innovations considérées ici consistent à rendre compatibles les caractéristiques des emballages aux impératifs de recyclabilité. Quatre pistes sont envisagées : (i) le développement de matériaux d'emballages barrières monocouches ; (ii) le développement de matériaux barrières assimilés à des monocouches, c'est-à-dire comportant des composants mineurs qui seront dispersés dans la masse au cours du recyclage matière, (iii) les emballages à composants multiples mais non solidarités, séparables au cours de l'opération de tri afin de permettre de recycler séparément des composants matériaux purs et (iv) les emballages « multicouches monomatière » avec l'utilisation d'un seul et même matériau de base formulé de façon différenciée pour apporter les différentes propriétés recherchées dans un emballage.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

Une profonde mutation a été entreprise depuis une vingtaine d'années par les utilisateurs d'emballage pour répondre à des exigences techniques de plus en plus diversifiées et complexes. L'association des propriétés élémentaires de différents matériaux dans un système complexe multicouches permet de répondre de façon quasi illimitée à des cahiers des charges trop complexes pour un seul matériau. De nombreux facteurs ont favorisé le développement des complexes :

- Les emballages métalliques et verre ont en partie été remplacés par les matériaux plastiques, afin de réduire la masse des emballages, et d'améliorer la modularité des formats. Les exigences de niveau barrière appellent à utiliser les multicouches.
- Les exigences de durée de vie des produits sont de plus en plus élevées. On remarque en parallèle le fort développement du MAP²⁴, pour la protection biochimique et microbiologique des produits. Pour les DLC²⁵ longues, ceci doit être associé à des emballages permettant la rétention de l'atmosphère modifiée (barrières multicouches).
- De nouveaux standards d'emballages souples se développent comme par exemple le Doypack, qui appelle un compromis complexe entre rigidité (couche PET²⁶), effet barrière (couche métallique), résistance à la déchirure (couche LDPE + couche PA)²⁷ et scellabilité (couche de scellant copolymère aliphatique).
- Les cadences sur lignes de conditionnement sont de plus en plus élevées, ce qui appelle l'utilisation de couches de scellage de très faible point de fusion.
- Les voies d'apport des couches externes et d'impression se diversifient, grâce aux innovations dans le domaine de l'impression, et le développement des technologies de type IML. Ces technologies ont été développées pour les emballages injectés, mais sont également en voie de développement pour d'autres technologies de mise en forme des matériaux plastiques.
- Des emballages mixtes plastique / papiers cartons se développent.

Les exigences de diminution du gaspillage appellent également, entre autres approches, à multiplier les emballages, avec le développement des petites portions et des modes de consommation nomade. Cette

²⁴ MAP : Modified Atmosphere Packaging

²⁵ DLC : Dates Limites de Consommation


²⁶ PET : Polyethylene terephthalat

²⁷ LDPE : Dow Density Polyethylene et PA : Polyamide

approche se justifie d'un point de vue environnemental global, l'ACV²⁸ du couple emballage produit étant généralement meilleure grâce à la diminution du gaspillage alimentaire. La tendance à l'augmentation du volume des emballages doit cependant s'accompagner d'une amélioration des performances de la filière de recyclage. Malgré une progression très significative de l'utilisation industrielle d'emballages recyclés en France ces dernières années, les objectifs fixés au niveau européen nécessitent des progrès supplémentaires. Ces efforts devront à la fois améliorer le taux de recyclage des matériaux aujourd'hui collectés, mais également élargir le gisement collecté. Pour améliorer les performances de la filière de recyclage, ECOEMBALLAGES envisage ainsi une extension de la collecte des emballages plastiques, au-delà des bouteilles et flacons recyclés à ce jour. De la situation actuelle où seuls les bouteilles et flacons sont recyclés, avec des spécificités locales de règles de tri, nous passerons bientôt à une seule consigne au niveau national : tous les emballages plastiques seront recyclés. Les pots, films, et barquettes non recyclés à ce jour seront désormais collectés, puis valorisés par recyclage matière ou valorisation thermique. La valorisation thermique sera systématiquement envisagée lorsque les matériaux présenteront une composition trop complexe. C'est évidemment le cas (fréquent) des matériaux complexes multicouches.

