



**HAL**  
open science

## Optimisation multicritère de la chaîne du froid : qualité, sécurité et énergie

Christophe Nguyen-The, Evelyne Derens-Bertheau, Steven Duret, Marina François, Lena Fritsch, Clément Sorin, Maja Musse, Barbara Gouble, Véronique Broussolle, Hong-Minh Hoang, et al.

### ► To cite this version:

Christophe Nguyen-The, Evelyne Derens-Bertheau, Steven Duret, Marina François, Lena Fritsch, et al.. Optimisation multicritère de la chaîne du froid : qualité, sécurité et énergie. *Revue Générale du Froid et du Conditionnement d’Air*, 2022, 1183, pp.29-35. hal-04189869

**HAL Id: hal-04189869**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04189869>**

Submitted on 5 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation multicritère de la chaîne du froid : qualité, sécurité et énergie.

Christophe Nguyen-the<sup>a</sup>, Evelyne Derens<sup>b</sup>, Steven Duret<sup>b</sup>, Marina Français<sup>a</sup>, Lena Fritsch<sup>c</sup>, Clément Sorin<sup>d</sup>, Maja Musse<sup>d</sup>, Barbara Gouble<sup>a</sup>, Véronique Broussolle<sup>a</sup>, Hong-Minh Hoang<sup>b</sup>, Anthony Delahaye<sup>b</sup>, Erwan Hamon<sup>e</sup>, Valérie Stahl<sup>e</sup>, Frédéric Carlin<sup>a</sup>, François Mariette<sup>d</sup>, Laurent Guillier<sup>c</sup>, Onrawee Laguerre<sup>b</sup>

<sup>a</sup> INRAE, Avignon Université, UMR SQPOV, 84000 Avignon, France

<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, FRISE, 92761 Antony, France

<sup>c</sup> Université Paris-Est, Anses, Département d'appréciation des risques, 94700 Maisons-Alfort, France

<sup>d</sup> INRAE, OPAALE, 35000 35044 Rennes, France

<sup>e</sup> Aérial, 67412 Illkirch, France

L'article présente les principaux résultats du projet ANR OPTICOLD dont l'objectif était de développer des outils et d'acquérir les connaissances permettant d'optimiser la chaîne du froid en préservant la qualité et la sécurité microbiologique des produits, tout en minimisant la quantité d'énergie mobilisée. La démarche a pris en compte toute la chaîne, avec un focus particulier sur le froid dans les usines de transformation.

Présentation du projet ANR OPTICOLD :

Des outils et connaissances pour une chaîne du froid plus durable. Optimisation multicritère de la chaîne du froid : qualité, sécurité et énergie.

Résumé

Pour trois aliments réfrigérés (pâtes fraîches, fond de tarte et salade de 4<sup>ème</sup> gamme), les données sur les températures et la consommation énergétique des équipements de réfrigération ont été collectées dans des ateliers de production pour alimenter des modèles d'évolution des

distributions de température des produits et des modèles de consommations d'énergie. L'effet du froid sur l'adaptation des bactéries et l'altération des aliments a été précisé. En couplant l'histoire thermique du produit à des modèles de croissance microbienne, il a été possible de lier les besoins en froid, la température des produits et les risques d'altération et sanitaire pour une durée de vie de produit donnée. Pour aider au choix entre différents scénarios de gestion du froid, une approche de décision multicritère a été mise en place.

#### Abstract

On three chilled foods (fresh pasta, ready-to-use pastries and fresh-cut salads), data on temperatures and energy costs were collected in cold equipment in food plants to feed models on temperature distribution changes in the food products and on energy consumption. New knowledge on the impact of cold on adaptation of bacteria and on food spoilage were obtained. By coupling the product temperature history to microbial growth models, it was possible to link cold energy consumption, food products temperature, food safety and food spoilage risks, for a given product shelf-life. To support the choice between different scenarios of cold management, a multicriteria decision analysis was used.

Mots clés : altération des aliments, sécurité microbiologique des aliments, analyse de décision multicritère, consommation énergétique, distribution de température, relaxation RMN, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus*

Keywords : food spoilage, microbial food safety, multicriteria decision analysis, energy consumption, temperature distribution, relaxation NMR, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus*

#### Introduction

La chaîne du froid permet la fabrication et la commercialisation dans de bonnes conditions de qualité et de sécurité d'un très grand nombre d'aliments, mais elle représente une consommation énergétique élevée dont le coût ne cesse de croître [1]. Le projet OPTICOLD, financé par l'ANR (2016-2020), comprenait 9 partenaires : INRAE SQPOV<sup>1</sup> (coordinateur), ANSES<sup>2</sup>,

---

<sup>1</sup> UMR - Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, INRAE-Avignon Université

