

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

**L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement
(AgroParisTech)**

Spécialité : Génie des Procédés Alimentaires

*présentée et soutenue publiquement
par*

Mariette SICARD

le 8 janvier 2010

METHODES, CONCEPTS ET OUTILS DES SYSTEMES COMPLEXES POUR MAITRISER LES PROCEDES ALIMENTAIRES. APPLICATION A L’AFFINAGE DE CAMEMBERTS.

*Directeurs de thèse : **Nathalie Perrot, Sophie Martin, Paul Bourgine***

*Travail réalisé à : AgroParisTech, INRA, UMR782 Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires
F-78850 Thiverval-Grignon*



Devant le jury :

M. Paul BOURGINE
Mme Marie-Véronique LE LANN
Mme Sophie MARTIN
Mme Nathalie PERROT
M. Eric RAUFASTE
M. Patrick SAINT-PIERRE
M. Gilles TRYSTRAM

Directeur ISC-PIF et CREA, Paris
Professeur, LAAS ; Toulouse
Ingénieur du GREF, Cemagref-Lisc; Clermont-Fd
Directeur de recherche, INRA-UMR GMPA, Grignon
Directeur adjoint, CNRS-LTC, Toulouse
Professeur, Univ. Paris-Dauphine, Paris
Professeur, AgroParisTech, Massy

Examineur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Rapporteur
Président

Méthodes, concepts et outils des systèmes complexes pour maîtriser les procédés alimentaires. Application à l'affinage de camemberts.

20 janvier 2010

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse Mme Nathalie Perrot, Mme Sophie Martin et Mr Paul Bourguine.

Nathalie, comment te remercier ? Cela fait presque 5 ans que nous “ cherchons ” ensemble, cela a été une grande joie ! Merci pour ta vision de la recherche qui m’a ouvert un cadre de réflexion très riche. Merci de m’avoir accueillie dans ce cadre de travail chaleureux et dynamique que tu créé autour de toi. Merci de m’avoir soutenue pendant ces trois ans de thèse pour t’aider à construire ta cathédrale. J’espère que nous la continuerons ensemble à travers d’autres projets.

Merci beaucoup Sophie, grâce à toi j’ai pu retourner dans les mathématiques que j’avais quitté il y a bien longtemps. C’était passionnant et je crois que je n’ai encore jamais rencontré quelqu’un d’aussi pédagogue que toi.

Merci Paul pour ton aide aux moments cruciaux, merci de m’avoir formé aux systèmes complexes et merci pour cette aventure passionnante qu’a été la parallélisation de nos calculs de viabilité ! Il reste le problème de la tour et des canards, j’espère que nous aurons l’occasion d’élucider cette question un jour !

J’exprime toute ma reconnaissance à Mme Marie-Véronique Le Lann et Mr Patrick Saint-Pierre pour m’avoir fait l’honneur d’être les rapporteurs de cette thèse de même que Mr Eric Raufaste et Mr Gilles Trystram pour avoir accepté de le juger.

Une thèse « système complexe » est par nature très pluridisciplinaire et je n’aurais pu la réaliser sans l’aide des nombreux chercheurs impliqués dans le projet Incalin. Mes sincères remerciements vont à :

- Isabelle et Salma du Lip6, j’espère que la robustesse va poursuivre ses formidables aventures. Merci Isa pour tes précieux conseils.
- Romain, grâce à toi la parallélisation va devenir un jeu d’enfant. Merci de m’avoir formée à Linux et vive le logiciel LIBRE !
- Jean-René et Françoise pour votre aide sur les fromages et vos conseils.
- Cedric, Pierre-Henri et Evelyne d’avoir expliqué avec patience vos recherches.
- Guy, Amadou, Kamal et Hubert pour le pain (et le chocolat !)

Un grand merci aux chercheurs de l’INRA, UMR GMPA :

Merci à Georges Corrieux, Michèle Marin et Isabelle Souchon de m’avoir accueillie dans votre dynamique laboratoire. Merci aussi à Valérie pour ton aide et ta gentillesse si réconfortante.

Je tiens également à remercier chaleureusement l’équipe « fromage » sans qui je n’aurais pas eu de données pour travailler. Je n’en avais jamais assez et cela représentait pour vous des heures de travail. Merci à Marie-Noëlle, Thomas, Hervé, Frédéric, Jérôme, David et bien sûr Anne-Sophie pour l’évaluation sensorielle.

Le procédé fromage nécessite des années d’expériences, merci à Georges, Daniel, Marie-Noëlle, Eric et tous les experts interrogés dans cette thèse d’avoir si volontiers partagé leur savoir-faire. Grâce à vous j’ai découvert que faire du fromage est aussi complexe que faire du vin !

Mes remerciements vont aussi à tous les joyeux membres de l'équipe 2. Merci Cristian pour les nombreux échanges scientifiques que nous avons eu. Merci Cédric et Sébastien pour les maths et les modèles! Merci Sébastien et David pour Linux, LaTeX et autres geekeries bien utiles. Merci Aurélie, tu auras été une super représentante des thésards et encore merci pour le club BD. Enfin, merci pour votre amitié, Marion, Jean-Marie, Clément, Julie, Inès, profitez bien de vos dernières années de thèse!

Merci à Maria Lempicki, Anne-Laure Réau et Camille Pradel dont les travaux de stage ont contribué à l'élaboration de cette thèse.

Merci également, Pierre et Claude, pour votre soutien infailible et votre aide.

Enfin, je te remercie de tout coeur, Julien, de m'avoir suivi dans cette aventure, c'est un très beau cadeau que tu m'as fait. Merci Yannick et Noémie d'avoir été si sages ces trois ans, c'est un bonheur de vous voir grandir chaque jour.

Table des matières

1	Avant propos	13
2	Introduction	15
3	L’affinage de camemberts, un système complexe.	23
3.1	La fabrication et l’affinage de camemberts	25
3.2	Étude expérimentale de l’affinage de camemberts : Matériels et méthodes.	39
3.3	Influence de la température et de l’humidité relative sur l’affinage : résultats expérimentaux	48
3.4	Conclusions	57
4	Les connaissances expertes	61
4.1	Introduction	63
4.2	Bilan sur l’expertise, son utilisation en contrôle de procédé alimentaire et son étude par les sciences cognitives.	64
4.3	Matériel et méthode : recueil, formalisation et mise en application des connaissances expertes	72
4.4	Résultats	82
4.5	Travaux complémentaires issus du projet INCALIN	96
4.6	Conclusions	100
5	Théorie de la viabilité pour l’alimentaire	103
5.1	Introduction	105
5.2	La théorie de la viabilité	105
5.3	Modélisation et problème de viabilité	110
5.4	Algorithmes et moyens de calcul	119
5.5	Résultats	128
5.6	Travaux complémentaires issus du projet INCALIN	135
5.7	Conclusion	137
6	Conclusion générale et perspectives	139
7	Annexes	154

Table des figures

2.1	Démarche de la thèse : outils, méthodes et concepts des systèmes complexes pour maîtriser l'affinage de camemberts.	20
3.1	Diversité des fabrications fromagères d'après Lenoir (1983).	26
3.2	Voies métaboliques de dégradation du lactose, d'après Merlet (1995).	32
3.3	Voies métaboliques de la lipolyse d'après Molimard et al. (1997)	33
3.4	Schéma général du catabolisme microbien des acides aminés au cours de l'affinage des fromages. D'après Hemme et al. (1982)	34
3.5	Domaine dans lesquels des modèles du procédé fromagers ont été développés.	36
3.6	Type de modèles utilisés pour les procédés fromagers	37
3.7	Installation expérimentale de fabrication fromagère	39
3.8	Schéma du procédé de fabrication de camemberts au GMPA (INRA-Grignon).	41
3.9	Schéma des enceintes de fabrication et d'affinage des camemberts	44
3.10	L'Arlésienne, hâloir pilote d'une capacité de 70 fromages installé dans une chambre thermostatée.	45
3.11	Le dispositif de mesure en ligne "CRiC" (Guillemin, 2007) pour le contrôle de l'affinage des camemberts	45
3.12	Représentation des 22 essais d'affinage réalisés. Chaque essai est représenté en fonction de la température et de l'humidité relative appliquée lors de l'affinage en hâloir	49
3.13	Evolution du pH au cours d'un affinage standard (92 % d'humidité relative et 12 °C pendant la phase en hâloir) en surface des fromages et à coeur.	49
3.14	Evolution de la concentration de <i>K. marxianus</i> au cours de l'affinage standard.	50
3.15	Evolution de la concentration en lactose au cours de l'affinage standard en surface et à coeur des fromages.	50
3.16	Evolution de la concentration en <i>G. candidum</i> au cours d'un l'affinage standard.	51
3.17	Evolution de la concentration en spores de <i>P.camemberti</i> au cours d'un affinage standard.	51
3.18	Evolution de la vitesse de production de dioxyde de carbone par les micro-organismes au cours d'un affinage standard.	52

3.19	Evolution de la concentration en lactate au cours d'un affinage standard en surface des fromages et à coeur.	52
3.20	Evolution de la concentration en <i>B. aurantiacum</i> au cours d'un affinage standard.	53
3.21	Courbes d'évolution du pH (a) et de la croissance de <i>K.marxianus</i> (b) au cours des 22 essais d'affinage en fonction du temps. Les affinages réalisés à 16 °C, 12 et 8 °C sont représentés en rouge, vert et bleu respectivement.	54
3.22	Analyse en composantes principales des courbes de pH pour les 22 essais de la base de données.	55
3.23	Analyse en composantes principales sur les 5 essais (a1, a2, b1, b2, c1) représentatifs de l'affinage à différentes conditions de température et d'humidité relative. Les variables explicatives sont représentées dans l'ACP (a) et les données observées à chaque prélèvement dans l'ACP (b).	58
4.1	Modélisation de la gestion cognitive des processus dynamiques d'après Rasmussen (1986) et Hoc (1996).	67
4.2	Illusion d'optique, perception d'un triangle imaginaire.	68
4.3	L'expert et la gestion du procédé d'affinage de camemberts, représentation simplifiée vue sous l'angle de la psychologie cognitive.	71
4.4	Guide d'interview pour recueillir l'expertise d'affineurs	74
4.5	Interface graphique pour enregistrer les mesures sensorielles "at-line"	80
4.6	Analyse factorielle des correspondances représentant les experts interrogés et leur corpus associés	83
4.7	Analyse factorielle des correspondances basée sur les quatre thèmes principaux du discours	85
4.8	Essai de modélisation de l'évolution de l'affinage vue par les experts opérationnels. L'affinage est envisagé à son niveau macroscopique.	90
4.9	Evolutions sensorielles "at-line" observée sur les 5 cinétiques de référence. Les jours d'affinage des fromages évalués sont représentés en haut des schémas. Les chiffres en dégradé de gris représentent les notes attribuées aux fromages par les opérateurs	91
4.10	Analyse en composantes principales basée sur les valeurs de pH et sur la concentration des fromages en lactose, lactate et micro-organismes <i>K. marxianus</i> , <i>G. candidum</i> , <i>P. camemberti</i> , et <i>B. aurantiacum</i> des fromages affinés expérimentalement. Chaque fromage a été identifié par sa phase d'affinage (Ph) diagnostiquée à partir du programme à base de règles expertes et des mesures sensorielles du panel at-line. "J" représente le jour de prélèvement et a1, a2, b1, b2, c1 les affinages à différentes conditions d'humidité relative et de température.	92
4.11	La première phase d'affinage vue par les experts scientifiques_ représentation simplifiée.	94
4.12	La seconde phase de l'affinage vue par les experts scientifiques _ représentation simplifiée.	95
4.13	La troisième phase de l'affinage vue par les experts scientifiques _ représentation simplifiée.	95
4.14	La quatrième phase de l'affinage vue par les experts scientifiques_ représentation simplifiée.	96

4.15	Réseau Bayésien dynamique représentant les dynamiques de croissance des micro-organismes couplées aux consommations de substrat selon l'influence de la température au cours du procédé d'affinage et leur impact sur l'évolution des propriétés sensorielles.	98
5.1	Représentation d'un noyau de viabilité (bord noir intérieur blanc) dans l'espace de deux variables d'état X_1 et X_2 , d'un bassin de capture (gris), de la cible C et d'une trajectoire qui atteint cette cible (noir).	109
5.2	Schéma de la respiration : à une même valeur de taux de libération de dioxyde de carbone $r_{CO_2}^n$ correspondent deux points de la courbe. A partir de ces deux points correspondent deux valeurs de $r_{CO_2}^{n+1}$ après un incrément de temps de Δt . Les deux cas de figures doivent donc être différenciés.	114
5.3	Contraintes sur une courbe de respiration représentative de l'activité microbiologique.	116
5.4	Schéma du workflow, parallélisation du calcul du tube backward sur la ferme de calcul MiG (Inra-Jouy-en-Josas).	126
5.5	Gérer les temps de migration par rapport à la charge des processeurs de la grille de calcul : pour un calcul divisé en 6 pour 6 processeurs si l'un s'avère non disponible le temps de calcul est très élevé (cas 1, fig. a), pour une subdivision en 12 le temps de calcul est un peu moindre (cas 3, fig.c), pour une subdivision en 10 le temps de calcul est optimal (cas 2, fig.b).	127
5.6	Bassin de capture d'affinage en 12 jours sous deux angles de vue (a) et (b). (a) montre l'évolution des masses de fromage viables au cours du temps et (b) les vitesses de respiration (taux de libération de CO_2)	129
5.7	Contrôle de l'humidité relative et de la température pour un affinage standard (a) et pour un affinage optimisé (b) selon les résultats de l'algorithme de viabilité.	130
5.8	Mesure en ligne de la masse d'un fromage dans le hâloir pilote au cours de l'affinage pour un affinage optimisé (ligne continue) et pour un affinage standard (ligne pointillée).	130
5.9	Cinétique du pH (a), de <i>K. marxianus</i> (b), <i>G. candidum</i> (c), <i>P. camemberti</i> (d), et <i>B. aurantiacum</i> (e) pour l'affinage optimisé (ligne continue) et l'affinage standard (ligne pointillée).	132
5.10	Profil sensoriel "at-line" au 20 ^{ème} jour d'un affinage standard (a) et au 15 ^{ème} jour d'un affinage optimisé (b).	133
5.11	Profil sensoriel de fromages affinés de manière optimisée (ligne continue), de manière standard (ligne pointillée) et affinés par un industriel (ligne continue avec les symboles carrés).	134
5.12	Capture d'écran de l'interface graphique permettant d'accéder aux données issues des analyses de viabilité et de robustesse pour les affinages en 8 jours et 12 jours.	136
6.1	Résultats et limites de la thèse par chapitre.	139
6.2	Démarche d'intégration des connaissances pour poursuivre l'étude des procédés alimentaires avec une démarche de type "système complexe".	143

Liste des tableaux

3.1	Liste des travaux sur la modélisation de l'affinage de camemberts.	40
3.2	Milieuxensemencés et les conditions d'incubation des différents micro-organismes étudiés	47
3.3	Exemple pour le pH de tableau utilisé pour les analyses en composantes principales des données mesurées pendant les affinages expérimentaux.	55
3.4	Résultat des ANOVA, effets du facteur humidité relative et du facteur température sur les deux premières composantes (cp1 et cp2) principales déterminées pour chacune des variables de l'affinage. L'effet du facteur non significatif, significatif, très significatif et hautement significatif est représenté par les sigles NS, *, ** et *** respectivement.	56
3.5	Représentation du tableau pour l'analyse en composantes principales sur les cinétiques d'affinage des 5 essais de références. a1 : essai F13 H1 98 % 16 °C, a2 : F13 H2 88 % 16 °C, b1 : F12 H1 98 % 8 °C, b2 : F12 H2 88 % 8 °C et enfin c1 : F11 H1 92 % 12 °C	57
4.1	Comparaison entre deux méthodes d'analyse sensorielle. L'analyse "at-line" réalisée au cours de l'évolution du procédé et l'analyse sensorielle classique généralement effectuée sur le produit fini.	77
4.2	Effectifs des noms les plus cités dans les textes des recueils d'expertise.	84
4.3	Segments répétés les plus fréquents dans les recueils d'expertise.	85
4.5	Performances des opérateurs pour les indicateurs sensoriels "at-line" : calibration et répétabilité. Pour la calibration la note des opérateurs est comparée à celle de l'expert.	86
4.4	Indicateurs sensoriels de l'évolution de l'affinage formalisés avec les experts.	87
4.6	Règles d'agrégation pour lier les notes sur les indicateurs sensoriels aux phases de l'évolution de l'affinage.	89
4.7	Matrice de confusion résultant de la validation croisée du modèle logistique. Le modèle a pour objectif de prédire l'évolution organoleptique de l'affinage à partir des mesures instrumentales : concentrations de <i>K. marxianus</i> , <i>G. candidum</i> , <i>P. camemberti</i> , <i>B. aurantiacum</i> , lactose, lactate et mesure du pH. Les phases d'affinage estimées à partir des mesures sensorielles des opérateurs sont en colonnes et les phases prédites par le modèle sont en lignes.	93
5.1	Contraintes sur les variables d'état pour l'algorithme de viabilité	115

- 5.2 Test de comparaisons multiples des moyennes pour les notes des fromages affinés de manière optimale (Aff. optimisé), de manière standard (Aff. standard) et affinés par un industriel (Aff. industriel) basée sur la différence significative de Tuckey-Kramer au 35^{ème} jour après fabrication. Les lettres représentent les groupes dont les moyennes diffèrent significativement à $p < 0.05$ 135

Chapitre 1

Avant propos

Cette thèse s’inscrit dans le cadre du projet INCALIN, financé par l’Agence Nationale de la Recherche (ANR), initié en 2007 pour une durée de trois ans. Ce projet est sous la direction de Mme Nathalie Perrot, chercheur à l’UMR GMPA de Paris-Grignon.

Les enjeux de compétitivité auxquels sont confrontées les IAA (Industries Agro Alimentaires) portent sur la qualité des produits alimentaires et leur invariabilité. L’objectif du projet INCALIN est de construire des outils d’aide à la décision pour mieux maîtriser et contrôler la qualité des produits et donc, en amont, des procédés de transformation. Il s’agit de réduire l’incertitude qui caractérise un processus par le développement ou l’adaptation de concepts, compétences et outils méthodologiques innovants. L’enjeu de ce projet est de comprendre et modéliser le réseau d’interactions qui permet d’expliquer les observations réalisées à différentes échelles et leurs articulations. Pour cela, ce projet propose de développer des concepts, compétences et outils pour reconstruire le puzzle de connaissances dans le but d’expliquer et de maîtriser le comportement global du processus. Cela passe par l’intégration des informations ou connaissances ponctuelles capitalisées, à différentes échelles, et sous différents formats (tableaux de données, savoirs d’experts, résultats de simulation de modèles), par l’ensemble des acteurs concernés par ce processus. Les dynamiques à différents niveaux devront être reconstruites et maîtrisées.

Ce projet réunit une équipe interdisciplinaire associant des laboratoires de recherche fondamentale (CREA, INRIA, LIP6) et des partenaires (INRA, professionnels). Les premiers proposent des formalismes mathématiques originaux, tels la théorie de la viabilité, l’évolution artificielle ou les réseaux bayésiens dynamiques. Les derniers maîtrisent des applications représentatives de transformations alimentaires complexes : l’affinage des fromages et la panification.

Les partenaires du projet sont :

- l’UMR GMPA, laboratoire de Génie Microbiologique des Procédés Alimentaires de l’INRA
- le CREA, Centre d’Épistémologie Appliquée de l’école polytechnique
- l’équipe “aide à la décision” du lip6, Laboratoire d’Informatique de Paris 6
- l’équipe “Complex” de l’INRIA
- le laboratoire BIA, Biopolymères Interactions Assemblages de l’INRA
- l’UMR Génial, ingénierie, procédés, aliments de l’école Agroparistech
- l’Actilait, centre technique des produits laitiers
- l’INBP, Institut National de la Boulangerie Pâtisserie

Cette thèse a été réalisée dans le cadre de ce projet INCALIN sous la co-direction de Mme Nathalie Perrot (INRA, UMR GMPA), de Mme Sophie Martin (CREA, Cemagref-LISC) et de M. Paul Bourguin (CREA, et directeur du Réseau National des Systèmes Complexes et de l’ISC-pif).

Le sujet de cette thèse s'appuie sur l'application "Affinage de fromage" de ce projet et plus précisément les WP2 et WP3. Commencée en janvier 2007, elle prendra fin en 2010.

Chapitre 2

Introduction

Le contrôle des procédés alimentaires

Les entreprises alimentaires doivent faire face à une compétition croissante, à une législation de plus en plus contraignante et des consommateurs de plus en plus exigeants sur la qualité des produits. Elles doivent ainsi transformer des matières premières très variables en des produits de qualité constante avec les technologies et les énergies disponibles de la manière la plus économique et écologique possible. Il est donc essentiel de mieux contrôler les procédés de fabrication.

La nature des décisions à prendre est très complexe. Cette complexité provient à la fois de la variabilité des matières premières, de la nature souvent non continue des procédés (Batch, semi-batch), du manque de capteurs efficaces, de l'incomplétude des connaissances sur les phénomènes (Bimbenet et al., 1994)... Elle provient aussi de la prise en compte des contraintes, ce qui est un problème difficile car elles peuvent être de natures ponctuelles, continues, temporelles, linéaires, non linéaires (Banga et al., 2008) comme par exemple les contraintes sanitaires ou d'équipement.

Du fait de ces difficultés, le contrôle de procédés alimentaires est encore souvent basé sur l'évaluation d'opérateurs humains et leurs décisions (McGrath et al., 1998). Une étude de Ilyukhin et al. (2001) aux USA montre qu'en pratique une majorité de sites industriels (59%) n'est que partiellement automatisée.

Une des voies privilégiées pour mieux contrôler les procédés alimentaires est la modélisation. Modéliser les dynamiques du procédé est nécessaire pour construire des contrôleurs automatiques et des systèmes d'aide à la décision en prédisant l'évolution du procédé. La modélisation permet de prédire les évolutions de système et de les simuler. La modélisation permet par exemple de construire des mesures indirectes de variables inaccessibles par les capteurs, de faire du contrôle automatique, de tester des hypothèses sur les phénomènes, d'optimiser la conduite...

Toutefois la modélisation en agro-alimentaire est difficile à cause des fortes non-linéarités qui apparaissent dans le domaine de fonctionnement courant des procédés (Perrot, 2004, Trelea 1997). Comme présenté par Charpentier (2002), cela implique de comprendre le procédé à différentes échelles d'espace et de temps, depuis l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle de l'usine. Cette approche inclut la modélisation de phénomènes se situant aux échelles nano (processus moléculaires, sites actifs, gènes), micro (particules, bulles, gouttes, microorganismes, enzymes, tourbillons), méso (réacteurs, échangeurs, séparateurs), macro (unités de production, usines) et méga (environnements, atmosphères, sols, océans).

Les systèmes complexes pour mieux maîtriser les procédés alimentaires

Pour de nombreux systèmes, la connaissance recueillie sur chacun des éléments étudiés indépendamment des autres ne permet pas de prédire le comportement de l'ensemble du système. C'est le cas des procédés alimentaires.

La compréhension du couplage entre les processus relevant de différents niveaux d'observation est une tâche difficile qui se trouve au coeur des approches de type "systèmes complexes".

L'étude des systèmes complexes est la conséquence des avancées dans différentes disciplines de la physique à l'anthropologie. Selon l'annexe scientifique du Réseau National des Systèmes Complexes (RNSC¹) les premières approches théoriques de modélisation des systèmes complexes remontent aux années 1940 avec les automates auto-reproducteurs de Von-Neumann, les réseaux de neurones formels de McCullochs et Pitt.

1. www.rnsc.fr

Les automates auto-reproducteurs, comme par exemple le jeu de la vie, sont révélateurs du fait que des règles simples sur des automates peuvent faire émerger des comportements complexes. Les automates et les réseaux de neurones sont des simplifications des systèmes dont on veut modéliser le comportement. Les neurones formels introduits par McCulloch et Pitts sont une simplification caricaturale des neurones vivants, objets d'étude de l'électrophysiologie actuelle.

Comme dans le cas des automates cellulaires de von Neumann, ces simplifications permettent néanmoins d'appliquer un formalisme rigoureux et d'obtenir des résultats exacts. Cette approche est une approche dynamique. On part d'une description locale du système, en termes de changements d'état à court terme des composants, sous l'effet de leurs interactions et on attend du formalisme la description globale du système, c'est-à-dire le comportement aux temps longs de l'ensemble du système.

D'autres travaux dans les années 60 et 70 ont influencé l'apparition de la science des systèmes complexes. Bourguin (2008), directeur du RNSC, cite les mathématiques de la morphogénèse de René Thom, la thermodynamique des systèmes hors d'équilibre de Prigogine, la synergie de Haken, les méthodes de mécanique statistique d'Anderson et de Wilson qui ont permis de nouvelles compréhensions des systèmes auto-organisés. Parallèlement, la modélisation "qualitative" des systèmes naturels comme systèmes complexes progressait en biologie avec la construction des réseaux macromoléculaires de la cellule (François Jacob), les paysages épigénétiques pour la morphogénèse des êtres multicellulaires (Waddington) et, dans les sciences sociales, avec l'économie évolutionniste de Schumpeter et l'économie cognitive d'Hayek et de Simon.

L'étude des systèmes complexes a été reconnue comme discipline scientifique à part entière dans les années 1980. La science de la complexité est née à l'Institut de Santa Fe au Nouveau-Mexique en résultat des études d'un certain nombre de scientifiques de différentes disciplines. Parmi eux se trouvaient Murray Gell-Mann prix Nobel de physique, Kenneth Arrow prix Nobel en économie, John Holland informaticien inventeur des algorithmes génétiques. Ces chercheurs physiciens, économistes, biologistes, informaticiens avaient la volonté de mettre en commun les outils, les techniques et les points de vue de disciplines différentes pour développer des approches capables de mieux prédire et comprendre les évolutions des systèmes complexes. Cette volonté est issue de la rencontre de systèmes complexes dans chacune de leur discipline et de la prise de conscience des similarités de leurs problématiques.

Les systèmes complexes se rencontrent dans toutes les disciplines mais il n'existe pas de définition consensuelle. Certaines propriétés sont toutefois communément admises :

- Des interactions non triviales : dans le cas des systèmes complexes, de nombreux constituants sont en interaction de manière non-triviale, c'est à dire de manière non-linéaire ou avec des boucles de rétroaction ; il est impossible de prédire parfaitement le comportement du système.
- Le holisme : isoler des morceaux du système change radicalement le tout. Un système complexe doit être étudié de manière globale. Comprendre indépendamment le comportement de chacun des constituants du système n'est pas suffisant pour comprendre le système dans son ensemble.
- L'émergence et l'immergence : une propriété est émergente lorsqu'on ne peut pas la prédire immédiatement à partir du comportement des constituants élémentaires du système. Ces propriétés émergentes sont souvent pertinentes au niveau global mais perdent leur sens au niveau individuel des constituants. Les interactions individuelles engendrent des comportements collectifs qui peuvent manifester des structures organisées. Ces structures émergentes influencent en retour les comportements individuels (immergence). Les causes sont multiples et la causalité fonctionne à la fois de façon ascendante et descendante dans les niveaux d'organisation.
- L'auto-adaptation ou résilience : selon Zwirn (2006), les systèmes les plus complexes sont auto-adaptatifs. Ils répondent aux événements externes pour devenir plus performants dans leur environnement. C'est la richesse des interactions qui permet au système de s'auto-organiser pour s'adapter.

Les systèmes naturels ont de remarquables propriétés émergentes d'autonomie, d'homéostasie, d'apprentissage et de résilience face aux perturbations. Ils ont une propriété fondamentale : celle d'avoir émergé au fil de processus co-évolutionnaires, où leur viabilité et leur réplication sont conditionnées non seulement par leurs processus internes mais aussi par le réseau des processus externes auxquels ils participent. Les grandes propriétés et régularités des systèmes adaptatifs complexes sont la robustesse aux perturbations, leur adaptabilité pour maintenir leur homéostasie, leur viabilité et leur autonomie dans des environnements changeants.

En pratique, il est rare que l'on puisse prédire l'évolution d'un système dynamique avec exactitude. Néanmoins, il est généralement possible de déterminer qualitativement ses attracteurs. La réalité que nous percevons est ainsi constituée d'une multitude d'entités qui nous semblent avoir une certaine permanence précisément parce qu'elles ont atteint un attracteur relativement à notre point de vue d'observation. Cette notion d'attracteur est toujours relative à une échelle d'observation (Chavalarias, 2008). Ces niveaux d'organisation sont des représentations utilisées par l'Homme pour mieux comprendre, expliquer et modéliser les systèmes complexes. Le monde qui nous entoure est d'une infinie complexité du fait qu'il possède des structures à toutes les échelles. Comme expliqué par Chavalarias (2008), nous sommes composés de cellules dont la quasi-totalité est renouvelée toutes les semaines. Cela ne nous empêche pas de reconnaître quelqu'un dans la rue. Dans cet exemple, l'attracteur du métabolisme de l'individu est son enveloppe corporelle. Restreindre l'observation d'un phénomène à une certaine résolution permet de penser le monde en termes de continuité et de relations causales.

Toute la difficulté est de trouver les bons niveaux d'échelle d'observation, ceux pertinents par rapport au problème posé, et de reconstruire les liens entre les dynamiques du système à ces différents niveaux.

Une caractéristique de la science des systèmes complexes soulignée par Zwirn (2006) est qu'elle n'aurait jamais pu se développer sans l'invention des ordinateurs. Le moyen principal d'étude des systèmes complexes est la simulation au travers de modèles programmés sur ordinateur. L'ordinateur joue un rôle indispensable pour pouvoir observer le comportement des systèmes complexes au moyen d'expériences "virtuelles". Résoudre exactement un système constitué de nombreuses variables en interactions (souvent non linéaires) est en général impossible. Le moyen d'étudier cette dynamique est donc de simuler par ordinateur le fonctionnement du système à partir d'un modèle.

Démarche de l'étude

Dans cette étude, nous soutenons la thèse que certains procédés alimentaires sont des systèmes complexes. Les étudier en tant que tel peut permettre de mieux les comprendre et les contrôler. Ainsi nous avons utilisé les outils, méthodes et concepts de la science des systèmes complexes pour mieux maîtriser l'affinage de camemberts.

Notre démarche est illustrée par la figure 2.1. Envisager le procédé d'affinage comme un système complexe a consisté tout d'abord à reconstruire les dynamiques de ce procédé et ensuite à étudier ces dynamiques notamment par simulation informatique.

Notre démarche a été basée sur la mise en commun d'outils, de techniques et de points de vues de disciplines différentes pour développer des approches et mieux prédire les évolutions du procédé d'affinage. Nous avons envisagé ce procédé sous l'angle du génie des procédés, de la psychologie cognitive, de l'informatique et des mathématiques appliquées. Les outils utilisés ont été très divers, depuis des méthodes d'enquête adaptées, jusqu'à des outils informatiques de calcul haute performance.

Nous avons également tenté d'étudier l'affinage de camemberts dans sa globalité à différentes conditions de température et d'humidité relative en étant aussi proche que possible de l'"in vivo". Dans

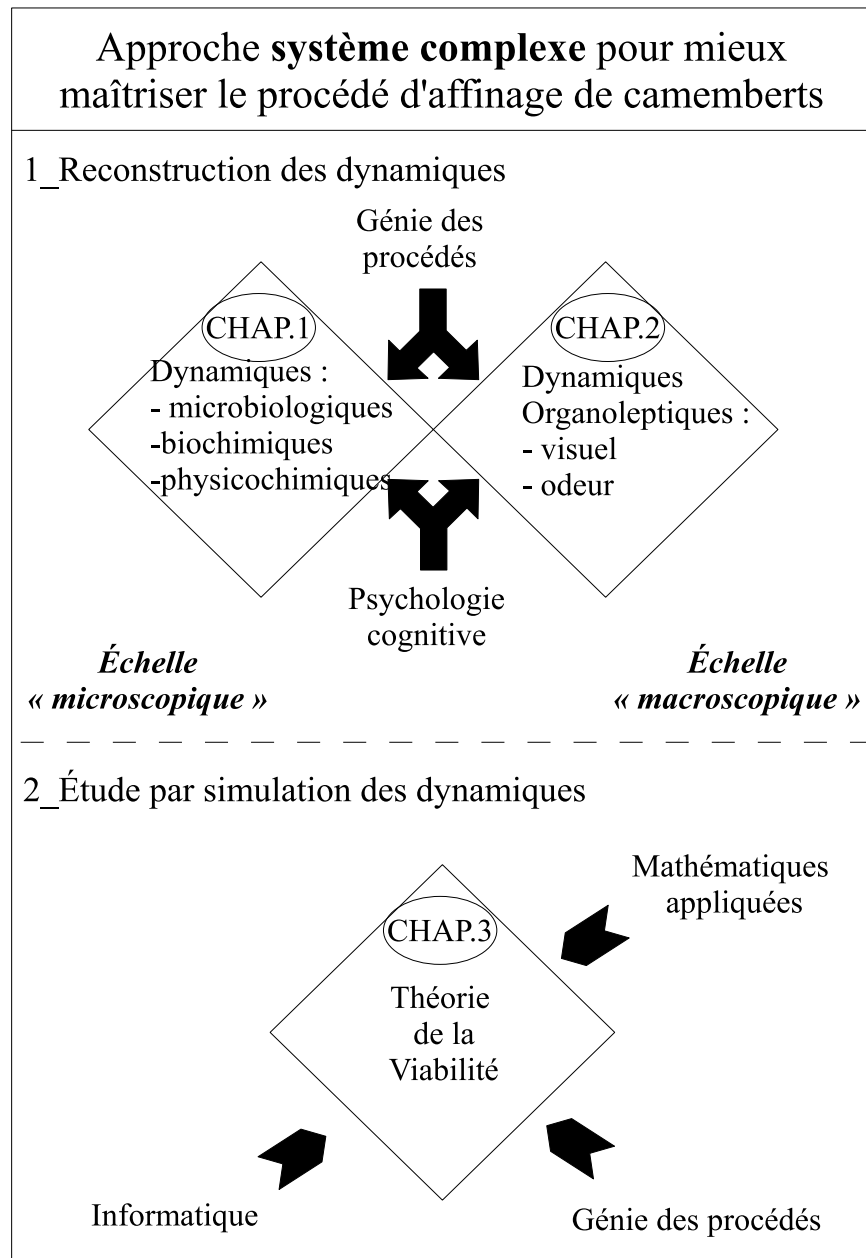


FIGURE 2.1: Démarche de la thèse : outils, méthodes et concepts des systèmes complexes pour maîtriser l'affinage de camemberts.

son ouvrage, Bourguine (2008) utilise ce terme pour souligner l'importance d'observer les phénomènes de manière globale et dans leur contexte du fait de "causalités descendantes des contextes variés sur les dynamiques qui y prennent place". Les expériences *in vitro* peuvent être d'une grande utilité pour mieux étudier et comprendre certains phénomènes en les isolant, mais elles ne sont pas toujours suffisantes notamment dans beaucoup de procédés alimentaires pour reconstruire le comportement du procédé dans son ensemble.

Dans ce cadre, notre premier objectif était de reconstruire les dynamiques à différents niveaux d'échelle. Deux niveaux d'observation ont été naturellement privilégiés : le niveau "microscopique" et le niveau "macroscopique".

Le niveau microscopique représente le niveau des réactions microbiologiques, c'est à dire les cinétiques microbiennes, les phénomènes biochimiques de consommation des substrats et par extension les phénomènes physicochimiques qui y sont directement liés. Ce niveau d'observation a été privilégié car l'affinage est un processus d'activité fermentaire et de digestion enzymatique des constituants du lait. Il est nécessaire de reconstruire les dynamiques de ces phénomènes. L'affinage de camemberts a été étudié de manière expérimentale, en hâloir pilote, les résultats de l'étude du niveau microscopique sont présentés dans le chapitre 3 cette thèse.

Le niveau macroscopique représente le niveau des phénomènes organoleptiques. L'affinage est également un processus qui transforme une pâte fraîche en un fromage de qualités organoleptiques attendues par le consommateur. Le niveau macroscopique et plus particulièrement le développement des propriétés sensorielles du fromage au cours de l'affinage est donc également un niveau d'étude à privilégier. Nous avons étudié les dynamiques de ces phénomènes par le biais d'analyses sensorielles et de recueils d'expertise auprès de fromagers expérimentés. Les dynamiques reconstruites représentant le niveau macroscopique du procédé d'affinage sont présentées dans le chapitre 4.

Notre second objectif a été d'étudier des dynamiques d'affinage modélisées pour simuler le procédé d'affinage et envisager de nouveaux contrôles de ce procédé. Cette exploration du procédé a été réalisée dans le cadre conceptuel de la théorie de la viabilité à partir d'un modèle mécanistique liant phénomènes microbiens et phénomènes de perte de masse. Le domaine de viabilité du procédé en fonction des contraintes opérationnelles a été déterminé et a permis de proposer une trajectoire optimisée d'affinage. Ces résultats font l'objet du dernier chapitre de cette thèse (chapitre 5).

Notre travail présente de premières avancées dans le contexte de l'étude des procédés alimentaires en tant que systèmes complexes, toutes les questions étant loin d'être résolues. Nous concluons en dressant le bilan de ce travail de thèse et en proposant des objectifs à court et moyen termes pour la poursuite de ces travaux.

Chapitre 3

L'affinage de camemberts, un système complexe.

Contenu

3.1	La fabrication et l'affinage de camemberts	25
3.1.1	Fabrication	25
3.1.2	L'affinage	28
3.2	Étude expérimentale de l'affinage de camemberts : Matériels et méthodes.	39
3.2.1	Fabrication des fromages	39
3.2.2	L'affinage des fromages	43
3.2.3	Suivi des cinétiques d'affinage	46
3.3	Influence de la température et de l'humidité relative sur l'affinage : résultats expérimentaux	48
3.3.1	Description du déroulement de l'affinage standard	48
3.3.2	Analyse des cinétiques d'affinage	53
3.3.3	Sélection de fabrications représentatives	56
3.4	Conclusions	57

3.1 La fabrication et l'affinage de camemberts

Le Camembert est un fromage à pâte molle et à croûte fleurie. L'appellation "Camembert de Normandie" est une appellation d'origine contrôlée (AOC) depuis 1986 (Décret n° 86-1361 du 29 décembre 1986). Il a été imité dans de nombreux endroits du monde (France, Royaume Uni, Australie, États Unis...).

Le cahier des charges stipule que le Camembert de Normandie doit être fabriqué dans l'aire géographique constituée des départements du Calvados, de l'Eure, de la Manche, de l'Orne et de la Seine Maritime et à partir de lait cru de vache de ces régions (chauffage au maximum à 37°C). Ce fromage est défini par le décret comme : un "fromage à pâte molle, légèrement salée, de couleur blanche à jaune crème, à moisissures superficielles constituant un feutrage blanc pouvant laisser apparaître des taches rouges, à caillé non divisé pouvant être légèrement tranché verticalement, à égouttage spontané. En forme de cylindre plat d'un diamètre de 10,5 à 11 cm, il est fabriqué exclusivement avec du lait de vache emprésuré et renferme au moins 45 grammes de matières grasses pour 100 grammes de fromage sec, le poids total de matière sèche ne devant pas être inférieur à 115 g par fromage. Son poids est de 250 g au minimum". Le caillé doit être moulé à la louche et le salage doit se faire au sel sec. Enfin, "la durée de l'affinage, comptée à partir du jour de fabrication doit être au minimum de vingt et un jours, dont seize jours dans l'aire géographique délimitée".

L'AOC Camembert se situe au sixième rang de l'ensemble des fromages AOC français en tonnages produit (Guéguen et al., 2005). En 2004, la France a produit 444 776 tonnes de fromages à pâte molle et à croûte fleurie dont : 158 636 de bries et coulommiers, 122 511 de camemberts et formes camembert, 1500 de carrés de l'Est et 163 639 d'autres fromages. Avec 37 % de la production totale des fromages à pâte molle, les bries et coulommiers devancent les camemberts 27 %.

Les enjeux économiques sont tels qu'une "guerre du Camembert" a fait rage durant les dix dernières années, menée par les grands groupes industriels du secteur. Le décret n° 2008-984 du 18 septembre 2008 relatif à l'appellation d'origine contrôlée « Camembert de Normandie » est alors paru, réaffirmant principalement : l'obligation d'une fabrication à partir de lait cru, et fixant un processus d'évolution génétique des troupeaux vers la race Normande (25 % du cheptel en race Normande en 2015 et 50 % en 2020), l'alimentation des animaux est également mieux définie avec une durée minimum de pâturage fixée à 6 mois par an.

Malgré des pratiques communes et, dans le cas des AOC, un cahier des charges assez restrictif, la diversité des camemberts produits reste importante du fait de la complexité des processus mis en jeu. Nous nous attacherons ici à définir les sources de cette complexité.

3.1.1 Fabrication

A partir de lait, de présure, de sel et de ferments d'affinage, quatre éléments simples, plus de 1 000 variétés de fromages sont fabriquées en France. A tel point que leur classification est difficile. La classification de Lenoir (1983) (figure 3.1) permet d'appréhender la diversité des fabrications fromagères d'un point de vue technologique et de positionner les fromages à pâte molle et à croûte fleurie.

3.1.1.1 Prétraitement du lait

Le lait est un milieu complexe contenant de nombreux composés essentiels pour la constitution des fromages, tels que les matières grasses, le lactose, les matières protéiques et les matières minérales ainsi que des micro-organismes.

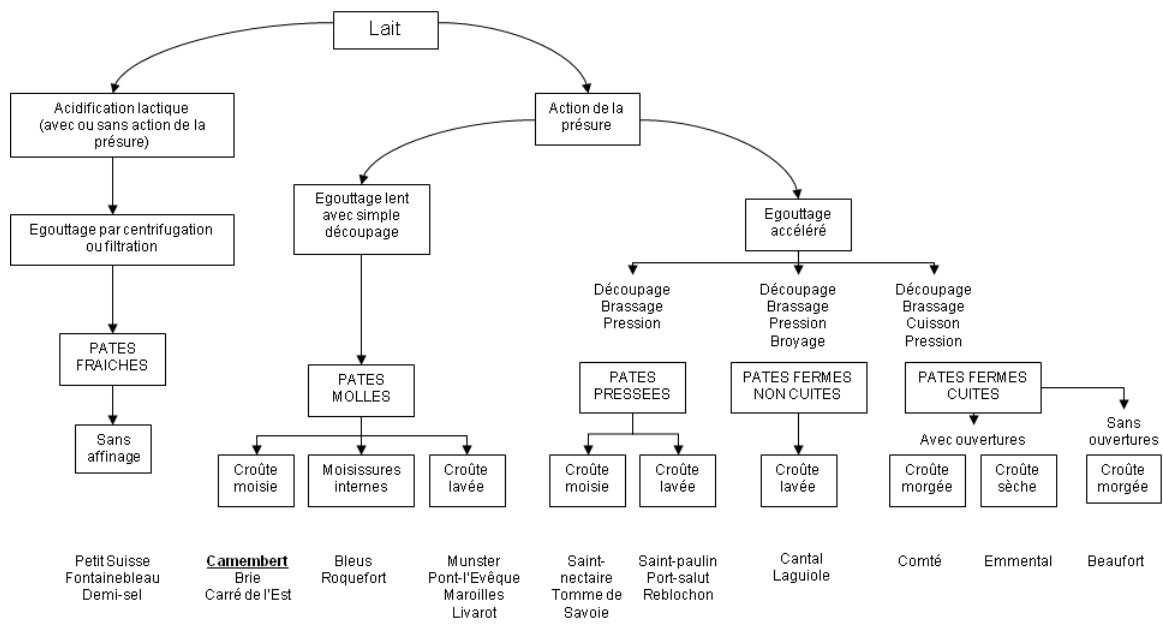


FIGURE 3.1: Diversité des fabrications fromagères d'après Lenoir (1983).

Le lait provenant de la traite est conservé réfrigéré à 4 °C. Du chlorure de calcium $CaCl_2$ est également ajouté au lait pour corriger ces laits car une partie du calcium a précipité lors de la réfrigération. Cet ajout conduit à une augmentation du Ca ionisé et à un léger abaissement du pH ce qui diminue le temps de prise à la coagulation et augmente le rendement fromager.

Ensuite, pour limiter la variabilité de la matière première, le lait est standardisé en matières grasses (29 g/L). La standardisation en matières protéiques par apport de poudre de lait est interdite dans le cas des camemberts AOC mais fréquente dans le cas des camemberts industriels. Enfin, le lait est généralementensemencé en levains lactiques et flores d'affinage de manière à mieux contrôler les écosystèmes microbiens en activité lors de la fabrication et de l'affinage.

3.1.1.2 Coagulation

Le phénomène de coagulation est un changement d'état du lait d'un état liquide à un état semi-solide c'est à dire en un gel laitier. La coagulation est liée à la création d'un réseau protéique et minéral lors de la dénaturation des caséines du lait par voie acide ou enzymatique.

Les caséines du lait Les caséines du lait sont constituées de molécules amphiphiles (un pôle hydrophobe et un pôle hydrophile). C'est leur propriété émulsifiante qui permet l'homogénéité du lait. Il existe plusieurs types de caséines, dont les principales sont les caséines α , β , γ , et κ . Elles s'organisent en micelles de caséines : particules sphériques formées par l'association des caséines, de quelques fragments peptidiques et de composants minéraux (principalement calcium et phosphate). La caséine κ a la propriété de stabiliser les micelles en présence de calcium. Ces micelles de caséine mesurent environ 100 nm de diamètre.

Coagulation acide Ce type de coagulation résulte d'un abaissement du pH du lait par production d'acide lactique par des bactéries lactiques, suite à la dégradation du lactose. Lorsque le pH est inférieur à 5,2, le phosphate de calcium est solubilisé, provoquant un changement de charge des caséines à l'extérieur des micelles. Elle passe d'une charge négative à la neutralité. Il n'y a plus de répulsion électrostatique et donc les micelles s'agglomèrent. Il y a alors une réorganisation protéique et la formation d'un réseau protéique tridimensionnel, insoluble emprisonnant du lactosérum et de la matière grasse, appelé gel ou coagulum. Le coagulum est dit "lactique". Il n'y a plus de liaison ionique, les liens entre protéines sont de faible énergie (liaison H, Van der Waals, hydrophobes, . . .), Le gel est lâche donc perméable, il est peu contractile et fragile, il faut le manipuler avec précaution.

Coagulation enzymatique (ou présure) Des enzymes d'origine animale, végétale ou microbienne peuvent faire coaguler le lait. Mais la plus couramment employée est la présure. Elle se compose d'un mélange de chymosine et de pepsine. Les enzymes coupent la caséine κ entre sa partie hydrophobe et sa partie hydrophile et déstabilise ainsi les micelles. La partie hydrophile se solubilise dans le sérum, la partie hydrophobe reste dans le caillé. Les ponts phosphocalciques sont toujours présents, les énergies de liaison entre les caséines sont importantes. Les micelles se réorganisent, pour former un gel appelé "gel présure" qui est souple, très cohésif, imperméable, peu contractile et ne s'égouttant pas spontanément.

Coagulation mixte, le cas du Camembert Il existe également des coagulations dites "mixtes" qui associent les deux types de coagulation. Les propriétés des gels ainsi formés et l'aptitude à l'égouttage sont intermédiaires entre celles du coagulum acide et celles du coagulum présure.

À l'issue de l'étape de coagulation, le lait se trouve à l'état semi-solide et les caractéristiques physico-chimiques du gel formé conditionnent l'aptitude à l'égouttage et les caractéristiques finales

du fromage. Dans le cas de fromage à pâte molle, la température d'empresurage est primordiale pour la maîtrise de l'égouttage.

3.1.1.3 Égouttage

L'égouttage a pour fonction de concentrer les caséines et la matière grasse du lait sous un volume réduit par expulsion du lactosérum. Ce phénomène résulte de phénomènes physiques de synérèse (contraction du gel) et de phénomènes plus passifs liés à la porosité et à la perméabilité du gel. Selon le type de coagulation utilisée, l'aptitude à l'égouttage des gels seront différentes.

Les gels lactiques sont plus perméables, les gels présures doivent être traités mécaniquement pour permettre l'égouttage. Les gels mixtes ont des aptitudes à l'égouttage intermédiaires. Les fromages à pâte molle et à croûte fleurie comme le Camembert sont des gels mixtes. Le gel est "découpé" puis moulé à la louche pour ne pas détruire le caillé. L'égouttage en moule dure environ 24 h durant lesquels l'acidification du gel se poursuit.

Toute la complexité du procédé d'égouttage des fromages à pâte molle réside dans le maintien de l'équilibre égouttage/acidification. En effet, cet équilibre va fixer les propriétés physiques et chimiques des pré-fromages qui induiront les activités microbiennes et enzymatiques lors de l'affinage. L'acidification augmente la porosité du caillé cela permet un meilleur égouttage mais parallèlement elle induit également une solubilisation de minéraux évacués avec le lactosérum, et donc à une déminéralisation du caillé. Pour les fromages à pâte molle, l'un des objectifs au cours de l'égouttage est d'obtenir une pâte peu déminéralisée mais bien égouttée. Les paramètres à surveiller sont la température d'égouttage et le pH du lactosérum.

3.1.1.4 Salage

Le salage est essentiellement réalisé au chlorure de sodium par salage à sec ou en saumure. Le salage est une étape indispensable pour la conservation du fromage. Il permet de limiter l'eau libre (diminution de l' a_w) ce qui limite les développements microbiens et contribue à la qualité sanitaire des fromages. Le salage contribue également à un complément d'égouttage et à la formation de la croûte en se déposant à la surface du fromage. Enfin, le sel participe aux propriétés organoleptiques des fromages (goût et texture). Pour les fromages à pâte molle et à croûte fleurie, la maîtrise du salage est indispensable pour permettre une bonne implantation de la flore de surface au cours de l'affinage.

3.1.2 L'affinage

L'affinage du fromage est une phase de digestion enzymatique des constituants du caillé qui va donner au fromage les caractéristiques organoleptiques attendues par les consommateurs. Le fromage peut être considéré comme un bioréacteur constitué par un écosystème complexe.

Les agents d'affinage constituant cet écosystème sont les enzymes du lait et micro-organismes natifs ou ensemencés. Ces agents agissent sur le substrat constitué par le caillé avec ses propriétés physiques, biochimiques... Et enfin, l'action des agents d'affinage va être conditionnée par les données d'environnement de l'affinage, c'est à dire la température, la composition de l'air (teneur en vapeur d'eau, en oxygène, en dioxyde de carbone, en ammoniac) et l'humidité relative.

Ces trois éléments, agents d'affinage, environnement et substrats interagissent entre eux.

Concernant l'affinage des fromages à pâte molle et à croûte fleurie, ce sont surtout les activités de la flore de surface des fromages qui confèrent à ces fromages leur typicité.

3.1.2.1 Les agents d'affinage

Les micro-organismes sont essentiels à la fabrication des fromages. Ils participent soit de manière directe avec leur activité métabolique, soit de manière indirecte avec la libération d'enzymes dans la matrice fromagère.

Les enzymes Trois types d'enzymes participent à l'affinage des fromages : (i) les enzymes présentes naturellement dans le lait telle que les lipases et les plasmines (protéase alcaline), (ii) les enzymes coagulantes qui sont principalement des protéases acides, (iii) et enfin les enzymes des micro-organismes telles que les enzymes de la glycolyse, de la protéolyse et de la lipolyse, les enzymes lysant les acides aminés ou encore celles lysant les acides gras. Les enzymes microbiennes peuvent être libérées par les micro-organismes vivants mais également par les micro-organismes lors de leur mort car la lyse des cellules libère les enzymes intracellulaires.