Pour consolider l'intérêt environnemental des emballages nomades/portionnables il convient donc d'appréhender leur recyclabilité et leur fin de vie dès leur conception. C'est donc l'ensemble des règles de choix et de conception des matériaux qui doivent être révisés :

- (i) Par la diminution de la masse des emballages lorsque les technologies multicouches et leur valorisation thermiques resteront incontournables
- (ii) Par la substitution directe des complexes par des packagings monomatériaux lorsque leur usage n'est pas obligatoire
- (iii) Par la mise au point de nouveaux concepts d'emballages, à la fois fonctionnels et recyclables, apportant l'ensemble des propriétés recherchées, mais permettant de recycler séparément des composants matériaux purs**

Source du gisement actuel 

Catégorie d'emballages	Résine plastique	Tonnage	En %
Bouteilles et flacons	PET	333 000	28
	Pehd	150 000	12
	PP	11 000	1
Rigides autre que bouteilles et flacons	PP	126 000	10
	PS	46 000	4
	PET	42 000	3
	PE	19 000	2
	PVC	34 000	3
	PSE	35 000	3
	Complexes	39 000	3
Souples	< A4	124 000	10
	> A4 Pebd	198 000	16
	> A4 PP	12 000	1
	> A4 Complexes et PVC	16 000	1
	> A4 sacs PP et PE tissés	24 000	2
TOTAL		1 209 000	100

Gisement de déchets d'emballages plastiques ménagers
 Source : étude Eco-Emballages / ADEME « Etude de l'opportunité du tri et du recyclage des emballages ménagers plastiques autres que bouteilles et flacons », publié en décembre 2009.

Figure 1 : Composition des emballages alimentaires

²⁸ ACV : Analyse du Cycle de Vie

Les pistes techniques évoquées ci-dessous sont données à titre d'exemple de façon évidemment non exhaustive :

- **matériaux d'emballages barrières monocouches** : utilisation de polymères barrières qui assurent de façon satisfaisante les autres fonctions de l'emballage (voir fiches « nouveaux polymères d'emballages avec hautes propriétés barrières » et « matériaux d'emballage nanochargés dans la masse »)

- **matériaux barrières assimilés à des monocouches**, c'est-à-dire comportant des composants mineurs qui seront dispersés dans la masse au cours du recyclage matière (cf fiche coatings organiques nanochargés)

- **emballages à composants multiples non solidarisés**, séparables au cours de l'opération de tri. Dans l'exemple ci-dessous, les 3 composants de l'emballage (opercule, bol interne, bol externe) ne sont solidarisés qu'au niveau de la zone de scellage, au niveau des oreilles des deux bols.



Figure 2 : Prototype FUI projet EMABIO

Après ouverture, les composants peuvent être valorisés séparément. On peut également citer le concept de la société *Virgin Biopack* qui propose un système de séparation d'un emballage plastique / carton.



Figure 3 : Concept de Virgin Biopack

- **Emballages « multicouches monomatière »**

Un seul et même matériau de base peut être sélectionné en grade et formulé de façon différenciée pour apporter les différentes propriétés recherchées dans un emballage multicouche barrière. Des concepts reposant sur l'exemple ci-dessous seraient en développement.

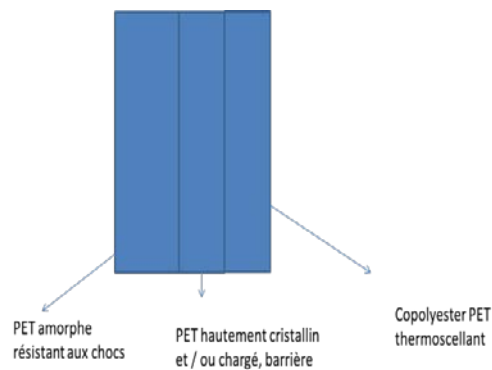


Figure 4 : Emballage

Après recyclage matière, le mélange des trois matériaux génèrerait un grade « moyen » de PET bouteille.