<sup>2</sup> Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

INRAE FRISE<sup>3</sup>, INRAE OPAALE<sup>4</sup>, AERIAL<sup>5</sup>, l'ANIA<sup>6</sup>, la société CLAUGER<sup>7</sup> et trois industriels fabricants d'aliments réfrigérés. L'objectif du projet était d'améliorer la durabilité de la chaîne du froid. Pour cela, le compromis entre le coût énergétique, la sécurité des aliments, la qualité et la durée de vie pour les aliments transformés réfrigérés doit être optimisé. Actuellement, le pilotage de la chaîne du froid est basé principalement sur le respect des températures, fixées par la réglementation et les spécifications entre producteurs et distributeurs. Ces consignes, qui sont souvent appliquées aux ambiances de stockage et de travail, ne reflètent pas toujours la température réelle des produits et pourraient être optimisées. Les partenaires du projet OPTICOLD ont proposé une alternative originale, en visant un pilotage multicritère de la chaîne du froid où la minimisation de la consommation énergétique aurait un rôle majeur [2]. Pour cela, une modélisation globale de la chaîne du froid (de l'usine au réfrigérateur) a d'abord été réalisée, permettant de relier coût énergétique, qualité et sécurité des aliments réfrigérés. Trois catégories d'aliments réfrigérés ont été étudiées, pâtes fraîches avec une étape de pasteurisation, fond de tarte sans traitement thermique et salade de 4<sup>ème</sup> gamme, produit vivant découpé et donc avec une forte activité physiologique. L'originalité du projet OPTICOLD est d'avoir pris en compte la chaîne du froid dans l'usine de transformation, car même si les produits y séjournent peu, les équipements frigorifiques y fonctionnent en permanence ou fréquemment, ce qui permet de supposer la possibilité d'économies d'énergie significatives sur la production du froid sans conséquence trop marquée sur les produits.

## 1 La chaîne du froid dans les usines de transformation

Les données publiées sur le froid en usine de transformation d'aliments sont très peu abondantes et la première étape du projet était d'en acquérir pour les trois aliments étudiés. Les températures des produits et les consommations énergétiques des équipements frigorifiques ont été mesurées et modélisées pour les parties réfrigérées des chaînes de transformation (exemple de l'usine de fabrication des fonds de tarte, Figure 1), en prenant en compte les consignes de température, l'hétérogénéité spatiale (par exemple entre produits situés à différentes hauteurs de palettes dans une chambre froide) et les évolutions temporelles (par exemple les cinétiques de refroidissement des produits ou les variations saisonnières). Certains équipements particulièrement complexes comme un pétrin réfrigéré ont nécessité la mise au point d'une démarche originale qui tient compte de la variabilité de température de la pâte dans un même

---

<sup>3</sup> Unité de recherche Génie des procédés frigorifiques pour la sécurité alimentaire et l'environnement, INRAE

<sup>4</sup> Unité de recherche Optimisation des procédés en agro-alimentaire, agriculture et environnement, INRAE

<sup>5</sup> Institut Technique Agro-Industriel

<sup>6</sup> Association Nationale des Industries Alimentaires

<sup>7</sup> Entreprise spécialisée en froid industriel et en traitement d'air.

lot de fabrication, variabilité qui dépend de la température de consigne du pétrin et de la température extérieure de l'usine (lieu de stockage de la farine). Les modèles développés ont permis de tester des scénarios de gestion du froid et ont, par exemple, montré pour l'une des usines, que l'augmentation de la température de consigne de la salle de transformation et des chambres froides de stockage pourrait permettre une économie d'énergie de 18 %, avec un impact mineur sur la température des produits [3]. Une journée de mesure sur site, complétée par des données d'autocontrôle de l'usine, a permis de collecter les données nécessaires pour construire un modèle global associant la qualité, la sécurité des aliments et la consommation énergétique. L'approche proposée a été appliquée à deux des trois usines participant au projet (pâte fraîche, fond de tarte) ayant des niveaux de complexité et d'informations disponibles différents.

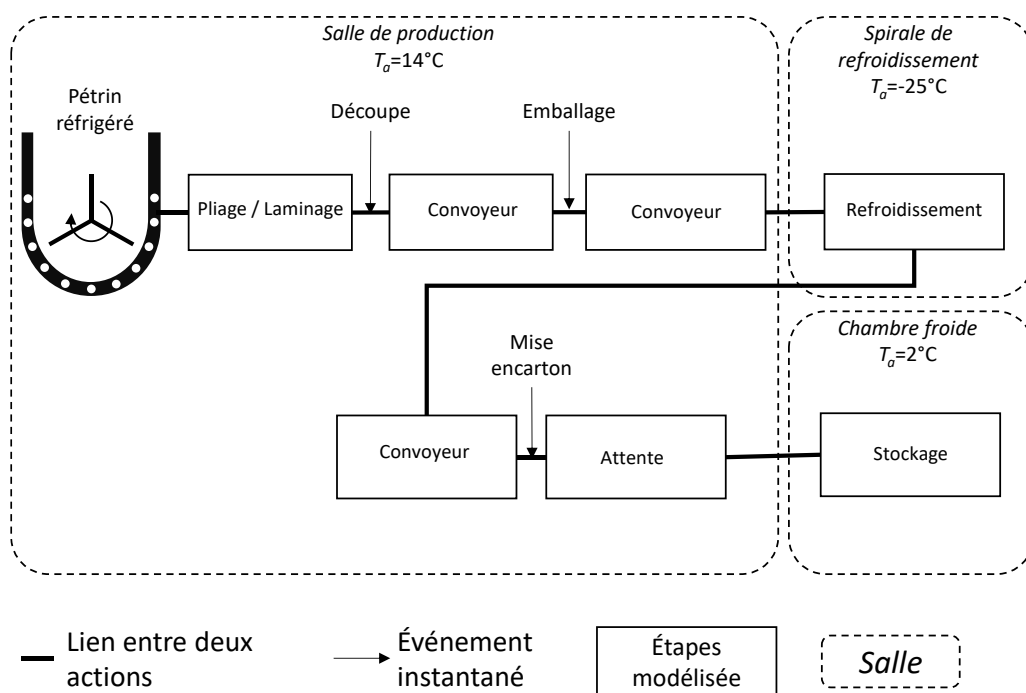


Figure 1 : Schéma d'une ligne de fabrication de fond de tarte.