Les bactéries Les bactéries lactiques sont les premières espèces à se développer dans le caillé. Leur principal rôle est la consommation du lactose, la production d'acide lactique et la production de précurseurs et de composés d'arôme. Dans les pâtes molles, les ferments lactiques principalement utilisés en industrie sont des bactéries mésophiles acidifiantes (*Lactococcus lactis*, *L. cremoris*)¹ ou aromatiques (*L. lactis subsp diacetylactis*, *Lc. mesenteroides*) ainsi que des bactéries thermophiles (*S. thermophilus*).

Les bactéries de surface ont également un rôle important dans l'affinage des fromages, ce sont principalement des Micrococcaceae et des bactéries corynéformes. Du fait de leur caractère aérobie, ces bactéries se développent en surface elles sont résistantes au sel mais sont acido-sensibles. Le pH en surface doit être supérieur à 5,5 pour permettre leur développement.

Dans le cas du camembert, une bactérie importante est *Brevibacterium aurantiacum*. Elle se développe après désacidification de la pâte par les levures et moisissures. Cette bactérie participe à la protéolyse et la production de composés aromatiques ou de leurs précurseurs et libère notamment de l'ammoniac (Choisy et al., 1997). Elle est capable d'utiliser les acides aminés comme seule source d'énergie et dégrade notamment la méthionine produisant du méthanthiol et des dérivés soufrés. Ces composés donnent des goûts aillés caractéristiques. Enfin, elle possède un pigment rouge-orangé visible sur la croûte et typique des camemberts de type AOC (Richard et Zadi, 1983).

Enfin, en ce qui concerne les fromages au lait cru, les flores bactériennes sauvages participent de manière importante au développement des qualités organoleptiques des fromages (Guéguen et al., 2005).

Les levures Les levures sont particulièrement importantes pour leur rôle dans la neutralisation des caillés, leur action protéolytique réduit l'amertume des caillés et leur action lipolytique libère des composés volatils aromatiques. Les levures caractéristiques du camembert sont principalement *Kluyveromyces marxianus*, *Kluyveromyces lactis* et *Geotrichum candidum*.

Kluyveromyces marxianus a pour principale fonction la désacidification de la pâte par dégradation du lactose. Après épuisement du lactose en surface, *K. marxianus* métabolise le lactate (Leclercq-Perlat et al., 2004a). C'est surtout en rendant le lactose limitant que cette levure réduit les risques de post-acidification (baisse du pH après le début d'affinage qui conduit à des défauts importants des fromages). Cette levure produit également de l'acétate d'éthyle dont l'odeur de pomme verte fermentée est caractéristique du début d'affinage des fromages de type camembert. A la surface du camembert, l'évolution de *K. marxianus*, dans des conditions d'affinage de 13 °C, 93 % HR, a été décrite d'après par une croissance exponentielle jusqu'au 4^{ème} jour, une phase stationnaire entre le

1. Classification de 1997

5^{ème} et le 19^{ème} jour et une phase de mortalité jusqu'à la fin de l'affinage (Leclercq-Perlat et al., 2006).

Geotrichum candidum joue un rôle clé dans l'affinage des camemberts car il permet la désacidification de la pâte en consommant les lactates mais il participe aussi à sa désamérisation en lysant les peptides amérisants produits par *Penicillium camemberti*. Enfin, *G. candidum* favorise la cohésion et le séchage de la croûte et libère des arômes typiques du camembert (Berger et al., 1999). Cette levure a connu un regain d'intérêt ces vingt dernières années. Son utilisation dans la fabrication du camembert au lait pasteurisé permet d'obtenir des produits au croûtage et à la saveur plus traditionnels. De plus, sa rapidité de croissance lui donne avec *K. marxianus* un rôle de couverture et de lutte contre les contaminants (dont le *Mucor*). Elle se développe dès le premier jour, sa croissance augmente du 4-5^{ème} jour au 10-12^{ème} jour puis se stabilise.

Les moisissures Les moisissures superficielles sont typiques des fromages à croûte fleurie tels que les camemberts, les moisissures internes sont des caractéristiques majeures des pâtes persillées type Roquefort, Bleu d'Auvergne... *Penicillium camemberti* représente la principale moisissure utilisée dans la fabrication des fromages à pâte molle et à croûte fleurie. C'est une moisissure de surface dont le feutrage blanc et duveteux apparaît après les 5 – 6^{ème} jours d'affinage. Il atteint, suivant les souches, 2 à 3 mm vers les 10 – 12^{ème} jours. *P. camemberti* est considéré comme peu sensible au sel bien que cette propriété soit variable d'une souche à l'autre. *P. camemberti* est une moisissure aérobie stricte, sensible aux teneurs en dioxyde de carbone trop élevées (Leclercq-Perlat et al., 2006).

P. camemberti utilise le lactose et les lactates comme source de carbone contribuant à la remontée du pH dans le caillé (Aldarf et al., 2006). Cependant, dans le cas des camemberts, les quantités en lactose sont négligeables lorsque le mycélium de *P. camemberti* apparaît. De sorte que le substrat principalement assimilé par cette moisissure en début d'affinage est le lactate.

P. camemberti a une activité lipolytique principalement par libération de lipase alcaline et de phosphohydrolase. Cette moisissure libère également deux protéases (une métallo-protéase et une aspartyl-protéase), deux amino-peptidases alcalines et une carboxypeptidase acide. Le début de l'activité des protéases coïncide avec l'apparition du feutrage mycélien à la surface du fromage. La croissance de *P. camemberti* est actuellement difficile à évaluer autrement que de manière visuelle car les techniques actuelles de dénombrement détruisent le mycélium et ne permettent de suivre que l'évolution des concentrations en spores (Molimard et al., 1995, Aldarf et al., 2002, Leclercq-Perlat et al., 2006).

Conséquences des interactions entre les agents d'affinage Durant l'affinage, il y a de nombreuses relations d'interactions entre les micro-organismes. Il peut y avoir des interactions directes liées à un contact entre les populations microbiennes ou indirectes pour l'intermédiaire de substances produites par ces micro-organismes. Ces interactions peuvent être positives (stimulation de la croissance) ou négatives (inhibition de la croissance ou de l'activité métabolique). Ce dernier cas peut être lié à des phénomènes de compétition ou de production de substances inhibitrices.

L'acidification par les bactéries lactiques par exemple diminue le risque de contamination des fromages.

La flore d'affinage du camembert est un système complexe dans lequel les micro-organismes utilisés peuvent entrer en synergie. Ainsi, l'association de *G. candidum* avec *K. marxianus* et *P. camemberti* permet une désacidification plus rapide du caillé, agissant favorablement sur le développement de la flore bactérienne superficielle (Mounier et al., 2005). Cette flore de surface joue un rôle de couverture de surface et d'antagoniste des contaminants tel que *Mucor*. De façon macroscopique, l'association *G. candidum* et *P. camemberti* permet une protéolyse plus intense accompagnée d'une

moindre amertume. Au delà de cette constatation, ces deux espèces présentent surtout une complémentarité métabolique. D'après Aziza et al. (2005), la croissance de chaque micro-organisme en milieu de culture est plus importante en association qu'en culture pure. L'action bénéfique de la levure n'est pas encore totalement élucidée. Mais il est très probable que les activités enzymatiques de *G. candidum* (hydrolyse des peptides de bas poids moléculaire) permettent une meilleure assimilation par *P. camemberti* des peptides et des acides aminés qu'il peut utiliser comme sources de carbone. En co-culture, l'activité protéolytique de *Penicillium* permet la constitution d'un stock de petits et moyens peptides utilisables par *Geotrichum*. Cependant, il peut également être à l'origine de défauts type "graisse" ou "peau de crapaud", qui se forment à la surface du caillé. Ainsi, une peau grasse, plus ou moins plissée, empêche *P. camemberti* de s'implanter correctement et modifie les caractéristiques de texture et la qualité organoleptique du fromage. Enfin au niveau bactérien, *G. candidum* est capable de produire de l'acide D-3-phenyllactique et de l'acide D-3-indollactique qui empêchant ainsi la croissance de *Listeria monocytogenes*.

Rousseau (1984) a étudié la flore de surface de camemberts par microscopie à balayage électronique montre que pendant les quatre premiers jours, la surface du fromage est principalement colonisée par des bactéries lactiques. Cependant, à partir du deuxième jour, les levures commencent à être observées en surface. Du 9^{ème} jour au 21^{ème} jour d'affinage, les fromages sont totalement couverts par *G. candidum* et *P. camemberti*. Puis, de la 3^{ème} à la 6^{ème} semaine, les bactéries de surface se développent sur le mycélium de *P. camemberti* et notamment *B. aurantiacum* qui induit une pigmentation en jaune ou rouge.

L'impact de certaines interactions microbiennes sur les qualités organoleptiques et notamment aromatiques pour des camemberts ont été explorés par Molimard et al. (1997) et par Martin et al. (1999).

3.1.2.2 Propriétés de la matrice fromagère et consommation des substrats

Principales propriétés de la matrice fromagère influant sur l'affinage Trois facteurs internes à la matrice jouent un rôle important dans l'affinage : l'activité de l'eau, la structure du fromage et enfin, le pH.

L'activité de l'eau, noté a_w , représente la disponibilité en eau et est essentiellement déterminée pour les matrices fromagères par la teneur en eau et en sel. C'est un paramètre influant sur les développements microbiens et l'activité enzymatique. Son contrôle est indispensable car une a_w trop élevée ou trop basse conduit à une dégradation sensorielle des fromages (Beresford et al., 2001). Une humidité trop élevée des fromages augmente les risques de contamination. L' a_w des fromages est contrôlée à travers les opérations de salage et d'égouttage. Au cours de l'affinage et notamment durant le ressuyage l'humidité relative va également influencer sur l' a_w des fromages. Enfin l' a_w est modifiée par la fixation d'eau lors des réactions biochimiques. *G. candidum* a une croissance faible à des pressions osmotiques élevées. Dans ce sens, le salage peut affecter le développement de *Geotrichum* et favoriser celui de *P. camemberti*. L' a_w du camembert est d'une valeur moyenne de 0.975 au cours de l'affinage (Helias et al., 2007a).

Pour les fromages à pâte molle et à croûte fleurie, les substrats carbonés, protéiques et les matières grasses sont consommés de manière différée en surface et à coeur des fromages. Les flux de substrats entre la croûte du fromage et le coeur sont cruciaux pour la qualité d'affinage de ces fromages. Le fromage est un réseau de micelles de caséines emprisonnant une phase aqueuse dans laquelle les phénomènes de diffusion se produisent. En fonction de la porosité de ce réseau, l'intensité des flux au cours de l'affinage et la disponibilité des substrats seront modifiées ainsi que, par conséquent, les activités microbiennes. La structure du réseau protéique est surtout liée à l'équilibre acidification/égouttage lors de la fabrication.

Le pH est un point clé de l'affinage des camemberts. En effet, il peut influencer la texture du fromage, les actions enzymatiques des micro-organismes, la répartition des minéraux et les phénomènes de

diffusion. Les levures et les moisissures peuvent se développer en milieu acide alors que les bactéries de surface préfèrent les milieux plus neutres (pH supérieur ou égal à 5,5). L'activité des enzymes est aussi dépendante du pH. En effet, selon Choisy et al. (1997), à un pH inférieur à 4,5, l'activité et la stabilité de nombreuses enzymes sont fortement réduites. En général, l'activité des protéases microbiennes est maximale pour un pH compris entre 5,5 et 7,5 et celles des lipases microbiennes entre 7,5 et 9,0. Le pH des fromages est influencé par la consommation de l'acide lactique et la production d'ammoniaque par la flore microbienne de surface. L'action de la flore microbienne fait migrer le lactate (consommé) du coeur vers la surface et l'ammoniaque (produit) de la surface vers le coeur.

Au cours de l'affinage, la matrice fromagère est en constante évolution notamment concernant l'activité de l'eau, la structure du fromage et enfin, le pH.

Les voies métaboliques de consommation des substrats

Glycolyse Les voies métaboliques du lactose sont présentées dans la figure 3.2.

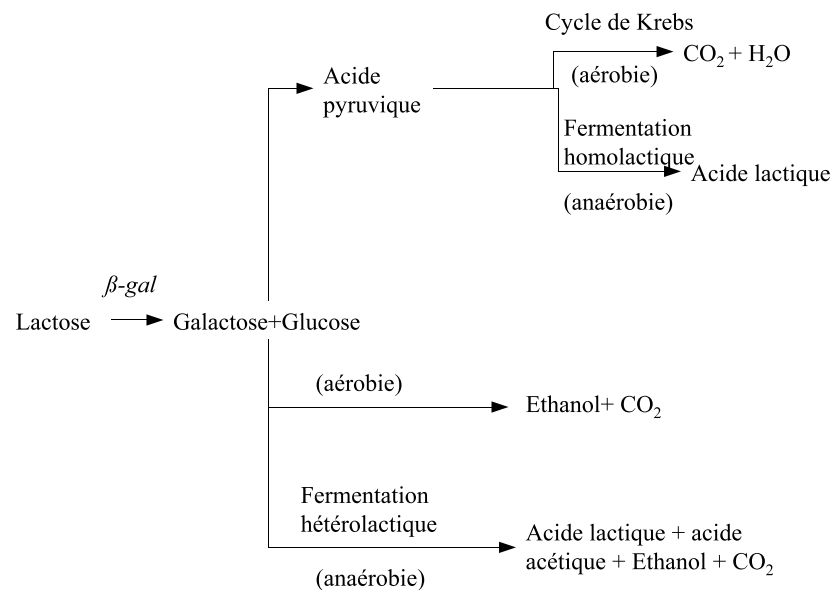


FIGURE 3.2: Voies métaboliques de dégradation du lactose, d'après Merlet (1995).

En ce qui concerne le Camembert, une partie du lactose est consommée par *K. marxianus*, une autre est transformée en acide lactique par les bactéries lactiques. Le lactate ainsi produit est ensuite principalement métabolisé par *G.candidum* et *P.camemberti* en début d'affinage par oxydation (Merlet, 1995).

Lipolyse Les Camemberts sont, après les bleus, les fromages dont la matière grasse est la plus dégradée. Le degré de lipolyse des camemberts Normands peut atteindre 6 à 10 % (Choisy et al.,

1997). Une dégradation qui joue un rôle clé dans la synthèse des arômes des fromages à pâte molle notamment en tant que précurseurs des méthylcétones, des alcools, des lactones et des esters. Les voies métaboliques de dégradation des lipides sont présentées figures 3.3.

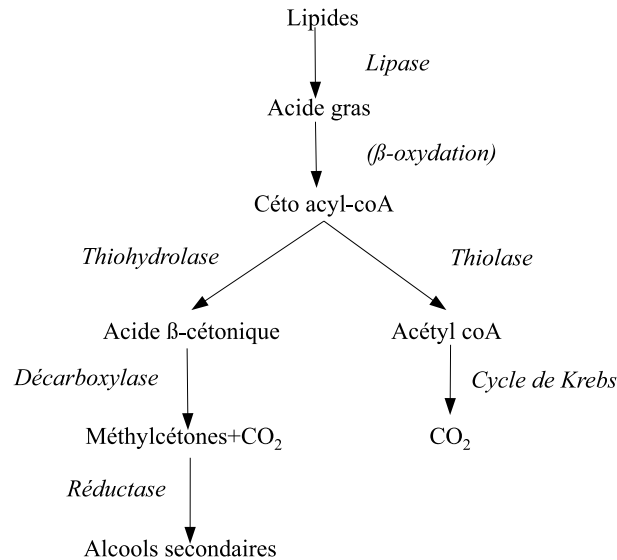


FIGURE 3.3: Voies métaboliques de la lipolyse d'après Molimard et al. (1997)

Protéolyse Le Camembert est un fromage fortement protéolysé, notamment dans la partie située sous la croûte. La protéolyse d'origine fongique prédomine. Néanmoins, les bactéries lactiques et *G.candidum* contribuent aussi à la dégradation des protéines.

La dégradation des protéines en acides aminés donne naissance à de nombreux composés aromatiques et à de l'ammoniac (figure 3.4). L'ammoniac représente environ 25% de l'azote total, il provient des réactions de désamination des acides aminés.

3.1.2.3 L'environnement de l'affinage

La maîtrise des conditions d'environnement de l'affinage constitue le principal moyen de contrôle des cinétiques d'affinage.

Température La température intervient directement dans les équilibres enzymatiques et microbiens et en conséquence influe sur la vitesse d'affinage. Les températures élevées (au delà de 14 °C) permettent une implantation plus rapide des flores. Toutefois les températures élevées en accélérant les processus microbiens rendent l'affinage plus difficile à maîtriser et augmentent les risques de défauts organoleptiques tels que des défauts d'arômes, saveur (amertume), du "coulage sous

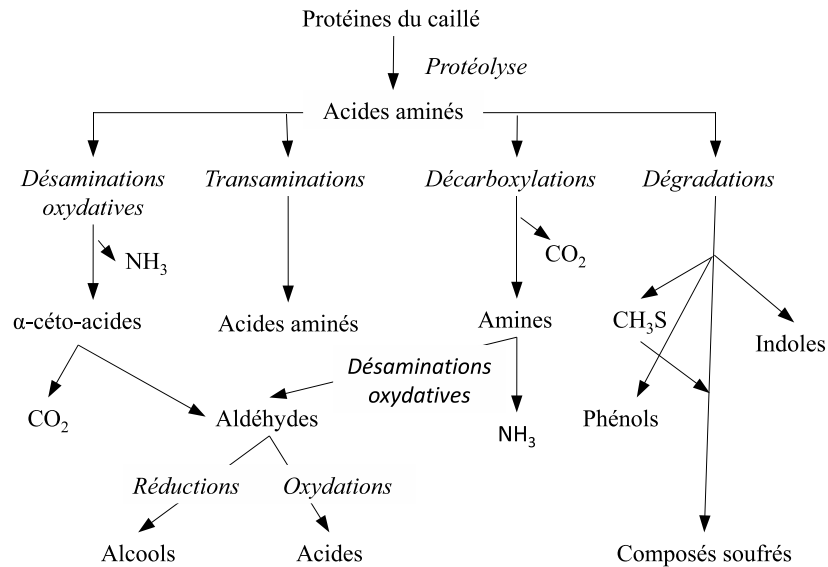


FIGURE 3.4: Schéma général du catabolisme microbien des acides aminés au cours de l'affinage des fromages. D'après Hemme et al. (1982)

croûte” (le fromage sous la croûte est liquide et le coeur n’est pas affiné)... Des températures plus fraîches permettent de ralentir les phénomènes microbiologiques et biochimiques mais, par exemple, des températures inférieures à 8 °C ont un impact très néfaste sur la croissance de *K.marxianus* (Mietton, 1987).

Humidité relative et vitesse d’air L’hygrométrie influence la teneur en eau des fromages et l’activité de l’eau à leur surface. L’évaporation varie en fonction de la quantité d’eau libre dans le fromage, de sa surface spécifique (surface / volume), de l’état de sa croûte, du temps de séjour en cave et de la vitesse de renouvellement de l’air dans la cave.

La maîtrise de l’humidité relative et des vitesses d’air dans les hâloirs est surtout importante pour limiter la “freinte” (perte de poids des fromages) et ses conséquences économiques pour l’industriel. L’équilibre doit donc être trouvé entre le taux de freinte et la qualité organoleptique des fromages, une hygrométrie trop importante ayant respectivement un effet positif sur l’un et négatif sur l’autre.

Enfin, la vitesse d’air doit être suffisante pour éviter l’apparition de micro-ambiances autour des fromages, mais ne doit pas être trop élevée au risque d’assécher la surface des fromages et de créer un phénomène de “croûtage” non désirable.

Composition gazeuse de l’atmosphère Les teneurs en oxygène, en dioxyde de carbone et en ammoniac influent sur l’affinage des fromages à croûte fleurie. L’absence d’oxygène est susceptible d’inhiber la croissance de *P. camemberti* et de *G. candidum*. L’accumulation modérée de CO_2 (entre 2 et 4 %) apparaît comme un activateur de l’activité de *G. candidum* et *P. camemberti* avec pour conséquence une accélération de l’affinage des camemberts. Toutefois, dès que ce taux atteint 6% de CO_2 des phénomènes de coulage sous-croûte se manifestent (Picque et al., 2006).

Le retournement des fromages permet de faire “respirer” la surface des fromages reposant sur le support. Concernant le camembert ce retournement a lieu vers le 6^{ème} jour pour favoriser l’implantation du *P.camemberti*.

Deux environnements différents : le hâloir et l'emballage Les fromages de type camembert sont affinés en hâloir entre 9 et 16 jours dans des conditions régulées de température, d'humidité et de composition d'air. Les fromages sont ensuite emballés et les conditions d'environnement sont alors nettement moins maîtrisées. L'emballage a un rôle d'information pour le consommateur, de protection du produit mais aussi de poursuite de l'affinage. Les fromages de type camembert sont emballés sous film et boîte en bois ou en carton. Les propriétés des films d'emballage peuvent différer en terme de perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau et permettre ainsi de maîtriser l'évolution de l'affinage jusqu'au moment de la consommation.

L'objectif de l'emballage est de limiter la perte d'eau tout en permettant aux micro-organismes aérobies peuplant la surface de respirer ce qui entraîne le développement des caractéristiques organoleptiques. L'apport en oxygène est toutefois limité pour ralentir l'activité microbienne et prolonger la durée de conservation des fromages. Une oxygénation trop faible conduit par exemple à un changement de couleur du *P. camemberti* qui devient grisâtre. Un équilibre doit donc être trouvé. De même, l'emballage doit limiter la perte en eau des fromages mais aussi éviter que l'humidité à l'intérieur de l'emballage ne détériore la flore de surface. La perte de poids des fromages emballés, essentiellement par évaporation d'eau, doit être de 2,5 à 5 %.

3.1.2.4 La qualité attendue

Les producteurs de camemberts doivent garantir la qualité sanitaire, nutritionnelle et organoleptique de leurs produits. Du point de vue sanitaire, ce sont surtout des contaminations par *E. coli* et *L. monocytogenès* qui sont médiatisées. Ces contaminations sont relativement rares mais leur impact économique est très important. Du point de vue nutritionnel, les produits laitiers comme le Camembert sont reconnus pour leur apport en calcium. Ces dernières années, l'accent a été mis sur la teneur en matière grasse des fromages et des camemberts allégés sont apparus dans les linéaires.

Enfin, en ce qui concerne les qualités organoleptiques du camembert, les grands groupes industriels introduisent régulièrement des innovations. Parmi les innovations les plus marquantes citons les Camemberts dit "de terroir" ou "la cloche saveur" développée par Lactalis. La cloche saveur est un emballage innovant développé pour répondre à deux attentes consommateurs : la non prolifération des odeurs dans le réfrigérateur et la conservation du fromage. En dehors de ces innovations, les industriels ont pour principal objectif de maintenir homogène la qualité organoleptique de leurs camemberts. Les principaux défauts pouvant apparaître sur le Camembert sont :

- L'accident du bleu est lié à la présence de *Penicillium chrysogenum*. Ce défaut apparaît dans à de basses températures et induit un développement anormal du *P. camemberti* (Lenoir, 1983).
- Le défaut « poil de chat » dû aux moisissures des espèces : *Mucor*. Il apparaît lorsqu'il y a un manque d'hygiène dans le hâloir. Des taches noirâtres apparaissent au dessus du feutrage blanc du mycélium de *P. camemberti* (Lenoir, 1983).
- Le défaut « peau de crapaud » ou « grasse » qui peut avoir lieu si *G. candidum* se développe trop au détriment de *P. camemberti*, la surface du fromage prend alors un aspect de peau de crapaud.
- Les défauts liés à une mauvaise implantation de *P. camemberti* ce qui donne une sous-croûte très coulante et amère (Lenoir, 1983).
- Le défaut de post-acidification. La post-acidification est un phénomène normal dans l'évolution du camembert. Cependant, si elle est trop prononcée, elle peut entraîner une forte perte d'eau par le fromage, des défauts d'implantation de souches, des problèmes de coulage sous croûte et de pâte acide.

Les producteurs de camemberts doivent atteindre des cibles de qualité sanitaire, nutritionnelle et organoleptique en contrôlant aux mieux le procédé d'affinage, c'est à dire les conditions d'affinage et l'ensemble des interactions entre micro-organismes et substrats au cours du temps.

3.1.2.5 La modélisation pour le contrôle des procédés fromagers

Les modèles sont une représentation simplifiée de la réalité. Quelque soit son niveau de complexité, un bon modèle doit être aussi fidèle que possible à l'objet ou au système modélisé. En agro-alimentaire, la modélisation recouvre trois approches majeures (Banga et al., 2008) :

- l'approche empirique, ou "boîte noire", qui permet d'établir des modèles donnant une corrélation statistique, linéaire ou non, entre différentes grandeurs mesurées, sans prendre en considération les phénomènes impliqués,
- l'approche "boîte blanche", basée sur les connaissances comme les modèles mécanistiques appuyés sur les lois biologiques, physiques, chimiques régissant le comportement du processus considéré, ou encore les modèles experts fondés sur les connaissances experts du procédé.
- l'approche hybride, plus rare, qui consiste à utiliser ensemble les deux approches précédentes.

De plus, selon la prise en compte de l'évolution du système dans le temps, les modèles mathématiques peuvent être classés en deux catégories :

- les modèles statiques, où la relation entre les grandeurs du système est indépendante du temps (par exemple une stœchiométrie réactionnelle) qui se traduit mathématiquement par des équations algébriques,
- les modèles dynamiques, qui décrivent des systèmes dont les grandeurs évoluent dans le temps ; c'est le cas, par exemple, des cinétiques réactionnelles. Mathématiquement, ces modèles sont construits sous la forme d'équations différentielles, de réseaux de neurones ou encore de réseaux bayésiens dynamiques...

Une recherche, sur la base bibliographique FSTA de ISI Web Of Sciences, a permis d'étudier globalement la modélisation du procédé fromager (à partir de la requête "fromage SAME model*", du 7 au 9 octobre 2009).

Parmi les 112 études collectées, les modèles développés ont traité en majorité des problèmes de physicochimie (44 %) mais aussi des problèmes de microbiologie, contrôle de procédé, biochimie et de propriétés sensorielles (voir figure 3.5).

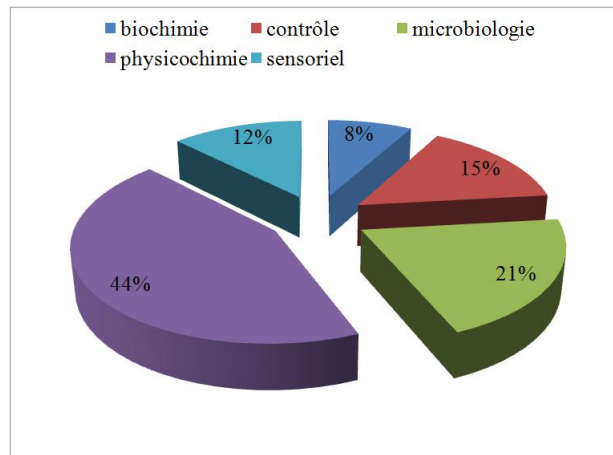


FIGURE 3.5: Domaine dans lesquels des modèles du procédé fromagers ont été développés.

Parmi ces modèles, 52% (des modèles développés) sont de nature empirique et 44% de nature mécanistique. Seules deux études ont pour base des modèles experts (voir figure 3.6)

Les modèles empiriques Bonaiti et al. (2004) ont optimisé les conditions d'humidité relative et de température d'affinage de fromage à croûte lavée. Le modèle utilisé était un modèle de surface de réponse construit à partir des vitesses de croissance maximum du pH, de la levure

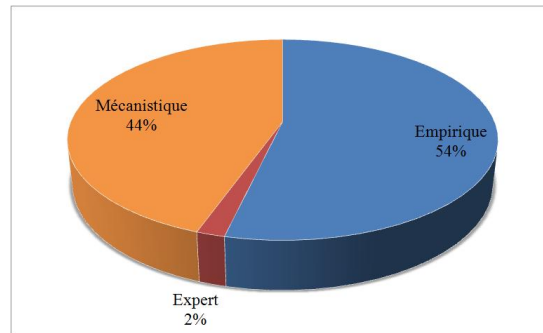


FIGURE 3.6: Type de modèles utilisés pour les procédés fromagers

Debaryomyces hansenii et des taux de consommation maximal de lactose et lactate mesurés à différentes combinaisons de températures et d'humidités relatives.

Bozkurt et Erkmen (2001) ont par exemple comparé différents modèles non linéaires de type Gompertz et de type logistique pour modéliser les contaminations de fromages Feta par *Yersinia enterocolitica* au cours de la phase de stockage.

Sihufe et al. (2010) ont déterminé le temps optimum d'affinage de fromages argentins affinés à partir d'analyse en composante principale sur des données expérimentales de protéolyse, lipolyse, analyse physicochimique et sensorielle. L'objectif était de raccourcir le temps d'affinage avec des affinages réalisés à températures élevées.

Parmi les modèles empiriques utilisés les méthodes de régressions multiples représentent 35 % des modèles. Ces modèles ont notamment été utilisés pour corréliser des données sensorielles à des données quantitatives plus classiques. la corrélation entre les caractéristiques sensorielles de Cheddar et leur composition en acide gras en fonction des saisons et des températures d'affinage (Kraggerud et al., 2008), la relation entre la protéolyse et les propriétés sensorielles de fromages norvégiens "Prast" (Pripp et al., 2006), les corrélations entre propriétés rhéologiques et texture perçue (Pereira et al., 2005). Ces modèles sont empiriques et pour la plupart statiques mais ils permettent de faire le lien entre des propriétés à l'échelle microscopique et des propriétés à l'échelle macroscopique comme les propriétés sensorielles.

Les méthodes des réseaux de neurones ont été employées dans 16 % des études concernées. Elles ont par exemple permis de développer des mesures indirectes. C'est le cas des études de Picque et al. (2004) et de Guillemin et al. (2006), ces deux études réalisent des mesures indirectes sur la coagulation du lait pendant la fabrication à partir des caractéristiques du lactosérum. Poirazi et al. (2007) ont modélisé la production de bactériocine par *Streptococcus macedonicus* dans des fromages de type Kasserli selon les conditions de fermentation du lait (pH, température, taux de sel). Paquet et al. (2000) ont modélisé par réseau de neurones le pH à quatre temps clés du processus : l'égouttage, le découpage, le pressage et la fin d'affinage pour du Cheddar. La corrélation avec les données de validation est de 0.853 à 0.926. Jimenez-Marquez et al. (2005) ont modélisé par réseau de neurone l'humidité de cheddars avant pressage.

Les modèles empiriques sont difficilement extrapolables hors de leur contexte de développement, c'est leur inconvénient. Cela pose des problèmes de transmission des modèles développés en laboratoire pour du contrôle de procédé en industrie. L'autre inconvénient de ces modèles est la nature "boîte noire", les liens entre les variables restent inexpliqués. Une corrélation entre deux variables par exemple n'implique pas un lien de cause à effet, des effets d'autres facteurs peuvent être masqués.

Les modèles mécanistiques En ce qui concerne les modèles mécanistiques, un tiers environ portent sur l'affinage de fromage. De manière plus générale les modèles mécanistiques sont utilisés

pour modéliser les phénomènes de diffusion notamment du sel (Turhan et Kaletunc, 1992, Zorrilla et Rubiolo, 1994, Wiles et Baldwin, 1996 Pajonk et al., 2003), les phénomènes microbiens de croissance ou de consommation de substrat (Amrane et al., 2006, Riahi et al., 2007, Guillier et al., 2008), des phénomènes de synérèse (Huber et al., 2001, Tijskens et De Baerdemaeker, 2004), avec très récemment un engouement pour les phénomènes d'échange gazeux des fromages emballés (Jakobsen et Risbo, 2009, Rodriguez-Aguilera et al., 2009b, Rodriguez-Aguilera et al., 2009a).

Aziza et al. (2006) ont développé un modèle compartimenté, dynamique et stochastique du processus de lavage et salage de fromage à croûte lavée pour prédire les risques de contaminations croisées par des micro-organismes de type *Listeria monocytogenes*.

Seule la publication de Arguelles et al. (2007) présente un modèle dynamique de l'affinage de fromage (Mahon) à différents niveaux d'échelle. Cette étude utilise la méthode SAFES (approche systématique des procédés alimentaires). Cette recherche a permis d'analyser les changements d'état des protéines au cours du procédé depuis le jour du salage jusqu'à 90 jours d'affinage. Fito et al. (2007) ont souligné dans leur article de 2007 la possibilité de traiter des problèmes multi-échelles avec la méthode SAFES : transfert de matière, réaction chimiques, changement de phases, changement de structure. Dans l'étude de Arguelles et al. (2007) la dimension multi-échelles de la modélisation reste toutefois limitée aux équilibres thermodynamiques et le lien avec les propriétés rhéologiques par exemple est évoqué mais non modélisé.

Globalement, les modèles mécanistiques ont l'avantage d'être extrapolables mais l'inconvénient de ne représenter que partiellement le procédé. Les phénomènes à différentes échelles de temps et d'espace ne sont pratiquement pas pris en compte, du moins à notre connaissance, dans le domaine agro-alimentaire. En revanche les modèles mécanistiques apportent de la connaissance et permettent de comprendre les liens entre variables.

Les modèles experts Les modèles exploitant les systèmes experts seront détaillés dans le chapitre 4 de cette thèse. L'objectif de ces études est d'utiliser les connaissances expertes pour prédire l'évolution des propriétés sensorielles d'un fromage à pâte molle et croûte fleurie au cours de l'affinage. Comme expliqué par Agioux (2003), l'un des objectifs principal est d'agir, le plus rapidement possible, sur le produit et/ou le procédé, pour anticiper ou corriger une dérive et donc limiter les coûts de la non-qualité. Dans le prolongement, la deuxième étude de Ioannou et al. (2003) est l'étude de sensibilité du modèle expert développé dans la première.

Les modèles experts sont intéressants car ils permettent de créer des modèles relativement "boîte blanche" où la connaissance est accessible. L'inconvénient de ces modèles est que la sensibilité des mesures des experts est méconnue et que les connaissances sur les dynamiques du système sont diffuses et donc difficiles à exprimer mathématiquement (Perrot, 2004).

Modélisation de l'affinage de camemberts Une quinzaine d'études ont trait à la modélisation de l'affinage de fromage de type camembert sous les angles physicochimiques, biochimiques et microbiologiques mais très peu au contrôle de ce procédé. Ces études sont présentées en détail tableau 3.1.

Au niveau microbiologique, le micro-organisme le plus étudié est *Penicillium camemberti* responsable de la couverture blanche du camembert (Adour et al., 2002, Leclercq-Perlat et al., 2004a,c, 2007, Aldarf et al., 2006). Les autres micro-organismes d'affinage étudiés sont *Kluyveromyces marxianus*, *Geotrichum candidum*, *Brevibacterium aurantiacum* notamment par Leclercq-Perlat et al. (2004a) et Leclercq-Perlat et al. (2007). Mis à part les flores d'affinage, la croissance du contaminant *Listeria monocytogenes* est modélisé par Liu et al. (2007) et Liu et Puri (2008) pour les étapes de fabrication et d'affinage des camemberts.

Concernant la modélisation des phénomènes physicochimiques, les études ont porté principalement sur la perte de masse de camemberts au cours de l'affinage (Helias et al., 2007b) et l'évolution du pH (Leclercq-Perlat et al., 2004a, Liu, 2008).

Enfin, les phénomènes biochimiques de la glycolyse, de la protéolyse et de la lipolyse ont été modélisés par Leclercq-Perlat et al. (2004a), Martin-del Campo et al. (2007) et Leclercq-Perlat et al. (2007).

Deux études abordent la modélisation d'aspects sensoriels de l'affinage (Pionnier et al., 2002, Michalski et al., 2003). Ces auteurs ont cherché à identifier l'impact de la taille des globules gras présents dans le lait sur les propriétés physicochimiques et organoleptiques des fromages en fin d'affinage.

Enfin, trois études ont porté sur le contrôle de l'affinage de camemberts. Picque et al. (2006) et Leclercq-Perlat et al. (2006) ont étudié l'impact de la composition en dioxyde de carbone dans la chambre d'affinage sur l'activité respiratoire des micro-organismes en surface des camemberts et sur l'apparence des fromages en fin d'affinage. Les deux études de Rodriguez-Aguilera et al. (2009b) et Rodriguez-Aguilera et al. (2009a) ont permis de modéliser les échanges gazeux au cours de l'affinage de camemberts sous emballage. Ces trois études portent donc sur le contrôle de la composition de l'atmosphère au cours de l'affinage, la première en hâloir, les deux autres sous emballage.

Ces travaux permettent de mieux comprendre l'affinage mais les interactions entre variables restent mal connues. Seuls trois des analyses présentées ont étudié les liens entre des variables de nature différente et à différents niveaux d'échelle et toujours à partir de modèles statiques. A notre connaissance, les dynamiques à différents niveaux d'échelle et leurs liens n'ont pas été modélisés.

3.2 Étude expérimentale de l'affinage de camemberts : Matériels et méthodes.

Pour mieux comprendre l'affinage de camemberts, le procédé est étudié au laboratoire sur des pilotes de fabrication et d'affinage de fromages. L'objectif est de fabriquer et affiner des camemberts aussi proches que possible des camemberts produits par les industriels. Nous souhaitons ainsi étudier les phénomènes du procédé d'affinage dans toute sa complexité, du moins autant que possible.

3.2.1 Fabrication des fromages

Les fabrications fromagères sont réalisées dans un pilote présenté sur les photographies 3.7.

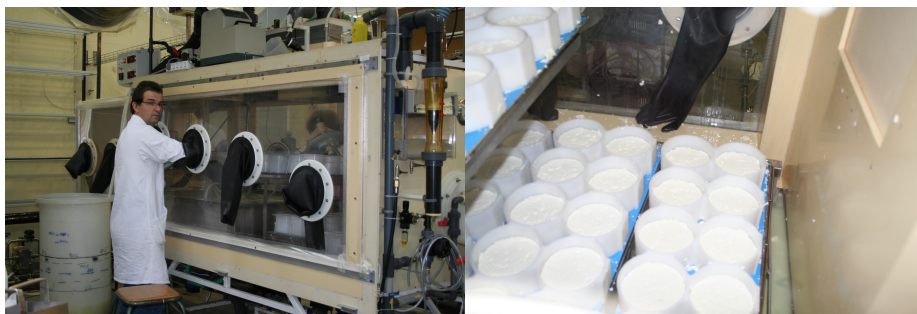


FIGURE 3.7: Installation expérimentale de fabrication fromagère

L'ensemble des étapes de fabrication qui est présenté dans cette section est synthétisé dans le diagramme de fabrication figure 3.8.

TABLE 3.1: Liste des travaux sur la modélisation de l'affinage de camemberts.

Auteur, année	Domaine	Objectif de l'étude	Outil mathématique utilisé
Adour et al. (2002)	Microbiologie	Prédire la croissance de <i>G. candidum</i> et <i>P. camemberti</i> en fonction de la consommation des substrats carbonés et azotés (culture en batch).	Modèle mécanistique
Pionnier et al. (2002)	Sensoriel	Comprendre les interactions entre les arômes et les molécules non-volatiles solubles du camembert.	Modèle empirique (t-test de Student)
Michalski et al. (2003)	Sensoriel et physicochimie	Comprendre l'impact de la taille des globules gras du lait sur les qualités physico-chimiques et organoleptiques des fromages.	Modèle empirique (analyse de variance)
Leclercq-Perlat et al. (2004a,c, 2007)	Microbiologie et physicochimie	Comprendre les interactions entre les variables physico-chimiques et microbiologiques au cours de l'affinage.	Modèle empirique (matrice de corrélation et analyse de variance)
Aldarf et al. (2006)	Microbiologie	Comprendre la diffusion du lactate du coeur vers la surface et de l'ammonium de la surface vers le coeur en fonction de la croissance de <i>P. camemberti</i> . (peptone gélifiée)	Modèle mécanistique
Picque et al. (2006)	Contrôle	Influence de la composition de l'air dans les hâloirs sur la respiration et la perte de masse de camemberts au cours de l'affinage.	Modèle empirique (étude de variance)
Martin-del Campo et al. (2007)	Physicochimie	Caractériser les compositions physicochimiques de camemberts à partir de leur analyse par spectroscopie infrarouge à différents stade d'affinage.	Modèle empirique (ACP et PLS)
Helias et al. (2007a)	Physicochimie	Prédire la perte de masse et la température de surface de camemberts au cours de l'affinage en fonction de la température et de l'humidité du hâloir et de la respiration des micro-organismes.	Modèle mécanistique
Liu et al. (2007)	Microbiologie	Étude de la répartition spatiale de <i>Listeria monocytogenes</i> pendant la fabrication et l'affinage de camemberts.	Modèle empirique (modèle linéaire généralisé)
Liu et Puri (2008)	Microbiologie	Modéliser la croissance de <i>L. monocytogenes</i> dans le camembert au cours de l'affinage.	Modèle mécanistique
Liu (2008)	Physicochimie	Modélisation de l'évolution des valeurs de pH de camemberts de la fabrication à la fin d'affinage.	Modèle empirique (modèles linéaires et sigmoïdes)
Rodriguez-Aguilera et al. (2009a,b)	Contrôle	Modéliser les dynamiques d'échanges gazeux de camemberts emballés en fonction de la porosité des emballages, de la composition en gaz dans l'emballage et de la température de stockage.	Modèles mécanistiques

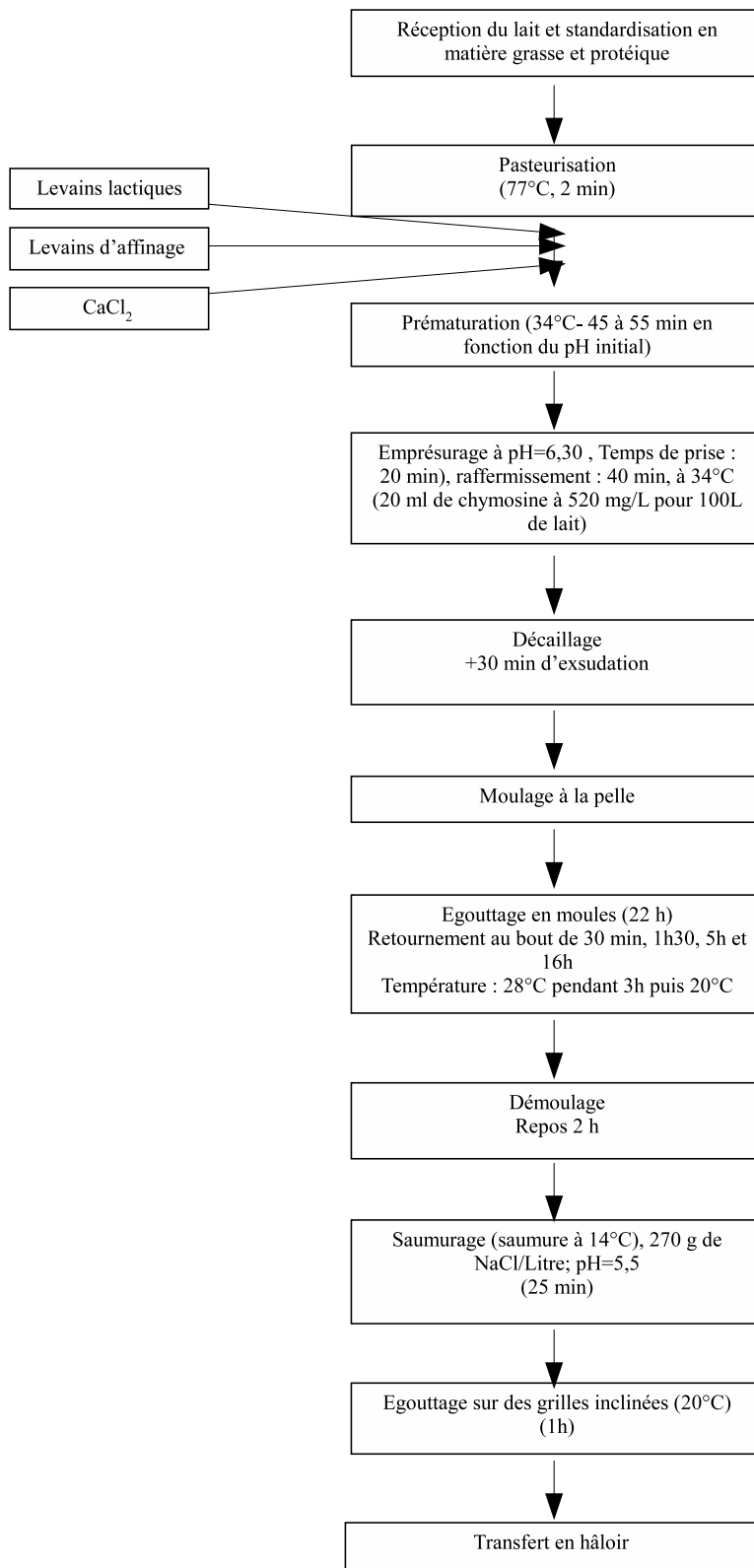


FIGURE 3.8: Schéma du procédé de fabrication de camemberts au GMPA (INRA-Grignon).

3.2.1.1 Préparation de la fabrication

Le pasteurisateur, la cuve de lancement (tank de lait initial) et le circuit de circulation du lait (tubes, pompes...) sont nettoyés, à 80-85 °C pendant au moins 40 min, avec une solution d'hydroxyde de sodium à 2 %. Ils sont ensuite rincés à l'eau puis à l'acide nitrique à 2 % pendant 40 min à 80-85 °C et de nouveau rincés à l'eau pendant 20 min. Pour réaliser les fabrications dans des conditions stériles, toutes les étapes de la fabrication sont réalisées dans l'enceinte de fabrication d'un volume de 3 m³ fabriquée par les ateliers du Laboratoire GMPA (INRA-Grignon). Cette enceinte ainsi que tout le matériel de fabrication sont stérilisés à l'acide péraétique pendant au moins 48 h à 20-25 °C, avant d'être rincés à l'air stérile et maintenus en légère surpression pour éviter toute contamination pouvant provenir de l'extérieur.

3.2.1.2 La fabrication des camemberts

Les Camemberts sont fabriqués à partir de laits produits à la ferme de l'AgroParisTech (Thiverval-Grignon, France), environ deux litres de lait sont nécessaires pour fabriquer un camembert. La veille de la fabrication, le lait entier (environ 200 L) et le lait écrémé (environ 100 L) sont réceptionnés et des analyses du taux butyreux et du taux protéique sont effectuées pour pouvoir standardiser le lait de fabrication. Le taux de matières grasses choisi est de 29 g/L, il est obtenu par mélange de lait entier cru (environ 40 g de matière grasse / L) et de lait écrémé. Le taux protéique de 35 g/L est obtenu par ajout de poudre 852B (Ingredia). Le lait est laissé une nuit à 4 °C pour laisser les équilibres minéraux se rétablir.

3.2.1.3 Ensemencement du lait

Le lait estensemencé avec 2,5 g de levains lactiques (CHN11, Chr. Hansen, Arpajon, France) pour 200 litres de lait, ils sont mis à incuber dans 1,5 L de lait stérile à 30 °C sans agitation pendant 16 h. Le levain d'affinage (les quatre principaux micro-organismes présentés dans la bibliographie) sont décongelés à 4 °C pendant la nuit. Leur mélange se fait au début de la fabrication pour obtenir la concentration voulue :

- *K.marxianus* (GMPA collection 44⁸) à une concentration de 4.10⁶ ufc/L de lait,
- *G.candidum* (Degussa souche D) à une concentration 8.10⁴ spores/L de lait
- *P.camemberti* (Degussa souche R) à une concentration 8,1.10⁶ spores/L de lait
- *B.aurantiacum* (ATCC 9175) à une concentration de 10⁷ ufc/L de lait.

Le matin de la fabrication, le lait de fabrication est pasteurisé à 77 °C pendant 2 min et 30 sec. Pour vérifier l'efficacité de la pasteurisation, des analyses microbiologiques sur boîtes de Pétri (bactéries lactiques, levures, moisissures et bactéries d'affinage) sont effectuées sur le lait : avant, au début, au milieu et à la fin de la pasteurisation. Les taux de lactose et de lactates dans le lait sont aussi mesurés pour connaître la concentration de ces substrats avant transformation. A la sortie du pasteurisateur, le lait est réceptionné dans la cuve de coagulation. Les levains lactiques et d'affinage sont ajoutés dans la cuve dès la réception des premiers litres de lait, en même temps que la solution de chlorure de calcium, stérilisée par filtration (0,22 µm) et à raison de 0,1 g/L pour 100L de lait, pour compenser les pertes de calcium dues au traitement thermique.

3.2.1.4 Prématuration et coagulation

La prématuration est une étape durant laquelle le pH diminue de 6,6 (pH initial du lait) à 6,3, elle dure entre 45 et 55 min selon les fabrications. Sa durée est déterminée par un suivi du pH à la

température de 34 °C ce qui permet de favoriser l'activité des bactéries lactiques. Lorsque le pH du caillé est de $6,30 \pm 0,05$, 40 mL de présure (Chr. Hansen, France) (520 mg de chymosine par litre) sont ajoutés et mélangés aux 200 litres de lait. La température dans l'enceinte est descendue à 28°C. Le temps de prise (coagulation totale) est fixé à 20 min et le gel obtenu est laissé au repos (raffermissement) pendant 40 min pour une contraction presque totale du gel.

3.2.1.5 Décaillage

Après raffermissment, le découpage du caillé ou « décaillage » se fait avec un tranche caillé de maille 2 x 2 cm. Dès la fin du découpage, environ 40 % du volume initial du lait (soit 80 L de sérum) sont soutirés stérilement par pompage pour favoriser l'égouttage des grains. La durée maximale d'exsudation n'excède pas 40 min.

3.2.1.6 Moulage

Le caillé est ensuite moulé avec des pelles en inox le plus rapidement possible afin d'éviter les inégalités au niveau du taux de matière sèche des fromages. Les moules comprennent deux parties : « le bloc moule » (comprenant 10 moules) de 107 mm de diamètre et d'une hauteur de 77 mm et « la rehausse » de même diamètre et d'une hauteur de 30 mm. Chaque « bloc moule » est posé sur une grille d'égouttage en inox recouverte d'un store plastique. Les rehaussees sont enlevées 30 min après le moulage. L'objectif du moulage est d'avoir des produits de hauteur et de poids similaires afin d'avoir une production homogène.

3.2.1.7 Égouttage

La température au début de l'égouttage est de 28 °C. Les fromages sont retournés une première fois 30 min après le moulage, une seconde fois 1 h 30 après le moulage et une troisième fois 5 h après le moulage. Après 3 h d'égouttage, la température de l'enceinte est diminuée de 28 °C à 20-22 °C.

3.2.1.8 Démoulage et salage

Vingt-deux heures après le moulage, les fromages sont démoulés, leur pH est compris entre 4,8 et 4,9 en surface, leur taux de matière sèche totale à coeur est de 40 à 42 %. Deux heures après le démoulage, les fromages sont salés dans une saumure stérile à 300 g NaCl/L, 5,5 de pH et à 14 °C. Les fromages y sont plongés pendant 25 min afin d'obtenir un taux de sel moyen égal à $1,7 \pm 0,1$ %. Après le saumurage, pour les égoutter et éliminer le surplus de saumure, les camemberts sont laissés à 20 °C pendant une heure sur les grilles inclinées (30 °).

3.2.2 L'affinage des fromages

Les fromages sont ensuite répartis dans les deux enceintes d'affinage. Pour rester en conditions stériles, ils sont transférés grâce à un sas amovible de transfert comme présenté figure 3.9.