-Technologies alternatives au thermoscellage classique

Le thermoscellage classique repose sur le principe schématisé ci-dessous : les matériaux sont scellés au niveau de couches internes par chauffage par l'extérieur. Pour que les couches internes fondent **avant** les couches externes (qui reçoivent la majeure partie du gradient thermique), il faut que les couches de scellage interne aient un très bas point de fusion. D'où l'utilisation incontournable de structures multicouches en thermoscellage classique.

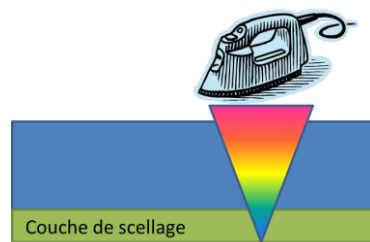


Figure5 : Thermoscellage

Les solutions alternatives consistent **soit par exemple à limiter la quantité de scellant en ne les utilisant qu'au niveau des zones de scellage** (FaerchPlast), **soit à remettre en cause la technologie de scellage par voie thermique : par exemple les ultrasons** permettent de faire fondre les couches internes en contact. La technologie est compatible avec un « mono » matériau d'emballage, en revanche elle ne permet pas un pelage aisé et est difficile à maîtriser. Des évolutions de cette technologie sont envisageables, soit en instrumentant le procédé pour un meilleur contrôle du niveau d'adhésion entre les surfaces, soit en adaptant de façon plus spécifique les matériaux d'emballages à cette technologie.

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

L'utilisation de portions adaptées aux usages des consommateurs est considérée comme un levier efficace de réduction du gaspillage alimentaire. Les emballages portionnables et/ou de faible volume font cependant face à une contradiction :

- Leur développement améliore l'ACV du produit, ainsi que généralement l'ACV du produit emballé
- Leur développement implique l'augmentation de l'impact des emballages

Pour encourager la mise en œuvre d'emballages portionnables, il convient de revisiter un grand nombre de concepts qui trouvaient jusqu'à présent toute leur justification technique, mais qui sont appelés à évoluer avec l'opportunité de recyclage des emballages, très élargie suite à la décision d'Ecoemballages.

1.3 Comparaison avec l'existant

L'innovation consistera à rendre compatibles des caractéristiques technologiques ou d'usage aux impératifs de recyclabilité.

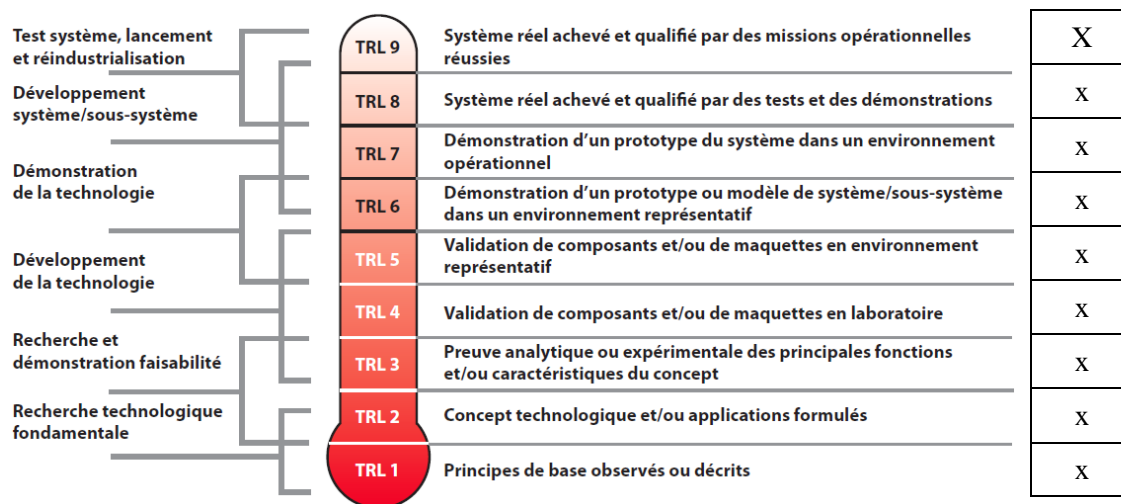
2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

Pas de verrou particulier de ce point de vue dans les différentes pistes listées.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Il existe une grande diversité de maturité des différentes pistes à envisager pour favoriser la recyclabilité des matériaux d'emballages.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Le frein principal réside dans le caractère très concurrentiel des innovations.