## 2 Impact du froid sur la qualité et la sécurité des produits

Les effets d'un non-respect de la chaîne du froid sur la croissance des bactéries pathogènes, et les menaces que cette croissance représente pour la sécurité des produits, sont documentés dans la littérature scientifique. Les valeurs critiques des critères microbiologiques à ne pas dépasser dans les aliments sont définies par la législation. L'impact du froid sur les paramètres de croissance de la microflore impliquée dans la salubrité microbiologique des aliments a été mesuré sur des lots d'aliments provenant des usines et des limites critiques pour la qualité ont

été déterminées [4]. Compte tenu de l'importante diversité de la microflore d'altération, il apparaît néanmoins difficile de prévoir dans quelle mesure les paramètres de croissance déterminés dans le cadre d'OPTICOLD sont généralisables à d'autres périodes de fonctionnement de l'usine ou à d'autres usines produisant les mêmes produits.

L'altération de la structure des salades de 4<sup>ème</sup> gamme résulte principalement de phénomènes liés à la sénescence des tissus végétaux. L'évolution de la structure des tissus des feuilles de salade au cours du stockage a été suivie en Relaxométrie par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), sur des salades conservées à différentes températures. Elle a mis en évidence des changements de l'état et de la distribution de l'eau à l'échelle subcellulaire au sein des tissus foliaires (Figure 2) avant les premiers signes visibles d'altération, suggérant l'endommagement des membranes cellulaires comme le mécanisme initial d'altération [5]. La température de conservation, de 4 °C à 12 °C, n'avait pas d'impact sur ces pertes d'eau vacuolaire et sur l'altération durant la première semaine de conservation. Au-delà d'une semaine, l'altération et les pertes d'eau vacuolaire se sont manifestées pour des températures supérieures à 7 °C [5]. Il a été également montré que les salades de 4<sup>ème</sup> gamme produites à partir de salades entières (matière première) conservées à 4 C et 7 °C n'avait pas d'altération visuelle et d'évolution de l'eau vacuolaire significativement différentes [6]. Selon ces résultats, il n'y aurait sans doute pas de gain sur la qualité visuelle et sur la structure des tissus, à conserver les salades entières destinées à la transformation en 4<sup>ème</sup> gamme à une température inférieure à 7 C. Il a aussi été montré qu'utiliser une eau de lavage et rinçage refroidie à 4 °C, par comparaison avec une eau non refroidie, n'avait pas d'effet mesurable sur la qualité des salades de 4<sup>ème</sup> gamme. Les fluctuations de la température ambiante de la chambre froide (amplitude et fréquence) liées au fonctionnement de la batterie froide et influençant l'humidité relative, pourraient avoir un impact sur les salades entières conservées sans protection, voire sur les salades découpées à cause des écarts de température entre le sachet et le produit.

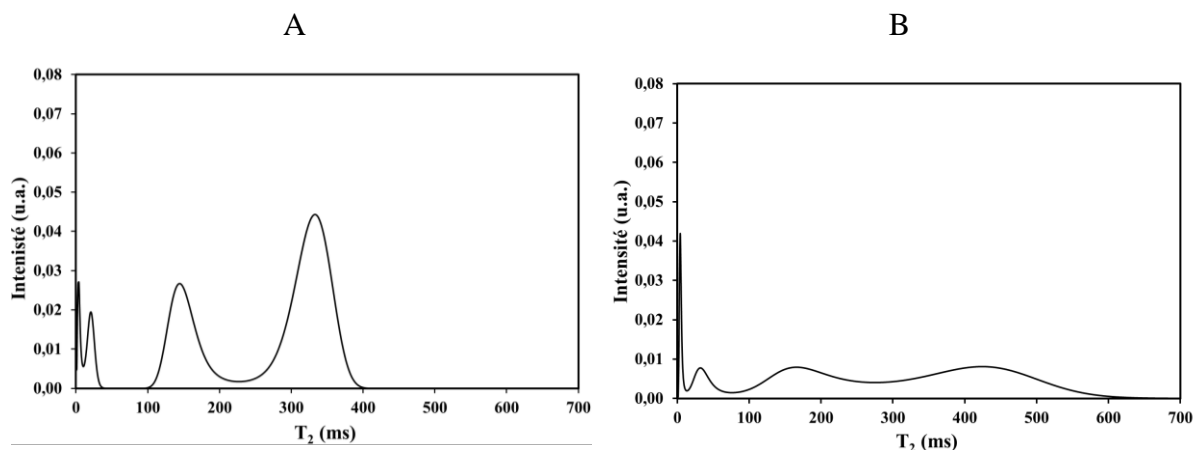


Figure 2 : Spectre de relaxation RMN de l'eau pour des salades conservées 13 jours à 4 °C (A) et à 12 °C (B). Les 2 pics à 4 °C (A) représentent l'eau dans les vacuoles des cellules de différentes tailles. La fusion des pics à 12 °C (Figure 2B) résulte de la diffusion de l'eau entre les vacuoles des cellules de différentes tailles, conséquence de l'altération des membranes vacuolaires.