3.2.2.1 Les étapes de l'affinage du camembert

Pour mieux comprendre l'affinage des camemberts, nous avons réalisé des affinages expérimentaux à différentes conditions de température et de humidité relative. Les températures d'affinage sont fixées à 8 °C, 12 °C et 16 °C, l'humidité relative à 88 %, 92 % et 98 % d'humidité. La nomenclature

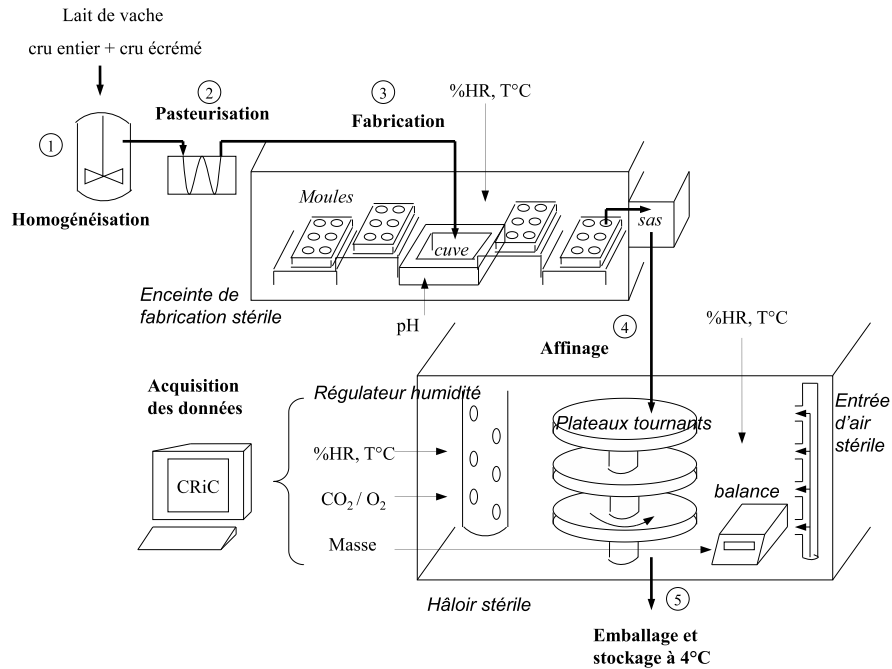


FIGURE 3.9: Schéma des enceintes de fabrication et d'affinage des camemberts

adoptée pour identifier les essais est la suivante : F11 H1 92 % 12 °C représente la 11^{ème} fabrication réalisée dans le petit hâloir à 92 % d'humidité relative et 12 °C.

Dans les hâloirs, les fromages subissent, le premier jour un ressuyage à 12 °C et à 85 % d'HR. Ce ressuyage permet de sécher les surfaces du fromage. Il est indispensable pour une bonne implantation de la flore d'affinage en surface. Le 5^{ème} jour, tous les fromages sont retournés pour favoriser l'oxygénation de la face inférieure des camemberts en contact avec les grilles de support. Le retournement permet une implantation homogène sur les deux faces de *G. candidum* et *P. camemberti*. Du 11^{ème} au 12^{ème} jour, les fromages subissent un nouveau ressuyage à 12 °C et à 85 % d'HR. Il permet de limiter l'humidité en surface du fromage qui pourrait causer une dégradation du mycélium de *P. camemberti* lors de l'affinage sous emballage. Au 12^{ème} jour d'affinage, les fromages sont emballés, avec un papier du commerce standard. Ils sont ensuite mis dans des boîtes en bois agrafées, puis stockés en chambre froide à 4 °C jusqu'au 40^{ème} jour.

3.2.2.2 La plate-forme d'affinage

La plate-forme d'affinage est constituée de deux hâloirs ce qui permet d'étudier deux conditions d'humidité relative différentes pour une même température et une même fabrication. Le premier hâloir (0,4 m³) a une capacité de 28 fromages, le second (1 m³) a une capacité de 70 fromages. Ce dernier est présenté figure 3.10. Les fromages dans les hâloirs expérimentaux sont posés sur des grilles elles-mêmes posées sur des plateaux tournants pour uniformiser l'aération des fromages.

3.2.2.3 La régulation des conditions d'affinage

Les deux hâloirs sont placés dans une chambre frigorifique thermostatée (MA60 Dagard, France) d'un volume de 27 m³ (L = 4,0 m ; l = 2,8 m ; h = 2,4 m) afin de réguler sa température. Pour



FIGURE 3.10: L'Arlésienne, hâloir pilote d'une capacité de 70 fromages installé dans une chambre thermostatée.

réguler l'humidité relative de l'air plus ou moins humide est injecté. Cet air est préalablement stérilisé par filtration puis humidifié.

Dans chaque enceinte d'affinage, l'humidité relative, la température et les concentrations en CO_2 sont mesurées en continu grâce au logiciel CRiC (Guillemin, 2007) développé au laboratoire (voir photo 3.11). CRiC est un logiciel qui permet d'enregistrer toutes ces mesures en ligne afin de contrôler et de réguler l'évolution de ces paramètres au cours de l'affinage.

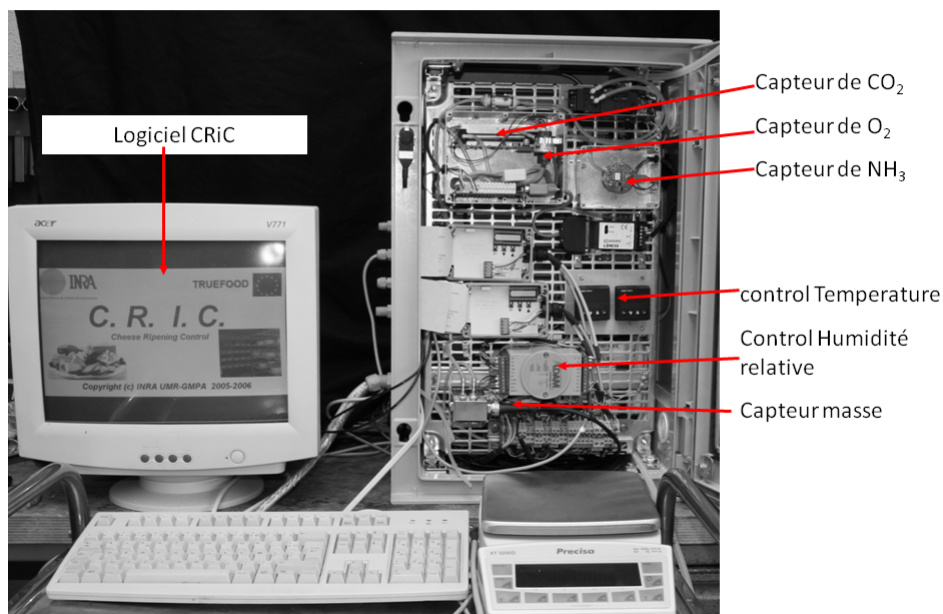


FIGURE 3.11: Le dispositif de mesure en ligne "CRiC" (Guillemin, 2007) pour le contrôle de l'affinage des camemberts

3.2.3 Suivi des cinétiques d'affinage

Les prélèvements s'effectuent tous les jours jusqu'au 9^{ème} jour ensuite les fromages sont analysés aux jours 12, 13, 14, 19, 26, 33 et 40. Les populations microbiennes, après emballage, évoluent plus lentement, du fait du stockage à 4 °C, ce qui explique qu'un seul prélèvement par semaine est effectué entre les 19^{ème} et le 40^{ème} jours. A chaque jour de prélèvement, un fromage de chaque hâloir est étudié.

3.2.3.1 Mesures en ligne

Comme présenté précédemment le logiciel CRiC (Guillemin, 2007) permet d'acquérir en ligne les mesures de CO_2 dans les hâloirs et d'en déduire la respiration des micro-organismes. La masse d'un fromage par hâloir est également mesurée et enregistrée par le logiciel. La mesure est réalisée avec une balance (Précica 9670M, France, précision = 0,01 g), aseptisée et tarée, qui a été préalablement placée dans l'enceinte d'affinage et reliée au logiciel d'acquisition. L'humidité relative des hâloirs est mesurée à l'aide de sonde Vaissala (HMP 243, Etoile International, Paris) étalonnée à 85 % avec une solution de chlorure de sodium ($NaCl$) saturée (humidité relative de 85 %) et à 99 % avec une solution de sulfate de potassium (K_2SO_4) saturée. Enfin, la température des hâloirs est également mesurée à partir des sondes Vaissala (HMP 243, Etoile International, Paris) et enregistrée en continu durant les essais.

3.2.3.2 Mesures "at-line"

Des mesures sensorielles "at-line" ont été réalisées. Elles consistent à analyser l'évolution des propriétés organoleptiques des camemberts au cours de l'affinage. La méthode utilisée et certains des résultats obtenus sont présentés dans le deuxième chapitre de cette thèse.

3.2.3.3 Mesures hors ligne

Analyses microbiologiques en surface des fromages Les prélèvements des fromages sont effectués en conditions stériles. Aucune analyse microbiologique n'est faite au coeur du fromage car *K. marxianus* et *G. candidum* ont une croissance très faible, *P. camemberti* et *B. aurantiacum* ne se développent pas au coeur. Pour étudier les micro-organismes présents en surface du camembert, il faut réaliser une suspension fromagère. Pour cela, 10 g de surface sont prélevés et broyés stérilement dans un mortier à l'aide d'un pilon. Cet échantillon est mis dans un sac plastique stérile avec 90 g d'eau physiologique ($NaCl$ à 9 g/L) stérile et thermisée à 55 °C. Ce mélange est homogénéisé à l'aide d'un broyeur stomacher (Seward, Prolabo, France) à une vitesse maximale pendant 6 min, afin d'obtenir une suspension fromagère au 1/10^{ème} homogène. Afin de pouvoir dénombrer les micro-organismes il faut diluer cette suspension. Ces dilutions sont faites dans des tubes d'eau physiologique stérile de 9 mL selon la méthode de dilutions décimales. Les dilutions varient en fonction des micro-organismes étudiés et du stade d'affinage. Trois boîtes de Pétri, de chaque milieu, sont ensemencées en surface par 0,1 mL de chaque dilution.

Les milieux ensemencés et les conditions d'incubation, des différents micro-organismes étudiés sont décrits dans le tableau 3.2.

Mesures du pH Les pH sont mesurés avec un pH-mètre (Orion modèle 350) équipé d'une sonde de contact (Elektrode, Schott instruments, prolabo) de 1 cm². Le pH au coeur est mesuré en six points. Le pH de la surface est mesuré en six points sur chaque face car le pH de surface présente une grande hétérogénéité surtout pendant la phase de croissance du mycélium (Leclercq-Perlat et al., 2004b).

TABLE 3.2: Milieuxensemencés et les conditions d'incubation des différents micro-organismes étudiés

Micro-organisme	Milieu	Dilution	Condition d'incubation	
			Température	Durée
<i>K.marxianus</i>	YEGC	10^{-1} à 10^{-6}	30 °C	48 h
<i>G.candidum</i>	YEGC	10^{-1} à 10^{-6}	30 °C	48 h
<i>P.camemberti</i>	PS	10^{-1} à 10^{-4}	20 °C	10 jours
<i>B.aurantiacum</i>	Piton	10^{-1} à 10^{-6}	25 °C	6 à 8 jours

Mesures de la concentration en substrats carbonés : lactose et lactates Pour analyser le taux de lactose, 5 g de fromage sont prélevés en surface et au coeur du fromage et sont broyés. Les protéines et les lipides sont précipités grâce à deux solutions (carrez I et carrez II). Un dosage par HPLC (chromatographie liquide sous haute pression) permet de doser le lactose. Il en est de même pour le dosage des lactates mais les protéines et les lipides sont précipités avec du trichloroacétique (TCA). Ces dosages sont décrits plus en détail dans l'article de Leclercq-Perlat et al. (1999).

3.2.3.4 Méthode d'analyse des données

Les données ont été analysées de manière empirique par analyse en composantes principales et par analyse de variance.

L'analyse en composantes principales est une analyse factorielle qui permet de réduire un grand nombre d'informations en quelques informations simplificatrices mais représentatives. L'analyse en composantes principales est utilisée pour des variables quantitatives. L'objectif est de décrire un tableau de données X constitué de p variables observées pour x individus, en calculant un petit nombre de variables synthétiques non corrélées entre elles et appelées "composantes principales". Ces composantes C sont des combinaisons linéaires des variables d'origine et décrivent les principales variations observées dans le tableau X . Ces combinaisons linéaires doivent être indépendantes deux à deux et sont ordonnées selon leur inertie, de la plus grande à la plus petite. Les composantes principales correspondent aux vecteurs propres associés aux valeurs propres de la matrice de corrélation. L'inertie de chacune de ces composantes représente la variance expliquée par chacune qui peut être interprétée comme la part d'information contenue. Cela permet de hiérarchiser l'information contenue dans le tableau de données étudié.

Cette analyse en composantes principales peut être non normée ou normée, dans ce dernier cas l'analyse n'est pas effectuée sur les données brutes mais sur les données centrées réduites selon l'équation 3.1 :

$$\frac{x_{ij} - \mu_i}{\sigma_i} \quad (3.1)$$

où μ_i et σ_i sont respectivement la moyenne et l'écart-type des x individus pour la variable observée. Cette réduction permet de supprimer les problèmes d'échelle en attribuant la même importance à toutes les variables.

Dans cette étude les deux types d'analyse en composantes principales, normées et non-normées, sont utilisées selon les cas.

L'analyse de variance (ANOVA) recouvre un ensemble de techniques de tests et d'estimations destinés à apprécier l'effet de variables qualitatives sur une variable numérique et revient dans le cas simple à comparer plusieurs moyennes d'échantillons gaussiens. Le rapport de la variance

intergroupe d'observation sur la variance intragroupe est estimé et la règle statistique utilisée pour décider de l'existence d'une différence significative entre les populations est la statistique de Fisher.

La valeur du F de Fisher est comparée à la valeur de la table de Fisher au niveau de risque choisi avec $f - 1$ et $n - f$ degrés de liberté. Si la dispersion à l'intérieur des groupes est supérieure à celle entre les moyennes, les populations sont identiques pour le facteur étudié. Dans ce cas, la table de Fisher permet de mesurer le risque de conclure à tort que les populations sont différentes. Un niveau de risque de 5% est en général noté par une *, 1% par ** et 0.1% par ***, l'effet d'un facteur est dit respectivement significatif, très significatif, et hautement significatif (Howell, 1998, Danzart, 2009).

L'ANOVA est un cas particulier du modèle linéaire généralisé. Dans cette étude, elle a été utilisée de manière classique mais aussi pour tester des effets de facteurs à partir de composantes principales (Saporta, 2006).

3.3 Influence de la température et de l'humidité relative sur l'affinage : résultats expérimentaux

En 3 ans, 22 affinages ont été réalisés en pilote. Un essai expérimental dure environ 1 mois et demi. Les fromages sont fabriqués, affinés en hâloir en conditions contrôlées puis emballés et stockés à 4 °C jusqu'au 40^{ème} jour date des dernières mesures. Les fromages sont caractérisés au cours de l'affinage d'un point de vue physicochimique, biochimique, microbiologique et sensoriel.

Nous disposons d'une base de données constituée de 22² essais avec 19 fromages analysés par essai, soit 19 points par cinétique. L'ensemble de ces fabrications est présenté en figure 3.12. Sur cette figure chaque essai est représenté selon la température et l'humidité relative appliquées lors de l'affinage en hâloir. Quelques difficultés de régulations ont conduit à avoir quelques points en dehors du domaine d'exploration prévu.

La nomenclature adoptée pour identifier les essais est la suivante : F11 H1 92 % 12 °C représente la 11^{ème} fabrication réalisée dans le petit hâloir à 92 % d'humidité relative et 12 °C.

3.3.1 Description du déroulement de l'affinage standard

L'affinage standard servant de référence est un affinage conduit à 92 % d'humidité relative et 12 °C de température, sauf les premières 24 h consacrées au ressuyage (84 %, 12 °C). L'affinage dont les résultats sont présentés ici est l'essai F11 H1 92 % 12 °C.

Au cours d'un affinage standard les fromages perdent en moyenne 12 % de leur masse initiale.

En début d'affinage, le pH est de 4,8 puis une légère post-acidification se produit avec une baisse de 0,1-0,2 de pH (figure 3.13). En surface des fromages, le pH augmente rapidement à partir du 7^{ème} jour jusqu'à atteindre un maximum de 7,5 au 10^{ème} jour jusqu'en fin d'affinage. Le pH à coeur reste peu élevé et n'augmente qu'en fin d'affinage, lorsque la sous-croûte évolue. Pour l'affinage standard, les fromages ne sont pas encore affinés à coeur au 40^{ème} jour après la fabrication.

La levure *K. marxianus* croît exponentiellement dès le premier jour d'affinage (3.14), puis atteint un palier autour de 7,5 en log₁₀ ufc/g Fh (unité formant colonies par gramme de fromage humide). Puis, la concentration en *K. marxianus* décroît jusqu'en fin d'affinage. La lyse de ces cellules participe à l'affinage en libérant des enzymes de type endopeptidases.

La concentration en lactose essentiellement par *K. marxianus* au cours de l'affinage est présentée figure 3.15.

2. 20 fabrications*2 hâloirs-essais inutilisables

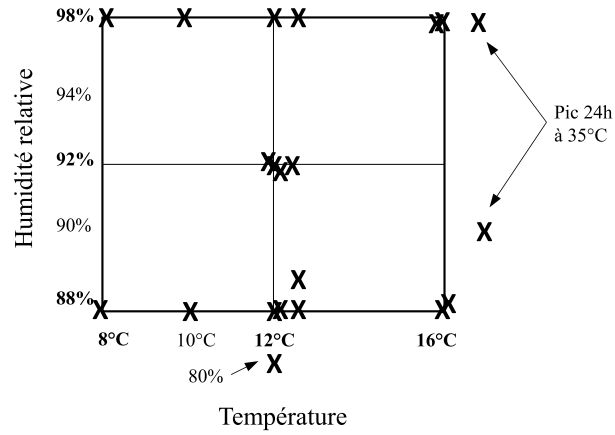


FIGURE 3.12: Représentation des 22 essais d'affinage réalisés. Chaque essai est représenté en fonction de la température et de l'humidité relative appliquée lors de l'affinage en hâloir

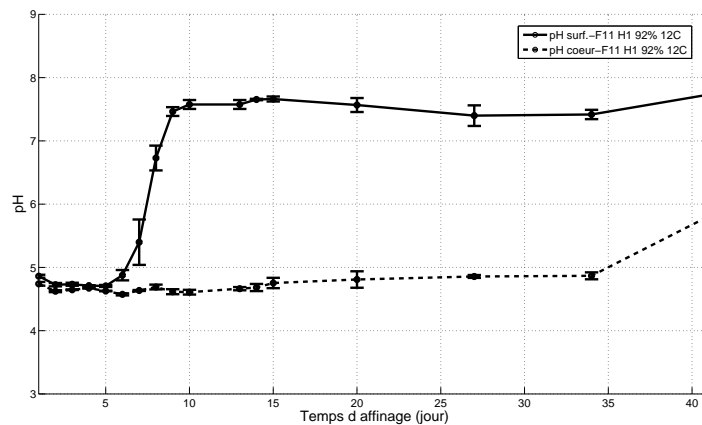


FIGURE 3.13: Evolution du pH au cours d'un affinage standard (92 % d'humidité relative et 12 °C pendant la phase en hâloir) en surface des fromages et à coeur.

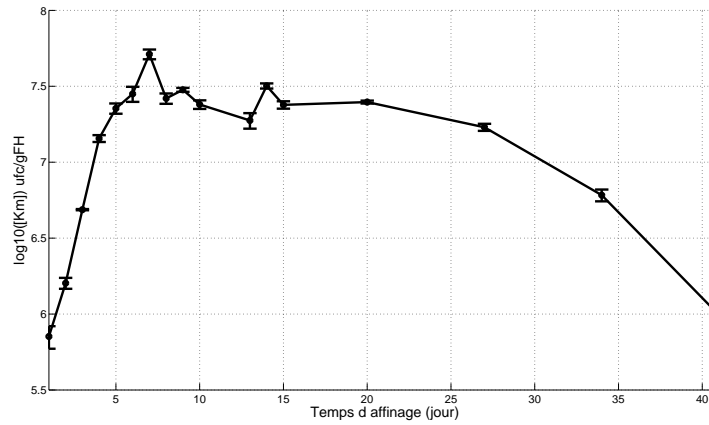


FIGURE 3.14: Evolution de la concentration de *K. maxianus* au cours de l'affinage standard.

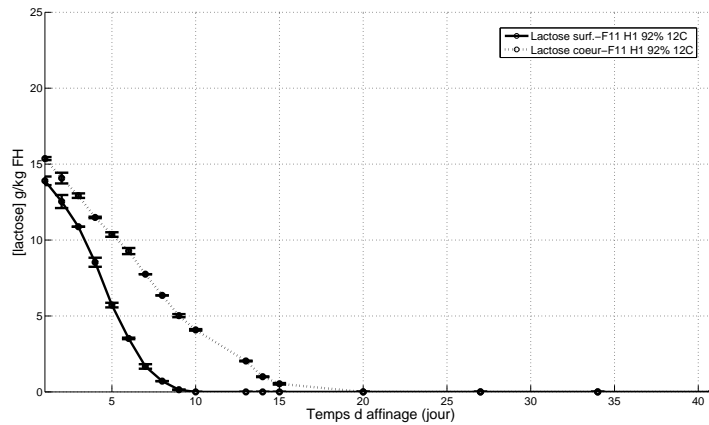


FIGURE 3.15: Evolution de la concentration en lactose au cours de l'affinage standard en surface et à coeur des fromages.

La levure qui croît tout de suite après *K. marxianus* est *Geotrichum candidum*. L'évolution de cette levure est présentée figure 3.16. *G. candidum* commence à croître à partir du troisième jour d'affinage pour atteindre sa concentration maximale autour du 10^{ème} jour à un niveau de concentration de 7,2-7,4 log₁₀ufc/g FH.

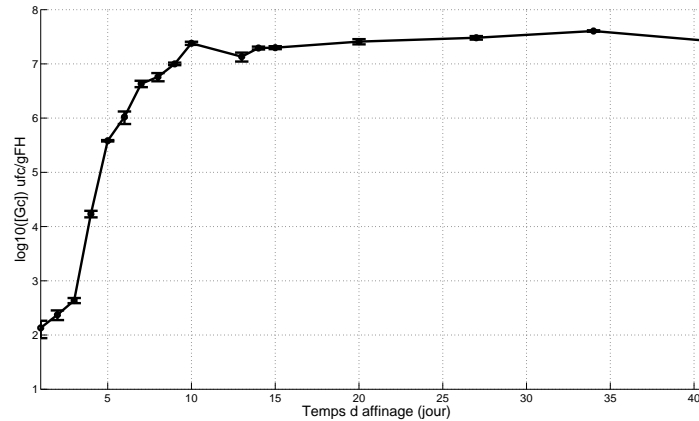


FIGURE 3.16: Evolution de la concentration en *G. candidum* au cours d'un l'affinage standard.

Penicillium camemberti se développe ensuite, comme *G. candidum* en consommant du lactate lorsque celui-ci est encore disponible. Le mycélium de *P. camemberti* commence à être visible en surface des fromages au 5^{ème} jour d'affinage. Toutefois, il n'existe pas actuellement de mesure non destructive du mycélium et seule la concentration en spores de *P. camemberti* a pu être mesurée au cours de nos essais expérimentaux. La concentration en spores n'est pas directement corrélée au développement du mycélium. Cette concentration diminue les 8 premiers jours d'affinage puis augmente exponentiellement jusqu'au 13^{ème} jour d'affinage et atteint un niveau de 4,6 log₁₀ spores/g FH au 40^{ème} jour.

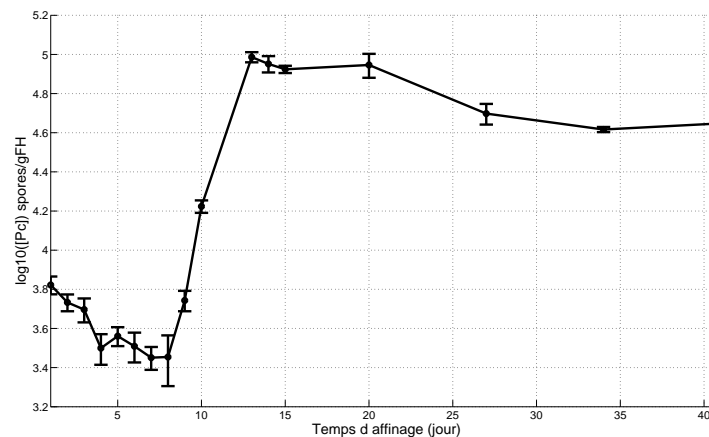


FIGURE 3.17: Evolution de la concentration en spores de *P.camemberti* au cours d'un affinage standard.

Ces deux micro-organismes *G. candidum* et *P. camemberti* sont les principaux micro-organismes

qui respirent. L'évolution de la libération en dioxyde de carbone au cours de l'affinage est présentée figure 3.18.

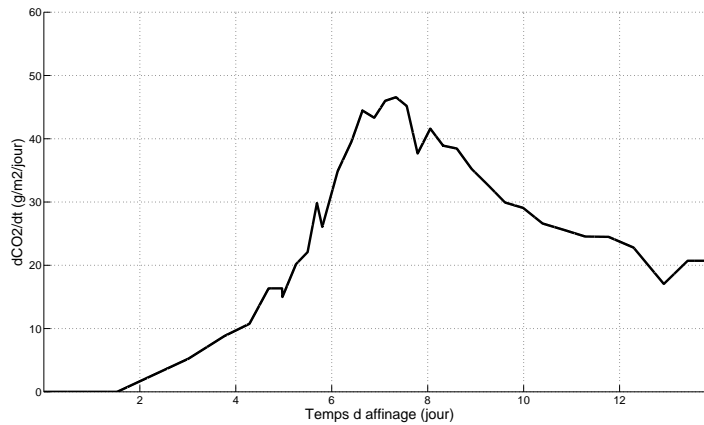


FIGURE 3.18: Evolution de la vitesse de production de dioxyde de carbone par les micro-organismes au cours d'un affinage standard.

G. candidum et *P. camemberti* consomment également tous deux le lactate présent dans les fromages. L'évolution du lactate est présenté figure 3.19. En début d'affinage le lactate continue à croître c'est ce qui crée le phénomène de légère post-acidification. Peu à peu le pH augmente du fait de la consommation du lactate par *G. candidum* et *P. camemberti*.

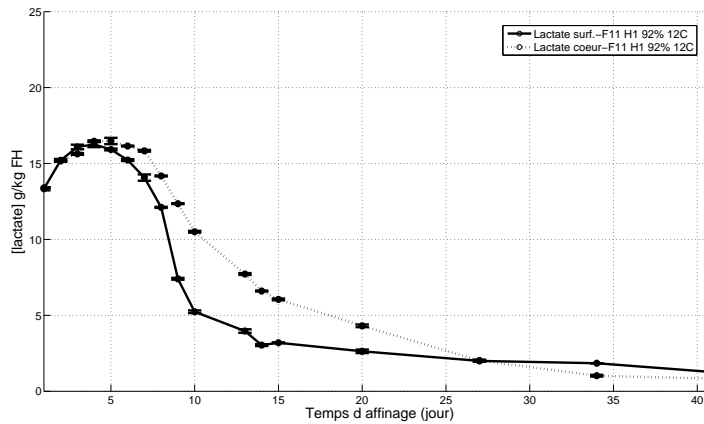


FIGURE 3.19: Evolution de la concentration en lactate au cours d'un affinage standard en surface des fromages et à coeur.

Le dernier micro-organisme à se développer est *B. aurantiacum*, cette bactérie est acido-sensible et ne peut se développer que lorsque le pH est supérieur à 5.5. L'évolution de *B. aurantiacum* (figure 3.20) est stable durant les 10^{ers} jours d'affinage, croît exponentiellement jusqu'au 20^{ème} jour puis augmente lentement jusqu'en fin d'affinage vers un niveau de 8,5 log₁₀ufc/g FH.

L'affinage de camemberts repose sur l'équilibre entre tous ces phénomènes.

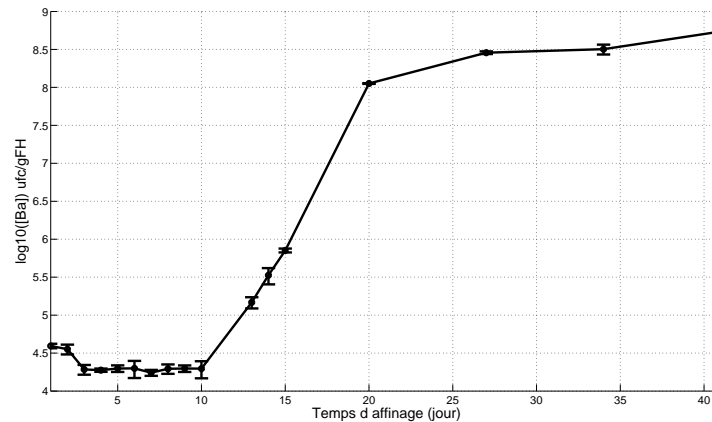


FIGURE 3.20: Evolution de la concentration en *B. aurantiacum* au cours d'un affinage standard.

3.3.2 Analyse des cinétiques d'affinage

Comme présenté figure 3.21, la variabilité des données recueillies sur l'ensemble des 22 affinages expérimentaux est très élevée. Cela est dû à la complexité du procédé et à des interactions non maîtrisées du fait des méconnaissances sur les phénomènes mis en jeu. La variabilité de la matière première et des ferments sont des facteurs importants de cette variabilité.

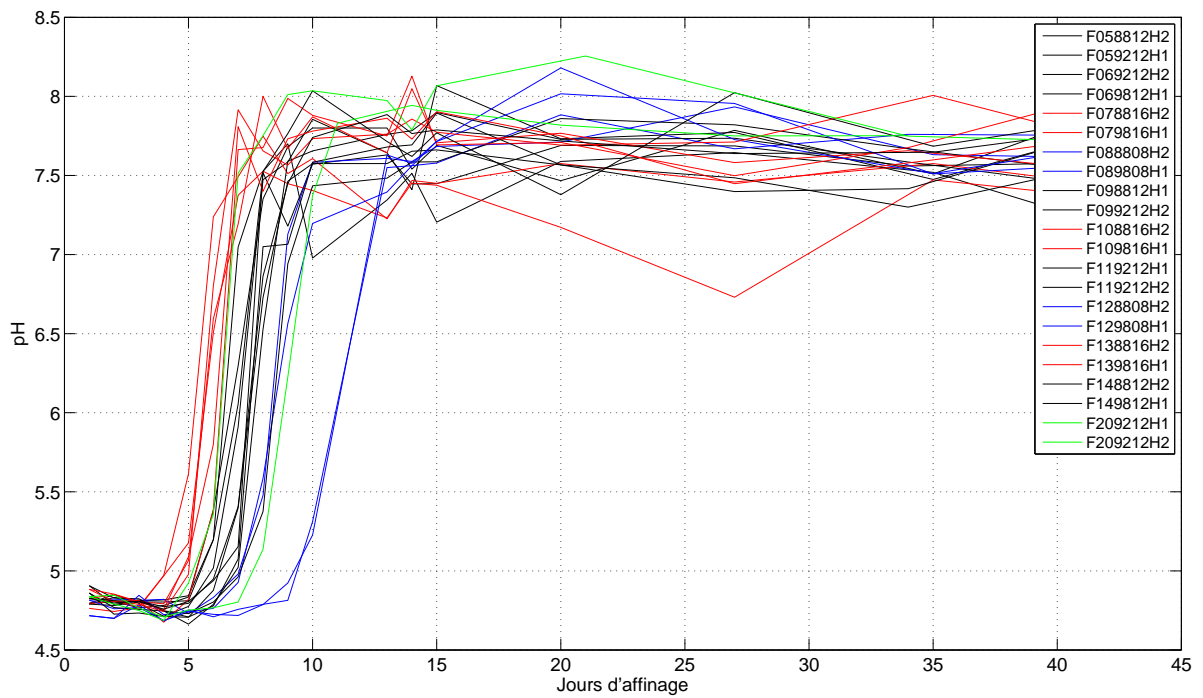
Les méthodes usuelles pour analyser les courbes de croissances microbiennes pour des écosystèmes simplifiés n'est pas valide dans notre cas. Ces modèles, qui sont de type sigmoïde, consiste à les modéliser avec une régression de type Weibull ou Gompertz (Van Boekel, 2008). Le modèle est ensuite utilisé pour déterminer la vitesse maximale de croissance des micro-organismes et le temps associé à cette croissance maximale. Ces deux indicateurs permettent ensuite comparer les croissances des micro-organismes. Ce type d'analyse qui résume l'information d'une cinétique en deux indicateurs clés n'est pas suffisamment fiable étant donné les variabilités observées sur nos essais.

Notre objectif est de fiabiliser nos analyses en prenant en compte l'ensemble des dynamiques pour analyser l'effet température et humidité relative. Le problème est de faire ressortir l'information d'un ensemble de courbes parfois difficile à interpréter "à l'oeil". L'effet température est visible pour les courbes de pH sur la figure 3.21, alors que les courbes de croissances de *K. marxianus* en fonction des températures sont plus difficiles à interpréter. Les courbes de croissance de *G. candidum*, *P. camemberti*, *B. aurantiacum*, et de consommation du lactose et lactate sont présentées en annexe 1.

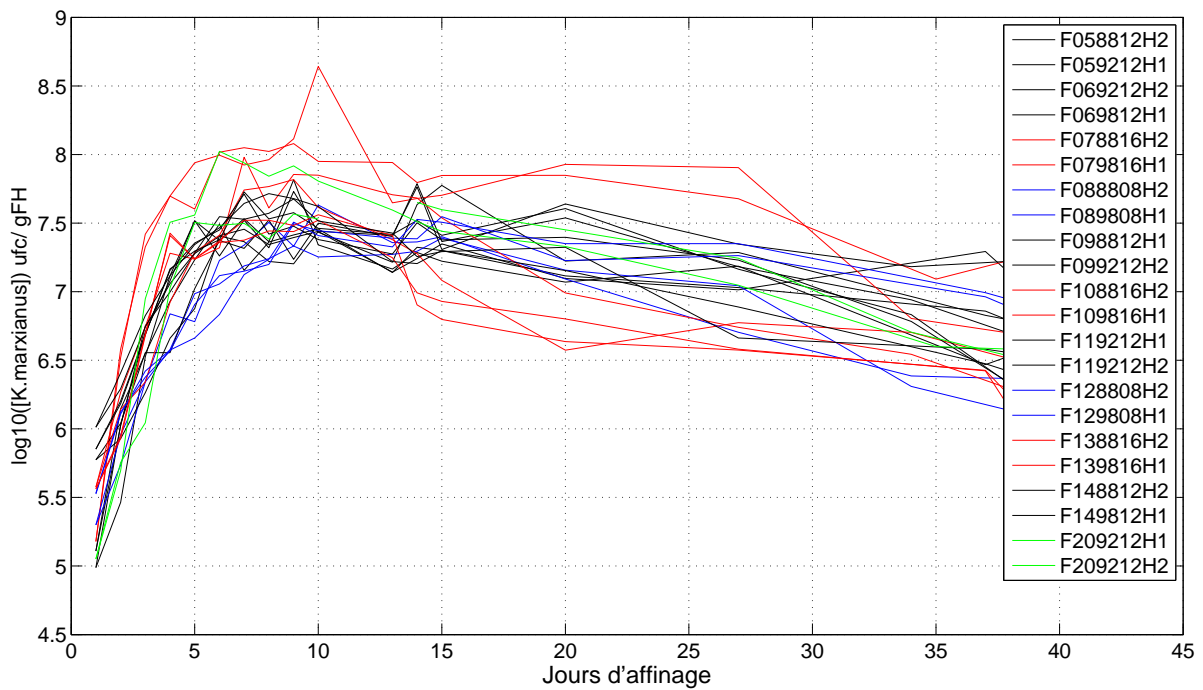
Les données dans la figure 3.21 sont classées avec un code couleur par niveau de température de l'affinage faible, moyen, fort. Cette représentation permet d'envisager un effet température sur une majorité des variables mesurées malgré la grande variabilité de celles-ci. Les variables pH, *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti*, lactose et respiration semblent sensibles à un effet température.

Le même traitement des données pour l'effet de l'humidité relative est étudié mais l'impact de celle-ci a été beaucoup moins net sur les variables d'affinage.

Pour analyser ces données nous avons réalisé des analyses en composantes principales non normées. Une analyse en composantes principales est réalisée pour chacune des variables de l'affinage : pH, *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti*, *B. aurantiacum*, lactose, lactate, masse, vitesse de libération du CO_2 . Pour chaque variable, les observations sont les résultats de chaque prélèvement de fromages pour chaque essai pilote et les variables explicatives la durée d'affinage subit par chaque



(a)



(b)

FIGURE 3.21: Courbes d'évolution du pH (a) et de la croissance de *K.marxianus* (b) au cours des 22 essais d'affinage en fonction du temps. Les affinages réalisés à 16 °C, 12 et 8 °C sont représentés en rouge, vert et bleu respectivement.

prélèvement. L'analyse en composantes principales est effectuée sur un tableau comme celui présenté tableau 3.3 avec en ligne les 22 essais et en colonne les 17 prélèvements effectués au cours de chaque affinage.

TABLE 3.3: Exemple pour le pH de tableau utilisé pour les analyses en composantes principales des données mesurées pendant les affinages expérimentaux.

Essais :	PH :				
	J1	J2	J3	...	J41
F07 H1 98 16	...				
F07 H2 88 16					
F08 H1 98 8					
F08 H2 98 8					
...					

Ce type d'analyse de données est utilisé en analyse d'image (Legland, 2005) ou en analyse de spectres infra-rouge (Karoui et al., 2006, Fagan et al., 2007). Les cartes ainsi créées permettent de visualiser les ressemblances entre les cinétiques.

L'analyse en composantes principales des données de pH pour les 22 fabrications est présentée figure 3.22. Les fabrications sont représentées projetées sur les 2 premiers axes principaux. Le premier axe représente 71% de l'information et le deuxième 16%. Sur cette figure les fabrications sont représentées par un symbole correspondant à la température appliquée pendant l'affinage en hâloir. L'axe 1 permet nettement de différencier les fabrications selon cette température. Ce qui implique un effet de la température d'affinage sur les cinétiques de pH. L'interprétation des autres composantes principales n'a pas permis d'identifier d'effet humidité de l'affinage sur les cinétiques de pH.

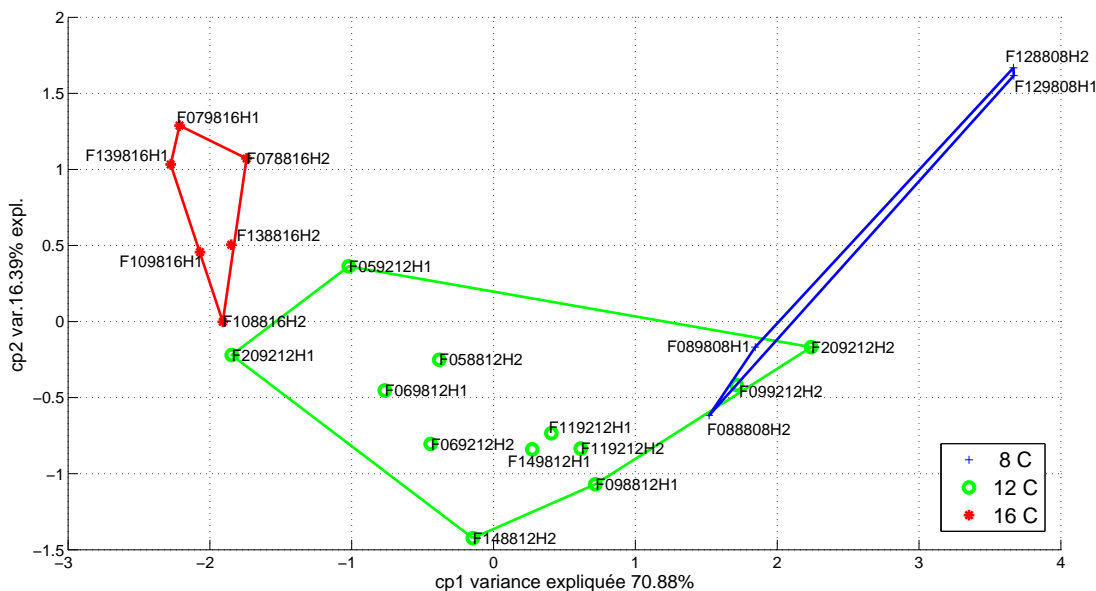


FIGURE 3.22: Analyse en composantes principales des courbes de pH pour les 22 essais de la base de données.

L'effet des facteurs humidité et température d'affinage a été testé sur les composantes principales de chaque variable d'affinage par analyse de variance à deux facteurs. En pratique cela revient à comparer l'écart entre les groupes par rapport à l'écart dans les groupes sur une composante principale considérée. Le bilan des données est présenté dans la tableau 3.4. Les effets d'interactions n'ont pas pu être étudiés.

TABLE 3.4: Résultat des ANOVA, effets du facteur humidité relative et du facteur température sur les deux premières composantes (cp1 et cp2) principales déterminées pour chacune des variables de l'affinage. L'effet du facteur non significatif, significatif, très significatif et hautement significatif est représenté par les sigles NS, *, ** et *** respectivement.

	cp1					cp2				
	Variance expliquée	Température		Hum.Relative		Variance expliquée	Température		Hum.Relative	
		p	Sign.	p	Sign.		p	Sign.	p	Sign.
pH	70.88%	< 10 ⁻⁴	***	0.7425	NS	16.39%	0.0033	**	0.507	NS
<i>K. marxianus</i>	42.36%	0.1519	NS	0.8638	NS	25.38%	0.0084	**	0.4357	NS
<i>G. candidum</i>	63.46%	0.0063	**	0.5185	NS	15.04%	0.0223	*	0.7772	NS
<i>P. camemberti</i>	64.39%	0.018	*	0.4704	NS	15.04%	0.3493	NS	0.7856	NS
<i>B. aurantiacum</i>	69.20%	< 10 ⁻⁴	***	0.0003	***	11.61%	0.0388	*	0.2216	NS
Lactose	79.96%	0.0016	**	0.3528	NS	11.86%	0.0598	NS	0.0647	NS
Lactate	67.42%	0.0105	*	0.1875	NS	13.24%	0.9829	NS	0.5482	NS
Taux CO ₂	59.58%	0.0016	**	0.122	NS	19.29%	0.2287	NS	0.2282	NS
Perte de masse	96.02%	0.1535	NS	0.0112	*	3.53%	0.4499	NS	0.1619	NS

Les résultats mettent en évidence un effet température sur la quasi-totalité des variables sauf la perte de masse. L'humidité relative du hâloir impacte la perte de masse et *B. aurantiacum*. Cela confirme les résultats de la littérature, Helias et al. (2007a) ont modélisé la perte de masse des camemberts au cours de l'affinage en prenant en compte l'humidité relative et Leclercq-Perlat et al. (2000) ont montré que la croissance de *B. linens* (ancien nom de *B. aurantiacum*) est corrélée à l'humidité relative dans la chambre d'affinage.

Seule *B. aurantiacum* paraît sensible simultanément aux effets température et humidité relative de l'affinage. Il serait intéressant d'explorer les effets d'interactions pour ce micro-organisme dans de futures études.

La base de données constituée au cours de cette étude est relativement riche même si comme c'est souvent le cas en agro-alimentaire elle reste incomplète. Une méthode adaptée prenant en compte tous les points des cinétiques d'affinage permet de réduire l'incertitude liée à la variabilité des données et de connaître l'effet des paramètres de contrôle sur l'affinage. La température a nettement un effet accélérateur sur les cinétiques de croissance microbienne, et ainsi sur le pH, sur la consommation des substrats et enfin sur la cinétique de libération du CO₂.

3.3.3 Sélection de fabrications représentatives

Pour les besoins de l'étude, nous avons sélectionné 5 essais représentatifs des comportements du procédé à différentes températures et humidités relatives d'affinage de camemberts. Ces essais sont les fabrications F13 H1 98 % 16 °C, F13 H2 88 % 16 °C, F12 H1 98 % 8 °C, F12 H2 88 % 8 °C et enfin F11 H1 92 % 12 °C. Ces essais seront respectivement désignés a1, a2, b1, b2 et c1.

Les résultats de ces 5 essais de référence ont été étudiés de manière globale par analyse en composantes principales normées pour envisager l'évolution des affinages dans sa globalité.

Les variables explicatives sont le pH, les concentrations en micro-organismes *K.marxianus*, *G.candidum*, *P.camemberti*, *B.aurantiacum* et en substrats carbonés lactose et lactate. Les variables expliquées étant les fromages échantillonnés chaque jour (J) des essais a1, a2, b1, b2 et c1. Une représentation du tableau servant de base à cette analyse est présenté tableau 3.5.

TABLE 3.5: Représentation du tableau pour l'analyse en composantes principales sur les cinétiques d'affinage des 5 essais de références. a1 : essai F13 H1 98 % 16 °C, a2 : F13 H2 88 % 16 °C, b1 : F12 H1 98 % 8 °C, b2 : F12 H2 88 % 8 °C et enfin c1 : F11 H1 92 % 12 °C

	pH	Km	Gc	Pc	Ba	Lactose	Lactate
a1-J1	...						
...							
b1-J1							
...							

L'analyse en composantes principales de ces données est montrée figure 3.23. La première composante représente 62 % de la variance expliquée et la deuxième 23 %. 85 % de l'information est donc représentée sur cette carte. L'axe 1 est représentatif du temps c'est à dire de l'avancement de l'affinage, les échantillons sont ordonnés de manière chronologique du premier jour d'affinage, en haut à gauche de la figure, au dernier jour, en haut à droite. Le deuxième axe est plus difficile à interpréter mais l'effet température est visible avec par exemple, la différence de positionnement de l'échantillon b1 (8 °C-98 %HR) prélevé à J5 et celui très différent de l'échantillon a1 (16 °C-98 %HR) à J5. Pour l'échantillon b1-J5 la concentration en substrats carbonés est encore forte au 5^{ème} jour et *K.marxianus* commence seulement à se développer. La concentration en lactose au 5^{ème} jour a déjà bien diminué pour l'échantillon a1-J5, *K.marxianus* a fini de croître et *G.candidum* est en pleine croissance. L'effet accélérateur d'une température chaude sur l'affinage est nettement mis en évidence par cette première visualisation des données.

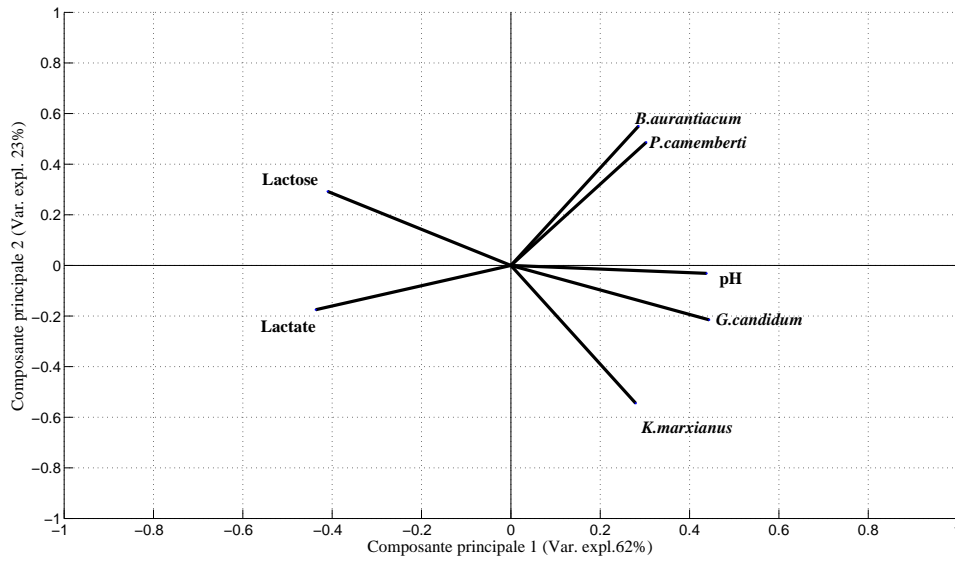
En revanche en fin d'affinage, l'effet température n'est plus visible sur l'analyse en composantes principales. L'échantillon a1-J20 est positionné à côté de l'échantillon b1-J20. Les deux composantes principales ne semblent pas permettre de différencier les échantillons des différents affinages en fin de procédé.

3.4 Conclusions

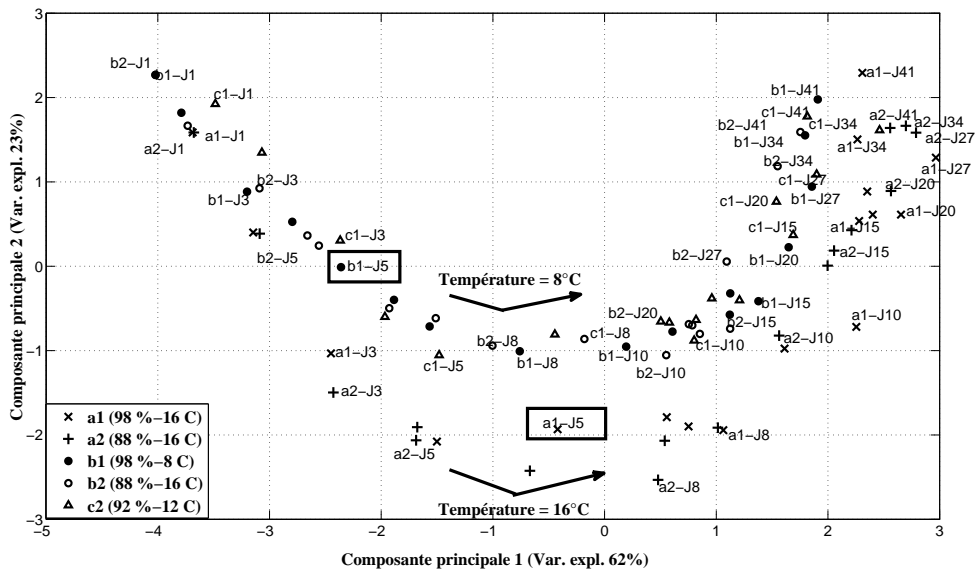
L'affinage de fromage est un procédé d'une grande complexité. De nombreuses variables biologiques, physiques, chimiques interagissent au cours du temps à différents niveaux d'échelle. Les réactions biochimiques principalement liées aux développements microbiens ont un effet direct sur les propriétés organoleptiques du fromage. En sens inverse, la texture du caillé défini lors de la fabrication des fromages qui se trouve va influencer sur les phénomènes à des niveaux d'échelle inférieurs sur les flux de matières et donc sur les cinétiques et interactions microbiennes. L'affinage est soumis aux influences extérieures que sont les conditions d'affinage : température, humidité relative, composition de l'air ambiant.

Dans cette étude, l'objectif est d'étudier l'influence des paramètres de température et d'humidité relative utilisés dans le hâloir sur les cinétiques d'affinage au niveau d'échelle microscopique en conditions aussi proches que possible du "réel". En effet, l'étude des micro-organismes isolés est difficilement transposable. Les camemberts affinés dans le pilote sont des camemberts très semblables à ceux industriels vendus dans le commerce.

Les cinétiques des phénomènes microbiologiques, biochimiques et physicochimiques ont été recueillis pour un affinage standard et pour des affinages à différentes conditions de température et d'humidité



(a)



(b)

FIGURE 3.23: Analyse en composantes principales sur les 5 essais (a1, a2, b1, b2, c1) représentatifs de l'affinage à différentes conditions de température et d'humidité relative. Les variables explicatives sont représentées dans l'ACP (a) et les données observées à chaque prélèvement dans l'ACP (b).

relative. Les données obtenues présentent une grande variabilité et de nombreuses interactions interviennent. Cette difficulté nous a conduit à utiliser une procédure spécifique pour exploiter au maximum l'ensemble des données recueillies. Cette méthode couplant analyse en composantes principales et analyse de variance permet d'interpréter les différences entre les cinétiques d'affinage aux différentes températures et humidité relative. L'effet de la température a été nettement visible notamment par l'accélération qu'elle produit sur les cinétiques de croissance de *G. candidum*, *B. aurantiacum*, sur l'augmentation de la sporulation de *P. camemberti*. Du fait de l'accélération des activités microbiennes les substrats sont consommés plus rapidement et le pH augmente plus précocement à température d'affinage élevée, la libération de dioxyde de carbone est aussi plus précoce. L'effet humidité a uniquement été observé sur la croissance de *B. aurantiacum* et sur la perte de masse des fromages.