Pour répondre à ces grands enjeux, une réflexion collective de la filière doit être engagée, afin de :

- **Définir les domaines dans lesquels les stratégies de différenciation des produits industriels doivent être recherchées**, afin de proposer aux marchés des matériaux originaux, très innovants, développés spécifiquement pour des secteurs d'application donnés, et afin de mieux répondre aux besoins de l'industrie agroalimentaire et aux exigences de qualité des aliments.
- **Définir les domaines dans lesquels, à l'échelle nationale, le codéveloppement et une certaine homogénéité des technologies sont souhaitables**, dans une optique d'écodéveloppement. En effet, en matière de recyclabilité, la trop grande diversité des technologies n'est pas souhaitable, ou du moins il est souhaitable que ces technologies convergent vers des modes de recyclage compatibles.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Les décisions sur les modalités d'extension des consignes de tri seront prises par Ecoemballages début 2014. Le basculement devrait ensuite avoir lieu relativement rapidement.

Les conséquences sur les technologies d'emballages dépendront grandement de l'exigence des consommateurs, qui triant davantage, exigeront une performance améliorée de la filière de recyclage. Il devrait donc y avoir un délai entre les décisions d'extension de la collecte et leurs conséquences sur l'évolution des technologies d'emballage. Ceci ouvre la possibilité d'une vraie réflexion de la filière en amont, pour préparer cette transition.

2.5 Principaux acteurs

La thématique est trop large pour recenser les acteurs potentiels. Il est toutefois clair que les innovations associées tiennent beaucoup plus de la recherche technique que d'un investissement de la recherche académique sur le sujet

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

D'autres pays ont étendu leur collecte très largement, sans observer de conséquences particulières sur les pratiques de conditionnement.

Les atouts nationaux attirent à la période au cours de laquelle la transition sera opérée :

- Exigences sociétales de développement durable particulièrement fortes concernant les emballages des produits alimentaires,
- Source d'innovation et de différenciation de la filière dans son contexte européen et international.

3- Impact environnemental

L'objectif de cette famille de technologies consiste à minimiser l'impact environnemental des emballages sans modifier celle du produit qui lui est associé (iso-fonctionnalité).

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie de monocouches recyclables a obtenu une note de 0.7 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	-1	-1	0.7

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

•**Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage

•**Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique

- Recyclage:** 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique
0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Les consommateurs devraient être favorables car cette technologie permet de réduire la quantité de déchets non alimentaires. De plus le terme « recyclable » est perçu favorablement par les consommateurs.

5- Dimension économique

VirginBioPack est l'équipementier en France à proposer des solutions d'écoconception les plus abouties. Il pourrait être intéressant de valoriser des nouvelles sources de cellulose (paille de riz en Camargue, bagasse de la canne à sucre : déjà développé pour la bagasse mais en Asie). Ce marché est en croissance globalement.

Les changements de pratiques industrielles de conditionnement envisagées n'engendrent pas spécialement de surcoûts par rapport aux technologies existantes. En revanche, leur mise en place mobilisera probablement un fort investissement R&D de la filière.

La technologie proposée par Virginbiopack, barquette Hybric Tray, est environ 50% plus chère qu'une barquette en plastique classique. Cependant, l'emballage est plus valorisant et présente de nombreux avantages. De plus, étant donné que l'IAA cliente peut imprimer directement sur l'emballage, le prix plus élevé est en partie compensé par des économies faites au niveau des articles de conditionnement secondaires (étiquettes supports...). Enfin, l'adoption de cette technologie permet aux IAA de réduire leur écotaxe, car ces emballages sont éco-conçus.

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques de la technologie de monocouches recyclables :

Forces <ul style="list-style-type: none">- Faible impact environnemental- Diminution du gaspillage- Surface imprimable pour le marketing- Bonne perception consommateur	Faiblesses <ul style="list-style-type: none">- Développement faible
Opportunités <ul style="list-style-type: none">- Développement industriel- Exigence de recyclabilité	Menaces <ul style="list-style-type: none">- L'émergence de technologie quasi équivalente mais beaucoup moins chère- Marché de niche limitant le développement

Le consommateur est de plus en plus préoccupé par son empreinte sur la planète. La réduction de l'impact environnemental est un atout pour le développement de la technologie ainsi que la réduction du gaspillage alimentaire permis par des portions plus adaptées aux besoins des consommateurs. Cette catégorie d'emballage englobe de nombreux matériaux prometteurs mais leur développement dépendra notamment des filières de recyclage mises en place au niveau national.