### 3 Un modèle global de la chaîne du froid pour construire des scénarios

Le modèle global intègre des modèles qui relient les effets de la température sur la qualité et la sécurité des aliments ainsi que sur la consommation énergétique des équipements frigorifiques. Il permet de simuler l'énergie économisée et les pertes de qualité engendrées par des modifications de la gestion du froid en usine. Le modèle de consommation énergétique a été développé à partir de la température de consigne, de la température extérieure, du COP (Coefficient de Performance) de Carnot en considérant un écart de température de pincement constant de 10°C, et un rendement global de la machine frigorifique ajusté à des données mesurées sur le terrain. Plus de détails sur le développement de ce modèle sont présentés dans Duret et al. [3]. Ce modèle a été appliqué à deux usines. Le Tableau 1 présente différents scénarios appliqués à une usine de fabrication de fonds de tarte réfrigérés (ligne présentée dans la Figure 1 et dans [3]). A titre d'exemple, il est montré qu'il est possible de réduire de 12 % les consommations énergétiques en augmentant la température de la chambre froide de stockage de 2 °C à 4 °C et de 18 % en augmentant aussi la température de l'atelier de fabrication de 14 °C à 16 °C. Pour ces deux scénarios, la perte de qualité est estimée inférieure à 1 % par rapport à la situation de référence de l'usine.

Tableau 1 : Impact de différents scénarios de fabrication dans un atelier de fabrication sur la consommation énergétique et la perte de qualité de fond de tarte (résultats de simulation).

Scenario	T° ext	T° salle de production	T° spirale*	T° Chambre froide	Régime	Consommation énergétique (normalisé)	% de produits <6°C à l'entrée de la chambre froide	% de produits <6°C à la sortie de la chambre froide (1 jour)	Perte de qualité (normalisé)
Ref (#1)	20°C	14°C	-25°C	2°C	normal	-	97.6%	100%	-
#2	20°C	14°C	-25°C	4°C	T°C chF ↑	-12%	97.6%	100%	-0.4%
#3	20°C	16°C	-25°C	4°C	T°C production et T°C chF ↑	-18%	80.3%	100%	-0.5%
#4	20°C	14°C	14°C	2°C	Panne spirale	-	0%	100%	-2.8%

Température de -25°C pratiquée compte tenu de la résistance thermique de l'emballage et de la courte durée dans la spirale.

Le modèle a également été appliqué à une usine de fabrication de raviolis frais. Il prédit les consommations énergétiques de l'usine et la qualité microbiologique des produits à la fin de la durée de vie. Pour cela, la température des produits, leur qualité et la consommation énergétique des équipements ont été modélisées sur l'ensemble de la chaîne du froid dans l'usine, en utilisant les données acquises dans OPTICOLD. Puis, les étapes suivantes (du transport au consommateur) ont été associées, en utilisant les nombreuses données disponibles dans l'Unité de Recherche FRISE sur les températures des aliments aux cours de ces étapes postérieures à la fabrication et au séjour en usine.

Les résultats issus du projet soulignent l'intérêt d'une analyse détaillée de la chaîne du froid en usine, considérant les différentes étapes pour identifier les meilleures stratégies de gestion du froid, maximisant les gains d'énergie en usine et minimisant les risques de dépassement des limites microbiologiques critiques chez le consommateur. Par exemple, pour l'un des aliments étudiés, pour un même impact sur la qualité des aliments, augmenter la température du tunnel de refroidissement économisait plus d'énergie que d'augmenter la température des chambres de conservation des produits finis [4] (Figure 3). Ce modèle suppose que la quantité de produits et les temps de séjours dans les étapes sont identiques pour tous les scénarios. Grâce au modèle global du projet OPTICOLD, il est aussi possible d'estimer l'impact d'aléas, tels que les pannes ou les fortes chaleurs, sur la qualité des produits. Intégrer dans un même modèle les conditions thermiques présentes en usine et dans les étapes ultérieures a en outre montré que les risques de dépassement des valeurs microbiologiques critiques pour les aliments proviennent principalement des quelques consommateurs respectant le moins les températures de réfrigération [4]. Des actions auprès des consommateurs pour garantir les bonnes températures



de conservation permettraient certainement des économies d'énergie dans les étapes en amont dans la chaîne du froid.