Cinq essais expérimentaux ont été sélectionnés pour représenter les cinétiques d'affinage aux différentes conditions de températures et d'humidité relative. Une analyse en composantes principales a permis d'obtenir une vision globale de ces 5 cinétiques. Ces essais servent de base pour d'autres analyses qui seront présentées dans les chapitres suivants de ce manuscrit.

Les dynamiques au niveau microscopique ne suffisent pas à comprendre l'affinage dans sa globalité. Le deuxième niveau d'étude privilégié pour comprendre ce procédé est l'étude de l'évolution des propriétés organoleptiques. C'est l'objet du chapitre 4 de cette thèse.

Chapitre 4

Les connaissances expertes pour contrôler les systèmes complexes alimentaires

Contenu

4.1	Introduction	63
4.2	Bilan sur l'expertise, son utilisation en contrôle de procédé alimentaire et son étude par les sciences cognitives.	64
4.2.1	Intégration des connaissances experts dans la conduite des procédés alimentaires	64
4.2.2	L'expertise vue par la psychologie cognitive	65
4.3	Matériel et méthode : recueil, formalisation et mise en application des connaissances expertes	72
4.3.1	Analyse sensorielle "classique" des fromages expérimentaux	72
4.3.2	Recueil d'expertise	73
4.3.3	Analyse des recueils d'expertise	75
4.3.4	Formalisation des indicateurs sensoriels	77
4.3.5	Agréger les perceptions sensorielles, le programme "Chunk"	81
4.3.6	Un modèle empirique pour lier données quantitatives et qualitatives : la régression logistique	81
4.4	Résultats	82
4.4.1	Evaluation sensorielle classique des fromages en fin d'affinage	82
4.4.2	Recueil d'expertise auprès des maîtres affineurs : les "experts opérationnels"	82
4.4.3	Suivi des affinages expérimentaux avec les connaissances des experts "opérationnels"	90
4.4.4	Recueil d'expertise auprès des chercheurs des procédés fromagers : les "experts scientifiques"	93
4.5	Travaux complémentaires issus du projet INCALIN	96
4.5.1	Un outil intégrateur : les réseaux bayésiens dynamiques	96
4.6	Conclusions	100

4.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent l'importance des phénomènes microbiologiques sur l'affinage de camemberts. Pour contrôler ce procédé, un deuxième niveau d'observation des phénomènes nous paraît crucial : le niveau macroscopique.

Les industries alimentaires ont ceci de particulier qu'elles doivent prendre en compte dans la fabrication des produits les facteurs liés à la matière première, aux interactions avec le procédé, ainsi que les perceptions des produits par les clients. Les propriétés organoleptiques des aliments, telles que la texture, l'arôme et la saveur, constituent des critères de qualité déterminants de l'acceptabilité et des préférences des consommateurs.

A l'heure actuelle, les méthodes instrumentales fiables pour évaluer la qualité sensorielle des aliments sont rares voir inexistantes en ce qui concerne les sens du goût et de l'odorat. Par exemple, de nombreux paramètres doivent être pris en compte pour comprendre les mécanismes à l'origine de la perception olfactive : paramètres physicochimiques liés au produit et paramètres physiologiques liés au sujet.

Ce sont les opérateurs expérimentés qui en contrôlant le procédé maintiennent la qualité des produits et notamment la qualité organoleptique. Leur perceptions sont comme c'est le cas dans l'affinage de camemberts des "instruments de mesure" cruciaux pour la conduite du procédé. A tel point par exemple que la société Wyke Farms a assuré le nez de son expert en fromages, Nigel Pooley, pour la somme de 5 millions de Livres auprès de la société d'assurances Lloyds. Ce type de démarche illustre bien l'importance de l'expertise perceptive dans certaines industries comme l'industrie alimentaire. Pourtant en science des aliments, les études intégrant le facteur humain sont encore rares comme l'ont souligné Bimbenet et al. (2007) lors du bilan du congrès ICEF 9.

Cependant, quelques travaux en génie des procédés alimentaires ont déjà utilisé les perceptions d'opérateurs expérimentés pour mieux contrôler les procédés alimentaires. L'origine de ces travaux remonte aux années 1994, aux réflexions menées par Gilles Trystram et Joseph Hossenlop et poursuivies par Nathalie Perrot, Corinne Curt et Irène Allais au sein de l'équipe Requala du Cemagref. Leur réflexion portait sur la place de l'Homme dans le processus d'évaluation sensorielle en ligne de produits alimentaires.

Suite à ces travaux de nombreuses questions restaient posées, parmi lesquelles celles de Perrot (Perrot et al., 2004 et Perrot et al., 2006) :

- comment choisir un expert ?
- quelle est l'organisation des connaissances mobilisées par l'opérateur pour contrôler les procédés alimentaires ?

Dans ce chapitre de la thèse, nous tentons d'apporter des réponses sur la base des connaissances acquises par les recherches en psychologie cognitive.

Du point de vue des systèmes complexes, les connaissances des experts fromage nous semblent intéressantes pour extraire les dynamiques des phénomènes au niveau macroscopique à partir de données "in vivo". Les experts ont en effet accumulé des connaissances à partir du déroulement réel du procédé tel qu'ils l'expérimentent chaque jour. Ils ont donc une vision "globale" (holistique) du procédé.

Paul Bourguine (Bourguine, 2008) parle à ce sujet d'une catégorisation symbolique des événements par les experts. Selon lui, si l'on considère l'ensemble des symboles catégorisant les événements, les histoires individuelles (évolutions du procédé) peuvent être reconstruites phénoménologiquement comme des dynamiques symboliques.

4.2 Bilan sur l'expertise, son utilisation en contrôle de procédé alimentaire et son étude par les sciences cognitives.

4.2.1 Intégration des connaissances experts dans la conduite des procédés alimentaires

La modélisation des connaissances humaines a été rendue possible par les outils développés en intelligence artificielle qui ont permis de prendre en compte des données non numériques : les systèmes à base de règles, les réseaux de neurones artificiels, le raisonnement à base de cas... L'intérêt des systèmes experts pour l'industrie alimentaire a été défendu dès les années 90 par Davidson (1994), Perrot et al. (1996) et Linko (1998) et . La logique floue notamment a été très utilisée ces vingt dernières années. Formalisée par Zadeh (1965), la logique floue autorise la transition graduelle entre des sous-ensembles. Mieux que la logique booléenne utilisée auparavant, elle permet de prendre en compte l'imprécision et l'incertitude inhérente au raisonnement humain que la logique booléenne utilisée auparavant. Elle permet aussi d'associer des informations de sources différentes, par exemple l'association d'informations venant de capteurs et d'informations venant des opérateurs.

Perrot et al. (2006) ont réalisé une synthèse des travaux portant sur les concepts de la logique floue appliqué au contrôle de la qualité en industrie alimentaire. Dans 53% des études les connaissances étaient utilisées pour modéliser soit i) des mesures sensorielles descriptives réalisées par des opérateurs ou panels entraînés, ii) des mesures indirectes des propriétés des aliments, iii) des systèmes de diagnostic ou d'aide à la décision. Plus récemment 2009, Goelzer et al. (2009) ont utilisé une approche basée sur les connaissances expertes et la logique floue pour réduire l'espace de recherche et accélérer le calcul de décision optimale d'un logiciel dédié à la fermentation alcoolique du vin.

Parmi les travaux basés sur la logique floue et les connaissances expertes, deux traitent de l'affinage du fromage (Perrot, 2004 et Ioannou et al., 2006). Perrot (2004) ont étudié une approche basée sur la symbolique floue pour développer un système de diagnostic qui aide les opérateurs à définir le degré d'affinage d'un fromage de type "Rogeret" (fromage à pâte molle et croûte fleurie). Ce système de diagnostic a été construit à partir des mesures sensorielles effectuées par les opérateurs sur la ligne de production. L'objectif était d'évaluer les changements globaux du fromage au cours du temps et de les comparer aux trajectoires standard d'affinage. Ce système a été validé sur 106 points avec une performance de 97 % et 80 % de bon diagnostic pour respectivement une sensibilité de 3.5 jours et 1.75 jours. Le faible nombre de règles d'agrégation (30 équations symboliques) pour intégrer les connaissances expertes est un avantage. L'étude de Ioannou et al. (2006) est un complément de cette recherche. L'auteur évalue l'effet des imprécisions sur le modèle en les propageant. L'objectif est de vérifier la robustesse du modèle face aux imperfections des mesures sensorielles humaines. La méthode consiste à inverser les expressions analytiques du modèle flou de Perrot (2004). Les résultats ont montré les périodes de sensibilité du modèle, périodes pour lesquelles le nombre de mesures sensorielles pourraient être augmenté où des mesures instrumentales développées.

D'autres méthodes que la logique floue ont été utilisées pour modéliser les connaissances expertes comme la physique qualitative avec les travaux de Ndiaye et al. (2009) sur le pain ou celles, un peu différentes, de type ontologie utilisées par de Buche et al. (2006). L'objectif de cette dernière étude est de recueillir et formaliser de manière automatique les connaissances scientifiques de la bibliographie pour construire un système d'informations sur les risques micro biologiques en agro-alimentaire. Les conclusions de ces deux études mettent en relief l'intérêt et la validité des connaissances expertes intégrées dans le système de diagnostic. Perrot (2004) souligne toutefois la moindre précision de ce type de modèle par rapport aux modèles micro biologiques par exemple et préconise d'intégrer les connaissances micro biologiques aux systèmes futurs.

4.2.2 L'expertise vue par la psychologie cognitive

La psychologie cognitive, science de l'acquisition des connaissances et du traitement de l'information s'intéresse aux questions liées à l'expertise depuis de nombreuses années et notamment depuis l'apparition dans les années 1970 de la psychologie ergonomique. La psychologie ergonomique est une partie de la psychologie cognitive qui relève de l'ergonomie cognitive, c'est à dire une partie qui cherche à résoudre les problèmes liés aux activités cognitives humaines en situation de travail. La psychologie ergonomique est également définie comme la « psychologie de l'expertise » car elle s'intéresse à la nature, à l'exercice, à l'acquisition et au soutien de l'activité experte.

4.2.2.1 Définition d'un expert

Malgré de nombreuses études en psychologie et en intelligence artificielle, il n'existe pas de définition consensuelle et opérationnelle de l'expertise (Shanteau, 1992). La compétence d'un opérateur ne se mesure pas uniquement au fait d'atteindre le but fixé, de réaliser la tâche prescrite. Elle comprend également la tâche effectivement réalisée par l'opérateur car, c'est le phénomène de vicariance, il existe plusieurs manières d'atteindre le même but. Pour Amalberti (1996), l'opérateur compétent est celui qui privilégie l'économie cognitive et les compétences qu'il considère bien maîtriser. En psychologie cognitive l'expert est par définition un individu compétent qui produit une performance optimale dans son domaine. L'expertise s'acquiert par une pratique régulière sur une longue durée (Hoc, 2004) et n'est pas une aptitude innée (Raufaste, 2001). Ce qui fonde les différences entre experts et novices n'est pas leurs capacités intellectuelles mais l'ensemble de leurs connaissances, l'organisation de ces connaissances et leur degré de fonctionnalité. L'expertise peut concerner des savoir-faire ou des savoirs pour une tâche que ce soit dans le milieu professionnel ou dans les loisirs. L'expertise concerne aussi bien les opérateurs en industrie que les joueurs d'échecs. L'expertise est spécifique à un domaine, être expert dans un domaine ne rend pas expert dans un autre (Chi et al., 1981).

Selon les études en psychologie cognitive, les experts ont une vue plus fonctionnelle des procédés, ils ont de meilleures capacités à inférer et à anticiper les évolutions de ce procédé (Cellier et al., 1997). Un autre élément important de l'expertise est le grand nombre d'automatismes acquis par les experts au cours de leurs longues années de pratique (Raufaste, 2001).

Finalement, les critères de définition de l'expertise les plus couramment utilisés sont la durée de la pratique, le haut niveau de performance (lorsqu'il est mesurable) et la reconnaissance par les pairs (Hoffman et al., 1995, Cellier et al., 1997, Farrington-Darby et Wilson, 2006).

4.2.2.2 Le contrôle des processus dynamiques

Les processus dynamiques, comme l'affinage, sont des processus qui ont une évolution propre en dehors de l'intervention de l'opérateur. La difficulté de contrôle d'un processus dynamique dépend de la vitesse du processus, de la qualité des informations disponibles, du temps nécessaire pour les obtenir, des possibilités d'action, du délai pour observer l'effet de ces actions... L'affinage est un processus relativement lent mais pour lequel peu d'informations sont disponibles et les moyens de contrôle sont limités. Le diagnostic en situation dynamique se déroule en même temps que le processus et doit prendre en compte aussi bien les informations passées, que présentes ou futures. La principale difficulté du diagnostic en situation dynamique est le risque pour l'opérateur de prendre une décision trop précoce, alors qu'il n'a pas encore toutes les informations, ou trop tardive, alors que la correction n'est plus possible.

Les limites des ressources cognitives Pour fonctionner, le système de traitement cognitif a besoin de ressources. Les ressources cognitives nécessaires au traitement de l'activité sont par exemple « l'effort de traitement, les capacités de mémoire, les canaux de communication... » (Norman et Bobrow, 1975). Ce problème est étudié en psychologie cognitive sous le nom de charge mentale (Leplat, 1997). La charge mentale dépend à la fois de la tâche à effectuer mais aussi de l'agent qui l'effectue. La charge mentale d'un novice pour exécuter une tâche sera plus importante que celle d'un expert de cette tâche. Wickens (1991) a distingué trois dimensions dans les ressources disponibles pour un agent : la modalité sensorielle impliquée (visuelle/auditive), le mode de codage (spatial/verbal), et le stade de l'activité concerné (codage et traitement/réponse). En fonction de ces trois dimensions les tâches interféreront plus ou moins les unes avec les autres. Ces éléments permettent de comprendre les phénomènes d'interaction entre tâches.

L'attention agit comme un moyen de concentrer à un moment donné des ressources mentales limitées à l'information et aux processus cognitifs les plus saillants c'est le compromis cognitif (Amalberti, 1996). Le processus psychologique d'attention permet d'exploiter judicieusement nos ressources mentales limitées. Les trois fonctions principales de l'attention sont 1) la détection du signal, 2) l'attention sélective qui consiste à prendre en compte certains stimuli et à en ignorer d'autres et 3) l'attention partagée qui consiste à répartir les ressources attentionnelles pour la réalisation simultanée de plusieurs tâches.

L'opérateur cherche à limiter le coût cognitif de ses actions, à réaliser des compromis cognitifs car ses ressources cognitives sont limitées pour pouvoir mener plusieurs tâches de front (Amalberti, 1996). Cette capacité va en fait dépendre de la nature des tâches qui conditionnera les interférences entre elles.

Dans le cas des processus dynamiques, la gestion des ressources cognitives est primordiale du fait de la contrainte de temps pour contrôler le processus. L'opérateur ne dispose en général que d'un temps limité pour envisager des hypothèses de résolution de problème et pour rassembler les informations nécessaires à sa prise de décision. Le processus évolue en parallèle de l'action de l'opérateur. Celui-ci effectue donc des cycles de prises d'informations sur la situation diagnostic/exécution d'opérations/prises d'informations. Cela induit une rationalité limitée, l'opérateur doit faire un compromis entre le coût et la performance de son activité cognitive (Raufaste, 2001).

La gestion des ressources cognitives La gestion des ressources cognitives a été modélisée par Rasmussen (1986) et Hoc (1996) dans le cadre de la gestion des processus dynamiques. Ce modèle est présenté figure 4.1.

Régulation par les habiletés (automatismes) (Skill-Based : SB) Ces automatismes sont spécifiquement adaptés à des situations représentatives dont l'exécution est fréquente. Ils sont acquis par l'entraînement. C'est le cas par exemple, dans l'affinage, des opérations de retournement des fromages qui sont des tâches quotidiennes pour les opérateurs. Ce niveau de régulation ne nécessite quasiment pas de ressource attentionnelle de la part de l'opérateur et celui-ci peut mener plusieurs actions de ce type en parallèle. Ces automatismes ou habiletés peuvent se construire sans recours aux représentations conceptuelles, ce peut être un apprentissage implicite du simple fait de l'exposition au processus. L'expert peut avoir acquis ces connaissances concrètes sans être capable de les verbaliser, de les conceptualiser.

Régulation par les règles (Rule-Based : RB) Pour ce niveau de régulation, l'opérateur va interpréter les signes de la situation pour déclencher des règles d'action déjà élaborées au cours de son expérience. A ce niveau, l'opérateur déclenche des actions concrètes de manière assez directe sans chercher à analyser la situation de manière conceptuelle. Le mode attentionnel conscient est

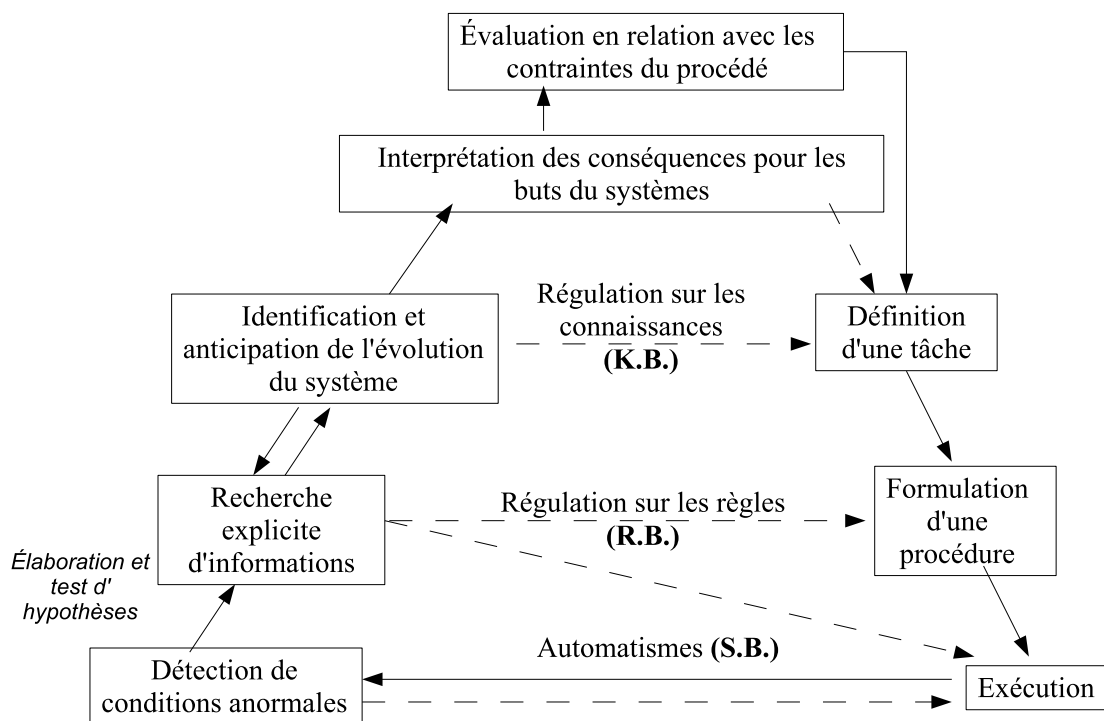


FIGURE 4.1: Modélisation de la gestion cognitive des processus dynamiques d'après Rasmussen (1986) et Hoc (1996).

utilisé à ce niveau pour choisir la règle à appliquer. Le traitement des informations perçues de la situation peut être réalisé de manière implicite, sub-symbolique. De même, une fois la règle appropriée choisie par l'opérateur, l'exécution de celle-ci se fait souvent de manière automatique, sans contrôle attentionnel de la part de l'opérateur. Ce niveau de régulation par les règles, nécessite des ressources attentionnelles mais bien moins que la régulation basée sur les connaissances conceptuelles. Il libère donc des capacités de l'opérateur pour effectuer d'autres tâches en parallèle. Ce niveau présente également l'avantage d'être plus adaptable que celui des automatismes.

Régulation de l'activité par les connaissances conceptuelles (Knowledge Based : KB)

Ce niveau de régulation fait appel aux connaissances profondes de l'opérateur, c'est à dire à ses connaissances conceptuelles, déclaratives, du processus : connaissances académiques, principes de fonctionnement, relation de causalité... Pour l'affineur, ce sont notamment les connaissances acquises lors de sa formation de fromager. A ce niveau, l'opérateur utilise des représentations symboliques et des raisonnements complexes pour guider son activité. Comme le souligne Hoc (1996), ce niveau de régulation n'est utilisé qu'en cas de situation de résolution de problème, où les solutions habituellement employées ne fonctionnent pas et où il est nécessaire d'en créer de nouvelles. L'opérateur va utiliser les schémas généraux dont il dispose et les particulariser ou créer entièrement de nouvelles procédures. Ce niveau de régulation est très coûteux en ressources cognitives, l'opérateur est donc limité dans son utilisation.

4.2.2.3 Fonctionnement cognitif caractéristique de l'expert

Selon Raufaste (2001) les performances en situation de diagnostic dépendent de la richesse, de la pertinence et de la flexibilité du raisonnement de l'expert.

Détection de l'information

Expertise perceptive Les perceptions sont un sujet d'étude important de la psychologie cognitive car elles sont une voies privilégiées d'acquisition des connaissances et les phénomènes en jeu sont très complexes. Par exemple, ce que nous ressentons dans nos organes sensoriels n'est pas forcément ce que nous percevons dans notre esprit. La figure 4.2 illustre un exemple d'illusion perceptive. Nous interprétons l'image comme représentant deux triangles alors qu'ils sont fictifs (Sternberg, 2007).

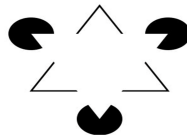


FIGURE 4.2: Illusion d'optique, perception d'un triangle imaginaire.

L'expertise perceptive a été étudiée notamment à travers les études sur "l'effet race" qui ont montré que l'on reconnaît mieux les visages de sa propre ethnie que ceux d'une autre (O'Toole et al., 1998). Un ensemble de traits distinctifs optimum pour décrire et discriminer les visages que nous voyons souvent. Ces traits distinctifs, cependant, ne sont efficaces que pour ces visages. L'expertise perceptive est utilisée dans le domaine sportif, musical et notamment par les sciences sensorielles dans le domaine alimentaire. Dans cette spécialité, l'analyse descriptive des produits alimentaires repose sur la formation de panels "experts" ou panels entraînés. Les juges de ces panels sont formés à la reconnaissance de critères sensoriels et à leur quantification. Il ne s'agit pas d'un apprentissage

procédural mais d'un apprentissage perceptif. Dans ce cadre Valentin et Abdi ont étudié l'expertise perceptive à travers une étude sur le vin (Valentin et al., 2003). Pour Gibson (1969) l'apprentissage perceptif permet un développement de la capacité à extraire de l'information d'une situation lorsqu'elle est fréquemment rencontrée.

Les effets de l'expertise se manifestent quand l'attention doit viser rapidement aux éléments cibles du stimulus, ou si l'encodage de la mémoire doit être rapide. En cognition, les processus perceptifs sont considérés comme une forme d'apprentissage automatique et continue.

Les chunk Les "traitements perceptuels" propres à l'expertise ont été découverts par Chase et Simon (1973) en étudiant les performances de joueurs d'échecs. Les experts optimisent leur prise d'informations sur la situation en cours à travers leur intégration dans des structures complexes nommées "chunk". La notion de chunk ou pattern est au coeur des théories de l'expertise. Les chunks sont des configurations typiques de situations acquises par l'expert au cours de sa pratique.

La capacité de la mémoire à court terme (MCT) est évalué à 7 ± 2 empanns mnésiques (unités discrètes). L'utilisation de chunk permet aux experts de structurer leurs perception en grande structures cohérentes qui peuvent être encodée ensuite en mémoire à court terme ce qui augmente la quantité d'information traitée (Raufaste, 2001). Les chunks permettent également aux experts de recueillir rapidement ces informations.

Grâce aux ces "chunks" les experts disposent d'une information plus complète que des novices sur la situation à contrôler. La précision de l'encodage est un élément clé pour sélectionner l'information pertinente.

Richesse des connaissances et des automatismes

Richesse des connaissances La richesse des connaissances ne se mesure pas aux seules connaissances théoriques, les connaissances pratiques sont également cruciales. Comme le souligne Raufaste (2001) l'acquisition d'expertise se conçoit habituellement à deux niveaux : l'apprentissage formel, académique et l'apprentissage informel qui résulte de la pratique quotidienne. Le premier apprentissage permet l'acquisition d'un réseau sémantique de connaissances explicites. Le second constitue l'ensemble des connaissances procédurales de l'expert. Ces connaissances sont enrichies soit par une pratique délibérée, l'expert concentre son attention sur son activité de manière consciente, soit du simple fait de l'exposition au processus par des mécanismes sub-symboliques d'association (Ericsson et al., 1993). L'expert a enrichi sa base de connaissances par un ensemble de cas réels, d'épisodes rencontrés au cours de son activité. La richesse de son "répertoire comportemental" permet à un expert d'adapter étroitement son activité à la complexité des situations rencontrées. Ces connaissances sont plutôt de nature implicite et sont difficiles à exprimer pour l'expert.

Richesses des automatismes La caractéristique fondamentale qui différencie les experts des novices est l'incorporation des connaissances en un nombre croissant d'automatismes. Ces automatismes permettent de répondre spécifiquement à un grand nombre de situations rencontrées lors de l'activité. Les traitements sont ainsi réalisés de manière implicite, non consciente par les opérateurs experts et sont donc peu coûteux au niveau cognitif. Ils permettent ainsi aux experts de garder des ressources disponibles pour anticiper le processus de leur activité ou contrôler son déroulement. Le haut niveau de performance des experts est expliqué par leur capacité d'anticipation des processus dynamiques. Les experts régulent les processus en utilisant le niveau des habiletés décrit par Rasmussen (1986) (SB) de manière plus importante que les novices.

L'activité de diagnostic serait aussi automatisée avec un fonctionnement des experts en reconnaissance de cas connus par comparaison aux situations mémorisées au cours de la pratique (Dreyfus et Dreyfus, 1986).

Pertinence des connaissances La pertinence représente l'à-propos de la sélection des connaissances et savoir-faire mobilisés par l'opérateur pour diagnostiquer ou contrôler un processus. Face à une résolution de problème en système dynamique, il est impossible d'explorer exhaustivement l'ensemble des possibilités en un temps raisonnable. La pertinence du raisonnement et des connaissances mobilisées est cruciale.

Rabinowitz et McAuley (1990) ont posé l'hypothèse que la récupération d'un concept est une fonction probabiliste qui dépend du niveau d'activation du concept. Le niveau d'activation étant défini par la fréquence avec laquelle une connaissance ou réseau de connaissances a été utilisée et activée. L'activation traduit l'accessibilité des connaissances. Les connaissances jugées pertinentes par l'expert seront celles qui auront le plus de probabilité d'être justes. En psychologie cognitive, ce processus qui permet une stratégie rapide de résolution de problème est nommé processus heuristique de décision. Ces heuristiques sont un compromis entre coût cognitif et efficacité, elles composent une stratégie rapide mais non certaine de résolution de problème. Il existe des heuristiques de plusieurs types, nous en présentons trois particulièrement utilisées par les opérateurs :

- L'heuristique de représentativité (Kahneman et Tversky, 1972) : L'opérateur va assimiler la situation en cours à une situation déjà rencontrée ayant des caractéristiques similaires. Il pourra ensuite adapter ce cas connu aux spécificités de la situation. Pour des fromages avec un retard d'affinage, l'opérateur va chercher en Mémoire à Long Terme un cas « typique » similaire et les solutions qu'il avait appliquées.
- L'heuristique de disponibilité (Kahneman et Tversky, 1972) : C'est la tendance à estimer la probabilité d'apparition d'un événement en fonction de la facilité de récupération en mémoire d'exemples, d'illustrations se rapportant à l'événement. Par exemple, l'affineur sait qu'un retard d'affinage dans son hâloir a été plus souvent lié à un manque d'oxygène dans l'air qu'à la température, il réalisera donc préférentiellement une aération du hâloir plutôt qu'une modification de température. Cette heuristique aura toutes les chances d'être efficace puisque c'est statistiquement le cas le plus rencontré.
- L'heuristique d'affect (Raufaste, 2001) : L'affect est une réponse émotionnelle issue de l'évaluation des risques et bénéfices obtenus après une décision. Ainsi, l'expert dispose d'un indicateur de satisfaction à attendre de l'application des différentes procédures mémorisées qui lui permettra de faire son choix et de sélectionner celles qui probablement le rapprocheront le plus de son but. Nous présentons ce type d'heuristiques car ce sont elles qui permettent aux opérateurs de prendre en compte les cas rares. Elles minimisent le risque d'écarter un cas peu probable.

Ces heuristiques participent d'une rationalité limitée, elles échouent donc parfois mais sont globalement efficaces pour un coût cognitif minimal.

Script Les cas connus par l'expert au cours de sa pratique lui ont permis d'automatiser ses connaissances procédurales sous forme de script (Amalberti et Valot, 1990). Les experts récupèrent de manière automatisée, à l'aide des heuristiques, des schémas génériques qu'ils particularisent ensuite pour obtenir rapidement une représentation de la situation et des hypothèses de diagnostic. Raufaste (2001) précise que les experts ne privilégient pas un raisonnement à base de règles qui s'enchaînent mais raisonnent plutôt par reconnaissance de cas connus. Pour le contrôle de processus dynamiques, les experts reconnaissent dans les situations des « patterns dynamiques » (Holding, 1992) ou « schémas-séquences » (Getz, 1996) qui vont leur permettre d'anticiper l'évolution du processus. Les scripts sont apparentés à la théorie des schémas de Schanck et Abelson (1977) à ceci près que la dimension temporelle est prise en compte. Les deux caractéristiques temporelles prises en compte par l'opérateur dans les processus dynamiques sont la durée et la chronologie des événements. Les opérateurs acquièrent rapidement la relation d'ordre entre les événements lors de l'apprentissage du processus. Ils sont également capables de s'adapter à des structures complexes de procédés sans avoir recours à une horloge grâce à des repères temporels clés, de la chronologie des événements et de leurs durées relatives. En revanche, les opérateurs n'ont pas une représentation objective de la durée (absolue) des événements même si l'ordre de grandeur est la plupart du temps

respecté. Les opérateurs acquièrent une représentation opérative des durées. Elles sont sous-estimées ou sur-estimées selon un biais fonctionnel qui permet à l'opérateur de se simplifier la tâche. Les scripts sont des éléments clés de la gestion des processus dynamique par les expert.

4.2.2.4 Conclusion : l'expert et la conduite de l'affinage

Dans notre travail, nous faisons l'hypothèse que dans l'industrie alimentaire plus qu'ailleurs, les perceptions sensorielles sont au coeur de l'expertise. C'est par ce biais que des connaissances peuvent être recueillies pour améliorer la compréhension des systèmes complexes alimentaires.

Un schéma synthétisant notre représentation de la conduite d'affinage de camemberts par un expert à l'issue de l'étude bibliographique sur l'expertise vue par la psychologie cognitive est présenté figure 4.3. L'expert prélève des informations sur le procédé d'affinage en cours sous forme d'indicateurs sensoriels, il les fusionne par l'intermédiaire de chunk préétablis pour se créer une représentation mentale de l'état du procédé. L'expert compare ensuite cet état du procédé à une cinétique de référence de l'affinage encodée en mémoire sous forme de script. Cette comparaison lui permet de diagnostiquer l'évolution du procédé et de la corriger si nécessaire. Le diagnostic fera appel à différents niveaux cognitifs (SB, RB, et KB) en fonction du type de problème à traiter.

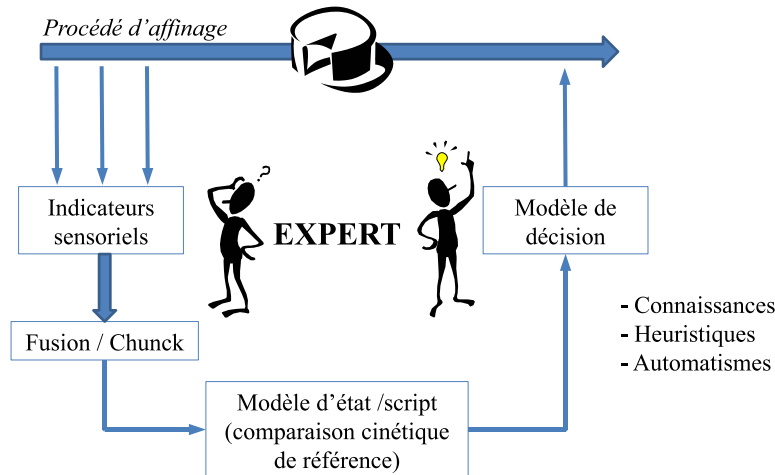


FIGURE 4.3: L'expert et la gestion du procédé d'affinage de camemberts, représentation simplifiée vue sous l'angle de la psychologie cognitive.

Notre objectif est de recueillir ces connaissances expertes pour reconstruire les dynamiques des phénomènes au niveau macroscopique de l'affinage des camemberts.

Toutefois, nous avons vu que les experts ont majoritairement automatisé leurs connaissances et qu'elles sont donc difficilement explicables. Cet effet nommé effet "bottleneck" (goulot d'étranglement) est bien connu en intelligence artificielle, le plus difficile dans la construction d'un système expert est le recueil d'expertise, pas la construction du programme informatique formalisant ces connaissances (Hoffman et al., 1995, Wood et Ford, 1993). En effet, les experts sont souvent incapables d'expliquer comment ils pensent et raisonnent (Wooten et Rowley, 1995). Des méthodes

adaptées d'élicitation d'expertise étaient donc nécessaires pour pouvoir recueillir leurs connaissances.

La méthode de recueil d'expertise utilisée dans cette étude a été inspirée de celles utilisées en psychologie cognitive. La méthode de formalisation de ces connaissances a été construite selon la méthode des indicateurs sensoriels développée par (Curt et al., 2004).

4.3 Matériel et méthode : recueil, formalisation et mise en application des connaissances expertes

Notre objectif est de recueillir les connaissances des experts fromagers sur l'affinage des camemberts pour reconstituer les dynamiques des phénomènes au niveau macroscopique. Les connaissances épisodiques, procédurales et l'expertise perceptive sont à éliciter. Pour cela les méthodes d'enquête développées en psychologie cognitive sont utilisées. Notre second objectif est de formaliser cette expertise pour la transmettre à un panel de laboratoire et le rendre capable de suivre les affinages expérimentaux comme un expert le ferait. Nous souhaitons ainsi valider les savoir-faire des experts et déterminer l'impact au niveau macroscopique de l'humidité relative et de la température sur les 5 cinétiques d'affinage sélectionnées à la section 3.3.3. Toutefois la première étape de cette étude des phénomènes d'affinage au niveau macroscopique a été une analyse sensorielle classique.

4.3.1 Analyse sensorielle "classique" des fromages expérimentaux

Une caractérisation "classique" des propriétés organoleptiques des fromages expérimentaux a été effectuée en fin d'affinage. Cette analyse descriptive réalisée par un panel entraîné du centre technique des produits laitiers Actilait est complémentaire à l'analyse sensorielle "at-line" beaucoup plus succincte. Elle permet notamment de situer les camemberts produits dans le pilote dans "l'espace produit ¹" des camemberts vendus dans le commerce.

A la fin de chaque essai expérimental, les fromages sont envoyés pour dégustation au centre technique Actilait pour dégustation par un panel entraîné. L'analyse sensorielle est effectuée selon la technique descriptive du profil sensoriel. Douze juges évaluent les fromages à 35 jours d'affinage selon 26 critères sur une échelle continue de 10 cm. Les 26 critères sont présentés en annexe 2, ils portent sur :

- l'aspect de la croûte : couleur de la croûte, régularité de la croûte et épaisseur de la croûte,
- l'aspect de la pâte : couleur de la pâte, coeur plâtreux, aspect coulant et présence d'ouverture,
- l'odeur : intensité globale de l'odeur, odeur de champignon et odeur d'ammoniac,
- la texture : texture souple, texture ferme, perception de la croûte, texture collante texture granuleuse et texture crémeuse,
- le goût : intensité globale du goût, salé, acide et amertume
- l'arôme : arôme lacté, arôme savon, arôme ammoniac, arôme champignon et richesse aromatique.

Les juges disposaient de l'équivalent de 1/5 de fromage pour l'évaluation et devaient se rincer la bouche à l'eau et manger un morceau de pain entre chaque échantillon dégusté. Les échantillons sont évalués de manière répétée et anonyme.

1. Terme consacré en analyse sensoriel, l'espace produit est l'ensemble de produits présentant des similitudes. En analyse sensorielle les bornes de l'échelle des indicateurs doivent représenter l'écart maximum trouvé entre les produits du même "espace". Dans notre cas, l'espace produit est constitué par les différents camemberts vendus dans le commerce.

Les résultats sont analysés de manière statistique par analyse de variance à un facteur : l'effet produit.

L'analyse sensorielle classique est une représentation des propriétés sensoriels d'un produit à un moment donné, ici le 35^{ème} jour d'affinage. Cette analyse ne permet pas d'accéder aux dynamiques des phénomènes c'est pourquoi une analyse sensorielle "at-line" a également été conduite dans cette étude (voir section 4.3.4).

4.3.2 Recueil d'expertise

4.3.2.1 Les experts opérationnels

Dans cette étude, 4 experts opérationnels ont été interrogés. Les critères de choix pour ces experts sont la durée de leur pratique et la reconnaissance par leurs pairs. Tous les quatre avaient plus de 15 ans d'expérience sur le procédé de fabrication du camembert. Deux experts parmi ceux interrogés sont consultants pour l'industrie, un autre est responsable de production, le dernier est un expert responsable de la fabrication et de l'affinage de camemberts au sein de notre laboratoire.

Chaque expert a été interrogé individuellement par un ou deux enquêteurs durant 2 à 3 heures. Les entretiens étaient intégralement enregistrés. L'objectif était de poser des questions simples, synthétiques, sans ambiguïté et n'induisant pas de réponse. Les entretiens étaient réalisés sur la base d'un guide semi-directif. Le guide d'entretien est présenté dans la figure 4.4. Comme pour tout entretien semi-directif, ce guide n'avait pas pour objectif d'être suivi à la lettre, les questions étant destinées à relancer l'entretien en cas de difficulté ou à approfondir les questions non abordées spontanément par les experts.

Ce guide devait permettre d'explorer les trois niveaux de contrôle utilisés par les experts, le niveau des connaissances théoriques, la régulation à base de règles/heuristiques et le niveau de contrôle à base d'automatismes. Quatre thèmes ont été organisés, des connaissances les plus facilement explicites aux connaissances les plus implicites. L'objectif du premier thème était de recueillir l'évolution standard d'un affinage de camemberts c'est à dire sur le "script" de l'affinage. Le second thème visait à expliciter les contrôles effectués par les experts opérationnels ainsi que les moments critiques du procédé où les contrôles sont renforcés. Ce deuxième thème permet d'identifier les indicateurs sensoriels ou instrumentaux utilisés par les experts et les "chunk" (fusion) réalisés par ceux-ci. Le troisième thème portait sur les défauts rencontrés et leur management. Enfin, le dernier thème portait sur une remise en situation par l'utilisation de la technique des incidents critiques.

La technique des incidents critiques est l'une des techniques classiques de verbalisation de l'expertise. Cette technique est présentée en même temps que d'autres techniques de verbalisation dans l'ouvrage de Bisseret et al. (1999). La technique des incidents critiques consiste à comparer les récits d'incidents à ceux de fonctionnement normaux de l'activité. Les événements à forte charge émotionnelle comme les incidents critiques sont mieux encodés en mémoire par les experts et permettent de recueillir des informations aussi fiables que possible.

Ces techniques de verbalisation ne permettent toutefois pas d'inférer les connaissances stockées à des niveaux cognitifs inconscients comme les automatismes. Darses et al. (2004) proposent d'utiliser la technique d'inspiration clinique développée par Vermersch (1994) : l'entretien d'explicitation. P. Vermersch est chargé de recherche au CNRS, psychologue et psychothérapeute de formation. Les techniques de l'entretien d'explicitation visent à faire expliciter l'action et notamment ses aspects implicites considérés comme inaccessibles. Elle est donc une technique privilégiée pour étudier l'activité experte, activité à forte composante automatique. L'entretien d'explicitation permet de guider la personne interrogée vers une description du vécu réel de l'action et de limiter la verbalisation descriptive, la verbalisation conceptuelle, et la verbalisation imaginaire. L'auteur préconise notamment porter une attention particulière à la remise en situation pour ramener le sujet vers une évocation

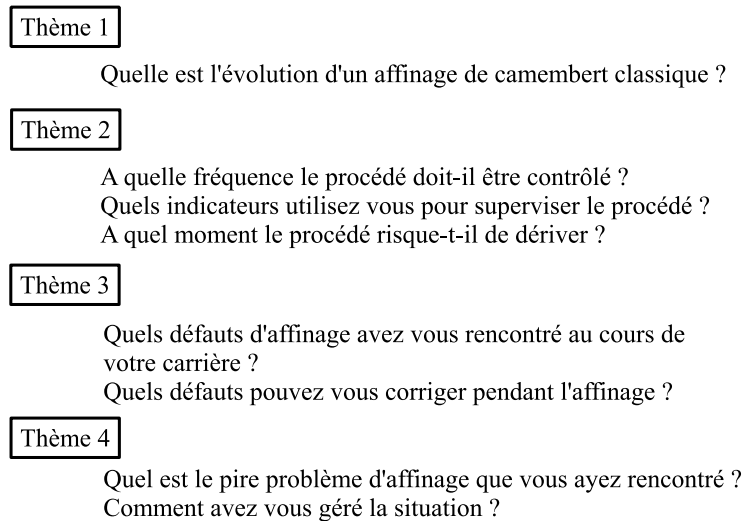


FIGURE 4.4: Guide d'interview pour recueillir l'expertise d'affineurs

concrète du vécu notamment en posant des questions sur le contexte ou les sous-modalités sensorielles de l'action. Il faut ainsi trouver un déclencheur sensoriel pour l'évocation. Selon Vermersch (1994) les événements ont plus de chance d'être remémorés si les stimuli environnant sont recréés. Cette technique de l'entretien d'explicitation a été employée également car elle permet d'obtenir une information plus fiable sur l'action concrète de l'expert et non sur une action conceptualisée parfois très différente.

Nous avons appliqué les recommandations de Vermersch (1994) au cours des entretiens pour favoriser autant que possible la remise en situation des experts. Dans la pratique, la première question déclenchait une verbalisation très riche dans laquelle la plupart des éléments prise d'informations/diagnostic/contrôle était abordée. Seul le 4^{ème} thème, un peu particulier était volontairement approché en fin d'entretien pour une meilleure remise en situation des experts et ainsi pour enrichir le recueil d'informations moins formelles/conceptuelles mais plus procédurales.

4.3.2.2 Les experts scientifiques

Des experts scientifiques ont été interrogés sur l'affinage de camemberts. Ils ont en effet un autre point de vue sur le procédé que les fromagers car ils cherchent à en comprendre les mécanismes plus qu'à les contrôler. Ils ont été la source privilégiée du recueil des connaissances théoriques sur le procédé.

Huit experts des laboratoires de l'INRA (UMR GMPA à Paris-Grignon et UMR STLO à Rennes) sont interrogés. Tous sont des spécialistes des procédés fromagers et étudient ces procédés depuis plus de 10 ans.

Le recueil d'expertise s'effectue sur le principe des focus groupe. Plusieurs experts scientifiques sont rassemblés et interrogés à partir des connaissances déjà recueillies auprès des experts opérationnels. Les séances ont pour objectif d'identifier les principales variables du procédé et les liens entre ces variables. Après les premiers entretiens, des cartographies conceptuelles de l'affinage sont soumises à ces experts pour qu'ils les complètent et les corrigent.

Un enquêteur conduisait la discussion et la réorientait si nécessaire. Au moins un autre enquêteur était présent pour prendre des notes. Les techniques d'entretiens plus élaborés de la psychologie cognitive n'ont pas été utilisés car les connaissances à recueillir étaient de nature explicite. Les experts scientifiques communiquent souvent leurs connaissances par le biais de publications scientifiques, d'enseignement... L'avantage des focus groupe, notamment par rapport à une étude bibliographique, est de recueillir les connaissances sous forme hiérarchisées et ainsi repérer les variables importantes du procédé et leur liens.

4.3.3 Analyse des recueils d'expertise

Les connaissances des experts scientifiques ont été exploitées directement car elles ne présentaient pas de difficultés particulières, les connaissances étant de nature explicite. En ce qui concerne les experts opérationnels, la richesse et la complexité des corpus recueilli nous a conduit à essayer de traiter les données de manière plus approfondie.

Les entretiens avec les experts opérationnels ont été intégralement retranscrits pour constituer un "corpus" qui a ensuite été analysé avec des logiciels d'analyse de texte. L'analyse des corpus peut être manuelle mais l'utilisation d'un logiciel permet une certaine traçabilité de l'analyse et ainsi une certaine reproductibilité de la mesure. La limite étant que même avec un logiciel, l'analyse textuelle reste en partie subjective : choix du regroupement des mots, choix des concepts clés...

4.3.3.1 Analyse thématique et sémantique

Les corpus sont d'abord traités par analyse cognitivo-discursive par analyse sémantique. L'analyse sémantique regroupe des mots issus d'un corpus de textes dans des catégories (par ex. cause, but, temps, lieu, etc.) ou des classifications (synonymes, hyperonymes), en s'appuyant sur des grammaires et des réseaux sémantiques. On passe de "l'analyse de contenants" (formes) à l'analyse de contenu (sens), en faisant appel à la pragmatique linguistique (i.e. tenir compte du contexte). La sémantique facilite l'analyse et réduit le risque interprétatif.

Cette méthode se fonde sur un processus récursif d'analyse, qui va partir d'une première classification (construite a priori) et boucler sur les trois étapes suivantes : 1 – analyser une collection de documents (corpus de test) représentative du sujet traité; 2 – identifier tous les termes et expressions qui ne sont pas pris en compte dans la classification (et qui sont jugés pertinents par rapport à la problématique d'analyse); 3 – rajouter les termes pertinents dans la classification et repartir à l'étape 1 (autant de fois que nécessaire), en changeant éventuellement de corpus de test. Sous certaines conditions, cette approche récursive peut être considérée comme terminée quand la classification reste stable lorsqu'on ajoute de nouveaux corpus.

Mais cette approche implique d'affronter la polysémie, avec l'inconvénient d'utiliser une logique complexe de résolution de problèmes (grammaticaux, sémantiques) et de nécessiter de gros dictionnaires de classification, qui ne seront jamais totalement parfaits ou exhaustifs. L'analyse sémantique impose donc des reclassifications, avant l'interprétation des résultats.

Les corpus sont d'abord traités avec le logiciel Tropes (société ACETIC, France) sans succès. Les résultats de cette analyse sont décevants car difficilement interprétables, toutefois, cette première approche facilite la suite des analyses car un ensemble de micro-récits (partie du discours de l'expert) et leurs thèmes sont dégagés.

Deux causes, intrinsèques au recueil d'expertise, sont peut être à l'origine des difficultés rencontrées : la petite taille des corpus (4 experts interrogés) et le langage opératif des experts. Le langage opératif est le jargon des experts (Ochanine, 1978). La pratique d'activités spécialisées conduit à élaborer des dialectes techniques, compréhensibles et efficaces pour les experts du domaine. Ce langage est plus

ou moins hermétiques comme par exemple l'expression "peau de crapaud" au sujet du camembert. Les dictionnaires utilisés par le logiciel Tropes ne semblent pas adaptés ("peau de crapaud" a conduit à un regroupement autour du thème "batracien" alors que c'est un défaut d'affinage du camembert) et demanderaient un effort de recodage important. La taille restreintes des corpus et le langage particulier utilisé sont une problématique commune à de nombreux recueils d'expertise. Pour des études futures, il serait intéressant de vérifier avec des utilisateurs confirmés la capacité d'analyse de Tropes sur ce type de données. L'affinage est peut être aussi un domaine où le langage opératif est particulièrement développé.

L'analyse thématique classique est donc finalement privilégiée pour une première analyse des textes. L'analyse thématique est une méthode d'analyse plus subjective et parfois remise en question mais elle permet une première analyse des textes en un temps relativement court. Après identification des thèmes principaux des discours et leur repérage dans les corpus, une analyse lexicométrique est réalisée.

La lexicométrie consiste à trier des formes fléchies extraites d'un corpus de textes, à filtrer les « mots outils » et à supprimer les termes à faible fréquence afin d'élaborer des statistiques. Cependant la lexicométrie pose plusieurs problèmes quand on veut s'en servir pour l'analyse de contenu. D'une part, le traitement statistique implique de réduire fortement le nombre de variables, donc de perdre de l'information, d'autre part, l'analyste doit découvrir lui-même les équivalents sémantiques durant la phase d'interprétation des résultats ce qui limite l'objectivité de la méthode.

Pour réaliser cette analyse lexicométrique, les interviews sont d'abord regroupées dans un même texte, ou corpus, puis analysées à l'aide du logiciel Sphinx (Le Sphinx Développement, Chavanod, France). Ce logiciel permet d'obtenir des tableaux de fréquence de termes du discours, après une phase de préparation des données. Des jalons et des marques ont été insérés dans le corpus. Les jalons séparent les discours de chacun des interviewés, les marques indiquent les thèmes du texte repérés lors de l'analyse thématique. Le texte ainsi préparé est analysé.

Le logiciel établit des lexiques des mots les plus fréquents du corpus en distinguant les mots, les noms, les verbes, les adjectifs et les segments répétés les plus fréquents.

Le logiciel permet également une réduction du corpus nécessaire à l'analyse des données. Cette réduction comporte :

- une lemmatisation du lexique : la lemmatisation réduit chaque mot à sa forme racine (infinif pour les verbes, masculin singulier pour les mots, etc).
- une suppression des mots-outils du texte, c'est-à-dire les mots qui ont une signification neutre. Il s'agit par exemple de être, ça, avec, etc.
- la suppression des termes dont la fréquence est très faible (<3).

Le logiciel permet aussi le regroupement de termes synonymes ou équivalents dans des dictionnaires entièrement paramétrables. Par exemple, des termes abrégés utilisés par les experts (tel que « Geo » pour « Geotrichum »), ou des termes qui décrivent la même idée (« sel » et « salage ») sont regroupés. Les listes de verbes, mots et adjectifs sont réduites de la même façon.

4.3.3.2 Analyse factorielle des correspondances

Pour analyser les résultats de l'analyse lexicométrique, dans cette étude, nous utilisons l'analyse géométrique de données préconisée par Wolff (2003). L'analyse géométrique de données permet de s'affranchir des analyses descriptives univariées qui peuvent être trop restrictives. Le codage des verbalisations peut permettre une analyse multidimensionnelle des informations (informations sur la tâche, sur les sujets interrogés, sur les comportements...).