EMBALLAGES MINIMISANT EN TOUTES CONDITIONS LES PHENOMENES DE MIGRATION

Fiche consolidée par Benoît Lefebvre (Ellipso)

Données clés

Résumé

Le développement des emballages portionnables a pour conséquence une augmentation du ratio entre les surfaces moyennes des emballages et le volume de produits consommés. Les emballages portionnables et/ou de faible volume font ainsi face à une contradiction : si leur développement améliore l'ACV (Analyse Cycle de Vie) du produit emballé, il implique par ailleurs l'augmentation de l'exposition du consommateur à l'ensemble des composés migrant des emballages. Le développement d'emballages portionnables doit donc s'accompagner d'une recherche de minimisation du risque chimique associé à l'utilisation des matériaux d'emballages. Cette catégorie d'innovations regroupe de nouveaux matériaux d'emballages alimentaires conçus à partir d'une approche de « safe-formulation ». Cette « safe-conception » des matériaux d'emballage repose sur l'utilisation d'outils prédictifs du danger des substances chimiques ou de l'exposition.

1-Description de la technologie et de son impact sur le gaspillage

1.1 Présentation de la technologie

La validation de l'aptitude au contact alimentaire d'un emballage plastique repose principalement sur 4 principes :

- Les composants entrant dans la fabrication de l'emballage doivent figurer sur une liste « positive » de composants autorisés pour un usage en contact alimentaire
- L'emballage ne doit pas avoir d'effets organoleptiques dans ses conditions d'usage
- La quantité massique de la fraction de l'emballage migrant dans l'aliment dans ses conditions d'usage ne doit pas excéder 10 mg/dm² (« limite de migration globale »)
- Si dans la composition de l'emballage certains composés sont soumis à restriction, la migration de ces composés dans les conditions d'usage de l'emballage ne doit pas excéder leur Limite de Migration Spécifique (LMS)

Tous les matériaux d'emballages sur le marché répondent à ces exigences réglementaires

Toutefois, un certain nombre de facteurs appellent les agro-industries à exiger et promouvoir une démarche plus restrictive que la réglementation européenne concernant les matériaux au contact des aliments.

- Le consommateur utilise de plus en plus de produits emballés, et le **développement des emballages portionnables** et nomades a pour conséquence directe l'augmentation du ratio entre les surfaces moyennes des emballages et le volume de produits consommés.
- La **sensibilité des consommateurs** au risque d'exposition aux substances chimiques a pris un nouveau tournant ces dernières années avec le débat sur les perturbateurs endocriniens. En absence de consensus pour la qualification du danger, les effets de perturbation endocrinienne ne font pas partie aujourd'hui des critères d'évaluation des nouvelles substances. Les filières agroalimentaires directement impactées par ces crises doivent donc se poser des questions quant aux démarches à suivre. En effet, les récents scandales ont bien montré que **le seul respect de la réglementation ne répond pas aux exigences sociétales**. Des contrats d'objectifs de diminution de l'exposition à certaines substances, la suggestion de listes négatives ou de composés à « éviter », sont des exemples de démarches que la profession pourrait mener en sus du strict et complexe respect de la réglementation.

- La gestion du risque chimique est la seule démarche mise en place sur la base d'un concept de seuil par les entreprises agroalimentaires. Les impératifs environnementaux et les systèmes d'assurance qualité fonctionnent eux sur la base de **démarches de progrès**, sans effet de seuil au-delà duquel les objectifs d'amélioration continue seraient superflus. Dans cette démarche, de nombreuses pistes pourraient être entreprises par la filière : minimiser la migration globale des emballages via des règles de choix des résines, minimiser l'utilisation d'additifs superflus (les formulations de matériaux plastiques sont rarement uniquement dédiées au « contact alimentaire », elles sont souvent optimisées pour répondre à un large spectre d'utilisations), limiter la surformulation des matériaux...