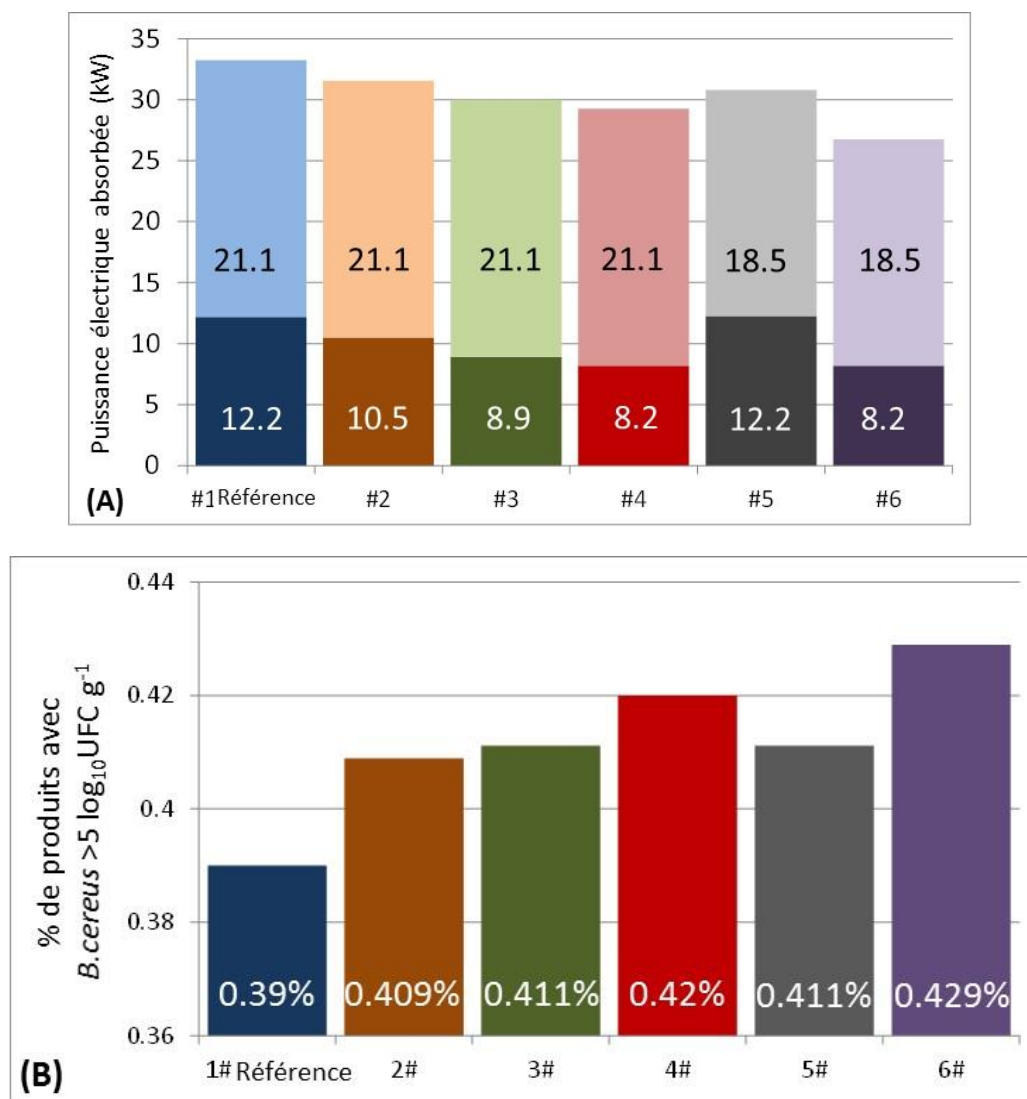


Figure 3 : Consommation électrique absorbée par le compresseur (kW) du tunnel de refroidissement (couleur sombre) et de la chambre froide de stockage (couleur claire) de produits réfrigérés pour les 6 scénarios de procédé (A), pourcentage de produits avec *B. cereus* > 5log<sub>10</sub>UFC g<sup>-1</sup> pour les 6 scénarios de procédés suivis par un scénario réaliste de la chaîne du froid en aval de l'usine au consommateur (B). Scénario #1= référence, température du tunnel de refroidissement (T<sub>TR</sub>) -2 °C et chambre froide (T<sub>CF</sub>) 4 °C. Scénarios #2, #3 et #4, T<sub>TR</sub> 2 °C, 6 °C et 8 °C, respectivement. Scénario #5, T<sub>CF</sub> 6 °C. Scénario #6, T<sub>TR</sub> 8 °C et T<sub>CF</sub> 6 °C. Adapté de [4].

#### 4 – Une approche multicritère d'aide à la décision

Pour guider les décisionnaires dans le processus de choix des conditions opératoires en fonction de différents critères difficilement comparables (e.g. une consommation énergétique en kWh avec un nombre annuel de maladies), une méthode d'analyse de décision multicritère basée sur la méthode de surclassement « ELECTRE » a été utilisée sur des données et simulations préexistantes de la chaîne du froid de jambon, de la sortie de l'usine à la consommation [7]. Différentes actions, telles que la modification de la température de consigne ou du débit d'air dans différents équipements, ont été testées. Pour chaque action, le nombre annuel de cas de listériose par rapport à l'action de référence, le pourcentage de produits détruits pour altération et la consommation énergétique attribuée à un paquet de jambon sont prédits (Tableau 2).