Nous effectuons des Analyses Factorielles des Correspondances (AFC) sur les données lexicales. L'AFC est une technique d'analyse de données qualitatives développée par Jean-Paul Benzécri. Elle s'effectue à partir d'un tableau de contingence (2 variables catégorisées à J et K modalités). Elle se fonde sur les calculs des distances entre les profils et le profil moyen pour élaborer une projection «dans l'espace» des différentes modalités étudiées. La carte factorielle est construite à partir des tableaux de fréquences de tous les types de mots (noms, adjectifs, verbes). Les modalités en ligne et en colonne correspondent aux mots rencontrés dans le texte. Le croisement de ces modalités se fait en comparant la proximité des mots au sein d'une ou plusieurs unités d'analyse. Le lien entre deux mots ou deux expressions se mesure par rapport à leur proximité. Le tableau regroupe donc le nombre de fois où deux mots sont apparus proches l'un de l'autre. Ce tableau est ensuite comparé à celui des effectifs théoriques. Pour une modalité ligne et une modalité colonne, plus cet écart est élevé, plus il est significatif. L'écart caractérise la dépendance ou l'indépendance des mots les uns par rapport aux autres. Cette projection amène à la construction de différents axes factoriels. Chaque axe comme dans le cas de l'analyse en composantes principales représente une part de variance par rapport à l'ensemble des modalités.

4.3.4 Formalisation des indicateurs sensoriels

La méthode des indicateurs sensoriels développée par Curt et al. (2004) a été développée pour la maîtrise des propriétés sensorielles des aliments en cours de fabrication. L'objectif de cette méthode est de formaliser les mesures perceptives réalisées par les opérateurs sur la ligne de production pour pouvoir les utiliser en contrôle du procédé. La métrologie sensorielle classique n'est pas appropriée pour répondre aux contraintes imposées par l'atelier de fabrication (nombreux panelistes, anonymat des produits, répétition des évaluations...). Les différences entre la méthode des indicateurs sensoriels et une analyse sensorielle descriptive classique sont détaillées dans le tableau 4.1. La principale différence est le nombre de juges qui doivent être 7 au minimum en analyse sensorielle classique tandis que 1 ou 2 opérateurs suffisent pour l'analyse sensorielle at-line.

TABLE 4.1: Comparaison entre deux méthodes d'analyse sensorielle. L'analyse "at-line" réalisée au cours de l'évolution du procédé et l'analyse sensorielle classique généralement effectuée sur le produit fini.

	Analyse sensorielle classique	Analyse sensorielle "at-line"
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> - décrire les propriétés sensorielles - comparer des produits - vérifier de la conformité de la production - développer de nouveaux produits 	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle de conformité de l'évolution du procédé - mesures "at-line" rapides
Produits analysés	<ul style="list-style-type: none"> - produits finaux 	<ul style="list-style-type: none"> - produits en cours de fabrication
Localisation	<ul style="list-style-type: none"> - en laboratoire dans des conditions contrôlées (température, lumière...) - groupe de juges entraînés 	<ul style="list-style-type: none"> - en usine - sur la ligne de production - un ou deux opérateurs
Juges	<ul style="list-style-type: none"> - juges non impliqués par le résultat de l'évaluation 	<ul style="list-style-type: none"> - opérateurs impliqués par le résultat de l'évaluation
Conditions d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - mesures déportées du lieu de fabrication - répétition des évaluations sur les mêmes produits - évaluation en aveugle (produits codés) 	<ul style="list-style-type: none"> - mesures réalisées en temps réel - une évaluation sur plusieurs produits - produits connus ainsi que leur historique de production - pas de test statistique
Analyse des résultats	<ul style="list-style-type: none"> - analyse statistique classique 	<ul style="list-style-type: none"> - estimation d'une déviation par rapport à la cible produit.

La méthode des indicateurs sensoriels s'appuie sur l'hypothèse que les indicateurs sensoriels sélectionnés par l'opérateur sont les plus pertinents, c'est-à-dire les plus discriminants pour les produits.

L'opérateur a besoin de quantifier les différences du produit par rapport à une référence qui est constituée de la valeur attendue pour chaque caractéristique évaluée. Ce besoin vient du fait que l'opérateur va agir sur les paramètres du procédé en fonction de la mesure d'écart qu'il a repérée.

L'opérateur cherche à évaluer la dynamique des phénomènes qui se produisent au cours d'une étape du procédé. Les indicateurs sensoriels sont fortement liés aux transformations physiques, chimiques et biologiques qui ont lieu cours de l'élaboration du produit. Les opérateurs choisissent des mesures en fonction des caractéristiques des produits intermédiaires. Le nombre d'indicateurs et leur nature évoluent donc au fur et à mesure de l'avancement du procédé. L'opérateur n'utilise pas l'ensemble des indicateurs à un moment donné. Les mesures sont ainsi faites non pas sur un seul type de produit mais sur plusieurs, c'est-à-dire sur chacun des produits intermédiaires.

A partir de ces constats sur le fonctionnement des opérateurs, Curt et al. (2004) ont développé la méthode des indicateurs sensoriels, normalisée dans la norme Afnor XP V09-502 pour utiliser ce savoir-faire en contrôle de procédés alimentaires. La méthode proposée s'articule en quatre phases :

- formalisation des indicateurs
- apprentissage de la tâche
- apprentissage de la quantification
- vérification des performances.

4.3.4.1 Formalisation des indicateurs

La première étape de la formalisation doit aboutir à une liste des différents indicateurs utilisés pendant le déroulement du procédé. La seconde étape de la formalisation des indicateurs sensoriels consiste en une structuration selon les sept catégories suivantes : Nom de la mesure, définition, mode opératoire, mode d'évaluation, références, lieu de prélèvement, instants clés d'évaluation. La transmission du savoir-faire est mise en oeuvre une fois la grille de formalisation validée par l'expert.

Les indicateurs définis par les experts sont retravaillés avec l'expert opérationnel de notre laboratoire. L'objectif est surtout de définir le protocole d'évaluation de ces indicateurs et de choisir des références pertinentes.

4.3.4.2 Apprentissage de la tâche

Avant de réaliser toute mesure, l'opérateur-apprenti doit se familiariser avec le vocabulaire spécifique de l'expert et avec les gestes à réaliser pour accomplir la tâche. Ces acquis doivent être effectifs avant le passage à la seconde phase. Cet apprentissage est réalisé au travers de mesures faites simultanément, par l'expert et par l'opérateur-apprenti, sur plusieurs échantillons, dans les conditions expérimentales normales de la mesure, c'est-à-dire sur le procédé.

Cette démarche prend en compte les différents états du produit, c'est-à-dire vise à faire apprendre toutes les références à l'opérateur-apprenti ; elle est exécutée pour tous les indicateurs. Plusieurs références sont nécessaires pour créer des échelles de catégories ordonnées qui permettront la mesure. Il est choisi de donner autant de références qu'il existe de points d'ancrage sur l'échelle : l'opérateur est seul face à son procédé et la fiabilité de la mesure ne repose que sur une personne. L'approche est différente de celle d'un panel où on fait la moyenne des mesures de plusieurs sujets. Il s'agit d'obtenir in fine un système d'appréciation robuste, facilement et rapidement manipulable par des opérateurs au cours de la transformation des produits.

4.3.4.3 Apprentissage de la quantification

L'opérateur-apprenti doit donner une note qui est proche de celle donnée par l'expert, le but étant de rendre les sujets interchangeables. Cet apprentissage se réalise selon deux étapes : · la première

est une séance de notation individuelle sur plusieurs échantillons dans les conditions normales de la mesure avec les conditions réelles d'éclairage et de température notamment. Dans cette phase, l'opérateur apprenti et l'expert ne sont pas autorisés à communiquer ; la deuxième compare les positions données par l'expert et l'opérateur-apprenti pour chaque échantillon, permettant à chacun d'eux de comparer ses positions sur l'échelle avec celles de l'autre sujet. Une discussion est instaurée afin d'amener l'opérateur à se caler sur l'expert considéré comme l'étalon de mesure.

4.3.4.4 Vérification des performances

Une fois un accord suffisant obtenu, des séances de vérification des performances sont menées. La transmission du savoir-mesurer vise à ce que les notes données par l'opérateur-apprenti et les notes données par l'expert soient identiques. Il s'agit d'évaluer la reproductibilité des résultats. Plusieurs sujets effectuent la mesure, ce qui entraîne une variation des conditions de mesure : la reproductibilité vise ici à déterminer s'il existe une différence de notation entre deux sujets. Les comparaisons ont lieu entre l'opérateur-apprenti et l'expert.

Au terme de la phase de transmission du « savoir-mesurer », les opérateurs doivent jouer le rôle d'instrument de mesure et permettre de réaliser des mesures avec les caractéristiques suivantes : répétabilité, justesse et reproductibilité.

Les échelles de notations en analyse sensorielle "at-line" sont discontinues, ordonnées et de nature symbolique. Les statistiques classiques ne sont pas applicables pour analyser les performances des juges. Dans cette étude, les notes données par les opérateurs ont été traitées selon la méthode décrite par Ioannou et al. (2002). Les notes sont évaluées selon leur degré de compatibilité (Bouchon-Meunier et al., 1996). Les notes sont considérées comme compatibles lorsque leurs différences n'excède pas 0.5, c'est à dire une différence d'un demi symbole. Si l'expert note un fromage à 2 en humidité, une note de 2.5 de l'opérateur est compatible mais pas une note de 3 (voir l'échelle d'humidité tableau 4.4). Les performances P d'un panellist j sont la somme des mesures i qu'il a effectuées et qui sont compatibles avec la note de l'expert sur le nombre total de mesures faites :

$$P(j) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Comp}_i(j)}{n} \quad (4.1)$$

Les performances des opérateurs sont validées si au moins 80% des mesures sont compatibles avec celles de l'expert. Cette limite est celle utilisée par Perrot et al. (2004).

L'évaluation des performances des opérateurs est réalisée sur 14 fromages en une séance. Les fromages sont fournis par un industriel fromager, 2 fromages sont fournis à : 1 jour d'affinage, 3 jours, 6 jours, 8 jours, 16 jours, 25 et 35 jours. Ces fromages ont été testés à l'aveugle de manière aléatoire et monadique (un seul fromage à la fois).

Une fois les juges formés, le panel a été considéré comme un instrument de mesure fiable pour évaluer l'évolution des propriétés sensorielles des fromages au cours des affinages expérimentaux. Les évaluations étaient enregistrées à l'aide d'une interface graphique représentée dans la figure 4.5. La répartition de la couverture en mycelium (*P. camemberti*) par exemple est présentée dans l'interface pour les deux faces du fromage (A et B), le protocole d'évaluation est indiqué et l'opérateur doit noter le critère sur l'échelle symbolique fournie (de <10% à >90% de la surface du fromage dans ce cas).

Les évaluations étaient effectuées sur les fromages prélevés pour les analyses instrumentales (1 fromage par jour par conduite d'affinage pendant la phase en hâloir les 12^{ers} jours puis 1 fromage par semaine par conduite ensuite). Les évaluations avaient lieu dans la chambre thermostatée à côté des hâloirs pour avoir des conditions constantes d'évaluation.

Questionnaire rempli le : 27/05/08

Répartition de couverture du mycélium sur la FACE A
% de superficie globale couverte (pas sur la tranche)

[Non renseignée]
> 90%
75%
50%
25%
< 10%

Répartition de couverture du mycélium sur la FACE B
% de superficie globale couverte (pas sur la tranche)

[Non renseignée]
> 90%
75%
50%
25%
< 10%

Epaisseur du mycélium sur la FACE A
Vue de côté, sur un demi camembert

[Non renseignée]
épais
moyen
fin
absent

Epaisseur du mycélium sur la FACE B
Vue de côté, sur un demi camembert

[Non renseignée]
épais
moyen
fin
absent

FIGURE 4.5: Interface graphique pour enregistrer les mesures sensorielles “at-line”

4.3.5 Agréger les perceptions sensorielles, le programme “Chunk”

L’objectif de cette étude est de pouvoir comparer les cinétiques d’affinage à différentes températures et humidité relative à une cinétique d’affinage standard. Pour cela nous cherchons à nous approcher le plus possible du raisonnement de l’expert. L’expert fusionne les informations sensorielles qu’il prélève sur le procédé par l’intermédiaire de chunk préétablis (voir section 4.2.2.3) de manière à comparer sa représentation mentale de l’état du procédé à une cinétique de référence.

Nous cherchons à simuler cette fusion des indicateurs sensoriels. Les opérateurs sont préparés à cela pendant leur formation aux indicateurs sensoriels. Les résultats ne sont ni reproductibles ni compatibles. Du fait de la complexité de la fusion, chaque opérateur a sa propre représentation des règles de fusion à appliquer, ses préférences sur les indicateurs sensoriels à favoriser.

La formation des opérateurs n’ayant pas pu être menée à bien, nous avons décidé de construire un programme à base de règles pour réaliser la fusion des indicateurs sensoriels. Ce programme sera nommé “Chunk” dans la suite du document. Ce programme est construit à partir des recueils d’expertises et en collaboration avec l’expert du laboratoire lorsque les éléments manquaient. Ce programme est une représentation très simplifiée du mécanisme de “Chunking” opérée par les experts mais il présente l’avantage d’être répétable et de permettre une traçabilité des règles de fusion.

A partir des mesures sur les indicateurs sensoriels des opérateurs, le programme “Chunk” permet de connaître l’évolution organoleptique globale de l’affinage aux cours des essais expérimentaux.

4.3.6 Un modèle empirique pour lier données quantitatives et qualitatives : la régression logistique

L’objectif est de caractériser l’évolution de l’affinage de camemberts d’un point de vue organoleptique à partir des mesures microbiologiques, biochimiques et physiques sur des fromages. La régression logistique est un modèle utilisé pour prédire la probabilité d’un évènement en ajustant les données à une courbe logistique. Ce modèle permet notamment de prédire les valeurs prises par des variables catégorielles à partir de variables explicatives continues. La loi de probabilité sur laquelle repose ce modèle est une loi logistique. Les variables catégorielles à prédire n’étant pas binaires, une régression logistique multinomiale est utilisée à partir de la fonction “mnrfit” de Matlab (Mathworks, USA) avec l’option “ordinal”. Les mesures sensorielles effectuées à partir des connaissances expertes sont en effet réalisées sur des échelles ordonnées de mesure.

Le modèle est le suivant :

$$\ln \frac{P(Y_i = m)}{P(Y_i = 1)} = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_j X_j \quad (4.2)$$

P est la probabilité qu’une des variables expliquées Y_i prennent la valeur catégorielle m , $m = 1$ étant une catégorie de référence. $\{X_1 \dots X_j\}$ représente l’ensemble des variables explicatives du modèle et $\{a_1 \dots a_j\}$ l’ensemble des paramètres de ce modèle.

Ce modèle est développé à partir les cinq cinétiques d’affinage de référence (voir 3.3.3). Il est construit et évalué par validation croisée de quatre des cinq expériences servant de jeu d’apprentissage et l’une de jeu de validation alternativement. L’ensemble des résultats ont été ensuite analysés à l’aide d’une matrice de confusion permettant de comparer les résultats prédits par le modèle et ceux observés lors des essais expérimentaux.

4.4 Résultats

4.4.1 Evaluation sensorielle classique des fromages en fin d'affinage

Pour les cinq cinétiques représentatives, un modèle d'analyse de variance à deux facteurs avec interaction est utilisé pour analyser l'influence de la température et de l'humidité relative sur les qualités organoleptiques des camemberts. Les fromages en fin d'affinage au 35^{ème} jour sont analysés par le panel entraîné du centre technique Actilait selon 26 critères présentés en annexe 2 .

Les résultats de l'analyse statistique sont présentés en annexe 3 , résultats à partir desquels la synthèse suivante est présentée :

Les critères sensoriels peuvent être répartis en quatre groupes :

- Les critères ne présentant pas de différence significative en fonction des conditions d'affinage : odeur champignon, odeur ammoniac, perception croûte, intensité globale du goût, intensité globale de l'odeur, salé, acide, arôme champignon, arôme lacté, arôme savon, arôme ammoniac et amertume.
- Les critères influencés de façon significative par la température : couleur pâte, présence d'ouvertures, texture souple, arôme animal et richesse aromatique.
- Les critères influencés de façon significative par l'humidité relative : présence d'ouvertures.
- Les critères significativement sensible à l'interaction de la température et de l'humidité relative : couleur croûte, irrégularité de la croûte, coeur plâtreux, texture collante et texture granuleuse.

De manière générale, les effets de la température d'affinage sur les propriétés organoleptiques du camembert sont les suivants : plus la température est élevée, plus la pâte est jaune. Une augmentation de température de 8 °C à 12 °C entraîne un assouplissement de la pâte. Il y a moins d'ouverture dans la pâte et les arômes sont plus diversifiés. Entre un affinage à 12 °C et un affinage à 16 °C, l'intensité de l'arôme animal augmente.

L'effet de l'humidité relative n'a été observé que sur le critère "ouverture dans la pâte" , une humidité élevée d'affinage conduit à une quantité plus élevée d'ouvertures dans la pâte.

4.4.2 Recueil d'expertise auprès des maîtres affineurs : les "experts opérationnels"

Le recueil de connaissances expertes a été effectué auprès d'expert opérationnels pour modéliser l'affinage. L'objectif est de connaître les dynamiques des développements des propriétés organoleptiques au cours de l'affinage pour à terme faire le lien avec les phénomènes à l'échelle microscopique et pouvoir mieux contrôler ce procédé.

4.4.2.1 Vue globale des recueils d'expertise opérationnelle

L'analyse thématique a permis d'identifier 4 thèmes principaux abordés au cours des entretiens (voir figure 4.4) : le travail, l'évolution, les défaut et la fabrication. Le thème travail englobe toute les interventions des experts sur le procédé depuis le contrôle du procédés jusqu'aux interventions directes sur les fromages de type emballage ou retournement. Le thème évolution concerne tous les indicateurs utilisés par les opérateurs pour suivre l'évolution du procédé ainsi que les éléments chronologiques du procédé. Le thème fabrication conditionné par la fabrication. Enfin, une thématique importante pour les experts concerne les défauts de l'affinage et leur gestion. Ces quatre thèmes sont abordés plus ou moins souvent par les experts.

Pour étudier de manière plus approfondie les différences entre les discours des experts, une première analyse factorielle est réalisée (figure 4.6). Ce type de représentation permet de visualiser les mots/verbes et adjectifs les plus utilisés par chacun des experts. Une différence entre les experts de l'industrie et les technologues est nettement visible sur l'axe 1 (45.89 % de variance expliquée). Les consultants étant plus sensibles aux substrats et aux flores tandis que les industriels sont plus attentifs aux variables de contrôle (température), aux opérations à effectuer (ressuyage, emballage). L'axe 2 représente aussi une part importante de l'information avec 31 % de variance expliquée. Sur l'axe 2, c'est surtout les aspects de gestion de l'eau et de perte de masse qui sont opposés aux défauts de l'affinage (peau de crapaud, problème, postacidification). Dans son discours l'un des industriels ne semblait pas tellement focalisé sur les accidents et défauts du fromage qui sont plutôt rares mais sur les rendements matières, problème quotidien de rentabilité économique.

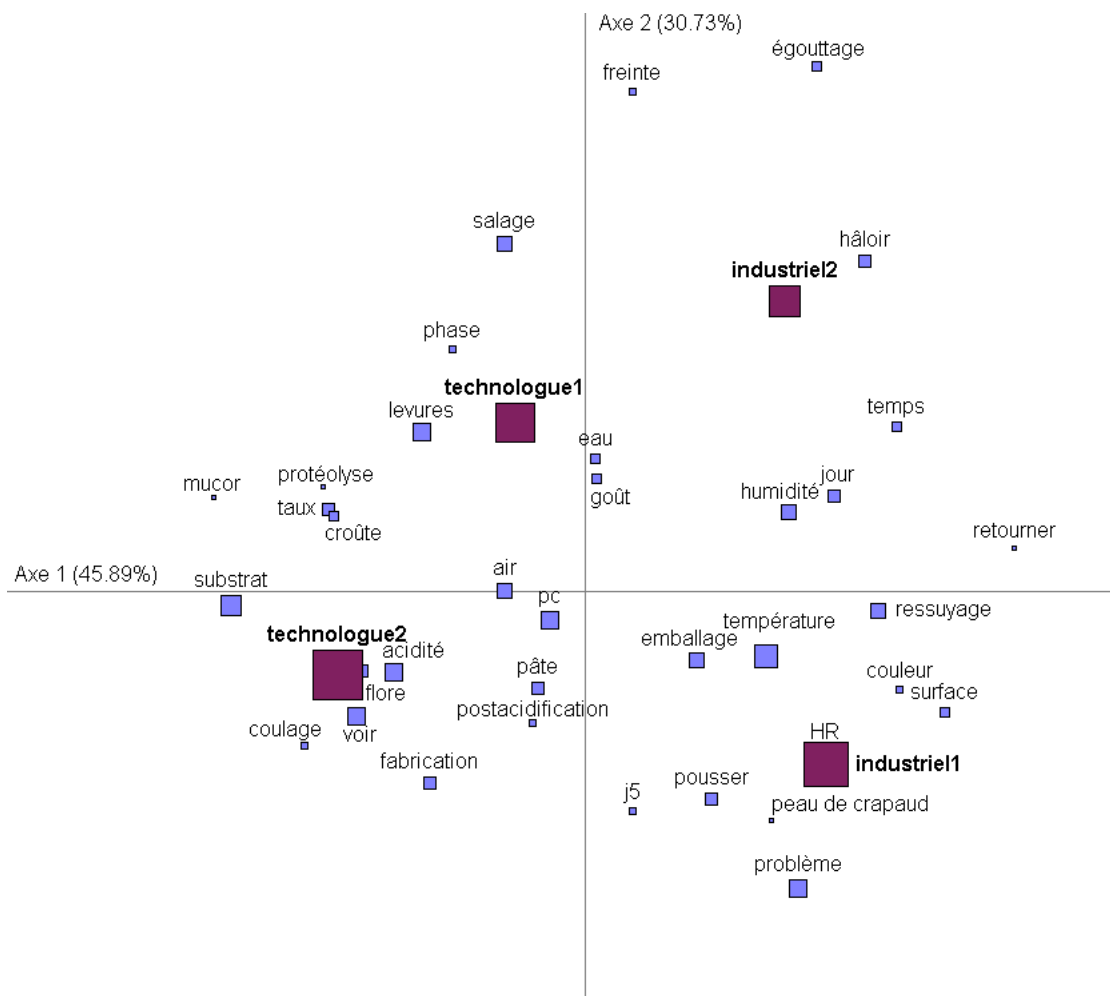


FIGURE 4.6: Analyse factorielle des correspondances représentant les experts interrogés et leur corpus associés

Ce type de représentation est d'un intérêt limité pour un si petit nombre d'experts interrogés mais pourrait être très intéressant si des enquêtes plus importantes étaient menées. Dans une profession encore très artisanale, il pourrait par exemple permettre d'identifier des différences de pratiques entre des artisans produisant des fromages d'une même appellation mais de caractéristiques différentes. Il y a autant de camemberts au lait cru que de camemberts. Dans certaines filières comme

celle du Picodon ou du St Nectaire par exemple cela pourrait permettre d'identifier les différentes pratiques de production soit pour les homogénéiser et répondre à un même cahier des charges type AOC soit pour permettre d'élaborer de nouvelles spécialités en renforçant les particularités des différents producteurs. Au sein d'un groupe industriel, cet outil pourrait permettre de diminuer les variabilités inter-usines.

Une deuxième synthèse des savoirs opérationnels est réalisée par une analyse factorielle des correspondances basée sur les quatre thèmes identifiés précédemment (figure 4.7). L'objectif est de mieux comprendre les différents éléments abordés dans ces thèmes et de voir leurs liens. Le premier axe est surtout représenté par le thème "Travail" c'est à dire le contrôle du procédé avec le contrôle de la température de l'humidité relative du hâloir. L'axe 2 est quand à lui caractérisé par une opposition fabrication fromagère / défauts de l'affinage. Le thème "Évolution" est situé au centre de la carte, il est caractérisé par la "fabrication", le "salage", "l'égouttage" principales étapes de l'affinage, par la "durée" des évolutions de l'affinage. L'évolution semble liée également au "Jour 5" qui est une période cruciale pour l'affinage, à la "pousse" du *Penicillium* qui doit avoir lieu à cette période là. Les aspects liés aux perceptions sensorielles sont présents sur cette carte avec de nombreuses utilisations du verbe "voir", du mot "goût", de "couleur", du mot "pousse" (visualisation de la croissance des levures et du mycélium de *P. camemberti*)

L'analyse lexicométrique permet aussi d'extraire des connaissances expertes des tables d'effectifs réalisées automatiquement par le logiciel Sphinx. Le tableau des noms 4.2 montre l'importance de la température et du *Penicillium camemberti* pour l'affinage de fromage. Des premiers indicateurs du procédé apparaissent avec le "Jour" comme mesure du temps et échelle des interventions, le pH. L'emballage est également fréquemment cité, après vérification dans les textes d'entretiens, il s'est avéré que ce mot est cité en proportion très importante par un seul des experts. Ce résultat met en évidence les limites d'une analyse lexicométrique surtout sur un petit nombre de recueils d'expertises.

TABLE 4.2: Effectifs des noms les plus cités dans les textes des recueils d'expertise.

Noms	Nombre
Température	139
Affinage	112
<i>P. camemberti</i>	107
Jour	94
Fromage	80
pH	49
Emballage	48
Problème	43
Acidification	39
Ressuyage	37
Air	33
Eau	33

Le tableau des segments répétés a également donné des résultats très intéressants 4.3. Ce tableau fait apparaître le langage opératif des experts, les expressions propres à la profession. Ces expressions sont liées aux défauts du camembert, ce sont des descriptions imagées qui permettent de communiquer sans ambiguïté et rapidement autour de ces défauts entre professionnels. La première préoccupation des experts semble être la post-acidification et le coulage sous-croûte (la première étant la cause du second).

L'analyse thématique et l'analyse lexicométrique ont permis d'extraire de premières connaissances des recueils d'expertises sous forme "relativement" objective et synthétique. Il apparaît que les

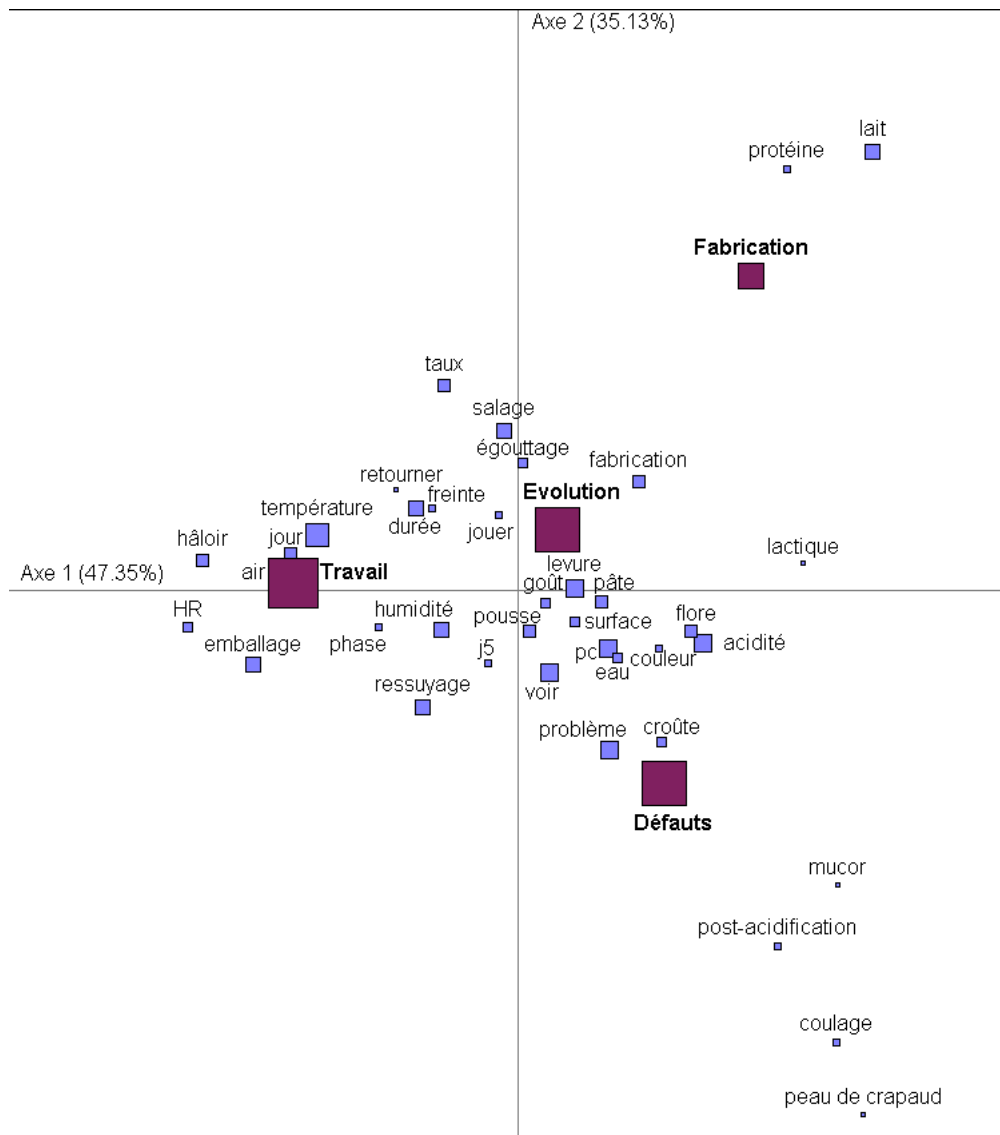


FIGURE 4.7: Analyse factorielle des correspondances basée sur les quatre thèmes principaux du discours

TABLE 4.3: Segments répétés les plus fréquents dans les recueils d'expertise.

Segments répétés	Nombre
post-acidification	27
coulage croûte	13
pousse <i>P.camemberti</i>	12
protéines sérique	12
vitesse d'air	12
peau crapaud	10
pouvoir tampon	10

préoccupations majeures de la profession sont la perte de masse et les problèmes liés à la post-acidification. Les principaux contrôles du procédé sont dans l'ordre la température, la vitesse d'air et l'humidité relative de la chambre d'affinage. Les points cruciaux du procédé sont le ressuyage et la période autour du 5^{ème} jour où une bonne implantation du *Penicillium camemberti* est l'indicateur d'une bonne implantation de l'écosystème microbien. Enfin, les aspects liés aux perceptions sensorielles des experts opérationnels sont au centre de leurs verbalisations. L'analyse lexicométrique nécessite toutefois un retour constant aux textes des entretiens pour une bonne interprétation des résultats. Cet aspect et l'importance des choix de regroupement des mots (dictionnaires) limite l'objectivité de la méthode.

L'analyse des corpus a permis d'avoir une vision globale des connaissances des experts sur le procédé d'affinage du camembert et de vérifier l'importance des perceptions sensorielles pour le contrôle de ce procédé.

4.4.2.2 Formalisation des indicateurs sensoriels

La suite de l'analyse a ensuite été effectuée directement à partir des textes. L'objectif est d'approfondir les connaissances permettant aux experts de contrôler l'affinage. Les mesures instrumentales dont disposaient les experts étaient peu nombreuses : température du hâloir, humidité relative et pH du fromage. D'autres mesures sont effectuées par les fabricants mais les résultats ne sont pas connus dans un temps compatible avec le temps du procédé. Elles ne sont pas utilisées au cours de l'affinage par les experts. Le pilotage de l'affinage se fait donc essentiellement par la surveillance des critères sensoriels.

Cinq critères sensoriels principaux ont été identifiés : l'humidité en surface des fromages, la couleur de la surface, la répartition du mycélium *P. camemberti*, l'évolution de la sous-croûte et l'odeur des fromages. Ces critères ont ensuite été formalisés avec l'expert opérationnel de notre laboratoire du fait de sa disponibilité. Le nom, la définition, le protocole d'évaluation et leur échelle d'évaluation sont présentés tableau 4.4. L'indicateur sensoriel "répartition du mycélium" a été défini comme le pourcentage de la surface du fromage couverte par *P. camemberti*. Ce critère doit être évalué en prenant le fromage par les côtés pour regarder la surface et évaluer la proportion de surface couverte. Enfin, la note doit être reportée sur l'échelle symbolique ordonnée proposant une répartition du mycélium sur moins de 10 % de la surface à plus de 90 % de la surface. Des photos représentatives des différents symboles étaient fournies aux opérateurs pour leur servir de références.

Performance du panel Les performances des quatre opérateurs formés aux indicateurs sensoriels ont été validées. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.5.

TABLE 4.5: Performances des opérateurs pour les indicateurs sensoriels "at-line" : calibration et répétabilité. Pour la calibration la note des opérateurs est comparée à celle de l'expert.

		Opérateur 1	Opérateur 2	Opérateur 3	Opérateur 4
Humidité en surface	Calibration	100%	90%	100%	80%
	Répétabilité	100%	100%	100%	100%
Couleur de la croûte	Calibration	85%	80%	90%	100%
	Répétabilité	90%	100%	90%	100%
Répartition du mycelium	Calibration	85%	80%	85%	100%
	Répétabilité	85%	90%	100%	85%
Taille de la sous-croûte	Calibration	100%	90%	100%	90%
	Répétabilité	100%	100%	100%	100%
Odeur de référence	Calibration	90%	85%	90%	85%
	Répétabilité	100%	85%	100%	100%

TABLE 4.4: Indicateurs sensoriels de l'évolution de l'affinage formalisés avec les experts.

Indicateurs sensoriels	Définition	Protocole d'évaluation	Echelle et références
Humidité en surface	quantité d'eau observée en surface	prendre le fromage par les côtés regarder le fromage en biais évaluer le niveau d'humidité	<p>Pas humide Très humide</p> <p>1 2 3</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
Couleur de la croûte	couleur de la surface des fromages	prendre le fromage par les côtés regarder les zones du fromage non couvertes par le mycelium évaluer la couleur de la croûte	<p>Blanc Marron clair</p> <p>1 2 3 4</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
Répartition du mycelium	% évaluation de la surface couverte par <i>P. c.</i>	prendre le fromage par les côtés regarder la surface du fromage évaluer la proportion de surface couverte par <i>P. camemberti</i>	<p><10% 50% >90%</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
Épaisseur de la sous-croûte	évaluation de la sous-croûte crémeuse	prendre le fromage par les côtés regarder le coeur du fromage évaluer l'épaisseur de la sous-croûte affiné	<p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
Odeur de référence	évaluation de l'odeur en surface du fromage	prendre le fromage par les côtés sentir la surface du fromage évaluer l'odeur par rapport aux odeurs de références	<p>Caille frais Champignon Ammoniac</p> <p>Pomme fermentée</p> <p>1 2 3 4</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>

Les performances des opérateurs ne sont pas homogènes selon les indicateurs sensoriels. L'indicateur taille de la sous-croûte par exemple est une mesure plus simple que la mesure des odeurs. Les odeurs des camemberts sont très complexes et il s'agit pour les opérateurs de déterminer l'odeur dominante parmi l'ensemble des odeurs perçues. Cependant, pour tous les indicateurs les performances estimées pour la calibration et la répétabilité sont supérieures à 80%, limite fixée dans les études précédentes (Ioannou et al., 2002).

4.4.2.3 Formalisation du script d'affinage

Le "script" (voir 4.2.2.3) de l'affinage a également été formalisé avec les experts. Ces connaissances expertes ont été simplifiées pour constituer le modèle de script d'affinage présenté figure 4.8. L'affinage de camemberts semble caractérisé essentiellement par quatre phases. Sur le "radar" sensoriel les phases de l'affinage sont décrites en fonction des indicateurs sensoriels formalisés avec les experts (tableau 4.4).

La première phase est liée à l'étape de ressuyage du camembert, l'humidité de surface doit être contrôlée pour permettre une bonne implantation des flores et les phénomènes de post-acidification doivent être limités. Durant cette phase les experts surveillent l'humidité de surface des fromages (visuellement), le pH en surface et à cœur des fromages ainsi que l'odeur du fromage. Une odeur caractéristique de pomme verte fermentée doit être perceptible. Elle correspond à la croissance de *K. marxianus*. Cette levure est cruciale pour désacidifier la pâte en consommant le lactose. La deuxième phase d'affinage est liée à l'implantation de *G. candidum* et de *P. camemberti*. La croissance de *G. candidum* conduit à une coloration jaune de la surface des fromages auparavant blanche. Puis le mycélium de *P. camemberti* commence à apparaître, l'odeur dominante du fromage est alors celle du champignon de Paris. Au cours de la troisième phase, le fromage est totalement recouvert de mycélium sur ses deux faces et la sous-croûte commence à apparaître. Une odeur typique de camembert est alors perceptible. Aucune précision pour mieux caractériser cette odeur n'a été trouvée dans les entretiens. Pour sa transmission au panel at-line, un fromage couvert de mycélium a été broyé et mis en solution pour créer une référence odeur. Enfin, la quatrième phase est caractérisée par une sous-croûte presque complète, tout le cœur du fromage est protéolysé, et l'odeur de référence utilisée par les experts est celle de l'ammoniac.

4.4.2.4 Agréger les perceptions sensorielles : le programme "Chunk"

Nous avons aussi utilisé ces connaissances recueillies pour construire un ensemble de règles permettant de lier indicateurs sensoriels et phase d'affinage. L'objectif est de diagnostiquer l'état d'affinage à partir des mesures sensorielles. La base de règles a été établie à partir des entretiens et de l'aide fournie par l'expert de notre laboratoire. Elle est présentée tableau 4.6.

La principale difficulté rencontrée a été de déterminer les règles pour la deuxième phase, en effet au 6^{ème} jour d'affinage ont lieu les retournements. Ces retournements ont pour but d'homogénéiser le développement des micro-organismes sur les deux faces des fromages. En effet, la face inférieure en contact avec les supports sont moins en contact avec l'air et le développement des micro-organismes est ralenti. Au 6^{ème} jour, la face supérieure des camemberts commence à se couvrir de mycelium pour un affinage standard tandis que la face inférieure n'est pas du tout couverte.

Les règles d'agrégation du programme "Chunk" ont donc été adaptées à ce phénomène.

TABLE 4.6: Règles d'agrégation pour lier les notes sur les indicateurs sensoriels aux phases de l'évolution de l'affinage.

Indicateurs sensoriels	Echelle d'évaluation	Phase 1	Phase 2 si jour <= 6	Phase 2 si jour >6	Phase 3	Phase 4
Humidité de la surface du fromage	Pas humide Très humide 1 2 3 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	≥ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5
Couleur de la surface de fromage	Blanc Marron clair 1 2 3 4 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	≤ 2	≥ 1.5 & ≤ 3	≥ 1.5 & ≤ 3	≥ 3 & ≤ 4	≥ 3
Répartition du mycélium (Pc) sur la face supérieure	<10% 50% >90% 1 2 3 4 5 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	< 2	≥ 1.5 & ≤ 5	≤ 5	≥ 1.5 & ≤ 4	> 4
Répartition du mycélium (Pc) sur la face inférieure	<10% 50% >90% 1 2 3 4 5 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	< 2	≥ 1.5	≥ 1.5	> 4	> 4
Épaisseur de la sous-couche	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	$= 1$	≥ 1 & ≤ 3	≥ 1 & ≤ 3	≥ 3	≥ 3
Odeur de référence du fromage	Caille frais Champignon Pomme fermentée Ammoniac 1 2 3 4 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	≤ 3	≥ 3 & ≤ 6	≥ 3 & ≤ 3.5	≥ 3.5 & ≤ 4	≥ 4

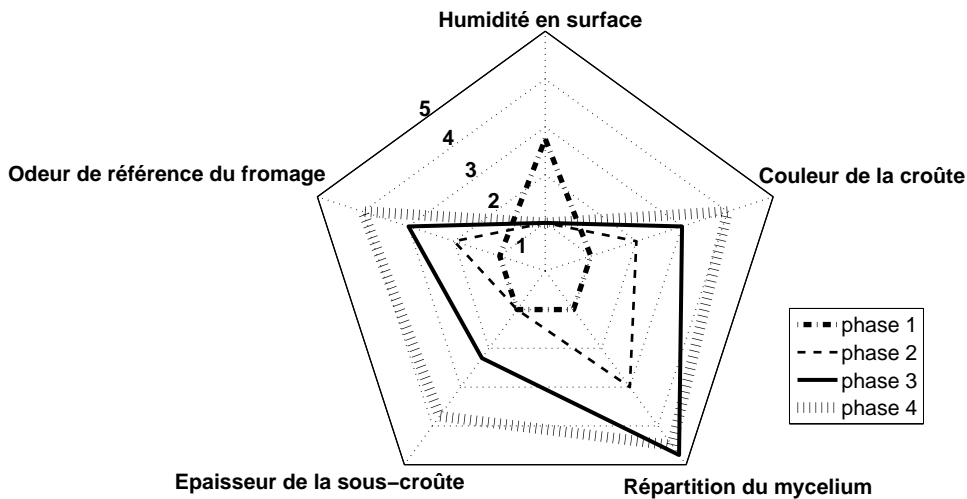


FIGURE 4.8: Essai de modélisation de l'évolution de l'affinage vue par les experts opérationnels. L'affinage est envisagé à son niveau macroscopique.

4.4.3 Suivi des affinages expérimentaux avec les connaissances des experts "opérationnels"

Après avoir recueilli et formalisé les connaissances expertes, nous les avons utilisées pour suivre les essais expérimentaux d'affinage de camemberts dans différentes conditions de température et d'humidité relative.

4.4.3.1 Suivi des cinétiques d'affinage

Les opérateurs formés aux indicateurs sensoriels ont ensuite évalué les fromages affinés selon le plan d'expérience. Les résultats présentés ici sont ceux des affinages a1 (98 %-16 °C), a2 (88 %-16 °C), b1 (98 %-8 °C), b2 (88 %-8 °C), c1 (92 %-12 °C). Les résultats du panel pour ces essais sont présentés figure 4.9. En haut des schémas sont notés les jours d'affinage. Les numéros représentés par des dégradés de gris sont les notes données aux indicateurs sensoriels par les experts, ces notes correspondent aux symboles des échelles présentées tableau 4.4.

Des différences sont nettement visibles d'un affinage à l'autre pour l'ensemble des critères sensoriels. L'humidité en surface des fromages diminue plus rapidement lorsque la température d'affinage est plus élevée (16 °C). De la même manière la coloration jaune beige apparaît plus rapidement pour des fromages affinés à 16 °C. En revanche, en fin d'affinage l'évolution de la croûte vers une couleur marron clair semble plus influencée par les conditions d'humidité relative que par les conditions de température. Le *P. camemberti* couvre plus vite le fromage à température plus élevée. Les conditions d'humidité relative ne semblent pas avoir d'effet sur cette évolution si ce n'est pour les affinages à 8 °C. L'apparition de la sous-croûte ne semble pas influencée par la température, des conditions d'humidité relative élevée paraissent en revanche accélérer sa "croissance". Enfin, en ce

qui concerne les odeurs, les effets des conditions d'affinage n'ont pas d'effet simple. Les odeurs d'ammoniac semblent seulement apparaître plus tôt pour les affinages à 8 °C.

Humidite en surface du fromage

Jours d'affinage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	20	...	27	...	34	...	41	
a1	1	2																			3			
a2	1	2																			3			
b1	1				2							3												
b2	1				2							3												
c1	1				2																			3

Couleur de la croûte du fromage

Jours d'affinage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	20	...	27	...	34	...	41
a1	1					2							3					4					
a2	1					2							3					4					
b1	1							2							3					4			
b2	1							2							3					4			
c1	1							2							3					4			

P.camemberti Repartition du mycelium

Jours d'affinage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	20	...	27	...	34	...	41
a1					1	2	3	4															5
a2					1	2	3	4															5
b1					1				2				3				4					5	
b2					1				2	3				4					5				
c1					1				2	3				4					5				

Taille de la sous-croûte affinée

Jours d'affinage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	20	...	27	...	34	...	41						
a1													1				2				3				4				
a2													1												2			3	
b1													1												2	3	4		
b2													1												2			3	
c1													1												2				3

Cheese main odor

Days of ripening	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	20	...	27	...	34	...	41	
a1					1									2					3					4
a2					1								2							3				
b1					1						2			3					4					
b2					1						2			3					4					
c1					1								2					3					4	

FIGURE 4.9: Evolutions sensorielles “at-line” observée sur les 5 cinétiques de référence. Les jours d'affinage des fromages évalués sont représentés en haut des schémas. Les chiffres en dégradé de gris représentent les notes attribuées aux fromages par les opérateurs .

Les connaissances recueillies auprès des experts permettent donc de suivre au niveau macroscopique les cinétiques d'affinage et de différencier les affinages réalisés à des conditions différentes

d'humidité relative et de température. L'effet humidité relative a un rôle plus important au niveau macroscopique qu'au niveau microbiologique, physique et biochimique, pour lesquelles nous n'avons pas trouvé d'effet de ce facteur (voir section 3.3.2).

4.4.3.2 Agrégation des mesures sensorielles et comparaison aux mesures instrumentales

Pour chacun de ces affinages, les mesures sensorielles du panel ont été agrégées avec le programme à base de règles "Chunk" pour déterminer la phase d'affinage des fromages analysés. La base de donnée ainsi construite comprend pour chaque fromage les mesures instrumentales classiques, les mesures sensorielles et le diagnostic de la phase d'affinage. Les mesures instrumentales sont celles précisées dans la section 3.2.3.3 : pH, concentration en lactose, lactate et micro-organismes *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti*, et *B. aurantiacum*. L'analyse en composantes principales présentée figure 4.10 est identique à celle présentée en section 3.3.3. Sur cette carte les fromages ont été identifiés selon leur phase d'affinage diagnostiquée par le programme "Chunk" à partir des mesures du panel sensoriel at-line.

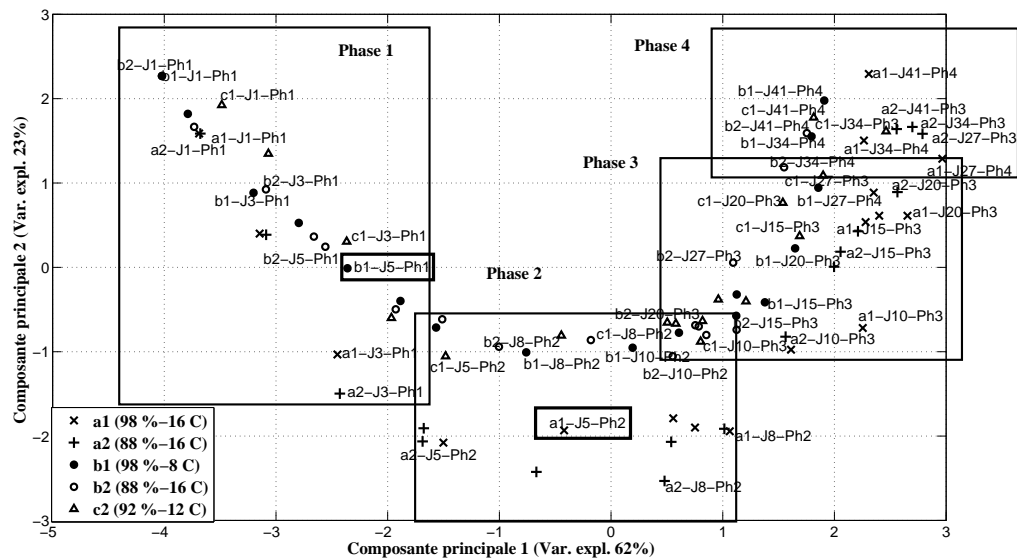


FIGURE 4.10: Analyse en composantes principales basée sur les valeurs de pH et sur la concentration des fromages en lactose, lactate et micro-organismes *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti*, et *B. aurantiacum* des fromages affinés expérimentalement. Chaque fromage a été identifié par sa phase d'affinage (Ph) diagnostiquée à partir du programme à base de règles expertes et des mesures sensorielles du panel at-line. "J" représente le jour de prélèvement et a1, a2, b1, b2, c1 les affinages à différentes conditions d'humidité relative et de température.

Les quatre phases sont dans l'ordre chronologique et n'ont pratiquement pas d'intersections pour quelques échantillons en fin de phase 3 qui se trouvent parmi des échantillons en phase 4 sur la figure. Le suivi de l'affinage à partir d'indicateurs sensoriels donne des résultats apparemment cohérents avec l'évolution de l'affinage suivi par les mesures instrumentales. Nous avons présenté l'exemple des fromages prélevés au jour 5 pour les affinages b1 et a1 et nous avons montré que pour l'échantillon b1-J5 la concentration en substrats carbonnés est encore forte au 5^{ème} jour et *K.marxianus* commence seulement à se développer. La concentration en lactose au 5^{ème} jour a

déjà bien diminué pour l'échantillon a1-J5, *K.marxianus* a fini de croître et *G.candidum* est en pleine croissance. L'effet accélérateur de l'affinage est nettement mis en évidence par cette première visualisation des données. Les mesures sensorielles permettent de détecter une différence entre ces deux fromages, a1-J5 étant classé en phase 2 et b1-J5 en phase 1.

Enfin, cette représentation figure 4.10 permet de visualiser la concordance entre les croissances microbiennes, consommation des substrats et l'évolution des propriétés organoleptiques des fromages. Les mesures sensorielles couplées aux règles de fusion des experts ("Chunck") permettent de capturer les différences de cinétique d'affinage selon les conditions d'affinage expérimentées.

Modélisation empirique de l'évolution organoleptique des camemberts au cours de l'affinage Ces résultats autorisent la construction d'un modèle empirique reliant les mesures instrumentales aux phases d'affinage de camemberts. Ce modèle est un modèle logistique.

Les performances de ce modèle sont présentées dans la matrice de confusion tableau 4.7. La meilleure configuration du modèle prédit correctement l'état d'affinage pour 88 % des fromages des 5 essais expérimentaux. Les performances du modèle se montrent proportionnellement médiocres pour la prédiction de la quatrième et dernière phase d'affinage. Cette mauvaise performance du modèle pourrait être liée à une mauvaise caractérisation de cette phase lors du recueil d'expertise. Cette dernière étape a été relativement moins abordée avec les experts opérationnels car les fromages sont alors au stade de consommation chez les consommateurs et non plus sous leur contrôle.

TABLE 4.7: Matrice de confusion résultant de la validation croisée du modèle logistique. Le modèle a pour objectif de prédire l'évolution organoleptique de l'affinage à partir des mesures instrumentales : concentrations de *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti*, *B. aurantiacum*, lactose, lactate et mesure du pH. Les phases d'affinage estimées à partir des mesures sensorielles des opérateurs sont en colonnes et les phases prédites par le modèle sont en lignes.

Phase d'affinage prédite	Etapas d'affinage estimées par les opérateurs			
	phase 1	phase 2	phase 3	phase 4
phase 1	29	2	0	0
phase 2	0	14	2	0
phase 3	0	5	24	2
phase 4	0	0	3	4

L'expertise perceptive des experts semble avoir été recueillie de manière appropriée. Les connaissances ainsi formalisées permettent de discriminer les différentes conditions d'affinage testées au laboratoire et les cinétiques macroscopique d'affinage obtenues concordent avec les cinétiques au niveau microscopique. Un premier modèle empirique est construit pour prédire l'état d'affinage en fonction du pH, des croissances microbiennes et des concentrations de substrat mesurées.

4.4.4 Recueil d'expertise auprès des chercheurs des procédés fromagers : les "experts scientifiques"

Le recueil de connaissances auprès des experts scientifiques est réalisé à partir des quatre phases identifiées par les experts opérationnels. L'objectif des recueils est de comprendre les mécanismes

principaux de ces quatre phases et de hiérarchiser les phénomènes. Les connaissances des scientifiques ne sont évidemment pas limitées aux éléments qui seront présentés ici.

La description de première phase est par exemple présentée figure 4.11. Les phénomènes caractéristiques de cette phase sont l'activité des bactéries lactiques, la croissance de la levure *K. marxianus* et les transferts de substrats carbonés du coeur vers la surface. Les odeurs utilisées comme références sont confirmées par les scientifiques, les odeurs de fromage frais et de pomme verte fermentée sont caractéristiques des début d'affinage de camemberts. L'aspect des transferts de lactose et lactate du coeur vers la surface est un aspect qui n'a pas été abordé avec les experts opérationnels. Les mécanismes des voies métaboliques non plus. Les contrôles évoqués sont la température et l'humidité relative.