1.2 Impact sur le gaspillage alimentaire

Les emballages portionnables assurant la juste dose du produit sont identifiés comme des leviers de réduction du gaspillage alimentaire. Le développement des emballages portionnables a pour conséquence une augmentation du ratio entre les surfaces moyennes des emballages et le volume de produits consommés. Si leur développement améliore l'ACV (Analyse Cycle de Vie) du produit emballé, il implique par ailleurs l'augmentation de l'exposition du consommateur à l'ensemble des composés migrant des emballages. Le développement d'emballages portionnables doit donc s'accompagner d'une recherche de minimisation du risque chimique associé à l'utilisation des matériaux d'emballages.

Il convient donc, pour consolider l'un des leviers les plus évidents de la maîtrise du gaspillage alimentaire, de minimiser le risque chimique associé à l'utilisation des matériaux d'emballages. Les nouveaux matériaux d'emballages alimentaires conçus à partir d'une approche de « safe-formulation » répondent à ce besoin.

1.3 Comparaison avec l'existant

Le risque chimique est maîtrisé sur la base des exigences réglementaires. Suffisantes ou non du point de vue des connaissances scientifiques actuelles (ceci est du ressort de l'EFSA), il n'en demeure pas moins que les exigences sociétales appellent une démarche complémentaire d'amélioration des matériaux d'emballages en dehors de toute considération de listes et seuils définis au niveau réglementaire.

2- Mise en œuvre de la technologie

2.1 Risque sanitaire et contrainte réglementaire

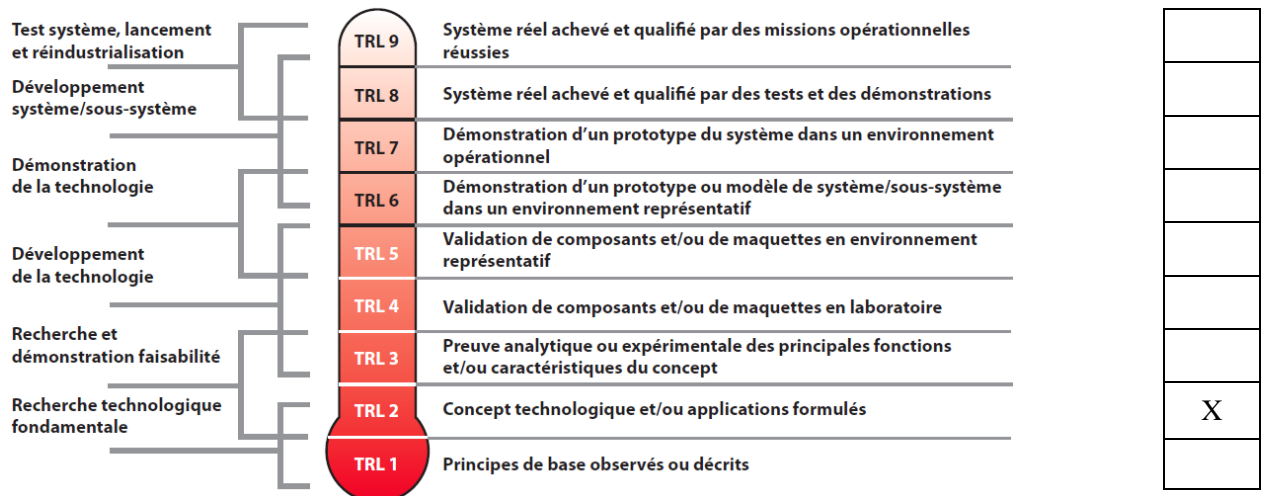
La démarche proposée pourrait faciliter le contrôle réglementaire des matériaux.

Dans le cas d'utilisation systématique de substances sans limites de migration spécifique (LMS), il n'y aurait par exemple plus de nécessité de pratiquer les tests de migration spécifique, ni de mener le traçage complexe des composés soumis à restriction concernés par ces analyses.

Dans l'éventualité de la mise en place de formulations génériques de matériaux répondant à un cahier des charges d'utilisation donné, les tests de conformité à un cahier des charges réglementaire à mettre en œuvre seraient considérablement allégés.