Tableau 2 : Impact des différentes actions sur le risque sanitaire, les pertes alimentaires et la consommation énergétique des équipements frigorifiques

Actions	% de produits consommés avec $L.m > 100 \text{ UFC g}^{-1}$	Nombre de cas annuel de listériose (% référence)	Produits détruits (%)	Consommation énergétique (kWh / pack)
<b>1: Référence</b>	0,85	-	7,74	0,044
<b>2: Réfrigérateur, <math>T_{th} 4 \text{ °C}</math></b>	0,51	-68	3,92	0,048
<b>3: Réfrigérateur, <math>T_{th} 7 \text{ °C}</math></b>	1,04	+70	10,29	0,043
<b>4: Réfrigérateur, meilleure isolation</b>	0,81	-7,2	7,33	0,038
<b>5: Meuble de vente, débit d'air - 50 %</b>	0,86	+2,4	7,86	0,031
<b>6: Meuble de vente, débit d'air - 25 %</b>	0,85	+0,4	7,78	0,038
<b>7: Meuble de vente, débit d'air + 25 %</b>	0,84	-0,8	7,71	0,051
<b>8: Meuble de vente, <math>T_{th} 2.5 \text{ °C}</math></b>	1,01	+16,4	9,42	0,043

Action 1 : référence, Action 2, diminution de la température du réfrigérateur domestique à 4 °C, Action 3 : augmentation de la température du réfrigérateur domestique à 7 °C, Action 4 : meilleure isolation du réfrigérateur domestique, Action 5 : diminution de 50 % du débit d'air dans le meuble de vente, Action 6 : diminution de 25 % du débit d'air dans le meuble de vente, Action 7 : augmentation de 25 % du débit d'air dans le meuble de vente, Action 8 : augmentation de la consigne de température du meuble de vente à 2,5 °C (1,5 °C dans l'action 1).

Avec les méthodes d'aide à la décision multicritère, il est possible de réaliser un classement des différentes actions, suivant les préférences des décideurs pour les différents critères (Tableau 2). Dans ce cas d'étude, le réglage de la température du réfrigérateur domestique à 4 °C (action 2) est l'action présentant les meilleurs résultats en supposant que les trois critères ont la même

importance. Par contre, l'action 5 (débit d'air du meuble de vente réglé à -50 %) est la mieux classée si la préférence porte sur le critère « moindre consommation énergétique ».

## 5 – Des connaissances nouvelles sur l'effet du froid sur les bactéries

Optimiser la chaîne du froid nécessite d'améliorer la précision des estimations de l'effet du froid sur le développement des bactéries. En effet, développer des moyens pour maîtriser le risque microbiologique implique d'acquérir une meilleure compréhension des mécanismes coordonnant l'adaptation aux basses températures. Ce sont ces connaissances que le projet Opticold a entrepris d'acquérir.

L'une des hypothèses au départ du projet, basée sur la littérature scientifique, était que la probabilité de croissance de cellules individuelles des bactéries pathogènes, à prévalence faible dans les aliments diminue avec la baisse des températures [8]. Un modèle de probabilité cellulaire avait été développé pour *L. monocytogenes* et validé comme pertinent pour une meilleure appréciation du risque dans les produits réfrigérés [9] par rapport à l'hypothèse conservatrice considérant une probabilité de 100 % de croissance pour chaque cellule isolée. OPTICOLD a montré que cette hypothèse est également vérifiée en conditions de stress au préalable, telle qu'une congélation, le contact d'une souche pathogène avec un produit désinfectant. Cette chute de probabilité de multiplication a été quantifiée en fonction de différents stress, de différentes températures de réfrigération, et pour différentes souches de *L. monocytogenes*.

La simulation de l'effet du froid repose sur des modèles décrivant son effet sur les paramètres de croissance des bactéries. Ces modèles sont définis pour chaque espèce, et prennent rarement en compte les variations de capacité d'adaptation au froid entre souches d'une même espèce, ce qui peut créer une surestimation de la croissance au froid dans les situations réelles. Dans le cas de la bactérie pathogène *L. monocytogenes*, des souches présentant une croissance lente ou rapide au froid ont pu être distinguées, des marqueurs génomiques définis et l'impact de ces différences de croissance sur le risque de listériose simulé [10, 11].

La durée de l'adaptation au froid avant croissance, appelée communément phase de latence, est mal connue et difficile à prendre en compte dans les modèles de simulations, tant les facteurs

pouvant la faire varier sont nombreux, ce qui peut entraîner une surestimation de la croissance au froid. L'objectif d'OPTICOLD était de développer des méthodes permettant d'une part, de quantifier plus rapidement cette phase de latence et d'autre part de l'étudier au niveau des cellules uniques. Pour cela, une méthode microscopique permettant de suivre un grand nombre de cellules et de mesurer la croissance par observation des premières divisions a été mise au point [12]. L'étude de systèmes rapporteurs de l'activité promotrice de différents gènes impliqués dans la croissance au froid, a montré que certains de ces gènes pourraient constituer des biomarqueurs d'étapes du développement de la bactérie. Par exemple, le promoteur du gène *cshA* codant pour une hélicase à ARN s'active au moment de l'élongation cellulaire et toujours avant la première division [13] (Figure 4).