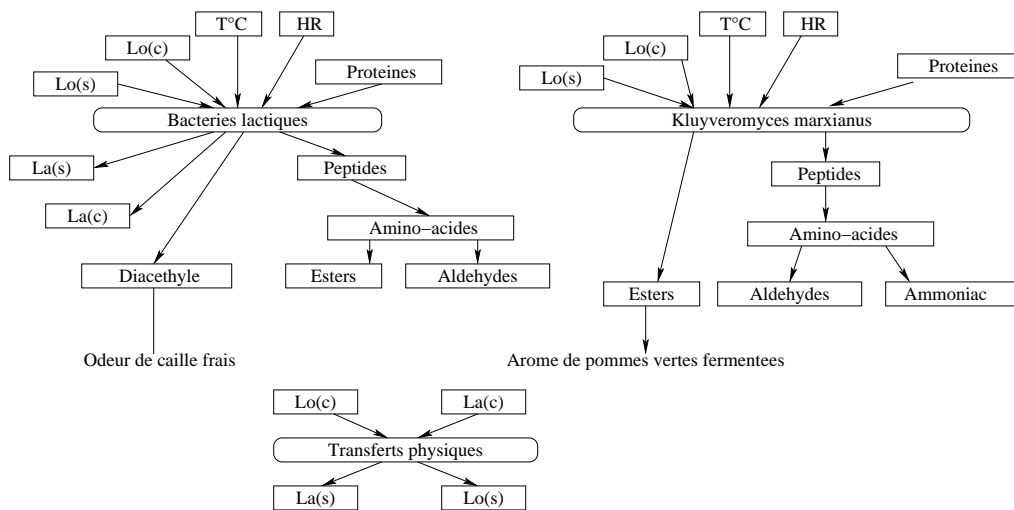


FIGURE 4.11: La première phase d'affinage vue par les experts scientifiques_ représentation simplifiée.

La seconde phase est caractérisée par la croissance de *G. candidum* et *P. camemberti*. L'élément le plus remarquable est l'expression de la composition de l'air en oxygène et dioxyde de carbone comme facteur de contrôle de l'affinage durant cette deuxième phase. L'odeur caractéristique de champignon de Paris est associée à la production de la molécule octen-1-ol-3 après dégradation des acides gras.

La troisième phase correspond à la stabilisation de *G. candidum* et *P. camemberti* et à la croissance de *B. aurantiacum*. Ce micro-organisme pourtant caractéristique des camemberts AOC a été très peu évoqué par les experts opérationnels. L'importance du pH a été soulignée dans cette phase car comme présentée dans la bibliographie *B. aurantiacum* est une bactérie acidosensible. Ensuite, les odeurs de "camembert" décrites par les experts opérationnels sont reliées aux composés soufrés produits par dégradation des protéines. Les experts scientifiques identifient cette odeur comme une odeur de chou. A partir de cette phase les substrats carbonés ont été entièrement métabolisés et la protéolyse et lipolyse deviennent les phénomènes principaux de digestion enzymatique du caillé. La sous-croûte commence alors à apparaître.

La description de la quatrième phase (4.14) a été moins riche, comme cela avait été le cas avec les experts opérationnels. Dans cette phase, les fromages sont emballés et les micro-organismes sont

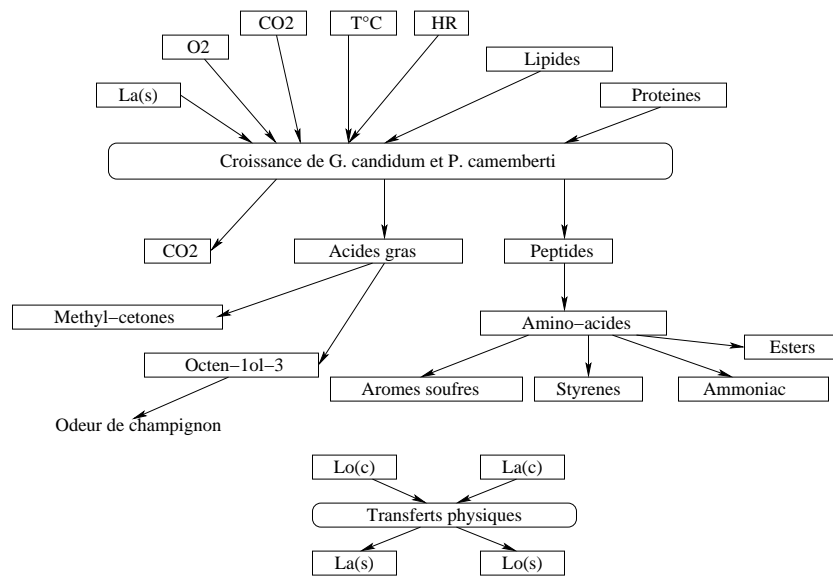


FIGURE 4.12: La seconde phase de l'affinage vue par les experts scientifiques _ représentation simplifiée.

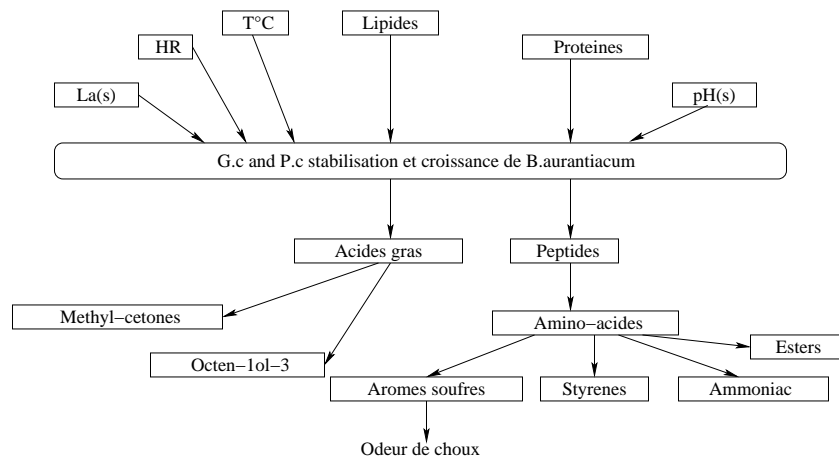


FIGURE 4.13: La troisième phase de l'affinage vue par les experts scientifiques _ représentation simplifiée.

stabilisés. Seule la température est citée comme facteur de contrôle, l'humidité et la composition de l'air étant définies par l'emballage.

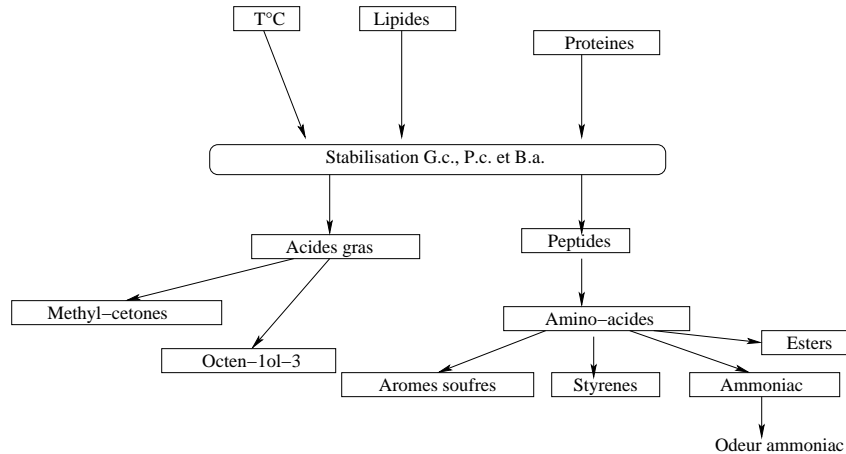


FIGURE 4.14: La quatrième phase de l'affinage vue par les experts scientifiques_ représentation simplifiée.

Les connaissances des experts scientifiques ont surtout permis d'expliquer les liens entre les phénomènes microscopiques et les propriétés organoleptiques des fromages. La simplification et la hiérarchisation des phénomènes de l'affinage sont relativement difficiles à réaliser. Pour de prochaines études il serait intéressant d'identifier des méthodes pouvant faciliter cette démarche, peut être des outils comme les repertory grids par exemple.

4.5 Travaux complémentaires issus du projet INCALIN

Au cours du projet Incalin, nos travaux sur le recueil d'expertise auprès des fromagers et des scientifiques a été utilisé pour construire un modèle représentant les réactions de l'affinage à différents niveaux d'échelle. Ce modèle a été construit par C. Baudrit de l'UMR GMPA en collaboration avec P.H. Wuillemin du Lip6. Nous présentons ici rapidement l'étude pour plus de détails se référer à l'article de Baudrit et al. (2009b).

4.5.1 Un outil intégrateur : les réseaux bayésiens dynamiques

4.5.1.1 Définition des réseaux bayésiens dynamiques

Le cadre mathématique utilisé pour modéliser l'affinage à différents niveaux d'échelle est celui des réseaux bayésiens. Les réseaux bayésiens sont basés sur les travaux de Thomas Bayes datant du 18^{ème} siècle et sont le résultat des travaux de Pearl (1988). L'objectif initial est de prendre en compte l'incertitude dans les systèmes experts. Les avantages des réseaux bayésiens sont multiples. Ils permettent de représenter les connaissances sous forme de graphe d'interaction et de loi de probabilités ce qui rend accessible les liens entre les variables du modèle. Ils sont modifiables simplement

et lorsque de nouvelles connaissances sont disponibles elles peuvent être ajoutées au modèle. Les réseaux bayésiens permettent également de prendre en compte l'imprécision et l'incertitude liées aux connaissances, qu'elles soient issues des bases de données ou des recueils d'expertise.

Les réseaux bayésiens dynamiques sont des réseaux bayésiens classiques dont les noeuds $\{X_i(t), i = 1 \dots N\}$ représentant les variables sont indexés par le temps t . Ils permettent une représentation compacte de la distribution des probabilités jointes P pour un intervalle de temps fini $[1, \tau]$ défini de la manière suivante :

$$P(X(1), \dots, X(\tau)) = \prod_{i=1}^N \prod_{t=1}^{\tau} P(X_i(t) | Pa(X_i(t))) \quad (4.3)$$

où $Pa(X_i(t))$ représente les noeuds parents de $X_i(t)$ et où $P(X_i(t) | Pa(X_i(t)))$ représente les fonctions de probabilités conditionnelles associées à la variable aléatoire $X_i(t)$ sachant $Pa(X_i(t))$.

$X(t) = \{X_1(t), \dots, X_N(t)\}$ est un pas de temps et représente l'ensemble des variables indexées par le même temps. La probabilité jointe $P(X(1), \dots, X(\tau))$ est la croyance à propos des trajectoires possibles du procédé dynamique $X(t)$.

En résumé le graphe représente la structure du modèle et les tables de probabilité ses paramètres. Dans cette étude, la structure est apprise des connaissances expertes et les paramètres des données expérimentales.

Dans cette étude, les lois de probabilités conditionnelles sont apprises directement sur les jeux de données sans à priori sur les connaissances. Elles ne sont pas recueillies auprès d'experts car les jugements humains ne sont pas réellement conformes à la théorie des probabilités (Raufaste et al., 2003, O'Mahony et al., 2006). Il est toujours possible de recueillir des probabilités auprès d'experts mais la validité de ces probabilités est mise en cause.

4.5.1.2 Description du réseau bayésien dynamique modélisant l'affinage de camemberts.

Ce réseau développé par Baudrit et al. (2009a) a permis de coupler les connaissances des experts scientifiques, les connaissances des experts opérationnels et les résultats de la base de données expérimentale. Le modèle obtenu permet de prédire l'évolution de l'affinage du point de vue microscopique (phénomènes microbiologiques, biochimiques, physiques) jusqu'au point de vue macroscopique (propriétés sensorielles). Le modèle est présenté figure 4.15.

4.5.1.3 Model M1 : intégration des connaissances scientifiques

La partie M1 du modèle a été construite à partir des connaissances des experts scientifiques. M1 représente les phénomènes microbiologiques, biochimiques et physiques ayant lieu au cours de l'affinage.

Tous les noeuds ne sont pas liés entre eux alors que de nombreux phénomènes sont en interaction dans l'affinage, ce sont les principaux liens qui sont modélisés. Il est en effet important d'utiliser la connaissance experte pour diminuer le nombre de liens entre les variables. Plus le nombre de liens est important plus le nombre de tables de probabilités à renseigner est important et donc plus les jeux de données (ici expérimentales) doivent être importants. Or nous avons tenté de démontrer

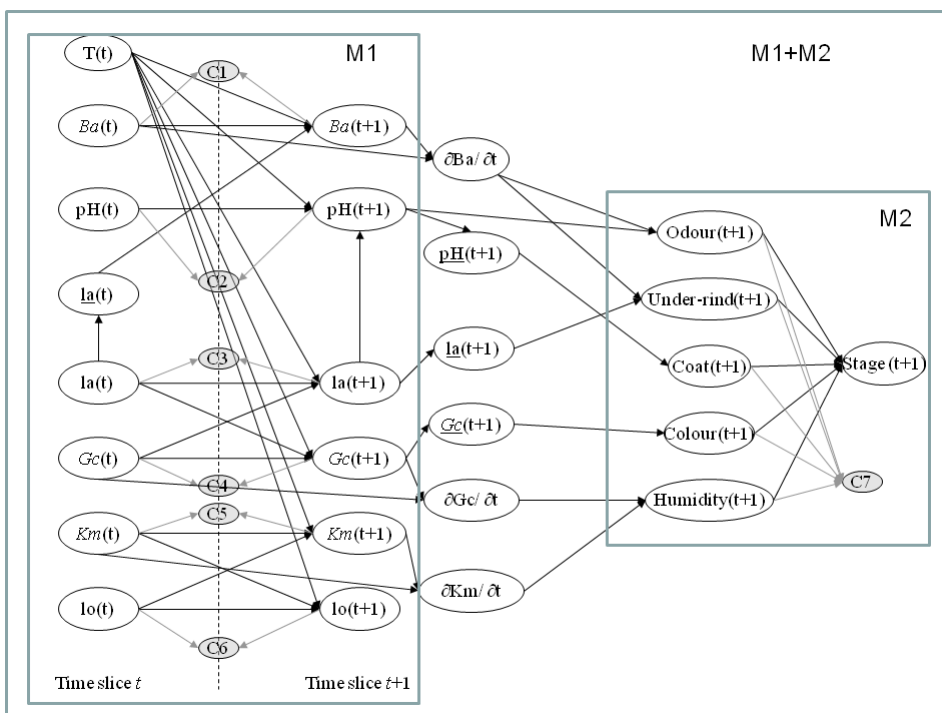


FIGURE 4.15: Réseau Bayésien dynamique représentant les dynamiques de croissance des micro-organismes couplées aux consommations de substrat selon l'influence de la température au cours du procédé d'affinage et leur impact sur l'évolution des propriétés sensorielles.

dans le 1^{er} chapitre qu’acquérir des données sur des procédés aussi complexes que l’affinage peut se révéler très coûteux en moyens et en temps.

Le choix des variables reliées entre elles est effectué à partir des connaissances des scientifiques. Seul les liens principaux sont considérés. En effet, si on observe les figures 4.11, 4.12, 4.13, et 4.14. Il y a un lien fort entre *K. marxianus* et l’évolution du lactose, il y a également un lien fort entre l’évolution du lactate et la croissance de *G. candidum* (4.12) puis avec la croissance de *B. aurantiacum* (4.13). Ces liens apparaissent dans les relations conditionnelles du modèle M1. De la même façon, l’influence de la température évoquée par les scientifiques pour les quatre phases de l’affinage est prise en compte. Le pH quand à lui est principalement conditionné par la concentration en lactate (acide) dans le milieu.

La connaissance des experts scientifiques est également utilisée dans les noeuds contraintes (C1 à C7) toujours avec l’objectif de diminuer le nombre de tables de probabilité à apprendre. Ces noeuds représentent les lois de conservation à propos des activités microbiennes et des consommations de substrat. La concentration en lactose par exemple dans le fromage ne peut que décroître, le lactose n’est pas synthétisé au cours de l’affinage.

La partie M1 du réseau bayésien permet de modéliser l’évolution des principaux phénomènes de l’affinage à l’échelle “microscopique”.

4.5.1.4 Model M2 : intégration des connaissances opérationnelles

La deuxième partie du modèle a été construite à partir des connaissances des experts opérationnels et plus précisément à partir des mesures sensorielles “at-line” effectuées pendant les affinages expérimentaux. Les indicateurs sensoriels ont été reliés aux phases de l’affinage à l’aide d’un classifieur bayésien.

A partir des notes des indicateurs sensoriels le classifieur bayésien permet de connaître la probabilité selon laquelle l’affinage est en phase 1, 2, 3 ou 4. Par exemple, pour fromage dont :

- la surface n’est plus humide (note = 1)
- la couleur est marron clair (note = 4)
- la surface est à moitié couverte par le mycelium (note = 3)
- la sous-croûte est inférieure à 7 mm (note = 1, 2 ou 3)
- l’odeur est “Champignon” (note = 3)

Alors la probabilité d’être en phase 2 est de 66% selon Baudrit et al. (2009b).

4.5.1.5 Le modèle complet : M1 + M2

Les modèles M1 et M2 ont été couplés en partie grâce aux connaissances des experts scientifiques. Par exemple, la phase 3 de l’affinage est caractérisée par la croissance de *B. aurantiacum*. Les principaux substrats dégradés sont les protéines et les lipides. Une odeur typique de “Camembert” apparaît durant cette phase. Or cette odeur typique des composés soufrés est liée à la production de méthanthiol par *B. aurantiacum* (Ferchichi et al., 1986). L’indicateur sensoriel de l’odeur a donc été lié à la variable *B. aurantiacum* par l’intermédiaire du noeud $\partial Ba/\partial t$ caractérisant la vitesse de croissance de cette bactérie.

Les modèles M1 et M2 ont également été associés en tenant compte des corrélations entre les cinétiques microbiologiques, physiques et biochimiques et les cinétiques des indicateurs sensoriels. C’est par exemple le cas de la relation entre les micro-organismes *K. marxianus* et *G. candidum* et l’indicateur “Humidité en surface” des fromages.

Le modèle global M1+M2 permet ainsi de prédire la croissance des principaux micro-organismes de l’affinage *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti* et *B. aurantiacum*, de prédire la consommation des substrats carbonés (lactose, lactate) et l’évolution des propriétés sensorielles des fromages

(humidité et couleur de la surface, croissance du mycélium, évolution de la sous croûte et odeur du fromage).

Ensuite les paramètres du réseau Bayésien dynamique, c'est à dire les tables de probabilités, sont apprises à partir des données de cinq affinages expérimentaux de températures variant entre 8 °C et 16 °C et d'humidité relative variant entre 88 % et 98 %.

Enfin, les performances du modèle sont évaluées en prédisant l'évolution de trois essais non inclus dans la base d'apprentissage. Les résultats obtenus sont présentés dans l'article de Baudrit et al. (2009b). Le taux moyen d'adéquation des prédictions du modèle avec les données expérimentales est de 85%. L'effet température est également bien correctement pris en compte dans le modèle. Celui-ci est capable de prédire des évolutions différentes d'affinage pour des températures différentes de contrôle. Les résultats sont validés car l'erreur entre données simulées et données mesurées est en majorité inférieure aux erreurs de mesures expérimentales.

Le formalisme des réseaux bayésiens a permis d'intégrer différentes formes de connaissances : base de données, connaissances scientifiques, connaissances opérationnelles. Les résultats montrent également qu'il est possible de modéliser un procédé complexe comme l'affinage de camemberts avec de relativement petites bases de données expérimentales en utilisant d'autres sources de connaissance comme les connaissances expertes.

4.6 Conclusions

La maîtrise de la qualité organoleptique des produits est cruciale pour les entreprises agro-alimentaires. L'approche système complexe nous a donc conduit à étudier les cinétiques à ce niveau après avoir examiné le niveau microscopique dans le chapitre précédent.

Capter les cinétiques organoleptiques ne peut se faire à partir d'instruments de mesure. Nous avons essayé d'utiliser les connaissances d'opérateurs experts pour y parvenir.

Des études de contrôle de procédés alimentaires à partir de connaissances expertes avaient déjà été menées avec succès (voir section 4.2.1) et avaient abouti à un certain nombre de questions sur le raisonnement des experts pour le contrôle de procédé.

Nous avons dans cette étude donné de premiers éléments de réponse à ces questions en nous appuyant sur les connaissances développées en psychologie cognitive sur l'expertise. Nous en avons notamment déduit que pour les procédés alimentaires l'expertise perceptive est cruciale.

Dans le cas de l'affinage, les experts disposent de peu d'instruments de mesure adaptés et les qualités organoleptiques des produits doivent être maintenues. Ils privilégient donc leurs perceptions sensorielles pour recueillir de l'information sur l'évolution du procédé et pour prendre des décisions de contrôle.

Après avoir recueilli l'expertise de fromagers à partir des techniques développées en psychologie cognitive nous avons formalisé les savoir-faire "sensoriels" des experts avec la méthode des indicateurs sensoriels (Curt et al., 2004).

Nous avons ensuite utilisé avec succès les connaissances des experts pour suivre les affinages expérimentaux réalisés à différentes conditions de température et d'humidité relative. Les cinétiques étaient différenciées et les effets de la température et de l'humidité relative visible à l'échelle macroscopique. Cela nous a également permis de valider les connaissances expertes car les mesures sensorielles étaient cohérentes avec les mesures instrumentales de microbiologie, physique et biochimie.

Enfin, un premier pas a été réalisé pour relier les phénomènes microbiologiques, physiques et biochimiques aux évolutions organoleptiques. Un modèle logistique est développé et les phases organoleptiques de l'affinage sont bien prédites dans 88% des cas.

Par la suite, des travaux réalisés en parallèle dans le cadre du projet Incalin ont permis d'enrichir ce lien entre les niveaux microscopiques et macroscopiques. L'affinage de camemberts est modélisé à l'aide d'un réseau bayésien dynamique permettant à partir de données d'initialisation de prédire l'évolution des phénomènes micro et macroscopiques.

En conclusion, l'expertise est une voie privilégiée de compréhension et de maîtrise des procédés alimentaires. L'expertise apporte des connaissances sur le procédé à un niveau d'échelle encore peu étudié mais primordial, celui des phénomènes organoleptiques, critères de choix importants des consommateurs.

Dans cette étude, nous avons apporté des connaissances sur les dynamiques aux niveaux microscopiques et macroscopiques de l'affinage de camemberts ce qui devrait permettre à terme de mieux modéliser ce procédé. De plus les modèles des procédés alimentaires peuvent être utilisés pour explorer les comportements complexes de ces procédés et mieux les contrôler. Nous présentons ainsi dans le chapitre suivant la théorie de la viabilité que nous avons utilisée comme cadre théorique pour explorer l'affinage de camemberts à partir d'un modèle mécanistique de l'affinage développé par Helias et al. (2007a).

Chapitre 5

La théorie de la viabilité pour contrôler les procédés alimentaires

Contenu

5.1	Introduction	105
5.2	La théorie de la viabilité	105
5.2.1	Le noyau de viabilité	106
5.2.2	Bassin de capture	108
5.2.3	Problèmes d'optimisation en horizon fini	109
5.2.4	Robustesse d'un système contrôlé	109
5.3	Modélisation et problème de viabilité	110
5.3.1	Un modèle d'affinage de camemberts issu de la littérature	110
5.3.2	Description des problèmes de viabilité et de bassin de capture posés	111
5.3.3	Critères de choix d'une trajectoire viable	117
5.4	Algorithmes et moyens de calcul	119
5.4.1	Approcher le bassin de capture par le bassin de capture exact d'un modèle discret en espace	119
5.4.2	L'algorithme	120
5.4.3	Evaluation des critères d'optimisation dans le modèle discret en espace	122
5.4.4	Algorithme de détermination de la trajectoire optimale	124
5.4.5	Simulation haute performance	125
5.5	Résultats	128
5.5.1	Résultats de l'algorithme	128
5.5.2	Description de la trajectoire optimisée	128
5.5.3	Test de la trajectoire en hâloir pilote	128
5.6	Travaux complémentaires issus du projet INCALIN	135
5.6.1	Premiers résultats et futures analyses de robustesse pour mieux contrôler le procédé	135
5.6.2	Un système d'aide à la décision pour l'affinage?	136
5.7	Conclusion	137

5.1 Introduction

L'affinage est un procédé alimentaire complexe difficile à contrôler car cela implique de maîtriser l'ensemble des variables en interactions à différents niveaux d'échelle spatio-temporelles.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, une première méthode recueille les connaissances des experts mais celles-ci sont en général limitées aux conduites connues et appliquées en usine. D'autres conduites sont peut être possibles mais n'ont pas été expérimentées du fait des risques encourus, du manque de temps, et de l'impossibilité de tester tous les contrôles possibles...

Pour explorer les évolutions des systèmes dynamiques complexes, la communauté des systèmes complexes utilise une méthode développée dans les années 1990 donc relativement nouvelle, la théorie de la viabilité. Cette théorie évalue la compatibilité des évolutions du système avec les contraintes sur les états. Le domaine de compatibilité est défini comme l'ensemble "viable" du système.

Dans le cadre d'un procédé alimentaire, l'objectif est d'assurer la pérennité du procédé jusqu'à atteindre la "cible qualité" fixée et de respecter tout un ensemble de contraintes opérationnelles. Le cadre théorique de la théorie de la viabilité permet d'expérimenter virtuellement des conduites du procédé à partir de modèles comme par exemple, ceux présentés dans le chapitre 3 pour l'affinage. Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle d'affinage de camemberts développé en 2007 par Helias et al. (2007a).

Une fois l'ensemble des évolutions viables déterminées, le cadre de la théorie de la viabilité permet de mener d'autres analyses. La première est une recherche d'évolution optimale. Un exemple simple d'optimisation est traité au moyen d'une fonction de coût linéaire, mais les mêmes méthodes et outils peuvent être appliqués à des fonctions de coûts non-linéaires.

Le second type d'analyse est une analyse de robustesse du procédé. En effet, la connaissance de l'ensemble des trajectoires viables permet d'étudier, en tout point de l'espace des états, la distance à la frontière du domaine de viabilité et donc d'avoir une mesure de la robustesse face à d'éventuelles perturbations. Dans les méthodes classiques de contrôle optimal, la robustesse est évaluée de manière probabiliste (voir par exemple Trelea et al., 2004). Dans cette étude, la robustesse est évaluée en fonction de la proportion de contrôles viables. Toutefois, nous présentons également les études géométriques de robustesse réalisées par nos partenaires sur l'affinage de camemberts. Les résultats nous semblent importants pour démontrer tout le potentiel de la théorie de la viabilité pour contrôler les procédés alimentaires.

Dans le premier chapitre de cette partie nous nous attachons à présenter la théorie de la viabilité. Dans le deuxième chapitre nous décrivons les problématiques de la conduite d'affinage et leur formalisation dans le cadre de la théorie de la viabilité. Enfin, nous présentons l'algorithme, les résultats obtenus et notamment une trajectoire optimisée de contrôle de l'affinage. Cette trajectoire a été validée en hâloir pilote, les résultats sont eux aussi présentés dans la troisième partie. La quatrième partie est consacrée à l'étude complète de la robustesse dans le domaine de viabilité selon des méthodes géométriques. Enfin, nous discutons l'intérêt de la viabilité pour le contrôle des procédés alimentaires.

5.2 La théorie de la viabilité

La théorie de la viabilité définie par Aubin (1991) s'intéresse à l'évolution de l'état d'un système contrôlé, gouverné par des dynamiques non-déterministes et soumis à des contraintes. Elle étudie particulièrement la compatibilité entre ces dynamiques et ces ensembles de contraintes en dehors desquels le système meurt ou ses évolutions ne sont pas souhaitables. Elle détermine également

l'ensemble des contrôles qui permettent d'empêcher le système de violer ces contraintes. Depuis le début des années 1980, des mathématiciens du Centre de Recherche Viabilité, Jeux et Contrôles ont démontré les théorèmes de la viabilité qui permettent d'obtenir des procédures de sélection d'évolutions viables¹.

Comme souligné par Garcia et al. (2006) l'étude des problèmes de contrôle dynamique, non linéaires et très contraints est souvent très difficile. La théorie de la viabilité est un cadre mathématique adapté à ce type de problématique. L'objectif est d'offrir une boîte à outils permettant l'étude de l'évolution de systèmes. Elle permet de repérer les conditions dans lesquelles les contraintes opérationnelles seront toujours satisfaites ou satisfaites jusqu'à atteindre une cible en temps fini. La théorie de la viabilité a pour but de contrôler les systèmes dynamiques en préservant certaines propriétés du système plutôt que de définir les états stables possibles et les points d'équilibre.

La théorie de la viabilité a été appliquée dans plusieurs domaines mais jamais à notre connaissance aux procédés alimentaires. Aubin et al. (2001) étudient les conditions de pérennité du système de retraites. Le système modélisé est composé des actifs et des inactifs, la dynamique tient compte du fait qu'une partie du revenu des actifs est versée aux retraités. Des questions d'équité et de pouvoir d'achat constituent les contraintes. Le noyau de viabilité de l'ensemble de ces contraintes est composé des états à partir desquels le système des retraites est viable (les actifs comme les retraités ont un pouvoir d'achat suffisant, garanti).

A partir des équations classiques de Lotka-Volterra, Bonneuil et Mullers (1997) modélisent plusieurs jeux dynamiques entre prédateurs et proies liés à des ensembles de contraintes différents en fonction des objectifs : soit leur viabilité individuelle, soit leur coexistence. Ils étudient les rétroactions qui permettent au système de rester dans ces ensembles de contraintes. Le terme d'interaction dans ce modèle proie-prédateur de Lotka-Volterra produit des solutions dans lesquelles deux espèces coexistent. Bonneuil (2003) étudie les conditions que le terme d'interaction (ou fonction de correction) doit satisfaire pour que la coexistence soit possible, autrement dit, pour que l'ensemble des états où les deux espèces coexistent soit un domaine de viabilité. Il montre que la fonction de correction proposée par Lotka-Volterra est l'une de celles qui satisfont ces conditions.

Pour étudier un modèle dynamique lié à la gestion de ressources renouvelables, Béné et al. (2001) utilisent les concepts de la théorie de la viabilité pour déterminer, lorsque cela est possible, les options de gestion à choisir pour garantir la pérennité du système. Ils soulignent, en particulier, les configurations de surexploitation irréversible conduisant à l'extinction de cette ressource. Dans la même perspective, Mullon et al. (2004) et Chapel et al. (2008) suivent une approche de type viabilité pour modéliser des écosystèmes marins. Ils montrent comment le noyau de viabilité peut être utilisé pour définir les quotas de pêche en fonction de l'évolution des ressources. Martin (2004) utilise la théorie de la viabilité pour évaluer la résilience d'un système, c'est à dire sa capacité à retrouver certaines propriétés après de fortes perturbations.

Enfin, la théorie de la viabilité a été appliquée à la gestion de flux automobiles sur autoroutes (Aubin et al., 2005), au domaine de la finance (Bonneuil, 2004) ou de la sociologie (Bonneuil, 2000).

Notre objectif est d'appliquer la théorie de la viabilité à l'affinage de fromage, c'est à dire au maintien de la viabilité de l'écosystème fromager.

5.2.1 Le noyau de viabilité

Le noyau de viabilité est un concept essentiel de la théorie de la viabilité. Etant donné un système dynamique, discret ou continu, et un ensemble K défini par un ensemble de contraintes, il n'est pas certain qu'à partir d'un point initial $x_0 \in K$, il existe une solution du système dynamique qui

1. L'association LASTRE a été créé pour valoriser les innovations mathématiques et algorithmiques de la Théorie de la Viabilité. Laboratoire d'Applications des Systèmes Tychastiques Régulés (LASTRE), <http://lastre.asso.fr>

reste toujours dans K . La théorie de la viabilité analyse la compatibilité entre les dynamiques et l'ensemble des contraintes sur les états. L'ensemble des points de K à partir desquels est issu au moins une solution qui ne sort jamais de K est appelé "noyau de viabilité".

Précisément, soit $X \subset \mathbb{R}^n$ l'espace des états du système (l'état du système, x , appartient à un espace vectoriel X de dimension finie). L'état du système évolue. Dans le cas continu en temps, son évolution est décrite par $x : t \rightarrow x(t)$ pour $t \in R_+ := [0, +\infty[$, dans le cas discret par $(x^n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Plaçons-nous dans le cas continu et supposons que l'évolution de l'état du système dépend de cet état, mais qu'elle peut également être influencée par des actions extérieures appelées contrôles. L'évolution de l'état du système est donc gouvernée par un système dynamique contrôlé de la forme :

$$\begin{cases} x'(t) = f(x(t), u(t)) & (action) \\ u(t) \in U(x(t)) & (retroaction) \end{cases} \quad (5.1)$$

prenant en compte le fait que les différents contrôles u qui peuvent intervenir au temps t appartiennent à un ensemble $U(x(t))$ qui dépend de l'état du système au temps t . Soit $Y \subset \mathbb{R}^p$ l'espace des contrôles (le contrôle u appartient à un espace vectoriel de dimension finie, p), la correspondance $U : X \rightsquigarrow Y$ décrit les contraintes sur les contrôles dépendant de l'état.

Une solution du système (5.1) est une évolution $t \rightarrow x(t)$ telle qu'il existe une fonction de contrôle mesurable $t \rightarrow u(t)$ telle que les conditions de (5.1) soient vérifiées presque partout. Partant d'un point initial donné $x_0 \in X$, il peut exister plusieurs évolutions possibles correspondant aux différents contrôles opérés au cours du temps $t \rightarrow u(t)$. La correspondance S_c associée à tout état initial $x \in X$ le sous-ensemble $S_c(x) \subset C(0, \infty; X)$ des solutions de (5.1) issues de x .

Dans le cas discret, un système contrôlé est décrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} x^{n+1} = f(x^n, u^n) & (action) \\ u^n \in U(x^n) & (retroaction) \end{cases} \quad (5.2)$$

Une solution du système (5.2) est une évolution $(x^n)_{n \in \mathbb{N}} \in X^{\mathbb{N}}$ telle qu'il existe une suite de contrôles $(u^n)_{n \in \mathbb{N}} \in Y^{\mathbb{N}}$ telle que les conditions de (5.2) soient vérifiées pour tout $n \in \mathbb{N}$. Partant d'un point initial donné $x_0 \in X$, il peut exister plusieurs évolutions possibles correspondant aux différents contrôles opérés. Comme dans le cas continu, on peut définir une correspondance S_d qui à tout état initial $x \in X$ associe le sous-ensemble $S_d(x) \in X^{\mathbb{N}}$ des solutions de (5.2) issues de x .

Soit maintenant $K \subset X$ un ensemble de contraintes. Aubin (1991) définit le concept d'évolution viable dans un ensemble de contraintes $K \subset X$, comme une évolution dont la trajectoire est contenue dans K :

$$\forall t \geq 0, x(t) \in K \quad (5.3)$$

dans le cas continu et

$$\forall n \in \mathbb{N}, x^n \in K \quad (5.4)$$

dans le cas discret.

Un ensemble K est viable si pour tout $x \in K$, il existe une solution de (5.1) dans le cas continu partant de x et viable dans K :

$$\forall x \in K \exists x(\cdot) \in S_c(x) \mid \forall t \geq 0, x(t) \in K \quad (5.5)$$

De même, un ensemble K est viable si pour tout $x \in K$, il existe une solution de (5.2) dans le cas discret partant de x et viable dans K :

$$\forall x \in K \exists (x^n)_{n \in \mathbb{N}} \in S_d(x) \mid \forall t \geq 0, x^n \in K \quad (5.6)$$

Cependant, K n'est pas nécessairement viable. Le noyau de viabilité, noté $Viab_{f,U}(K, T)$ (resp. $Viab_{f,U}(K, N)$), est le sous-ensemble de K qui contient tous les états pour lesquels au moins une fonction de contrôle $u(t)$, $t \in [0, T]$ (resp $(u^n)_{n \in [0, N]}$) existe de manière à ce que l'état du système reste dans K pour t appartenant à $[0, T]$ (resp pour $n \in \{0, \dots, N\}$) avec T fini ou non (resp N fini ou non) dans le cas continu (resp dans le cas discret).

Dans le cas continu, le noyau de viabilité est ainsi défini par :

$$Viab_{f,U}(K, T) := \{x \in K \mid \exists x(\cdot) \in S_c(x), \forall t \in [0, T], x(t) \in K\} \quad (5.7)$$

et dans le cas discret :

$$Viab_{f,U}(K, N) := \{x \in K \mid \exists (x^n)_{n \in \mathbb{N}} \in S_d(x), \forall n \in [0, N], x^n \in K\} \quad (5.8)$$

Toutefois pour pouvoir définir un noyau de viabilité, dans le cas continu le système contrôlé doit être de type Marchaud. Les conditions suivantes sont suffisantes soient $U : X \rightsquigarrow Y$ et $f : X \times Y \rightarrow X$. (U, f) est un système contrôlé Marchaud si $Graph(U)$ est fermé, f est continue, f et U ont des croissances linéaires et les ensembles $\{f(x, u) \mid u \in U(x)\}$ sont convexes pour tout $x \in \text{Dom}(U)$. Le domaine d'une fonction multivoque U est défini par $\text{Dom}(U) := \{x \in X \mid U(x) \neq \emptyset\}$. Dans le cas discret, la convexité des ensembles $\{f(x, u) \mid u \in U(x)\}$ n'est pas requise.

5.2.2 Bassin de capture

Un autre problème couramment traité en théorie de la viabilité est la recherche de l'ensemble des trajectoires respectant les contraintes et atteignant une cible $C \subset X$ en un temps fini. Cette variante des problèmes de viabilité est appelée bassin de capture qui sera noté dans le cas d'un problème continu $Capt_{f,U}(K, C)$, avec :

$$Capt_{f,U}(K, C) = \{x \in K \mid \exists x(\cdot) \in S_c(x), \exists t^* > 0, x(t^*) \in C, \forall t \in [0, t^*], x(t) \in K\} \quad (5.9)$$

La variable t^* représente le temps auquel la cible est atteinte. L'évolution $x(\cdot)$ reste dans l'ensemble des contraintes K jusqu'à atteindre la cible.

Dans le cas d'un problème discret :

$$Capt_{f,U}(K, C) = \{x \in K \mid \exists (x^n)_{n \in \mathbb{N}} \in S_d(x), \exists N^* > 0, x^{N^*} \in C, \forall n \in \{0 \dots N^*\}, x^n \in K\} \quad (5.10)$$

La Figure 5.1 est une illustration d'un tube de viabilité (bord noir intérieur blanc) dans un espace d'états à deux variables X_1, X_2 au cours du temps t , le bassin de capture pour atteindre la cible C est colorié en gris. Une trajectoire particulière atteignant cette cible est tracée en noir. Appliqué à l'affinage de Camembert, le temps 0 de cet exemple serait le début d'affinage, t_f le temps auquel le fromage sort du hâloir et est emballé et la cible C serait la cible qualité à atteindre.

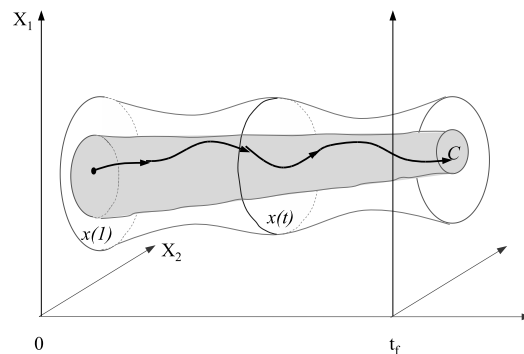


Figure 5.1: Représentation d'un noyau de viabilité (bord noir intérieur blanc) dans l'espace de deux variables d'état X_1 et X_2 , d'un bassin de capture (gris), de la cible C et d'une trajectoire qui atteint cette cible (noir).

5.2.3 Problèmes d'optimisation en horizon fini

L'ensemble des évolutions qui permettent de respecter les contraintes tout en atteignant la cible est déterminé grâce au noyau de viabilité ou au bassin de capture. Parmi ces évolutions, il est intéressant de pouvoir en trouver une qui soit optimale selon des critères prédéfinis. Une fonction de coût peut être associée à une évolution $x(\cdot)$ et le calcul peut être considéré comme une extension du problème du bassin de capture.

Aubin et Frankowska (1996) ont étudié les problèmes d'optimisation en horizon infini et ont montré que le calcul des fonctions associant à chaque état du système son coût se ramène à un problème de bassin de capture dans un espace augmenté d'une dimension (celle du coût). Cette démonstration a été utilisée par Martin (2004) pour calculer les valeurs de résilience dans des modèles d'eutrophisation.

Pour l'affinage de camemberts, le problème est similaire mais il s'agit d'optimisation en horizon fini.

Coupler l'optimisation au calcul du bassin de capture permet de garantir la viabilité de la solution d'une part, d'autre part, en cas de dérive du procédé, cela permet de proposer une nouvelle évolution viable atteignant la cible compte tenu de cette dérive sans avoir besoin de faire de nouveaux calculs.

5.2.4 Robustesse d'un système contrôlé

L'intérêt de l'utilisation de la théorie de la viabilité pour étudier un système contrôlé est qu'elle permet de déterminer le domaine de viabilité et donc ses frontières. Il est alors possible de définir les zones de sensibilité aux perturbations et donc d'étudier la robustesse. Si un point est considéré comme viable c'est qu'il existe au moins une fonction de contrôle qui permet au système d'évoluer en restant dans l'ensemble des contraintes. Cependant, chaque situation viable peut être plus ou moins sensible aux perturbations.

Dans cette étude, utilisant un modèle discret en temps du processus d'affinage de camemberts, la robustesse est envisagée de deux manières. Une première mesure de la robustesse en un état appartenant au bassin de capture est basée sur l'ensemble des contrôles viables. Notre étude est

surtout basée sur ce travail (cf. section 5.3.3.1). Une deuxième étude de robustesse a été menée en collaboration avec nos partenaires du Lip6 et de l'ISC, nous en expliquons les principes et montrons les principaux résultats dans le dernier chapitre de cette partie.

5.3 Modélisation du processus d'affinage de camemberts et description des problèmes de viabilité

L'objectif est de déterminer l'ensemble des évolutions, des contrôles d'un processus d'affinage de camemberts qui conduisent à une cible qualité attendue. Les concepts et outils de la théorie mathématique de la viabilité décrits dans le chapitre 5.2 ont été utilisés pour cela.

Dans ce chapitre nous allons poser les problèmes de viabilité et de bassin de capture dont les solutions sont les évolutions que nous recherchons. Nous nous basons sur un modèle d'affinage de camemberts issu de la littérature.

5.3.1 Un modèle d'affinage de camemberts issu de la littérature

5.3.1.1 Les équations

Le modèle d'affinage utilisé est celui développé en 2007 par Helias et al.. Ce modèle mécanistique décrit les dynamiques de perte de masse des camemberts au cours de l'affinage et les changements de température en surface des fromages (Eq. 5.11 et 5.12) :

$$\frac{dm}{dt} = s \{w_{o_2} \cdot r_{o_2} - w_{co_2} \cdot r_{co_2} - k [a_w \cdot p_{sv}(T_s) - rh \cdot p_{sv}(T_\infty)]\} \quad (5.11)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{s}{m \cdot C} \left\{ h(T_\infty - T_s) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) - \lambda k [a_w \cdot p_{sv}(T_s) - rh \cdot p_{sv}(T_\infty)] + \alpha \frac{r_{o_2} + r_{co_2}}{2} \right\} \quad (5.12)$$

t représente le temps, m la masse du fromage en (kg) et s sa surface en (m^2). C représente la chaleur spécifique du fromage ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).

Dans ce modèle la perte de masse est liée

1. à l'évaporation de l'eau :

$$\phi_w = \lambda k [a_w \cdot p_{sv}(T_s) - rh \cdot p_{sv}(T_\infty)] \quad (5.13)$$

Dans cette équation, T_s et T_∞ représentent respectivement la température en surface d'un camembert et la température dans le hâloir exprimées en degré Kelvin (K). La pression de vapeur saturante est notée p_{sv} et exprimée en Pascal (Pa). a_w nombre sans dimension représente l'activité de l'eau du fromage, c'est à dire sa capacité à libérer de l'eau. rh est l'humidité relative du hâloir. Enfin, k est le coefficient moyen de transfert d'eau en $kg.m^{-2}.Pa^{-1}.s^{-1}$. λ est la valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$).

2. aux flux convectifs et radiatifs :

$$\psi_{cr} = h(T_\infty - T_s) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) \quad (5.14)$$

h est le coefficient moyen de transfert de chaleur par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$), ε est l'émissivité du fromage (sans dimension), σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($W.m^{-2}.K^{-4}$) pour la puissance totale rayonnée par unité de surface.

3. à l'activité respiratoire des microorganismes :

$$\begin{cases} r = \alpha \frac{r_{O_2} + r_{CO_2}}{2} \\ p_c = w_{O_2} \cdot r_{O_2} - w_{CO_2} \cdot r_{CO_2} \end{cases} \quad (5.15)$$

r_{CO_2} est le taux de production de dioxyde de carbone et r_{O_2} le taux de dioxygène consommé. α est la chaleur dégagée par la respiration lors de la production d'1 mol de dioxyde de carbone ($J.mol^{-1}$). Les paramètres w_{O_2} et w_{CO_2} sont la masse molaire ($kg.mol^{-1}$) respectivement du dioxygène et du dioxyde de carbone.

5.3.1.2 Validation et sensibilité du modèle

Le modèle d'affinage de camemberts d'Helias et al. (2007a) est validé sur deux essais en hâloir pilote. La température, l'humidité relative et les concentrations en dioxygène et dioxyde de carbone sont continuellement mesurées. Après les essais, les enregistrements de ces mesures sont utilisés pour prédire la perte de masse du fromage et sa température de surface au cours de l'affinage. La perte de masse et la température de surface ainsi calculées sont ensuite comparées aux données d'un fromage, mesurées pendant l'essai (poids : balance Precisa, température : thermocouples).

Pour ces simulations, nous faisons l'hypothèse de départ que l'activité de l'eau des fromages, a_w , ne varie pas au cours de l'affinage et que le gradient de température à l'intérieur du fromage est négligeable. Seul le coefficient de transfert de chaleur h est ajusté aux données.

Les erreurs relatives sont respectivement de 1.9 % et 3.2 % pour la perte de masse et la vitesse de perte de masse. Les variations sur les contrôles (humidité relative et température dans les hâloirs) ont été modélisées avec succès.

Helias et al. (2007c) et Baudrit et al. (2007) ont ensuite mené une étude de sensibilité de ce modèle. Cette étude a conclu à une haute sensibilité aux mesures d'humidité relative et de composition atmosphérique (CO_2 , O_2). L'impact d'erreurs de mesure de la température du hâloir sur les résultats est très faible. L'effet des erreurs d'estimation sur les paramètres a également été évalué. Le modèle est très sensible aux erreurs sur le coefficient de transfert de chaleur h . Dans leur premier article, les auteurs soulignent que ce paramètre est dépendant des vitesses d'air appliquées dans le hâloir d'une part. Et d'autre part, ils mettent en évidence la difficulté de mesurer les vitesses d'air dans les hâloirs du fait de leur lenteur.

Les performances de ce modèle d'affinage sont limitées de deux points de vue : les difficultés liées au coefficient de transfert de chaleur h et le recours aux mesures en ligne en continu pour les éléments de respiration r_{CO_2} et r_{O_2} ce qui rend le modèle non autonome.

5.3.2 Description des problèmes de viabilité et de bassin de capture posés

Un problème de viabilité est décrit par une dynamique contrôlée et un ensemble de contraintes. La solution, le noyau de viabilité, rassemble tous les états à partir desquels il existe une suite de contrôles qui permet de respecter les contraintes (section 5.2.1).

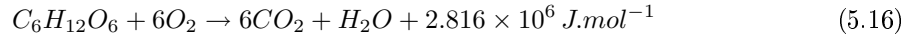
Un problème de bassin de capture est décrit par une dynamique contrôlée, un ensemble de contraintes et une cible. La solution, le bassin de capture, rassemble tous les états à partir desquels il existe au moins une suite de contrôles qui permet d'atteindre la cible en temps fini tout en respectant les contraintes (section 5.2.2).

5.3.2.1 Description de la dynamique : modifications du modèle d'affinage d'Helias et al. (2007a)

Le modèle du processus d'affinage d'Helias et al. (2007a) comporte deux variables d'état, la masse du camembert, m , et la température de surface du camembert, T_s .

Les variations de ces variables d'état au cours du temps, $\frac{dm}{dt}(t)$ et $\frac{dT_s}{dt}(t)$, décrites par les équations (Eq. 5.11) et (Eq. 5.12), dépendent des valeurs des variables, $m(t)$ et $T_s(t)$, de la respiration $r_{O_2}(t)$ et $r_{CO_2}(t)$, de la température ambiante $T_\infty(t)$ et de l'humidité relative $rh(t)$ et de paramètres constants, s , w_{O_2} , w_{CO_2} , k , a_w , p_{sv} , C , h , ϵ , σ , λ et α .

La quantité $r_{O_2}(t)$ se déduit facilement de la quantité $r_{CO_2}(t)$ dans le modèle d'Helias et al. (2007b) car la consommation des substrats (lactose, lactate) par voie oxydative est représentée de manière simplifiée sur la base de l'équation de respiration du glucose :



La consommation de dioxygène est équimolaire à la libération de dioxyde de carbone, c'est à dire qu'aux erreurs de mesure près $w_{O_2} \cdot r_{O_2} = w_{CO_2} \cdot r_{CO_2}$. Nous avons donc simplifié le modèle en ne prenant en compte que la libération du dioxyde de carbone pour lequel nous disposons de mesures expérimentales plus fiables.

L'énergie libérée par la respiration participe à l'échauffement de la surface du fromage $T_s(t)$.

Dans ce modèle donc, cinq quantités varient : $m(t)$, $T_s(t)$, $r_{CO_2}(t)$, $T_\infty(t)$ et $rh(t)$. Les deux dernières peuvent être contrôlées par un opérateur, ce sont donc des contrôles dans la terminologie de la théorie de la viabilité. Les variables d'état décrivant l'état du fromage durant le processus d'affinage et dont les variations sont non linéaires et interdépendantes sont donc au nombre de trois : $m(t)$, $T_s(t)$ et $r_{CO_2}(t)$.

Le modèle d'Helias et al. (2007a) donne les équations de variation de $m(t)$ et $T_s(t)$, mais pas de $r_{CO_2}(t)$. En effet, ils utilisent dans leur modèle des valeurs mesurées de la respiration. Un modèle de la respiration a donc été développé pour notre analyse de viabilité, nous le décrivons dans la sous-section 5.3.2.1.

Discrétisation en temps du modèle La résolution approchée de problèmes de viabilité ou de bassins de capture continus en temps et en espace se fait à partir de résolutions exactes de problèmes associés discrets en temps et en espace. En effet, Saint-Pierre (1994) montre que lorsque les pas d'espace h et de temps ρ tendent vers 0 avec $\frac{h}{\rho}$ tendant vers 0, alors les noyaux et bassins de capture discrets tendent vers le noyau et le bassin de capture du problème continu.

Ne disposant pas de l'équation différentielle continue décrivant les variations de la respiration r_{CO_2} , nous choisissons de décrire notre problème de viabilité directement sous une forme discrète en temps. Nous calculons ensuite une solution approchée en calculant la solution exacte d'un problème associé discret en temps et en espace.