2.2 Maturité de la technologie

Statut sur l'échelle Technology Readiness Level :



Cette démarche globale de filière ne se situe qu'au stade de concept.

2.3 Les freins possibles à la mise en œuvre de la technologie

Les acteurs impactant la qualité d'un matériau d'emballage sont au moins au nombre de 4 : le grand chimiste (en ce qui concerne les résines, leurs catalyseurs, les impuretés et fractions oligomériques...), le compoundeur (en ce qui concerne les additifs, les pigments et colorants), le transformateur (en ce qui concerne les additifs de process et les impacts procédé sur la formation de substances néoformées) et l'utilisateur (impacts du procédé alimentaire). **Cette multiplicité des acteurs** ainsi que la difficulté d'échanges d'informations en partie confidentielles et compétitives rend extrêmement complexe toute démarche collective visant à maîtriser la composition des matériaux d'emballage.

La démarche de *safe-formulation* peut être lue comme une source de limitation de l'innovation, et des stratégies de différenciation des entreprises.

2.4 Evolution possible de la technologie à l'horizon 2025

Les outils prédictifs du danger des substances chimiques (outils QSAR ou Quantitative Structure Activity Relationships) ou de l'exposition (outils de prédiction du partage des substances entre l'emballage et les aliments, outils de prédiction de la diffusion des substances, base de données de sources d'exposition) sont en fort développement depuis une dizaine d'années et sont appelés à gagner en robustesse.

Dans un premier temps envisagés comme des outils de prédiction du risque, ils se révèlent être aussi des outils de *safe-conception* des matériaux d'emballage. Trop complexes toutefois pour une utilisation directe par l'industrie, ils pourraient être valorisés sous forme de préconisation de composition de matériaux.

2.5 Principaux acteurs

La recherche académique (INRA, AgroParisTech) se focalise uniquement sur l'évaluation des matériaux, autrement dit sur la mise en évidence du danger et la quantification du risque dans les conditions d'utilisation. Ce travail est complexe et utile, mais aucun acteur académique n'a pour mission de contribuer, au regard des risques mis en évidence, à l'amélioration des matériaux.

Au niveau industriel, Nestlé met en place depuis quelques années une démarche très avancée sur la maîtrise des matériaux au contact, avec un cahier des charges à destination de ses fournisseurs, nettement plus exigeant que la réglementation européenne.

2.6 Mise en œuvre au niveau national : forces et faiblesses

La « *safe-formulation* » des matériaux d'emballage nécessitera une démarche collective de filière. Elle pourra être menée à l'initiative de la filière agroalimentaire, qui maîtrise les conditions finales d'utilisation des produits.

Des réflexions sont par ailleurs en cours, d'initiative française, sur la mise en place d'un réseau européen de laboratoires, avec pour objectif l'amélioration des matériaux au contact alimentaire. Les résultats des travaux seront rendus publics et la filière emballage disposera de ces données pour faire évoluer ses critères de choix, ses pratiques de formulation, et ses procédés de transformation.

En revanche, les experts dans le domaine ne sont pas suffisamment nombreux pour que ce genre d'initiative puisse être mené à échelle nationale.

3- Impact environnemental

Suite à l'évaluation de toutes les technologies en termes d'impact environnemental par les experts du CTCPA à partir des entretiens avec les équipementiers et d'après les informations contenues dans cette fiche, la technologie d'emballages minimisant en toutes conditions les phénomènes de migration a obtenu une note de 3 pour l'indice Coût environnemental par rapport à l'existant.

Quantité d'emballage additionnel	Intensité ressource par kg d'emballage	Recyclage	Indice Coût environnemental par rapport à l'existant
0	0	0	3

L'échelle pour chaque critère est la suivante :

- **Quantité d'emballage additionnel**: 1: la technologie implique une quantité d'emballage supplémentaire par rapport à un emballage classique 0: la technologie ne modifie pas la quantité d'emballage -1: la technologie réduit la quantité d'emballage
- **Intensité ressource par kg d'emballage** : 1: la technologie nécessite plus de ressources par rapport à un emballage classique 0: la technologie utilise les mêmes ressources que la solution existante -1: la technologie utilise moins de ressources par rapport à un emballage classique
- **Recyclage**: 1: l'emballage présente un recyclage plus complexe par rapport à un emballage classique 0: l'emballage présente le même type de recyclage que la solution existante -1: la technologie présente un recyclage facilité par rapport à un emballage classique

L'échelle pour l'indice coût environnemental allait de 0 (la technologie a moins d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) à 26 (la technologie a plus d'impact sur l'environnement sur les trois critères qu'une technologie existante comparable) sachant que la valeur 7 équivaut au fait que la technologie a le même impact que la technologie existante sur les trois critères.