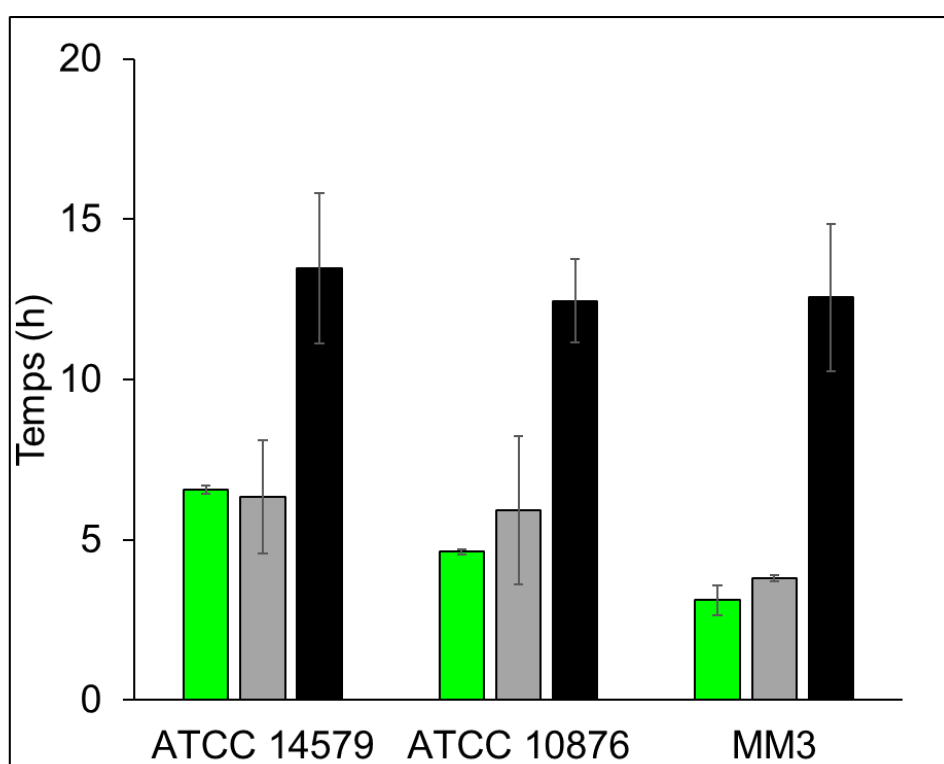


Figure 4 – Temps nécessaire à la bactérie *B. cereus* lors d'une croissance à 12°C pour initier l'activité du promoteur du gène de l'hélicase à ARN *cshA* (mesure de la fluorescence émise par le système rapporteur du promoteur) (vert), l'élongation (gris) et la première division cellulaire (noir). Les résultats sont présentés pour trois souches de *B. cereus* ATCC 14579, ATCC 10876 et MM3. Tiré de [13].

Ce promoteur représente ainsi un biomarqueur précoce de la sortie de latence. D'autres biomarqueurs, plus tardifs, spécifiques des premières divisions cellulaires, ou encore du moment où la multiplication est la plus rapide ont été identifiés dans le projet OPTICOLD [13, 14].

Couplé à un système de visualisation (émission de fluorescence ou de lumière par exemple) ces biomarqueurs représenteraient des moyens beaucoup plus rapides et plus simples que les méthodes de dénombrement bactérien classiques, pour déterminer le temps que met une bactérie à débiter sa croissance. Une application serait la réalisation de « tests d'épreuves » ou « challenge tests » consistant à inoculer un aliment avec une (ou des) souches d'une bactérie pathogènes, modifiée(s) pour exprimer ces biomarqueurs, afin de déterminer si la croissance de la bactérie pathogène est possible dans le cadre de la durée de vie de l'aliment. Il serait ainsi possible d'augmenter considérablement les conditions de conservation et de composition de l'aliment testées, et de cette façon d'améliorer nos connaissances du comportement des bactéries pathogènes durant la conservation des aliments.

## 6 – Conclusions et perspectives

La démarche novatrice d'OPTICOLD a montré que des économies d'énergie peuvent être obtenues à certaines étapes de la chaîne du froid dans les usines de transformation d'aliments réfrigérés avec un impact modéré sur les paramètres de qualité des aliments étudiés et sur le risque microbiologique. La démarche construite dans OPTICOLD pourrait être ajustée pour différents produits réfrigérés, et enrichie par les données d'autocontrôle des usines.

Le modèle de simulation construit dans le projet permet de caractériser les conséquences de différents scénarios de gestion du froid pour un ensemble de critères. Un outil d'aide à la décision multicritère a été mis en place et testé durant le projet. En perspective, il serait nécessaire d'impliquer les décideurs industriels et d'autres parties prenantes (notamment la distribution, voire pour certains scénarios impliquant une évolution de la réglementation, les autorités compétentes).

Une autre perspective serait de s'intéresser aux réfrigérateurs domestiques. L'enquête INCA 3 a révélé une grande diversité des températures des réfrigérateurs chez les consommateurs [15]. Un compromis reste à trouver entre les aspirations à réduire l'impact sur l'environnement et la nécessité d'assurer la sécurité microbiologique et la qualité des aliments.

OPTICOLD a aussi obtenu des résultats prometteurs sur des « marqueurs » précoces et/ou rapides de l'altération des salades et de la capacité d'adaptation au froid des bactéries. Il serait intéressant de rechercher les conditions et les moyens de leur mise en pratique pour la gestion de la qualité et de la sécurité sanitaire des produits.