Soit $\Delta t > 0$, le pas de temps, $n \in N$, la discrétisation du modèle (5.11) et (5.12) donne :

$$m^{n+1} = m^n + \Delta t \cdot s \left\{ -\frac{r_{CO_2}^n \cdot w_c}{w_{CO_2}} - k [a_w \cdot p_{sv}(T_s^n) - rh^n \cdot p_{sv}(T_\infty^n)] \right\} \quad (5.17)$$

$$T_s^{n+1} = T_s^n + \Delta t \cdot \frac{s}{m^n \cdot C} \left\{ h(T_\infty^n - T_s^n) + \epsilon \sigma (T_\infty^{n4} - T_s^{n4}) - \lambda k [a_w \cdot p(T_s^n) - rh^n \cdot p_{sv}(T_\infty^n)] + \alpha \frac{r_{CO_2}^n}{w_{CO_2}} \right\} \quad (5.18)$$

m^n , T_S^n et $r_{CO_2}^n$ sont les variables d'état, T_∞^n et r_h^n sont les variables de contrôle. Les évolutions de m et T_S sont décrites par les équations (5.17) et (5.18). Il faut maintenant définir celle de la respiration r_{CO_2} .

Modèle empirique de respiration Pour la définition de nos problèmes de viabilité et de bassin de capture, nous avons besoin d'un modèle de l'évolution de la variable respiration r_{CO_2} , c'est une fonction g qui associe aux valeurs des variables d'état et de contrôle à l'instant n , la valeur de la respiration à l'instant $n + 1$:

$$r_{CO_2}^{n+1} := g(m^n, T_S^n, r_{CO_2}^n, T_\infty^n, r_h^n)$$

Nous avons à notre disposition, les courbes expérimentales de respiration pour trois valeurs constantes de la température ambiante, T_∞ , 8 °C, 12 °C et 16 °C et 98% d'humidité relative.

Nous avons fait alors plusieurs hypothèses très audacieuses, une telle modélisation n'étant pas au coeur de ce sujet de thèse :

- La première hypothèse est que la respiration à l'instant $n + 1$ ne dépend que de la valeur de la respiration et de la température ambiante à l'instant n . Pour justifier cette hypothèse, des expérimentations supplémentaires auraient été nécessaires, en particulier des expérimentations faisant varier les contrôles au cours du temps. Des études sur les changements de conditions de température ont par exemple été menées avec succès en microbiologie alimentaire en Belgique et en Espagne (Versyck et al., 1999 ; Versyck et Van Impe, 2000 ; Bernaerts et al., 2002 ; Banga et al., 2002 ; Balsa-Canto et al., 2007). Toutefois, ce type d'étude n'a pu être réalisé au cours de la thèse.
- La seconde hypothèse est que $r_{CO_2}^{n+1}$ se déduit de $r_{CO_2}^n$ et T_∞^n de la manière suivante : la température T_∞^n permet de sélectionner la courbe expérimentale de référence. Ensuite, à une même valeur de $r_{CO_2}^n$ peuvent correspondre deux points sur la courbe de respiration expérimentale comme présenté sur la figure 5.2. A partir de ces deux points les valeurs de r_{CO_2} obtenues pour le temps $t + \Delta t$ sont différentes. Le modèle de respiration doit permettre de différencier si une valeur de $r_{CO_2}^n$ correspond à une respiration en phase ascendante ou descendante.

Nous avons donc rajouté une variable b discrète qui prend ses valeurs dans l'ensemble $\{0, 1\}$ et qui indique si on est en phase ascendante $b = 0$ ou en phase descendante $b = 1$. L'évolution de la variable b est décrite par :

$$\begin{aligned} b^{n+1} &= b^n && \text{si } b^n = 1 \\ b^{n+1} &= 1 && \text{si } b^n = 0 \text{ et } r_{CO_2}^{n+1} < r_{CO_2}^n \\ b^{n+1} &= 0 && \text{sinon} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Du fait de ces deux hypothèses non vérifiées et de la dépendance du coefficient de transfert de chaleur h aux conditions expérimentales, la généralisation du modèle est imparfaite. Nous attendons des prédictions entachées d'incertitude.

Toutefois, ce modèle nous paraît intéressant car les phénomènes physiques et microbiologiques de l'affinage y sont représentés. Une certaine part de la complexité des phénomènes est prise en compte.

Fréquence de variation des contrôles En usine, la modification de la valeur de la température ambiante, T_∞ , ou de l'humidité relative, rh , est réalisée par un opérateur, dont la fréquence d'intervention sur les hâloirs est journalière.

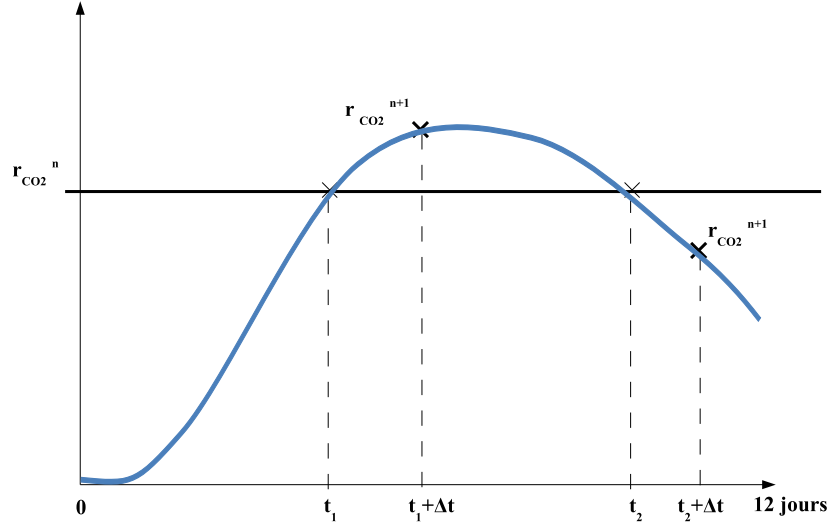


FIGURE 5.2: Schéma de la respiration : à une même valeur de taux de libération de dioxyde de carbone $r_{CO_2}^n$ correspondent deux points de la courbe. A partir de ces deux points correspondent deux valeurs de $r_{CO_2}^{n+1}$ après un incrément de temps de Δt . Les deux cas de figures doivent donc être différenciés.

Dans le modèle décrit dans les deux sections précédentes, le système discret en temps a un pas de temps Δt de l'ordre de la minute correspondant à la fréquence des mesures en ligne.

Pour mettre en cohérence le modèle avec la fréquence d'intervention de l'opérateur, nous définissons un nouveau système dynamique contrôlé discret qui correspond à NI itérations du modèle précédent, NI choisi de telle sorte que $NI \times \Delta t = 1$ journée :

$$\begin{aligned}
\tilde{m}^{n+1} &= m^{n+NI} \\
&= \tilde{m}^n + \sum_{j=0}^{NI-1} \left(\Delta t \cdot s \left\{ -\frac{r_{CO_2}^n \cdot w_c}{w_{CO_2}} - k \left[a_w \cdot p(T_s^{n+j}) - \tilde{r}h^n \cdot p_{sv}(\tilde{T}_\infty^n) \right] \right\} \right) \\
\tilde{T}_S^{n+1} &= T_S^{n+NI} \\
&= \tilde{T}_S^n + \sum_{j=0}^{NI-1} \left(\Delta t \cdot \frac{s}{m^{n+j} \cdot C} \{ h(\tilde{T}_\infty^n - T_s^{n+j}) + \varepsilon \sigma(\{\tilde{T}_\infty^n\}^4 - T_s^{n+j}{}^4) \right. \\
&\quad \left. - \lambda k \left[a_w \cdot p_{sv}(T_s^{n+j}) - \tilde{r}h^n \cdot p_{sv}(\tilde{T}_\infty^n) \right] + \alpha \frac{r_{CO_2}^{n+j}}{w_{CO_2}} \right) \\
\tilde{r}_{CO_2}^{n+1} &= r_{CO_2}^{n+NI} \\
\tilde{b}^{n+1} &= b^{n+NI}
\end{aligned} \tag{5.20}$$

avec $m^n = \tilde{m}^n$, $T_S^n = \tilde{T}_S^n$, $r_{CO_2}^n = \tilde{r}_{CO_2}^n$ et $b^n = \tilde{b}^n$ et m^n , T_S^n , $r_{CO_2}^n$ et b^n ont des variations décrites dans la section précédente (5.17), (5.18) et (5.19).

Le pas de temps du modèle (5.20) est la journée. Ainsi, les contrôles \tilde{T}_∞^n et $\tilde{r}h^n$ sont susceptibles d'être modifiés à chaque itération de ce modèle.

Les valeurs de ces contrôles sont bornées :

$$\forall n \in N \quad \tilde{T}_\infty^n \in [8; 16] \tag{5.21}$$

$$\forall n \in N \quad r\tilde{h}^n \in [84; 98] \quad (5.22)$$

Ces intervalles de variations correspondent au domaine exploré expérimentalement dans le chapitre 3. En industrie fromagère, les conduites d'affinage sont plutôt réalisées entre 11 °C et 14 °C et entre 90% et 96 % d'humidité relative. Dans cette étude, notre objectif est d'explorer le procédé d'affinage de manière assez large pour éventuellement trouver des méthodes de conduite nouvelles pour les industriels.

5.3.2.2 Description des contraintes

La définition des contraintes est réalisée à partir des données observées sur le hâloir pilote. Ces contraintes sont définies dans le tableau 5.1. Pour la masse le maximum est fixé à 310 g car au delà les rendements seraient trop faibles pour que ce type de conduite soit appliquée en industrie. Le minimum est de 250 g comme réglementé par le cahier des charges AOC. Les contraintes fixées pour la température de surface du fromage sont liées au modèle d'affinage dont la validité n'a pas été étudiée en dehors de cet espace. Enfin, les contraintes pour la respiration ont été déterminées d'après les courbes expérimentales utilisées pour le modèle empirique évoqué précédemment (voir 5.3.2.1), $55 \text{ g}/\text{m}^2/\text{jour}$ étant le maximum observé.

TABLE 5.1: Contraintes sur les variables d'état pour l'algorithme de viabilité

	Unité	Min	Max
Masse	g	250	310
Température de surface du fromage	kelvin	281	289
Respiration	$\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$	0	55

Ces contraintes se traduisent par l'ensemble $K \subset \mathbb{R}^3 \times \{0, 1\}$:

$$K := [250; 310] \times [281; 289] \times [0; 55] \times \{0, 1\} \quad (5.23)$$

La variable b peut prendre la valeur 0 ou 1, la respiration pouvant être ascendante ou descendante à priori.

5.3.2.3 Description des cibles

Cible finale La cible qualité à atteindre en fin d'affinage a été définie suite au recueil d'expertise avec les fromagers. Le premier critère est celui de la masse du fromage qui doit être au minimum légal de 250 g et au maximum de 270 g. La limite maximum n'est pas obligatoire mais le camembert étant vendu à la pièce contrôler le poids permet de limiter les coûts pour l'industriel.

Le deuxième critère est lié à l'équilibre microbien. Une fois le fromage emballé, les microorganismes doivent pouvoir poursuivre leur activité de digestion du substrat pour que l'affinage se poursuive et pour éviter le développement de défauts organoleptiques. Ces défauts sont par exemple une couverture grise lorsque le *Penicillium camemberti* est détérioré. Toutefois, après emballage, les flores disposent de ressources limitées en oxygène, leur activité ne doit donc pas être trop importante. Il s'agit donc d'atteindre en fin d'affinage en hâloir un équilibre des flores tel que l'activité respiratoire puisse se poursuivre après emballage. Cet équilibre a été fixé à une respiration entre 23 et $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$ après discussions avec les experts et observation des courbes expérimentales d'affinage standard. De plus, la valeur de cette respiration doit être en phase décroissante. Nous

rappelons que la croissance ou la décroissance de la valeur de la respiration est représentée dans notre modèle par la variable b . Donc, en fin d'affinage, la valeur de b doit être 1.

Le troisième critère est la température du fromage en fin d'affinage. Elle doit être entre 8 °C et 10 °C pour deux raisons. D'une part, les fromages froids permettent une meilleure "machinabilité", les fromages peuvent être emballés automatiquement sans risque de détérioration. D'autre part, après emballage les fromages sont stockés à 4 °C, si les fromages sont trop "chauds" il y a des risques de condensation d'eau en surface des fromages. Cette condensation est néfaste pour la couverture en *P. camemberti* et conduit aux défauts cités ci-dessus, une couverture grisâtre du fromage et des défauts aromatiques.

Cette cible au temps final T_f correspond au sous-ensemble $C_f \in \mathbb{R}^3 \times \{0, 1\}$ défini par :

$$C_f := [250 ; 270] \times [281 ; 283] \times [23 ; 50] \times \{1\} \quad (5.24)$$

Cible initiale Nous devons également imposer des valeurs initiales concernant la respiration. En effet, nous avons posé l'hypothèse suivante : une respiration normale c'est à dire qui démarre à 0, passe par un maximum puis redescend lentement, elle est représentative d'une bonne implantation des flores d'affinage en surface des fromages et donc d'un affinage correct : les cinétiques d'affinage doivent démarrer avec comme coordonnées $r_{CO_2} = 0$ et $b = 0$, atteindre un pic à au moins $30 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ et finir avec $b = 1$ avant emballage. Le minimum à atteindre au point d'inflexion est évalué à partir de la valeur mesurée au point d'inflexion observé lors de l'affinage à 8 °C où la respiration des microorganismes est la plus faible. La contrainte sur la respiration est schématisée dans la figure 5.3.

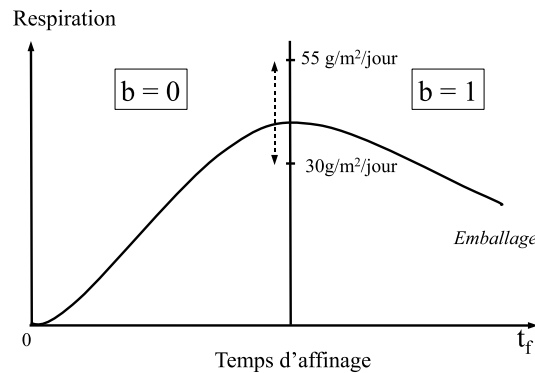


FIGURE 5.3: Contraintes sur une courbe de respiration représentative de l'activité microbologique.

La cible au temps initial $t = 0$ correspond au sous-ensemble $C_i \subset \mathbb{R}^3 \times \{0, 1\}$ défini par :

$$C_i := [250 ; 310] \times [281 ; 289] \times [0] \times \{0\} \quad (5.25)$$

5.3.2.4 Les problèmes de bassin de capture posés

Une durée d'affinage T_f étant fixée, notre objectif est de trouver l'ensemble des états $(\tilde{m}, \tilde{T}_s, r_{\tilde{CO}_2}, \tilde{b}, t)$ pour $t \in 0 \dots T_f$ tels que :

- Premier problème de bassin de capture : il existe une fonction de contrôle $(\tilde{T}_\infty^n, \tilde{r}h^n)_{n \in \mathbb{N}}$ gouvernant l'évolution de $(\tilde{m}^n, \tilde{T}_s^n, r_{CO_2}^n, \tilde{b}^n)_{n \in \mathbb{N}}$ selon le modèle (5.20) et soit $N^* = T_f - t$, les contraintes (5.23) sont vérifiées pour tout $n \in 0 \dots N^*$ et la cible C_f est atteinte pour $n = N^*$:

$$(\tilde{m}^{N^*}, \tilde{T}_s^{N^*}, r_{CO_2}^{N^*}, \tilde{b}^{N^*}) \in C_f$$

Nous noterons cet ensemble $Capt(K, C_f)$

- Second problème de bassin de capture : il existe une fonction de contrôle $(\tilde{T}_\infty^n, \tilde{r}h^n)_{n \in \mathbb{N}}$ gouvernant l'évolution de $(\tilde{m}^n, \tilde{T}_s^n, r_{CO_2}^n, \tilde{b}^n)_{n \in \mathbb{N}}$ selon la dynamique inverse de (5.20) telle que, soit $\hat{N} = t$, les contraintes (5.23) sont vérifiées pour tout $n \in 0 \dots \hat{N}$ et la cible C_i est atteinte pour $n = \hat{N}$:

$$(\tilde{m}^{\hat{N}}, \tilde{T}_s^{\hat{N}}, r_{CO_2}^{\hat{N}}, \tilde{b}^{\hat{N}}) \in C_i$$

nous noterons cet ensemble $\overleftarrow{C}apt(K, C_i)$

- Le premier problème de bassin de capture se résout en remontant le flot, nous parlerons de tube “backward”, le second problème de bassin de capture se résout en suivant le flot, nous parlerons de tube “forward”. Les états que nous recherchons doivent appartenir à ces deux tubes, c'est à dire à leur intersection :

$$Capt(K, C_f) \cap \overleftarrow{C}apt(K, C_i) \quad (5.26)$$

5.3.3 Critères de choix d'une trajectoire viable

Parmi les trajectoires respectant les contraintes et atteignant la cible en fin d'affinage, il est intéressant de pouvoir en trouver une qui soit optimale selon des critères prédéfinis. Nous identifions quatre critères importants.

5.3.3.1 Description des facteurs à optimiser

Plusieurs facteurs sont pris en compte pour optimiser le contrôle de l'affinage. Par ordre d'importance, le premier facteur est la robustesse des trajectoires d'affinage, le second est l'ensemble des coûts liés aux changements de contrôles, le troisième correspond aux coûts liés à la durée d'affinage et enfin le quatrième est lié aux coûts de perte de matière.

Deux critères liés à la robustesse La robustesse des trajectoires représente la sensibilité aux perturbations des trajectoires. L'objectif est de choisir des trajectoires d'affinage qui minimisent les risques d'échec de la production.

La robustesse en un point $(\tilde{m}^n, \tilde{T}_s^n, r_{CO_2}^n, \tilde{b}^n, t) \in Capt(K, C_f) \cap \overleftarrow{C}apt(K, C_i)$

est définie ainsi :

$$Rob(\tilde{m}^n, \tilde{T}_s^n, r_{CO_2}^n, \tilde{b}^n, t) := \frac{\mathbf{Aire} \{(\tilde{T}_\infty^n, \tilde{r}h^n) \in U | (\tilde{m}^{n+1}, \tilde{T}_s^{n+1}, r_{CO_2}^{n+1}, \tilde{b}^{n+1}, t+1) \in Capt(K; C_f) \cap \overleftarrow{C}apt(K, C_i)\}}{\mathbf{Aire} U} \quad (5.27)$$

Cette mesure de robustesse est basée sur la quantité de contrôles viables. Elle est comprise entre 0 et 1. Si tous les contrôles sont viables, cette mesure est de 1.

La robustesse d'une trajectoire $(\tilde{m}^n, \tilde{T}_s^n, r_{CO_2}^n, \tilde{b}^n, n)_{n \in \{0 \dots T_f\}}$ peut être évaluée de deux manières :

- par la robustesse globale de la trajectoire. Cette robustesse est la somme des robustesses $\sum_{n=0}^{T_f} Rob(\tilde{m}^n, \tilde{T}_S^n, r\tilde{C}_{O_2}^n, \tilde{b}^n, n)$ de tous les points de la trajectoire.
- par la robustesse minimale de la trajectoire. Elle représente la robustesse du point le moins robuste de la trajectoire $\min_{n \in \{0..T_f\}} Rob(\tilde{m}^n, \tilde{T}_S^n, r\tilde{C}_{O_2}^n, \tilde{b}^n, n)$.

Une trajectoire d'affinage peut être globalement robuste mais présenter un point de fragilité qui peut compromettre son évolution en cas de perturbation.

Les coûts liés aux changements de contrôles Les changements de contrôles d'humidité et de température interviennent dans le calcul des coûts énergétiques liés à la conduite d'affinage. Il faudrait cependant mener des études pour préciser ce lien qui dépend des procédés employés. Evaluer les coûts liés aux changements de contrôles lors d'un processus d'affinage est donc une première étape vers une évaluation des coûts énergétiques.

Pour une trajectoire d'affinage $(\tilde{m}^n, \tilde{T}_S^n, r\tilde{C}_{O_2}^n, \tilde{b}^n, n, \tilde{T}_\infty^n, r\tilde{h}^n)_{n \in \{0..T_f\}}$, le coût, $Cout_{cont}$, lié aux changements de contrôles est défini ainsi :

$$Cout_{cont} := \sum_{n=0}^{n=T_f-1} \frac{|(r\tilde{h}^{n+1} - r\tilde{h}^n)|}{(r\tilde{h}_{max} - r\tilde{h}_{min})} + \frac{|(\tilde{T}_\infty^{n+1} - \tilde{T}_\infty^n)|}{(T_{\infty max} - T_{\infty min})} \quad (5.28)$$

$r\tilde{h}_{max}$ et $T_{\infty max}$ sont respectivement l'humidité relative maximum et la température maximum applicables pour l'affinage, $r\tilde{h}_{min}$ et $T_{\infty min}$ les minima applicables pour l'affinage.

La durée d'affinage Ensuite la durée d'affinage nous paraît être un facteur crucial de coût tant au niveau énergétique que de gestion des stocks. Nous avons cherché à optimiser ce facteur en minimisant la durée d'affinage, pour cela nous comparons des affinages réalisés en 12 jours et en 8 jours.

La masse du fromage en début d'affinage Enfin, le dernier facteur pris en compte est le poids de départ du fromage. En effet, les coûts de perte de matière sont très importants pour les industries laitières. Quel que soit le poids de départ du fromage et sa perte de masse au cours de l'affinage, un camembert est toujours vendu à la pièce (c'est à dire 250g).

5.3.3.2 Arbitrage entre ces critères

Nous avons décidé de hiérarchiser ces critères suivant un ordre lexicographique : parmi toutes les trajectoires viables, nous retenons celles dont la robustesse minimale est maximale ; puis parmi ces dernières, celles dont la somme des robustesses en chaque point est maximale ; puis parmi ces dernières, celles dont le coût de contrôle est minimal ; puis parmi ces dernières, celles dont la durée d'affinage est la plus courte ; enfin, parmi ces dernières, celles dont le poids de départ du fromage est le plus faible.

Le choix de ces facteurs et leur hiérarchisation nous semble pertinent d'après les connaissances extraites des recueils d'expertise et nos connaissances sur le procédé. Toutefois, ce choix d'optimisation est discutable et idéalement à définir avec les décideurs. Leurs critères seraient bien évidemment différents selon leurs contextes industriels.

L'optimisation de l'affinage est donc multi-objectifs.

5.4 Algorithmes et moyens de calcul

L'approximation numérique du bassin de capture requiert une quantité importante de calculs. Les démonstrations réalisées dans le cadre de la théorie de la viabilité et leur application sur des environnements de calculs distribués permettent de palier cette difficulté.

5.4.1 Approcher le bassin de capture par le bassin de capture exact d'un modèle discret en espace

Pour résoudre de manière approchée nos deux problèmes de bassins de capture discrets en temps, nous allons comme dans les algorithmes de Saint-Pierre (1994) et Cardaliaguet et al. (1999), utiliser une grille dans l'espace des états et, cette fois, discrétiser en espace notre problème.

Notons $G_h \subset \mathbb{R}^3$ une grille de pas h , c'est à dire telle que

$$\forall x \in \mathbb{R}^3 \exists x_h \in G_h \quad \|x - x_h\| \leq h$$

Nous utiliserons comme grille $G_h := \prod_{i=1}^3 h_i \mathbb{N}$, la grille homothétique de rapport h_i dans la direction i de la grille des entiers naturels avec $\sum_{i=1}^3 h_i^2 \leq h$.

5.4.1.1 Tube backward

Dynamiques Nous définissons la dynamique discrète en temps et en espace de la manière suivante :

$$(\tilde{m}_h^{n+1}, \tilde{T}_{S_h}^{n+1}, r\tilde{C}_{O_2 h}^{n+1}, \tilde{b}^{n+1}) \in (f(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{S_h}^n, r\tilde{C}_{O_2 h}^n, \tilde{b}^n, \tilde{T}_\infty^n, \tilde{r}h^n) + (h\mathbb{B} \times \{0\})) \cap (G_h \times \{0, 1\}) \quad (5.29)$$

avec f définie par (5.20), les contrôles \tilde{T}_∞ et $\tilde{r}h$ appartenant aux ensembles définis en (5.21) et (5.22) et \mathbb{B} la boule unité de \mathbb{R}^3 .

Le terme $+h\mathbb{B}$ désigne l'ensemble des points à une distance inférieure ou égale à h , il est indispensable pour assurer que tout point aura au moins un successeur appartenant à G_h .

La variable b qui prend ses valeurs dans l'ensemble $\{0, 1\}$ est déjà discrète et n'est donc pas modifiée par cette opération.

Contraintes De manière analogue à la discrétisation de la dynamique, la discrétisation de l'ensemble des contraintes sur la grille est définie ainsi :

$$K_h = (K + (h\mathbb{B} \times \{0\})) \cap (G_h \times \{0, 1\})$$

où \mathbb{B} est la boule unité de \mathbb{R}^3 , la discrétisation ne porte pas sur la variable b déjà discrète.

Cible La cible sur la grille est également définie ainsi :

$$C_{f_h} = (C_f + (h\mathbb{B} \times \{0\})) \cap (G_h \times \{0, 1\})$$

où \mathbb{B} est la boule unité de \mathbb{R}^3 , la discrétisation ne porte pas sur la variable b déjà discrète.

5.4.1.2 Tube forward

Dynamiques Pour le tube forward, la cible est au temps $t=0$, on utilise la dynamique inverse (section 5.3.2.4), donc

$$(\tilde{m}_h^{n+1}, \tilde{T}_{S_h}^{n+1}, r\tilde{C}_{O_2h}^{n+1}, \tilde{b}^{n+1}) \in (-f(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{S_h}^n, r\tilde{C}_{O_2h}^n, \tilde{b}^n, \tilde{T}_\infty^n, \tilde{r}h^n) + (h\mathbb{B} \times \{0\})) \cap (G_h \times \{0, 1\}) \quad (5.30)$$

avec f définie par (5.20), les contrôles \tilde{T}_∞ et $\tilde{r}h$ appartenant aux ensembles définis en (5.21) et (5.22) et \mathbb{B} la boule unité de \mathbb{R}^3 .

Le terme $+h\mathbb{B}$ désigne l'ensemble des points à une distance inférieure ou égale à h . Il est indispensable pour assurer que tout point aura au moins un successeur appartenant à G_h .

Contraintes L'espace des contraintes est le même que dans le cas du tube backward :

$$K_h = (K + (h\mathbb{B} \times \{0\})) \cap (G_h \times \{0, 1\})$$

où \mathbb{B} est la boule unité de \mathbb{R}^3 , la discrétisation ne porte pas sur la variable b déjà discrète.

Cible La cible est discrétisée selon la même opération que les ensembles précédents :

$$C_{ih} = (C_i + (h\mathbb{B} \times \{0\})) \cap (G_h \times \{0, 1\})$$

où \mathbb{B} est la boule unité de \mathbb{R}^3 , la discrétisation ne porte pas sur la variable b déjà discrète.

5.4.2 L'algorithme

L'algorithme se déroule en deux temps : premier temps, calcul du tube backward ; deuxième temps intersection du tube backward et du tube forward. Cet algorithme en deux temps a été développé spécifiquement pour résoudre de manière approchée les problèmes décrits dans la section 5.3.2 et est implémenté au cours de la thèse.

5.4.2.1 Algorithme du bassin de capture pour le tube backward.

L'algorithme calcule le bassin de capture depuis la cible en fin d'affinage jusqu'au temps 0 du début d'affinage.

L'algorithme consiste à remonter itérativement de la cible finale à la cible du jour précédent jusqu'au début de l'affinage simulé. Pour chaque $t \in \{0 \dots T_f\}$, pour déterminer $D_{t_h} \subset K_h$ le sous-ensemble du tube backward pour le temps t , l'espace des contraintes sur les variables d'état discrétisé sur la grille G_h , K_h , est exploré, un point de coordonnées

$$(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{S_h}^n, r\tilde{C}_{O_2h}^n, \tilde{b}_h^n) \in K_h$$

est sélectionné, le modèle décrit dans l'équation (5.29) lui est appliqué en envisageant tous les contrôles possibles. Chacun des successeurs est testé pour savoir s'il appartient à la cible D_{t+1_h} , si c'est le cas le point est considéré comme viable, appartient au bassin de capture au temps t et les contrôles appliqués sont enregistrés comme viables eux aussi.

L'algorithme est construit de la manière suivante :

Initialisation

$$D_{T_{fh}} \leftarrow C_{fh}$$

Boucle principale

For $t := T_f - 1$ to 0

$$D_{t_h} \leftarrow \{x_h \in K_h \mid Succ(x_h) \cap D_{t+1_h} \neq \emptyset\}$$

Sortie

$$\{D_{0_h}, D_{1_h}, \dots, D_{T_{fh}}\}$$

Dans cet algorithme D_{t_h} est l'ensemble des états appartenant au bassin de capture au temps t , t étant le jour d'affinage considéré, T_f est le temps de fin d'affinage. C_{fh} et K_h sont la cible et l'espace des contraintes discrétisées. $Succ(x_h)$ à t représente l'ensemble des successeurs de x_h par la dynamique décrite dans l'équation (5.29) pour l'ensemble des contrôles $(\tilde{T}_{\infty_{\bar{h}}}, \tilde{r}\tilde{h}_{\bar{h}})$ appartenant à une discrétisation des ensembles définis en (5.21) et (5.22), discrétisation imposée par le traitement informatique de l'algorithme :

$$\tilde{T}_{\infty_{\bar{h}}} \in ([8; 16] + [-\bar{h}; \bar{h}]) \cap \bar{h}\mathbb{N} \quad (5.31)$$

$$\tilde{r}\tilde{h}_{\hat{h}} \in ([84; 98] + [-\hat{h}; \hat{h}]) \cap \hat{h}\mathbb{N} \quad (5.32)$$

Le bassin de capture, $Capt(K_h, C_{fh})$ est la réunion de tous les points viables x_h à chaque intervalle :

$$Capt(K_h, C_{fh}) = \bigcup_{t \in \{01 \dots T_f\}} D_{t_h}$$

5.4.2.2 Algorithme du bassin de capture pour le tube forward

Le calcul du tube backward se déroule de la cible au temps final puis “remonte” le temps. L'algorithme de calcul du tube “forward” part de la cible initiale au temps $t = 0$, puis calcule au temps $t = 1$ les états qui proviennent d'un état de la cible au temps précédent.

L'algorithme est le même, seule la dynamique est inversée :

Initialisation

$$E_{0_h} \leftarrow C_{ih}$$

Boucle principale

For $t := 1$ to T_f

$$E_{t_h} \leftarrow \{x_h \in K_h \mid \overleftarrow{Succ}(x_h) \cap E_{t-1_h} \neq \emptyset\}$$

Sortie

$$\{E_{0_h}, E_{1_h}, \dots, E_{T_{fh}}\}$$

E_{t_h} est encore l'ensemble des états appartenant au second bassin de capture au temps t , t étant le jour d'affinage considéré, T_f est le temps de fin d'affinage. C_{ih} et K_h sont la cible et l'espace des contraintes discrétisées. $\overleftarrow{Succ}(x_h)$ représente l'ensemble des successeurs de x_h par la dynamique inverse décrite dans l'équation (5.30) pour l'ensemble des contrôles $(\tilde{T}_{\infty_{\bar{h}}}, \tilde{r}\tilde{h}_{\hat{h}})$ appartenant à une

discrétisation des ensembles définis en (5.21) et (5.22), discrétisation imposée par le traitement informatique de l'algorithme :

$$\tilde{T}_{\infty_{\bar{h}}} \in ([8; 16] + [-\bar{h}; \bar{h}]) \cap \bar{h}\mathbb{N} \quad (5.33)$$

$$\tilde{r}_{\hat{h}} \in ([84; 98] + [-\hat{h}; \hat{h}]) \cap \hat{h}\mathbb{N} \quad (5.34)$$

Le bassin de capture, $\overleftarrow{C}apt(K_h, C_{i_h})$ est la réunion de tous les points viables x_h à chaque temps t :

$$\overleftarrow{C}apt(K_h, C_{i_h}) = \bigcup_{t \in \{0 \dots T_f\}} E_{t_h}.$$

La réponse à notre problème, l'ensemble $\mathbb{S}(K_h, C_{i_h}, C_{f_h})$, est donnée par l'intersection des deux bassins de capture :

$$\mathbb{S}(K_h, C_{i_h}, C_{f_h}) := \overleftarrow{C}apt(K_h, C_{i_h}) \cap C_{apt}(K_h, C_{f_h})$$

En pratique, on ne calcule pas séparément les deux tubes : les points du bassin de capture "backward" pour $t = 0$ sont sélectionnés selon les critères $r_{co_2} = 0$ et $b = 0$ puis l'algorithme du tube "forward" identifie les trajectoires possibles à partir de ces points initiaux : l'algorithme du tube "forward" peut être vu comme un filtre des données du tube backward.

5.4.3 Evaluation des critères d'optimisation dans le modèle discret en espace

5.4.3.1 Critères liés à la robustesse

La robustesse, Rob_h , en un point $(\tilde{m}_h, \tilde{T}_{sh}, r_{\tilde{CO}_2h}, \tilde{b}, t) \in \mathbb{S}(K_h, C_{i_h}, C_{f_h})$ est définie ainsi :

$$Rob(\tilde{m}_h, \tilde{T}_{sh}, r_{\tilde{CO}_2h}, \tilde{b}, t) := \left(\frac{\#Cont_v}{\#Cont_{p_t}} \right) \quad (5.35)$$

$\#Cont_v$ représente le nombre de couples de contrôles viables à partir de l'état $(\tilde{m}_h, \tilde{T}_{sh}, r_{\tilde{CO}_2h}, \tilde{b}, t) \in \mathbb{S}(K_h, C_{i_h}, C_{f_h})$. Un couple de contrôles étant une combinaison de :

$$(\tilde{T}_{\infty_{\bar{h}}}, \tilde{r}_{\hat{h}}) \in (([8; 16] + [-\bar{h}; \bar{h}]) \cap \bar{h}\mathbb{N}) \times (([84; 2 : 98] + [-\hat{h}; \hat{h}]) \cap \hat{h}\mathbb{N}) \quad (5.36)$$

et $\#Cont_{p_t}$ est le nombre de couples de contrôles viables maximum pour un des états viables au temps t .

La robustesse d'une trajectoire $(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{sh}^n, r_{\tilde{CO}_2h}^n, \tilde{b}^n, n)_{n \in \{0 \dots T_f\}}$ peut être évaluée de deux manières :

- par la robustesse globale de la trajectoire. Cette robustesse est la somme des robustesses $\sum_{n \in \{0 \dots T_f\}} Rob_h(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{sh}^n, r_{\tilde{CO}_2h}^n, \tilde{b}^n, 0)$ de tous les points de la trajectoire.
- par la robustesse minimale de la trajectoire. Elle représente la robustesse du point le moins robuste de la trajectoire $\min_{n \in \{0 \dots T_f\}} (Rob_h(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{sh}^n, r_{\tilde{CO}_2h}^n, \tilde{b}^n, n))$.

Algorithme de calcul de la somme des robustesses Soient $\bar{t} \in \{0 \dots T_f\}$, $x_h \in \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = \bar{t}\}$ et $S(x_h)$, l'ensemble des trajectoires issues de x_h vérifiant (5.29), on note

$$RobGlobale(x_h) := \max_{x_h(\cdot) \in S(x_h)} (\sum_{n \in \{0 \dots T_f - \bar{t}\}} Rob_h(x_h(n)))$$

la robustesse globale maximale possible à partir de l'état x_h .

Initialisation

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = T_f\}$$

$$\forall x_h \in F, RobGlobale(x_h) \leftarrow ValeurInfinie$$

Boucle principale

$$\text{For } \bar{t} := T_f - 1 \text{ to } 0$$

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = \bar{t}\}$$

$$\forall x_h \in F, RobGlobale(x_h) \leftarrow (Rob_h(x_h) + \max_{y_h \in Succ(x_h)} RobGlobale(y_h))$$

Sortie

$$\forall x_h \in \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}), RobGlobale(x_h)$$

Algorithme de calcul de la robustesse minimale Soient $\bar{t} \in \{0 \dots T_f\}$, $x_h \in \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = \bar{t}\}$ et $S(x_h)$, l'ensemble des trajectoires issues de x_h vérifiant (5.29), on note

$$RobMin(x_h) := \max_{x_h(\cdot) \in S(x_h)} (\min_{n \in \{0 \dots T_f - \bar{t}\}} Rob_h(x_h(n)))$$

la robustesse minimale maximale possible à partir de l'état x_h .

Initialisation

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = T_f\}$$

$$\forall x_h \in F, RobMin(x_h) \leftarrow ValeurInfinie$$

Boucle principale

$$\text{For } \bar{t} := T_f - 1 \text{ to } 0$$

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = \bar{t}\}$$

$$\forall x_h \in F, RobMin(x_h) \leftarrow \min(Rob_h(x_h), \max_{y_h \in Succ(x_h)} RobMin(y_h))$$

Sortie

$$\forall x_h \in \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}), RobMin(x_h)$$

5.4.3.2 Les coûts liés aux changements de contrôles

Pour calculer ce coût, nous nous inspirons de la méthode proposée par Aubin et Frankowska (1996) ce qui permet de garantir la viabilité de la solution proposée.

Pour une trajectoire d'affinage du modèle discret en temps et en espace, $(\tilde{m}_h^n, \tilde{T}_{S_h}^n, r_{CO_{2h}}^n, \tilde{b}^n, n, \tilde{T}_\infty^n, r\tilde{h}^n)$, le coût, $Cout_{cont_h}$, lié aux changements de contrôles est défini ainsi :

$$Cout_{cont_h} := \sum_{n=0}^{T_f-1} \frac{\left| \frac{r\tilde{h}_h^{n+1} - r\tilde{h}_h^n}{rh_{max} - rh_{min}} \right| + \frac{\left| \frac{\tilde{T}_\infty^{n+1} - \tilde{T}_\infty^n}{T_{\infty max} - T_{\infty min}} \right|}{2} \quad (5.37)$$

rh_{max} et $T_{\infty max}$ sont respectivement l'humidité relative maximum et la température maximum applicables pour l'affinage.

Algorithme Soient $x_h \in \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = \bar{t}\}$ et $S(x_h)$, l'ensemble des trajectoires issues de x_h vérifiant (5.29), on note :

$$Cout_{cont}Min(x_h) := \min_{x_h(\cdot) \in S(x_h)} \left(\sum_{n \in \{0 \dots T_f - 1 - \bar{t}\}} \frac{\frac{|(\tilde{r}h_h^{n+1} - r\tilde{h}_h^n)|}{(rh_{max} - rh_{min})} + \frac{|(T_{\infty}^{n+1} - T_{\infty}^n)|}{(T_{\infty max} - T_{\infty min})}}{2} \right)$$

le coût lié aux changements de contrôles minimaux possibles à partir de l'état x_h .

Initialisation

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = T_f\}$$

$$\forall x_h \in F, Cout_{cont}Min(x_h) \leftarrow 0 \text{ et } MeilleursControles(x_h) \leftarrow (([8 : 16] + [-\bar{h}; \bar{h}])\bar{h}N)(([84 : 2 : 98] + [-\hat{h}; \hat{h}])\hat{h}N)$$

En effet, les points, x_h appartiennent à la cible, il n'y donc pas de contrainte sur les contrôles.

Boucle principale

For $\bar{t} := T - 1$ to 0

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = \bar{t}\}$$

$$\forall x_h \in F, Cout_{cont}Min(x_h) \leftarrow \min_{y_h \in Succ(x_h)} (c(x_h, y_h) + Cout_{cont}Min(y_h))$$

$$\text{avec } c(x_h, y_h) = \min \frac{\frac{|(rh_h^{n+1} - r\tilde{h}_h^n)|}{(rh_{max} - rh_{min})} + \frac{|(T_{\infty}^{n+1} - T_{\infty}^n)|}{(T_{\infty max} - T_{\infty min})}}{2}$$

minimum pris sur l'ensemble $\{(\tilde{T}_{\infty}^n, \tilde{r}h_h^n)$ tels que y_h successeur de x_h et $(\tilde{T}_{\infty}^{n+1}, \tilde{r}h_h^{n+1}) \in MeilleursControles(y_h)\}$
 $MeilleursControles(x_h) \leftarrow \{(\tilde{T}_{\infty}^n, \tilde{r}h_h^n)$ tels que $(c(x_h, y_h) + Cout_{cont}Min(y_h))$ soit minimal}

Sortie

$$\forall x_h \in \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}), Cout_{cont}Min(x_h) \text{ et } MeilleursControles(x_h)$$

5.4.3.3 La durée d'affinage

Pour comparer les deux durées d'affinage en 8 et en 12 jours, nous calculons les bassins de capture pour $T_f = 8$ et $T_f = 12$.

5.4.3.4 La masse du fromage en début d'affinage

La masse du fromage en début d'affinage est donnée par m_h^0 .

5.4.4 Algorithme de détermination de la trajectoire optimale

Lorsque les deux bassins de capture ainsi que les critères liés à la robustesse et aux changements de contrôles ont été calculés, nous pouvons déterminer la trajectoire optimale :

Pour le tube en 12 jours, puis pour le tube en 8 jours :

$$F \leftarrow \mathbb{S}(K_h, C_{ih}, C_{fh}) \cap \{t = 0\}$$

1^{er} critère dans l'ordre lexicographique :

$F_1 \leftarrow \{x_h \in F \mid RobMin(x_h) \text{ maximale} \}$

2^{ème} critère dans l'ordre lexicographique :

$F_2 \leftarrow \{x_h \in F_1 \mid RobGlobale(x_h) \text{ maximale} \}$

3^{ème} critère dans l'ordre lexicographique :

$F_3 \leftarrow \{x_h \in F_2 \mid Cout_{cont}Min(x_h) \text{ minimal} \}$

A ce stade, de nombreuses solutions étaient équivalentes pour les affinages en 12 jours et les affinages en 8 jours et pour des masses entre 270 g et 300 g. Les fromages de type AOC sont fabriqués pour peser environ 300 g en début d'affinage. Les camemberts expérimentaux étaient fabriqués au laboratoire GMPA sur ce modèle. En revanche, les camemberts dits "industriels" sont fabriqués pour peser environ 280 g en début d'affinage ce qui limite les coûts de pertes de matières. Nous avons donc choisi une trajectoire optimisée d'affinage court (8 jours) dont le poids de départ soit proche de 280 g.

5.4.5 Simulation haute performance

Le calcul de cet algorithme de viabilité nécessite de tester 61 488 états par jour d'affinage et de tester tous les contrôles possibles soit 91 millions d'appel au modèle (voir le calcul 5.38).

$$61_{masse} \times 9_{T_s} \times 56_{r_{CO_2}} \times 2_b \times 9_{T_\infty} \times 15_{rh} \times 12_{jours} = 91\,309\,680 \quad (5.38)$$

Le temps de calcul est évalué à 2 mois sur un ordinateur classique, l'utilisation d'un environnement de calcul haute performance est donc indispensable. Le principe est de paralléliser de gros calculs sur plusieurs ordinateurs².

Grâce à une collaboration avec l'Institut des Systèmes Complexes, l'algorithme du tube backward a été parallélisé et a pu être exécuté sur la ferme de calcul de l'unité MiG de l'INRA à Jouy-en-Josas (<http://migale.jouy.inra.fr/>). La ferme de calcul MiG de l'INRA de Jouy en Josas est constituée de 200 processeurs de calcul. Cette ferme de calcul est accessible au travers du système de gestion d'exécution par lot de type "Sun Grid Engine"³. Ce système de file d'attente permet de répartir la charge sur les unités de calculs de manière équitable entre tous les utilisateurs de la ferme de calcul.

L'algorithme du tube forward parcourt les résultats précalculés, il est donc peu demandeur en temps de calcul. Il a pu être exécuté en une heure environ sur un ordinateur moderne.

5.4.5.1 Algorithme de la parallélisation

Dans l'algorithme de viabilité, l'exploration des variables d'états comprend de nombreux appels au modèle indépendant. Il est donc aisément parallélisable. Pour chaque temps t de l'affinage, l'espace des 61 488 états à explorer est subdivisé pour être exploré en parallèle sur les 200 processeurs de la ferme de calcul. Ensuite, au niveau de chaque processeur, l'algorithme présenté section 5.4.2.1 est appliqué pour l'espace d'état concerné. Pour finir, les états viables calculés de manière distribuée sont collectés depuis chacun des processeurs et agrégés pour constituer l'ensemble des états viables au temps t . On fait ensuite de même au temps $t - 1$.

Le workflow est schématisé sur la figure 5.4.

Initialisation

2. Méthode utilisée pour la première fois en 1994 dans le cadre du projet Beowulf de la NASA (Sterling et al., 1995)

3. <http://gridengine.sunsource.net>

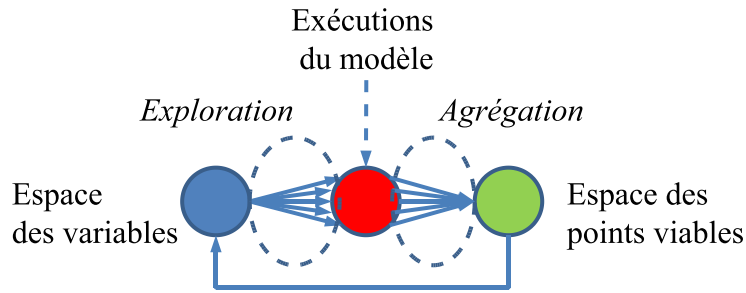


FIGURE 5.4: Schéma du workflow, parallélisation du calcul du tube backward sur la ferme de calcul MiG (Inra-Jouy-en-Josas).

$$D_{T_{f_h}} \leftarrow C_{f_h}$$

Division de l'espace à explorer en M sous-espaces

$$K_h = \cup_{i=1}^M K_h^i$$

Boucle principale

For $t := T_f - 1$ to 0

Pour $i = 1$ à M , $D_{t_h}^i \leftarrow \{x_h \in K_h^i \mid Succ(x_h) \cap D_{t+1_h} \neq \emptyset\}$

Agrégation des états viables

$$D_{T_{f_h}} = \cup_{i=1}^M D_{T_{f_h}}^i$$

Sortie

$$\{D_{0_h}, D_{1_h}, \dots, D_{T_{f_h}}\}$$

Dans cet algorithme M est le nombre choisi de divisions de l'espace d'états pour la parallélisation.

L'utilisation de Matlab (The MathWorks, Inc., MA, USA) sur un environnement de calcul distribué nécessitait l'achat d'une licence par noeud de calcul. Par conséquent, l'algorithme a été porté sur le logiciel libre Octave⁴. Ce transfert a été relativement simple car les deux logiciels sont interopérables (ils utilisent le même langage de programmation) mais leurs performances en temps de calcul sont très différentes. Le temps d'exécution de notre algorithme avec Octave est environ 30 fois plus long qu'avec Matlab.

5.4.5.2 Gestion des flux de données

Le dilemme temps de migration / charge des processeurs. La principale difficulté est de définir la taille des calculs à soumettre à chaque unité de calcul. En effet, la charge varie sur la ferme de calcul, les 200 processeurs ne sont pas forcément disponibles pour l'intégralité des calculs. Diviser l'espace d'exploration en 200 sous-espaces ne peut pas être efficace si les 200 processeurs ne sont pas libres. En effet, le temps de calcul global dépend du temps de retour du dernier calcul. Le dilemme temps de migration par rapport à la charge des processeurs est représenté figure 5.5. Pour une subdivision trop faible, la non disponibilité des processeurs peut faire augmenter considérablement les temps de calcul. Pour une subdivision trop importante c'est la somme des temps de migration qui augmente ce temps car le temps de migration est fixe quelle que soit la taille du calcul. Il s'agit donc de trouver un équilibre entre le fait que plus le nombre de subdivisions augmente plus

4. www.gnu.org/software/octave/

les probabilités de réduire le temps global de calcul augmentent mais plus les temps de migration deviennent importants. Il est donc nécessaire de trouver un compromis temps de calcul / temps de migration. La recherche de ce compromis est effectuée de manière empirique et l'espace à explorer pour chaque jour simulé est divisé par 500.

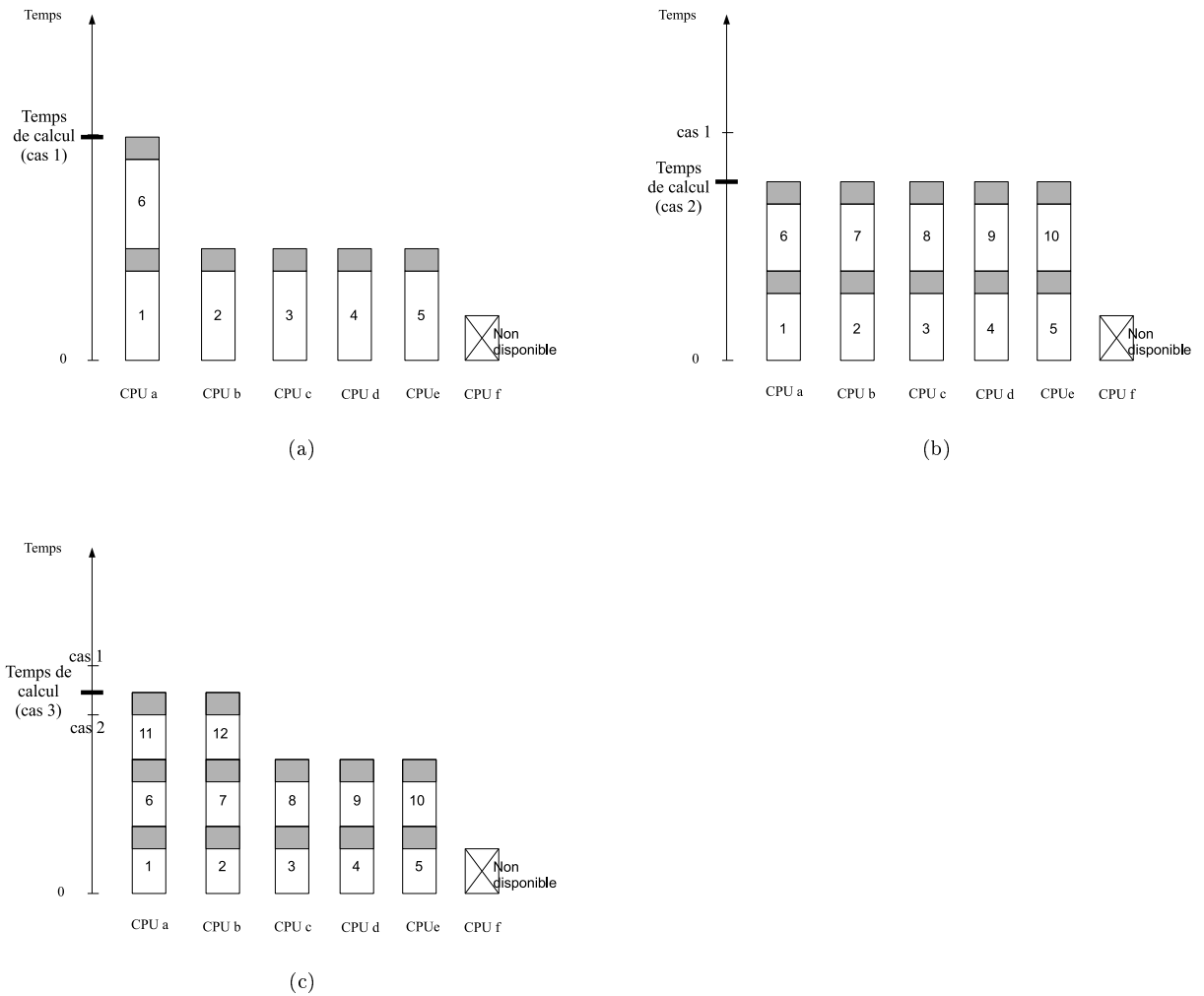


FIGURE 5.5: Gérer les temps de migration par rapport à la charge des processeurs de la grille de calcul : pour un calcul divisé en 6 pour 6 processeurs si l'un s'avère non disponible le temps de calcul est très élevé (cas 1, fig. a), pour une subdivision en 12 le temps de calcul est un peu moindre (cas 3, fig.c), pour une subdivision en 10 le temps de calcul est optimal (cas 2, fig.b).