4- Perception des consommateurs

Avant d'accepter cette innovation, les consommateurs demanderont des preuves de l'inertie chimique des matériaux utilisés. Ces emballages peuvent être associés à un milieu stérile et donc à l'hôpital.

5- Dimension économique

A priori sans effets majeurs

En conclusion, la matrice de SWOT suivante résume les éléments caractéristiques des 4.2 Emballages minimisant en toutes conditions les phénomènes de migration:

Forces <ul style="list-style-type: none">- Qualité sanitaire- Réduction du gaspillage	Faiblesses <ul style="list-style-type: none">- Stade de Concept uniquement- Dispersion et concurrence entre les acteurs
Opportunités <ul style="list-style-type: none">- Développement des emballages portionnables/nomades- Exigences sociétales- Réglementation- Démarche collective de la filière	Menaces

Les emballages minimisant en toutes conditions les phénomènes de migration sont encore au stade de concept. Ils répondent à une exigence du consommateur qui demande plus de sécurité sanitaire. En effet, la tendance étant à l'emballage portionnable et/ou nomade, les produits sont de plus en plus en contact avec les matériaux d'emballages et les consommateurs ont une crainte quant à l'exposition aux substances chimiques. Une démarche commune des acteurs agroalimentaire et une réglementation positive pourraient favoriser l'émergence de ces technologies.

Les rapports Pipame déjà parus

- Diffusion des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) dans le bâtiment, juin 2009
- Étude de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique, septembre 2009
- La logistique en France : indicateurs territoriaux, septembre 2009
- Logistique mutualisée : la filière « fruits et légumes » du marché d'intérêt national de Rungis, octobre 2009
- Logistique et distribution urbaine, novembre 2009
- Logistique : compétences à développer dans les relations « donneur d'ordre – prestataire », novembre 2009
- L'impact des technologies de l'information sur la logistique, novembre 2009
- Dimension économique et industrielle des cartes à puces, novembre 2009
- Le commerce du futur, novembre 2009
- Mutations économiques pour les industries de la santé, novembre 2009
- Réflexions prospectives autour des biomarqueurs, décembre 2009
- Mutations économiques dans le domaine de la chimie, février 2010
- Mutations économiques dans le domaine de la chimie – volet compétences, février 2010
- Mutations économiques dans le domaine automobile, avril 2010
- Maintenance et réparation aéronautiques : base de connaissances et évolution, juin 2010
- Pratiques de logistique collaborative : quelles opportunités pour les PME/ETI ?, février 2011
- Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, juin 2011
- Étude prospective des bassins automobiles : Haute-Normandie, Lorraine et Franche-Comté, novembre 2011
- M-tourisme, décembre 2011
- Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020, février 2012
- La gestion des actifs immatériels dans les industries culturelles et créatives, mars 2012
- Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France, avril 2012
- Enjeux et perspectives des industries agroalimentaires face à la volatilité du prix des matières premières, octobre 2012
- Potentiel et perspectives de développement des plates-formes d'échanges interentreprises, janvier 2013
- Étude sur la location de biens et services innovants : nouvelles offres, nouveaux opérateurs, nouveaux modèles économiques ? janvier 2013
- Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobiles et aéronautiques, mars 2013
- Chaînes logistiques multimodales dans l'économie verte, mars 2013
- Évolutions technologiques, mutations des services postaux et développement de services du futur, juillet 2013
- Imagerie médicale du futur, octobre 2013
- Relocalisations d'activités industrielles en France, décembre 2013
- Benchmark européen sur les plateformes chimiques, quels sont les leviers pour améliorer la compétitivité des plateformes françaises ? septembre 2014