Remerciements -

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence ANR-15-CE21-0011 OPTICOLD. Une partie des travaux a été réalisée en utilisant les équipements de la plate-forme PRISM (Biogenouest, Univ Rennes, Université d'Angers, INRAE, CNRS, FRANCE). Remerciements à Agathe Dutoit, Jeanne Hamet, Fatma El-Hani, Abygaelle Serguier, Claire Dargaignaratz, Stéphanie Oriol, Patrice Reling, pour leur aide technique dans ce projet.

## Références

- [1] Sarr J., Modélisation de l'impact carbone de la chaîne du froid, Rapport final en "Ingénierie des systèmes complexes", parcours "Ingénierie de la conception, voie recherche". Central Supélec, 139 pages., 2020.
- [2] Guillier L., Duret S., Hoang H.-M., Flick D., Nguyen-Thé C.,Laguerre O., Linking food waste prevention, energy consumption and microbial food safety: the next challenge of food policy?, *Current Opinion in Food Science*. Vol. 12, pp. 30-35, 2016.
- [3] Duret S., Hamon E., Hoang H.-M., Stahl V., Derens-Bertheau E., Delahaye A.,Laguerre O., Modelling methodology of temperature and energy consumption in food plant: Application to puff pastry, *International Journal of Refrigeration*. Vol. 115, pp. 28-38, 2020.
- [4] Duret S., Hoang H.-M., Guillier L., Derens-Bertheau E., Dargaignaratz C., Oriol S., Delahaye A., Laguerre O.,Nguyen-the C., Interactions between refrigeration temperatures, energy consumption in a food plant and microbiological quality of the food product: Application to refrigerated stuffed pasta, *Food Control*. Vol. 126, pp. 108076, 2021.
- [5] Sorin C., Mariette F.,Musse M., NMR study of fresh cut salads: Influence of temperature and storage time on leaf structure and water distribution in escarole, *Magn Reson Chem*. Vol. 57, pp. 626-637, 2019.
- [6] Gouble B., Reling P., Sorin C., Mariette F., Musse M., Cambert M., Duret S., Laguerre O., Guillier L., Hamon E., Stahl V.,Nguyen The C., OPTICOLD: For an ecodesign cold chain of fresh cut salads. , *F&V processing 2020*. Web Conference, 24-25 November, 2020. [https://symposium.inrae.fr/fruit-vegetable-processing2020/content/download/4892/60731/version/1/file/P2-4\\_GOUBLE\\_FVP2020\\_Barbara.pdf](https://symposium.inrae.fr/fruit-vegetable-processing2020/content/download/4892/60731/version/1/file/P2-4_GOUBLE_FVP2020_Barbara.pdf)  
Vol. pp. 2020.
- [7] Duret S., Hoang H.-M., Derens-Bertheau E., Delahaye A., Laguerre O.,Guillier L., Combining Quantitative Risk Assessment of Human Health, Food Waste, and Energy Consumption: The Next Step in the Development of the Food Cold Chain?, *Risk Analysis*. Vol. 39, pp. 906-925, 2019.
- [8] Augustin J. C.,Czarnecka-Kwasiborski A., Single-cell growth probability of *Listeria monocytogenes* at suboptimal temperature, pH, and water activity, *Frontiers in Microbiology*. Vol. 3, pp. 157-Article 157, 2012.

- [9] Ferrier R., Hezard B., Lintz A., Stahl V., Augustin J.-C., Combining Individual-Based Modeling and Food Microenvironment Descriptions To Predict the Growth of *Listeria monocytogenes* on Smear Soft Cheese, *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 79, pp. 5870-5881, 2013.
- [10] Fritsch L., Felten A., Palma F., Mariet J. F., Radomski N., Mistou M. Y., Augustin J. C., Guillier L., Insights from genome-wide approaches to identify variants associated to phenotypes at pan-genome scale: Application to *L. monocytogenes*' ability to grow in cold conditions, *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 291, pp. 181-188, 2019.
- [11] Fritsch L., Guillier L., Augustin J.-C., Next generation quantitative microbiological risk assessment: Refinement of the cold smoked salmon-related listeriosis risk model by integrating genomic data, *Microbial Risk Analysis*. Vol. 10, pp. 20-27, 2018.
- [12] Fritsch L., Baleswaran A., Bergis H., Lintz A., Hamon E., Stahl V., Augustin J.-C., Guillier L., A microscopy-based approach for determining growth probability and lag time of individual bacterial cells, *Food Research International*. Vol. 140, pp. 110052, 2021.
- [13] Français M., Carlin F., Broussolle V., Nguyen-Thé C., *Bacillus cereus cshA* Is Expressed during the Lag Phase of Growth and Serves as a Potential Marker of Early Adaptation to Low Temperature and pH, *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 85, pp. e00486-19, 2019.
- [14] Français M., Bott R., Dargaignaratz C., Giniès C., Carlin F., Broussolle V., Nguyen-Thé C., Short-Chain and Unsaturated Fatty Acids Increase Sequentially From the Lag Phase During Cold Growth of *Bacillus cereus*, *Frontiers in Microbiology*. Vol. 12, pp. 2021.
- [15] Anses, Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3. <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>, Vol. pp. 2017.