Grâce à la parallélisation, le temps de calcul est réduit à 2 jours sur la ferme de calcul au lieu de 2 mois sur un processeur unique. Nous obtenons ainsi un gain en temps de calcul d'un facteur 30. Ce gain est limité, d'une part du fait de l'occupation de la ferme de calcul et d'autre part du fait des nécessaires interventions humaines à chaque étape de l'algorithme.

Gestion manuelle du flux de données. L'intervention humaine est nécessaire à chaque étape de l'algorithme car la parallélisation n'est pas entièrement automatisée. Les calculs doivent être

envoyés manuellement au système de file d'attente, puis il faut surveiller la fin des calculs, récupérer les résultats et les agréger à partir d'un ordinateur unique. Ces opérations sont répétées pour chaque jour de calcul simulé. Le temps de calcul d'un bassin de capture est donc limité par les nécessaires interventions humaines. Cette difficulté est liée à la nouveauté des opérations réalisées, à l'avenir elles pourront être entièrement automatisées. Pour ce faire l'algorithme de viabilité a fait l'objet d'une intégration dans le logiciel SimExplorer⁵.

5.5 Résultats

5.5.1 Résultats de l'algorithme

Deux bassins de capture ont été calculés pour des durées d'affinage de 8 jours et de 12 jours. Le bassin de capture d'un affinage standard est représenté sur la figure 5.6. Sur la figure 5.6a le bassin de capture est aplati le premier jour car la respiration des microorganismes n'a pas encore démarré. En début d'affinage la masse des fromages pour un affinage en 12 jours peut être comprise entre 262 g et 310 g (Figure 5.6b). Toutes les températures de surface de 8 °C à 16 °C sont possibles, elles n'ont pas été représentées dans la figure 5.6.

5.5.2 Description de la trajectoire optimisée

Une trajectoire optimisée a été trouvée pour un affinage de 8 jours et un fromage de 284 g en masse initiale. Les contrôles à appliquer pour suivre cette trajectoire sont présentés sur la figure 5.7b en comparaison avec la trajectoire d'affinage standard sur la figure 5.7a. L'affinage standard considéré est celui de l'essai F11 H1 92 % 12 °C présenté dans le premier chapitre (3) de cette thèse.

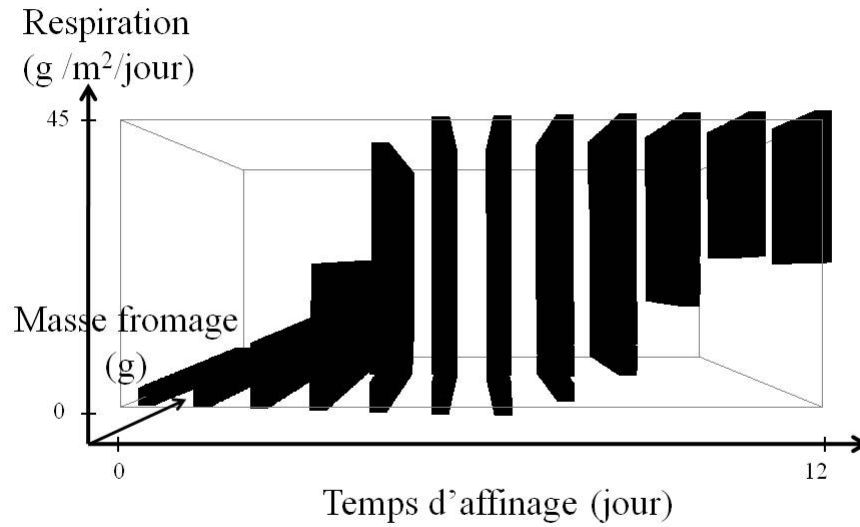
L'affinage optimisé doit être réalisé à humidité relative plus élevée (94 %) que l'affinage standard (92 %). Le premier jour d'affinage l'humidité relative est dans les deux cas fixée à 84 % pour permettre le ressuyage, étape indispensable d'un affinage pour la bonne implantation des flores. En revanche pour l'affinage optimisé, le contrôle de la température à appliquer varie. Il est de 12 °C, 13 °C, 14 °C deux jours puis 12 °C deux jours et enfin 9 °C pendant les dernières 24 h avant emballage.

Cette trajectoire est ensuite testée sur un hâloir pilote du laboratoire, les contrôles étant fixés chaque jour selon les consignes issues de l'algorithme de viabilité.

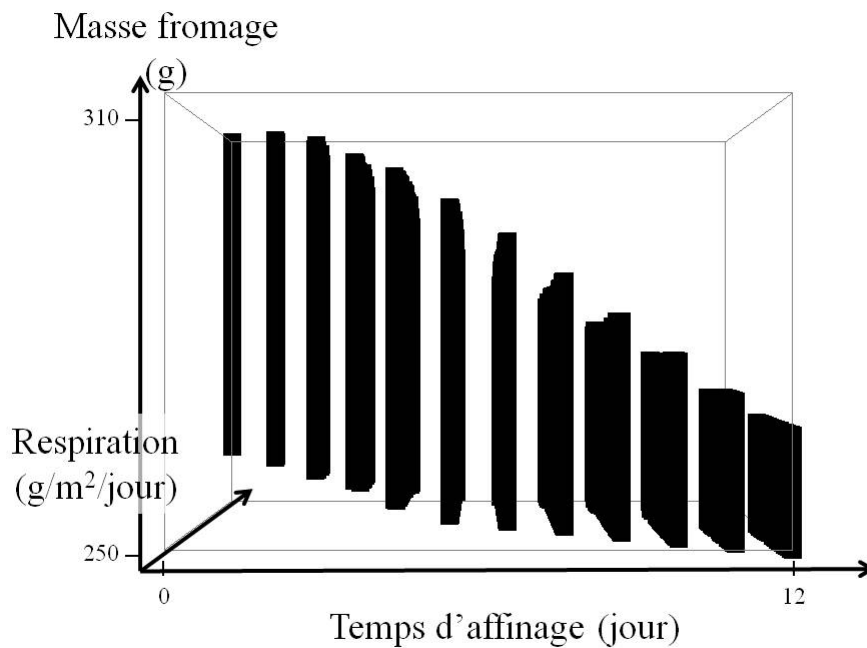
5.5.3 Test de la trajectoire en hâloir pilote

5.5.3.1 Les résultats de perte de masse

La figure 5.8 présente les résultats de perte de masse mesurée en ligne de l'affinage optimisé et d'un affinage standard sur le hâloir pilote. Les deux affinages ont permis d'atteindre la cible de masse pour le camembert (entre 250 g et 270 g). En revanche, dans le cas de l'affinage standard 54 g de matière sont perdus contre seulement 34 g dans le cas de l'affinage optimisé.



(a)



(b)

Figure 5.6: Bassin de capture d'affinage en 12 jours sous deux angles de vue (a) et (b). (a) montre l'évolution des masses de fromage viables au cours du temps et (b) les vitesses de respiration (taux de libération de CO_2)

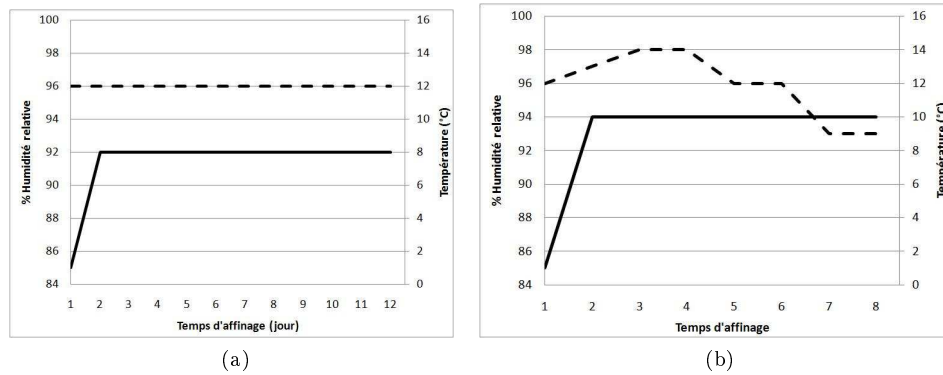


Figure 5.7: Contrôle de l'humidité relative et de la température pour un affinage standard (a) et pour un affinage optimisé (b) selon les résultats de l'algorithme de viabilité.

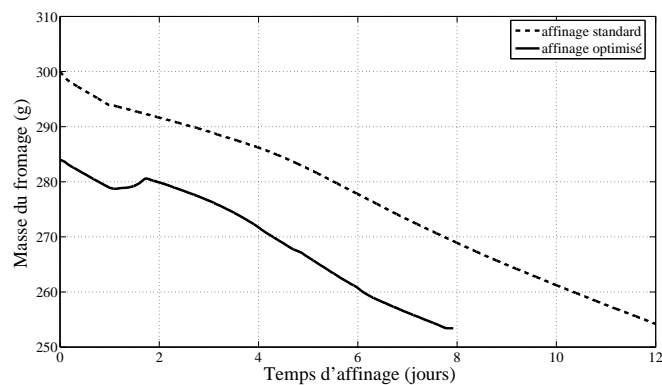


Figure 5.8: Mesure en ligne de la masse d'un fromage dans le hâloir pilote au cours de l'affinage pour un affinage optimisé (ligne continue) et pour un affinage standard (ligne pointillée).

Toutefois, la perte de masse est insuffisante pour caractériser l'affinage et nous avons cherché à connaître les cinétiques microbiennes et sensorielles de cet affinage optimisé.

5.5.3.2 Cinétiques liées aux activités microbiennes de l'affinage optimisé

Pour étudier les cinétiques microbiennes six indicateurs ont été suivis comme sur les fabrications présentées (3) : le pH (hors ligne) et les concentrations (hors ligne) en *K. marxianus*, *G. candidum*, *P. camemberti*, *B. aurantiacum* et la vitesse de libération du CO_2 (en ligne). Les résultats sont présentés sur la figure 5.9.

Le taux de libération du dioxyde de carbone observé pendant l'affinage optimisé est conforme aux contraintes qui sont définies (sous-sections 5.3.2.1 et 5.3.2.2). La respiration démarre à 0 augmente, atteint un maximum supérieur à $30 g/m^2/jour$ et ensuite redescend lentement jusqu'au 8^{ème} jour. La respiration des microorganismes de l'affinage optimisé démarre environ 1.5 jours plus tôt que lors de l'affinage standard.

Un autre indicateur de l'activité microbienne est le pH. Dans le cas de l'affinage optimisé la hausse caractéristique du pH a lieu 1 jour plus tôt que dans le cas de l'affinage standard.

En ce qui concerne la croissance des micro-organismes, la levure *K. marxianus* semble s'être moins bien développée qu'au cours de l'affinage standard ce qui paraît curieux car les levures sont habituellement favorisées par des températures plus élevées. L'autre levure, *G. candidum* a eu le même développement dans les deux types d'affinages.

Pour le *Penicillium camemberti*, la concentration en spores reste globalement constante dans les deux cas d'affinage. Cette mesure des spores ne reflète en revanche pas la croissance du mycelium en surface des fromages car celui-ci est détruit lors des prélèvements (Aldarf et al., 2002, Leclercq-Perlat et al., 2006, Molimard et al., 1995). Les mesures du panel sensoriel "at-line" montrent l'apparition du *P. camemberti* au 4^{ème} jour pour l'affinage optimisé et au 6^{ème} jour pour l'affinage standard (voir section 4.4.3.1).

Enfin pour les bactéries de type *B. aurantiacum*, le développement se révèle être moins important dans le cas de l'affinage optimisé. En revanche l'allure globale de la cinétique est similaire.

D'après ces résultats les cinétiques semblent être accélérées pour les mesures de respiration, et de pH. Ces accélérations paraissent en corrélation avec la couverture en *P. camemberti* qui apparaît plus précocement. En ce qui concerne les concentrations en micro organismes, les cinétiques sont modifiées mais cela reste relatif car les comportements sont globalement les mêmes et l'erreur de mesure est de l'ordre du demi-log.

5.5.3.3 Cinétiques sensorielles

Comme pour les autres affinages expérimentaux, l'essai pilote de l'affinage optimisé a été suivi par le panel sensoriel at-line. Ces mesures permettent de comparer l'évolution du profil sensoriel des camemberts de l'affinage standard et de l'affinage optimisé. Les résultats sont présentés dans la figure 5.10. Ils démontrent que les cinétiques sensorielles sont différentes entre les deux affinages et que les fromages de l'affinage optimisé ont au 15^{ème} jour le même profil qu'au 20^{ème} jour pour les fromages affinés de manière standard.

5. (<http://www.simexplorer.org>)

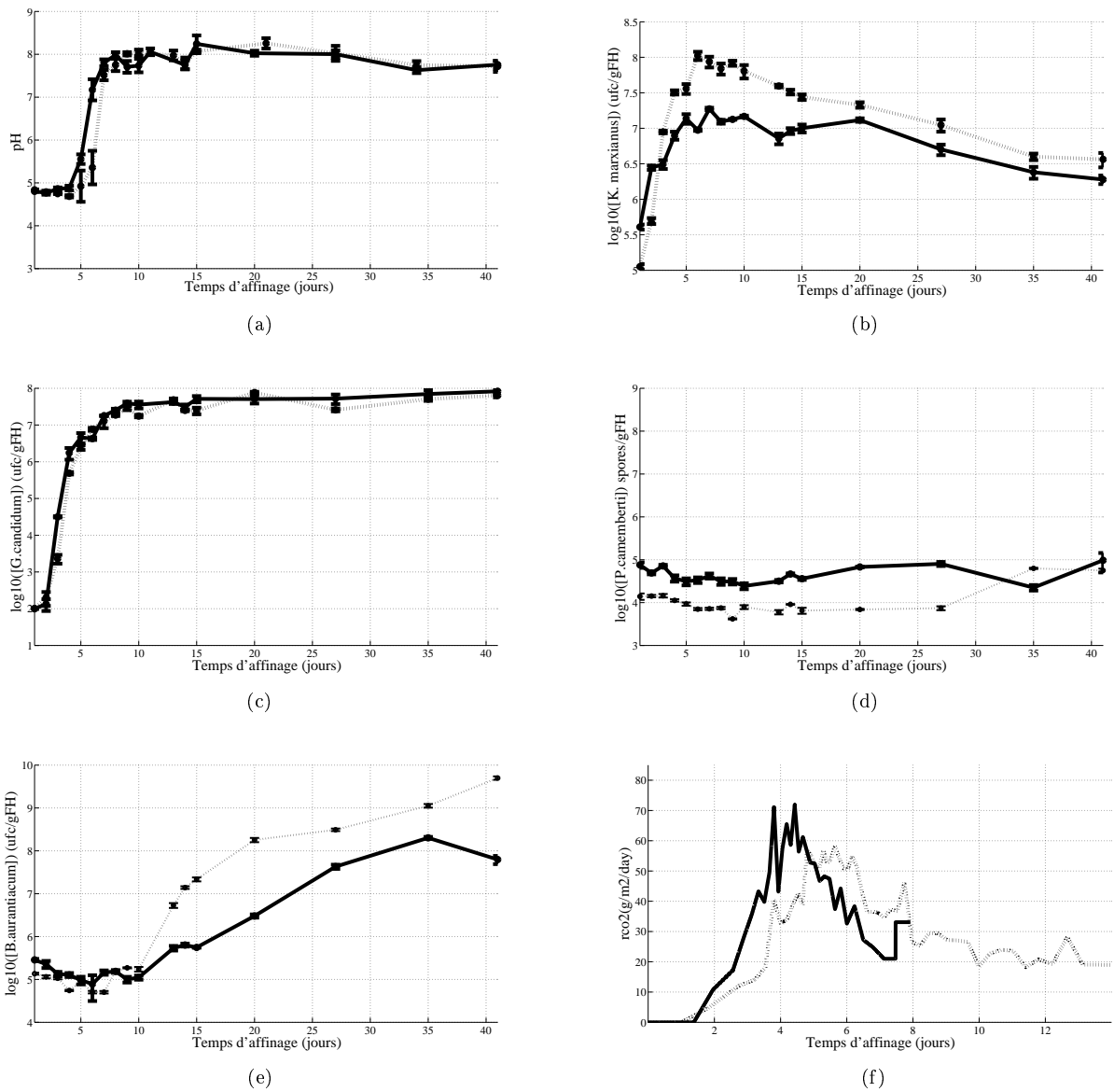


Figure 5.9: Cinétique du pH (a), de *K. marxianus* (b), *G. candidum* (c), *P. camemberti* (d), et *B. aurantiacum* (e) pour l'affinage optimisé (ligne continue) et l'affinage standard (ligne pointillée).

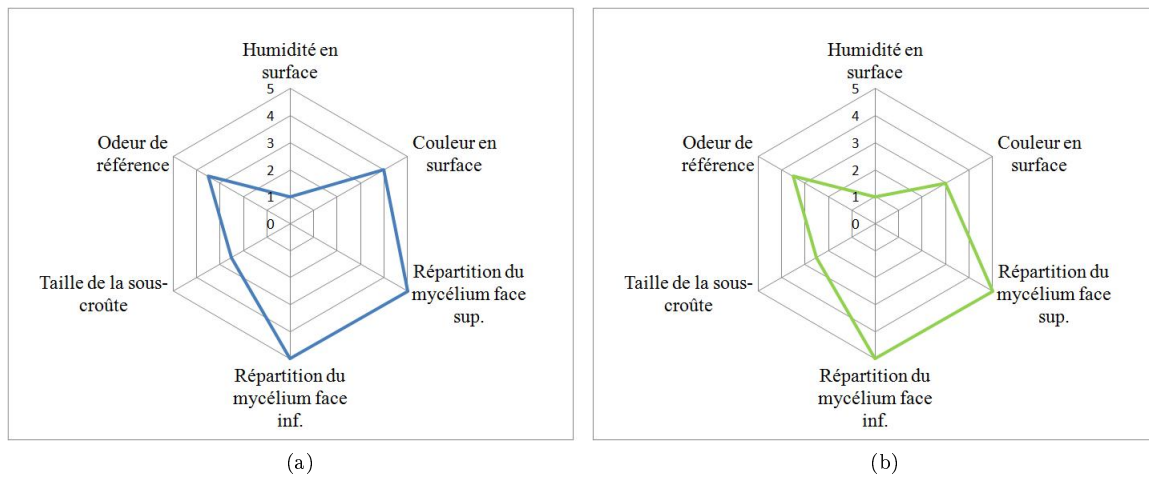


FIGURE 5.10: Profil sensoriel “at-line” au 20^{ème} jour d’un affinage standard (a) et au 15^{ème} jour d’un affinage optimisé (b).

Ce résultat est intéressant car en théorie, avec l’affinage optimisé, les industriels pourraient commercialiser les fromages plus tôt. Il restait toutefois à vérifier que les fromages soient dans la cible organoleptique au moment théorique de la consommation par les consommateurs.

Pour comparer le profil organoleptique des fromages expérimentaux à ceux vendus dans le commerce, les fromages sont évalués par un panel spécialisé dans la dégustation de camembert de l’Actilait, centre technique du lait et des produits laitiers. Une analyse est également effectuée sur des camemberts d’une marque vendue en grande distribution. Les analyses sont effectuées pour tous les fromages au 35^{ème} jour d’affinage. Cette date est choisie comme référence mais la période de consommation des camemberts peut aller du 20^{ème} jour au 50^{ème} jour d’affinage pour certaines marques. Les résultats sont présentés dans la figure 5.11.

La première analyse de ces profils permet de voir que les camemberts expérimentaux ne sont pas très différents des camemberts du commerce analysés. En effet, l’échelle du profil de 0 à 10 est sensée représenter les variations dans l’espace produit, c’est à dire l’écart qu’il existe entre les camemberts du commerce. L’écart maximal entre les profils est limité à 3 points. Ces résultats sont ensuite approfondis avec une analyse de variance à un facteur. Les trois types de fromages sont analysés comme significativement différents sur la moitié des 26 critères évalués.

Un test de Tuckey-Kramer est réalisé de manière à analyser les différences constatées entre les fromages. Les résultats sont présentés dans la table 5.2. Les fromages affinés dans le hâloir pilote ont une croûte plus jaune que celle des fromages affinés par un industriel, la croûte est plus irrégulière, la pâte est plus blanche, le coeur est plus coulant, et il y a moins d’ouverture dans la pâte, la texture est plus souple, plus collante et plus crémeuse. Les fromages expérimentaux ont aussi une odeur d’ammoniacque plus intense, ainsi qu’un arôme ammoniacque et un arôme animal plus intense.

Dans cette comparaison, il y a plus de différences entre camemberts du commerce et camemberts expérimentaux qu’entre les camemberts expérimentaux conduits selon les deux types d’affinages (standard vs. optimisé).

Ces analyses montrent que les fromages affinés de manière standard en hâloir et les fromages affinés de manière standard chez un industriel sont plus différents que ne le sont les fromages standards

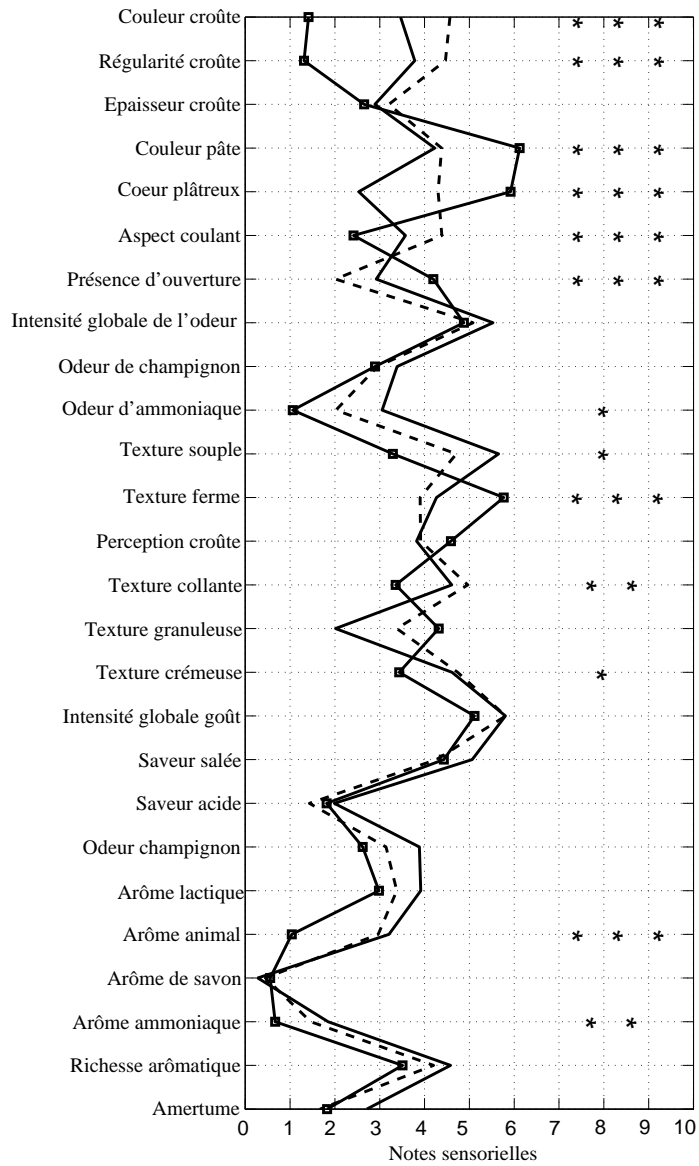


Figure 5.11: Profil sensoriel de fromages affinés de manière optimisée (ligne continue), de manière standard (ligne pointillée) et affinés par un industriel (ligne continue avec les symboles carrés).

TABLE 5.2: Test de comparaisons multiples des moyennes pour les notes des fromages affinés de manière optimale (Aff. optimisé), de manière standard (Aff. standard) et affinés par un industriel (Aff. industriel) basée sur la différence significative de Tuckey-Kramer au 35^{ème} jour après fabrication. Les lettres représentent les groupes dont les moyennes diffèrent significativement à $p < 0.05$.

	Aff. optimisé	Aff. standard	Aff. industriel
Couleur de la croûte	b	b	a
Régularité de la croûte	b	b	a
Couleur de la pâte	a	b	b
Coeur plâtreux	a	a	b
Aspect coulant	b	b	a
Présence d'ouverture	a	a	b
Odeur d'ammoniacque	b	b	a
Texture souple	b	b	a
Texture ferme	a	a	b
Texture collante	b	b	a
Texture crémeuse	b	b	a
Arôme animal	b	b	a
Arôme ammoniacque	a	a	b

du pilote et les fromages de l'affinage optimisé. Nous en déduisons que la trajectoire d'affinage optimisée permet de préserver les qualités organoleptiques des fromages bien que l'affinage soit raccourci de quatre jours.

5.6 Travaux complémentaires issus du projet INCALIN

5.6.1 Premiers résultats et futures analyses de robustesse pour mieux contrôler le procédé

L'enjeu de la robustesse est très important pour les industriels qui doivent limiter leur risque de perte de production ou de baisse de qualité. L'objectif est de connaître les zones de sensibilité aux perturbations du procédé pour les contrôler avec plus d'attention. Dans cette étude nous essayons de prendre en compte la sensibilité aux perturbations ou erreurs sur les contrôles.

L'analyse de robustesse peut être également une étude de sensibilité du système aux perturbations sur les états et les contrôles simultanément. La robustesse est alors définie comme une distance à la frontière du noyau de viabilité. Conjointement à cette thèse, des travaux de recherche sur des algorithmes de calcul de la distance à la frontière d'un ensemble ont été développés. Les premiers résultats ont été présentés par Mesmoudi et al. (2009). L'objectif de ces travaux est de réaliser une étude géométrique des bassins de capture pour évaluer la robustesse en chaque point comme distance de ce point à la frontière du bassin de capture. Pour cela la distance géométrique de chaque point à la frontière est calculée avec l'algorithme publié par Coeurjolly (2007).

Cette évaluation de la robustesse devrait permettre de choisir des trajectoires d'affinage peu risquées car peu sensibles aux perturbations dans l'espace des états comme dans celui des contrôles. Cette nouvelle information de robustesse pourra être utilisée pour trouver une nouvelle trajectoire optimisée et la comparer avec la trajectoire obtenue dans cette étude.

5.6.2 Un système d'aide à la décision pour l'affinage ?

Les données des deux bassins de capture calculées dans cette thèse sont stockées dans une base de données mySql⁶. Cette base de données permet de calculer la robustesse de chaque point de coordonnées $(\tilde{m}_h, \tilde{T}_{s_h}, \tilde{r}_{CO_2h}, \tilde{b}, r\tilde{h}_h, \tilde{T}_{\infty h}, t)$ avec un algorithme adapté de Coeurjolly (2007). Les résultats sont ensuite enregistrés, eux aussi, dans la base de données afin qu'elle soit la plus complète possible.

Une interface graphique a été développée, elle permet d'interroger la base de données pour évaluer la viabilité d'une trajectoire de contrôle d'affinage (en 8 ou 12 jours) et la robustesse de cette trajectoire. La base de données étant importante l'interface n'est pas encore opérationnelle car les temps de réponse sont très longs. Cette interface est présentée dans la figure 5.12. Cette interface est composée d'un premier onglet de "diagnostic", il permet de tester des contrôles et de vérifier si la cible est atteinte en fin d'affinage en fonction de la masse et de la température de surface initiale du fromage. Le deuxième onglet permet de visualiser la robustesse (contrôles+état) en chaque point de la trajectoire c'est à dire la distance à la frontière en chaque point.



FIGURE 5.12: Capture d'écran de l'interface graphique permettant d'accéder aux données issues des analyses de viabilité et de robustesse pour les affinages en 8 jours et 12 jours.

A l'avenir, d'autres calculs de bassins de capture et de robustesse pourraient être ajoutés à cette base de données (affinage en 11 jours, 10, 9,...). Il serait ainsi possible avec l'interface graphique d'explorer le procédé d'affinage de manière plus complète.

Ensuite à moyen terme, l'interface pourrait servir d'outil d'optimisation du procédé. De premières recherches ont été menées par nos partenaires du Lip6 pour construire une fonction de coût multi-objectifs permettant d'optimiser l'affinage. Les difficultés rencontrées sont actuellement liées à la taille de la base de données et à l'importance du nombre de requêtes à effectuer pour calculer la fonction multi-objectifs. L'objectif sera soit d'arriver à résoudre ces difficultés soit d'utiliser des fonctions d'optimisation non exactes de type métaheuristique.

L'intérêt de ce type d'optimisation multi-objectifs est de minimiser les hypothèses de départ et de pouvoir à plus long terme arbitrer directement avec les industriels, entre les solutions optimales, en fonction de leur contexte propre de production.

6. logiciel gratuit <http://www.mysql.fr/>

A long terme, on pourrait imaginer d'utiliser la base de données couplée à des interfaces adaptées pour du contrôle en ligne, puisqu'il ne s'agirait somme toute que de rechercher dans la base de données les meilleurs contrôles à appliquer.

Pour résumer, à partir des données de viabilité calculées une fois pour toute, les industriels pourraient évaluer la viabilité et la robustesse de leurs contrôles de l'affinage, envisager des solutions plus optimales et même peut-être réaliser du contrôle en ligne lors des dérives du procédé. Le "seul" obstacle étant de pouvoir interroger la base de données en temps réel. Ce problème paraît toutefois difficile à résoudre avec nos moyens actuels et il serait intéressant de soumettre ce problème à des spécialistes en informatique des bases de données pour évaluer l'ampleur de cette difficulté.

5.7 Conclusion

La théorie de la viabilité a été utilisée avec succès pour réduire la durée de l'affinage de Camembert de quatre jours en préservant les équilibres microbiens et les qualités organoleptiques des fromages.

L'expertise recueillie au chapitre a été une clé de cette réussite et notamment pour la construction de l'algorithme. Il nous paraît important de conserver cette phase de recueil de connaissance auprès d'experts lors de prochaines études de viabilité pour des procédés alimentaires.

La difficulté rencontrée lors de cette étude émane principalement des ressources en temps de calcul nécessaires pour utiliser les algorithmes. Le développement d'outils informatiques adaptés et ergonomiques, et des développements d'outils mathématiques pour réduire la complexité des approches est une voie ardemment explorée par la communauté utilisant la théorie de la viabilité.

La théorie de la viabilité nous a permis de contrôler efficacement le procédé d'affinage mais d'autres études en cours devraient permettre prochainement d'améliorer encore le "choix des évolutions" d'affinage et plus largement le contrôle de procédés alimentaires. En effet, l'étude de viabilité d'un procédé pourrait être complétée par une étude complète de sa robustesse. Coupler les deux méthodes permettrait de proposer des évolutions optimisées tant au niveau de coûts opérationnels que de leur robustesse, limitant ainsi les risques de dérives.

Enfin, les modèles étant toujours imparfaits, il serait intéressant d'explorer les procédés alimentaires en prenant en compte l'incertitude sur les modèles ce qui est aussi réalisable dans le cadre de la théorie de la viabilité(2007).

Chapitre 6

Conclusion générale et perspectives

Les entreprises agroalimentaires doivent maintenir la qualité de leurs produits constante et pour cela mieux maîtriser leurs procédés. Dans cette thèse, nous soutenons que certains procédés alimentaires sont des systèmes complexes. Les considérer comme tels peut permettre de mieux les comprendre et les contrôler.

Une démarche de type “système complexe” a été appliquée à l’affinage de camemberts. Cette démarche a consisté à reconstruire les dynamiques du procédé à différents niveaux d’échelle et à explorer l’intérêt de la théorie de la viabilité pour mieux maîtriser l’affinage.

La figure 6.1 présente les résultats obtenus au cours de nos recherches et leurs limites.

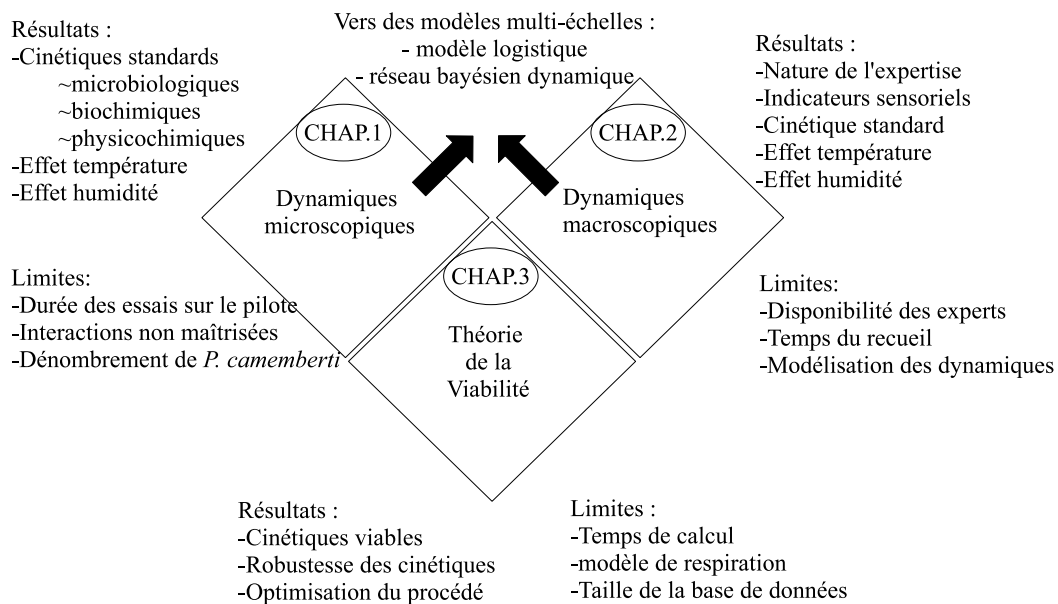


FIGURE 6.1: Résultats et limites de la thèse par chapitre.

Reconstruction des dynamiques aux différents niveaux d'échelle

Envisager l'affinage comme un système complexe consiste à l'étudier de manière globale. Les interactions aux différents niveaux d'échelle sont très importantes. Le comportement de l'ensemble du système ne peut être réduit au comportement de ses parties étudiées séparément.

Dans cette étude nous avons cherché à reconstruire les dynamiques du procédé à partir de son étude "in vivo" (Bourguin (2008)) c'est à dire le plus proche possible de la réalité du processus. Les dynamiques au niveau microscopique ont été étudiées sur l'affinage de camemberts ensemencés avec un écosystème relativement complexe, permettant de réaliser des produits très proches de ceux vendus dans le commerce. Les dynamiques au niveau macroscopique ont d'abord été étudiées à partir de connaissances d'experts accumulées au contact direct du procédé d'affinage en industrie.

Dynamiques au niveau microscopique : bilan, limites et perspectives

Au niveau microscopique, les cinétiques des phénomènes microbiologiques, biochimiques et physico-chimiques ont été recueillis pour un affinage standard et pour des affinages à différentes conditions de température et d'humidité relative. L'effet de la température a été nettement visible notamment par l'accélération engendrée sur les cinétiques de croissance de *G. candidum*, *B. aurantiacum*, sur l'augmentation de la sporulation de *P. camemberti*. Du fait de l'accélération des activités microbiennes, les substrats sont consommés plus rapidement et le pH augmente plus précocement à température d'affinage élevée, la libération de dioxyde de carbone est aussi plus précoce. L'effet humidité a uniquement été observé sur la croissance de *B. aurantiacum* et sur la perte de masse des fromages.

La portée de ces résultats est limitée du fait de la variabilité des données liées aux interactions non maîtrisées. La durée de l'affinage a été un facteur très limitant pour construire une base de données plus complète. Toutes les combinaisons de facteurs ne peuvent être testées expérimentalement.

Les réactions de l'affinage de camemberts sont en grande partie liées au développement de *P. camemberti* et il serait très intéressant de pouvoir "mesurer" son développement au cours de l'affinage de manière plus directe. Des méthodes par PCR (*Polymérase Chain Reaction*) quantitative pourraient être adaptées à cet effet. La PCR quantitative est une méthode de biologie moléculaire d'amplification génique. Elle permet de copier en grand nombre une séquence d'ADN ou d'ARN d'organismes (OGM, virus...) à partir d'une faible quantité pour détecter leur présence et la quantifier.

Une autre perspective de ce travail serait d'approfondir la reconstruction des dynamiques au niveau microscopique en étudiant les phénomènes à des températures et des humidités variant au cours du processus. Généralement les études d'évolutions de micro-organismes sont réalisées à température constante. Des études sur les changements de conditions de température ont par exemple été menées avec succès par des laboratoires de recherche en procédés alimentaires en Belgique et en Espagne (Versyck et al., 1999; Versyck et Van Impe, 2000; Bernaerts et al., 2002; Banga et al., 2002; Bernaerts et al., 2002; Balsa-Canto et al., 2007, 2002). Une étude de ce type pourrait permettre d'obtenir des connaissances supplémentaires sur l'effet des conditions environnementales sur les cinétiques d'affinage.

Les études "in vivo" sur les écosystèmes complexes en fromagerie sont relativement récentes et de nombreux travaux sont encore nécessaires pour mieux comprendre ces systèmes.

Dynamiques au niveau macroscopique : bilan, limites et perspectives

L'objectif était d'étudier les dynamiques de l'évolution des propriétés organoleptiques au cours de l'affinage tout en restant aussi proche du fonctionnement réel que possible.

Des travaux antérieurs (voir 4.2.1) ont montré l'intérêt de travailler avec les experts pour cela à travers la formalisation d'indicateurs sensoriels. A l'issue de ces travaux, des questions restaient posées sur l'expertise, et notamment sur le raisonnement des experts pour contrôler les procédés alimentaires (Perrot, 2004). Une étude bibliographique des travaux réalisés en science cognitive a permis de mieux comprendre le fonctionnement des experts. Cette étude a également confirmé l'importance des perceptions sensorielles dans la démarche experte de contrôle de procédés dynamiques.

Des recueils d'expertises auprès d'affineurs ont été réalisés et des indicateurs sensoriels formalisés pour suivre les dynamiques d'affinage. Des opérateurs ont été formés à ces indicateurs pour suivre l'évolution des propriétés sensorielles au cours des affinages expérimentaux.

Les résultats ont montré qu'une température élevée influe sur la couverture en *P. camemberti* qui apparaît plus tôt, la coloration en jaune de la surface du fromage est également plus précoce ainsi que la diminution de l'humidité visible sur cette surface. L'humidité relative semble surtout influencer sur la vitesse d'apparition de la sous-croûte, celle-ci se développe plus vite à humidité élevée.

L'agrégation des mesures sensorielles "at-line" avec le programme "chunck" a permis de confronter le suivi des dynamiques sensorielles à celles instrumentales de microbiologie, biochimie et physico-chimie. Les données étaient cohérentes ce qui nous a permis de valider les connaissances expertes comme un outil intéressant de contrôle du procédé d'affinage.

Les limites inhérentes au recueil d'expertise sont la disponibilité des experts et le temps à consacrer à ce recueil. Interroger plus d'experts fromagers pourraient permettre d'approfondir avec eux les cinétiques macroscopiques d'affinage, les déviantes notamment.

Notre approche du recueil et de l'analyse de l'expertise humaine devra être appliquée à d'autres types de procédés alimentaires traditionnels pour lesquels l'expertise des opérateurs ou des artisans est au cœur de la qualité des produits. Si sa généralité était confirmée, elle pourrait être utilisée d'une part, pour transmettre les savoir-faire des experts dans les entreprises et, d'autre part, pour être le support de systèmes d'aide à la décision intégrant les différentes sources de connaissances disponibles sur un objet donné.

Toutefois, cette approche pourrait être enrichie par l'observation de l'activité experte, méthode de recueil de connaissances préconisée en psychologie cognitive. Ce type de technique très coûteuse en temps n'a pas été appliquée dans notre étude mais constitue des méthodes d'investigation très intéressantes pour les études futures.

Vers une modélisation des liens aux deux niveaux d'échelle :

Suite à l'étude parallèle des dynamiques micro et macroscopiques, un modèle logistique a pu être construit. Il permet de connaître la phase d'affinage de camemberts en fonction des données instrumentales mesurées sur un échantillon. Il ne permet pas en revanche de prédire l'évolution de ces phases.

Par la suite, des travaux réalisés en parallèle dans le cadre du projet INCALIN ont permis d'enrichir ce lien entre les niveaux microscopique et macroscopique. L'affinage de camemberts a été modélisé à l'aide d'un réseau bayésien dynamique permettant à partir de données d'initialisation de prédire l'évolution des phénomènes microbiologiques, physicochimiques et biochimiques et l'évolution des propriétés organoleptiques. Le taux moyen d'adéquation des prédictions du modèle avec les données expérimentales était de 85%. Ainsi, le formalisme des réseaux bayésiens a permis d'intégrer différentes formes de connaissances : base de données, connaissances scientifiques, connaissances opérationnelles.

Toutefois, dans ce réseau, les dynamiques des propriétés organoleptiques ne sont pas représentées et cela reste un verrou scientifique important de notre étude déjà identifié par Perrot (2004) dans

ses travaux. Les experts ont des dynamiques du procédé en tête, nous avons recueilli la dynamique d'un affinage standard et il est possible de repérer les différents stades de cette évolution sur des affinages expérimentaux. Mais comment modéliser cette évolution ? Il est encore impossible de fixer une cible sensorielle à atteindre et de faire de l'ingénierie reverse pour pouvoir contrôler le procédé et atteindre cette cible.

Le lien entre les différents niveaux d'échelle macro et microscopique n'a été ainsi que partiellement réalisé. L'utilisation du formalisme mathématique des réseaux bayésiens dynamiques a toutefois été très prometteuse. Il serait intéressant de continuer dans cette voie, en essayant d'améliorer la prise en compte des phénomènes d'évolution des propriétés organoleptiques.

Etude des dynamiques de l'affinage dans le cadre de la théorie de la viabilité.

La théorie de la viabilité appliquée à un modèle d'affinage a permis d'identifier l'ensemble des évolutions viables du système en fonction des contraintes du procédé et de la cible qualité à atteindre. Deux études ont été réalisées, l'une pour un affinage en hâloir de 12 jours et l'autre pour un affinage de 8 jours. Le coût et la robustesse des trajectoires ont ensuite été évalués pour optimiser le contrôle du procédé. Ainsi la théorie de la viabilité a été utilisée avec succès pour réduire l'affinage de camemberts de quatre jours en préservant les équilibres microbiens et les qualités organoleptiques des fromages.

La première limite importante de cette étude est liée aux limites du modèle utilisé. Ce modèle nécessite l'entrée de valeurs mesurées de la respiration à chaque pas de temps. Pour pouvoir simuler le procédé, le développement d'un modèle de respiration a donc été nécessaire. Ce modèle est empirique et repose sur des hypothèses que nous n'avons pas vérifiées. Il serait à l'avenir intéressant de construire un modèle de la respiration plus approfondi afin d'améliorer les capacités de prédiction du modèle d'affinage. Pour cela, il est indispensable de pouvoir mieux mesurer le développement de *P. camemberti* qui participe de manière importante à la respiration.

Toutefois, les modèles étant toujours imparfaits, il serait judicieux d'explorer les procédés alimentaires en prenant en compte l'incertitude sur les modèles ce qui est aussi réalisable dans le cadre de la théorie de la viabilité Coeurjolly (2007).

L'expertise recueillie au chapitre 4 a également été une clé de cette réussite et notamment pour la construction de l'algorithme. Il nous paraît important de conserver cette phase de recueil de connaissance auprès d'experts lors de prochaines études de viabilité pour des procédés alimentaires.

La deuxième limite importante est liée au temps de calcul nécessaire pour utiliser les algorithmes. Ce type de problématique est l'une des principales voie de recherche explorée par la communauté utilisant la théorie de la viabilité avec des développements d'outils informatiques adaptés et ergonomiques, et des développements d'outils mathématiques pour réduire la complexité des approches. Dans le même ordre d'idées, le stockage des résultats de l'étude de viabilité a conduit à la construction d'une bases de données relativement importantes. L'interrogation par requêtes de telles bases de données pose des problèmes spécifiques et notamment de temps de réponse très important. Il serait intéressant d'étudier ce type de problématique avec des spécialistes de gestion de base de données. Une étude d'optimisation multi-objectifs par exemple pourrait être menée sur ces bases de données si elles n'étaient pas si difficiles à interroger.

A plus long terme, il serait intéressant de développer des systèmes d'aide à la décision à partir des études de viabilité. Les cinétiques viables seraient identifiées et stockées dans une base de données avec leurs valeurs de robustesse en chaque point. Une interface graphique pourrait être créée pour permettre à des industriels d'interroger cette base de données et d'optimiser leurs procédés hors

ligne ou en ligne. Des fonctions multi-objectifs appliquées à cette base de données pourraient même permettre d'arbitrer entre les solutions en fonction des objectifs propres à chaque problématique industrielle.

Perspectives pour l'étude des procédés alimentaires en tant que systèmes complexes

La science des systèmes complexes propose de nouveaux concepts pour comprendre les systèmes instables, multi-variables, multi-échelles, situés dans des environnements changeants, qui évoluent selon des dynamiques internes complexes en interaction à différentes échelles.

Dans cette thèse nous avons fait de premiers pas vers l'étude des dynamiques multi-échelles et de leurs interactions pour la maîtrise des procédés alimentaires. Les outils, méthodes et concepts des systèmes complexes constituent un cadre conceptuel d'étude des procédés alimentaires très intéressant.

Progresser dans l'intégration des connaissances acquises aux différents niveaux d'échelle du procédé permettrait d'aller plus loin sur cette thématique de recherche. La figure 6.2 présente cette démarche. Intégrer les connaissances aux niveaux microscopique et macroscopique permettra de construire des modèles plus globaux des procédés alimentaires. Ces modèles permettront ensuite l'exploration des dynamiques des procédés pour améliorer leur maîtrise, notamment dans le cadre de la théorie de la viabilité.

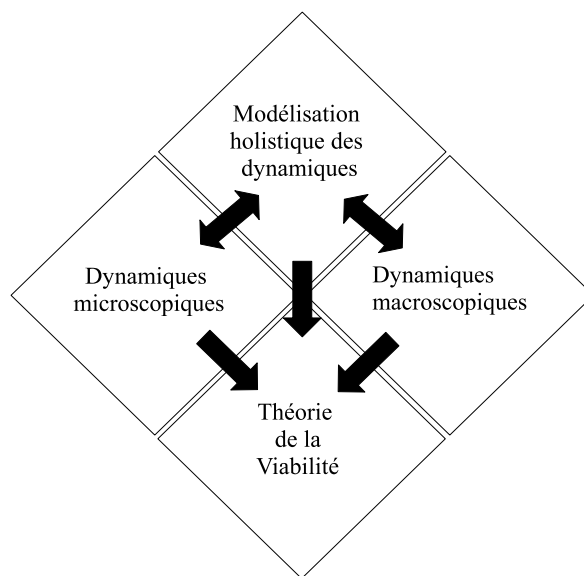


FIGURE 6.2: Démarche d'intégration des connaissances pour poursuivre l'étude des procédés alimentaires avec une démarche de type "système complexe".

Bibliographie

- Adour, L., Couriol, C., Amrane, A., et Prigent, Y. (2002). An unstructured model for the analysis of substrate consumption and product release in relation to biosynthesis and cell maintenance during batch cultures of *geotrichum candidum* and *penicillium camemberti*. *Journal Of Chemical Technology And Biotechnology*, 77(12) :1300–1307.
- Agioux, L. (2003). *Conception et validation d'un outil d'aide à l'estimation de l'état sensoriel des fromages en cours d'affinage. Application à l'affinage d'un fromage à pâte molle et à croûte fleurie*. PhD thesis, Institut National Agronomique de Paris Grignon.
- Aldarf, M., Fourcade, F., Amrane, A., et Prigent, Y. (2002). Growth model of *penicillium camemberti* cultivated on a solid medium - a logistic model for substrate consumption and metabolite production. *Process Biochemistry*, 38(3) :333–342.
- Aldarf, M., Fourcade, F., Amrane, A., et Prigent, Y. (2006). Substrate and metabolite diffusion within model medium for soft cheese in relation to growth of *penicillium camemberti*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 33(8) :685–692.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risques*. Le Travail Humain. PUF, Paris, France.
- Amalberti, R. et Valot, C. (1990). *Champ de validité, pour une population de pilotes, de l'expertise de l'un d'entre eux.*, volume 53 (4) of *Le Travail Humain*. PUF, Paris, France.
- Amrane, A., Aldarf, M., Fourcade, F., et Prigent, Y. (2006). Substrate and metabolite diffusion within solid medium in relation to growth of *geotrichum candidum*. *Foodsim'2006 : 4th International Conference On Simulation And Modelling In The Food And Bio-Industry*, pages 179–186.
- Arguelles, A., Castello, M., Sanz, J., et Fito, P. (2007). Application of safes methodology in manchego-type cheese manufacture. *Journal of Food Engineering*, 83(2) :229–237.
- Aubin, J. P. et Frankowska, H. (1996). The viability kernel algorithm for computing value functions of infinite horizon optimal control problems. *Journal Of Mathematical Analysis And Applications*, 201(2) :555–576.
- Aubin, J.-P. (1991). *Viability theory*. Birkhäuser, Boston, Basel.
- Aubin, J. P., Bayen, A. M., et Saint-Pierre, P. (2005). A viability approach to hamilton-jacobi equations : application to concave highway traffic flux functions. *2005 44th IEEE Conference on Decision and Control & European Control Conference, Vols 1-8*, pages 3519–3524.
- Aubin, J. P., Bonneuil, N., Maurin, F., et Saint-Pierre, P. (2001). Viability of pay-as-you-go systems. *Journal Of Evolutionary Economics*, 11(5) :555–571.
- Aziza, A., Couriol, C., Amrane, A., et Boutrou, R. (2005). Evidences for synergistic effects of *geotrichum candidum* on *penicillium camemberti* growing on cheese juice. *Enzyme and Microbial Technology*, 37(2) :218–224.

- Aziza, F., Mettler, E., Daudin, J. J., et Sanaa, M. (2006). Stochastic, compartmental, and dynamic modeling of cross-contamination during mechanical smearing of cheeses. *Risk Analysis* : 26 (3) 731-745, 26(3) :731-745.
- Balsa-Canto, E., Banga, J. R., et Alonso, A. A. (2002). A novel, efficient and reliable method for thermal process design and optimization. part ii : applications. *Journal Of Food Engineering*, 52(3) :235-247.
- Balsa-Canto, E., Rodriguez-Fernandez, M., et Banga, J. R. (2007). Optimal design of dynamic experiments for improved estimation of kinetic parameters of thermal degradation. *Journal of Food Engineering*, 82(2) :178-188.
- Banga, J. R., Balsa-Canto, E., et Alonso, A. A. (2008). Quality and safety models and optimization as part of computer-integrated manufacturing. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 7(1) :168-174.
- Banga, J. R., Versyck, K. J., et Van Impe, J. F. (2002). Computation of optimal identification experiments for nonlinear dynamic process models : a stochastic global optimization approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(10) :2425-2430.
- Baudrit, C., Helias, A., et Perrot, N. (2007). Uncertainty analysis in food engineering involving imprecision and randomness. *Isipta 07-Proceedings Of The Fifth International Symposium On Imprecise Probability :Theories And Applications*, pages 21-30.
- Baudrit, C., Sicard, M., Wullemmin, P., et Perrot, N. (2009a). Toward a knowledge integration for representing food processes. In *ECCS09*, Warwick (UK).
- Baudrit, C., Sicard, M., Wullemmin, P.-H., et Perrot, N. (2009b). Toward a global modelling of the cheese ripening process by coupling heterogeneous knowledge with dynamic bayesian networks. *Journal of food engineering.*, accepté.
- Beresford, T. P., Fitzsimons, N. A., Brennan, N. L., et Cogan, T. M. (2001). Recent advances in cheese microbiology. *International Dairy Journal*, 11(4-7) :259-274.
- Berger, C., Khan, J. A., Molimard, P., Martin, N., et Spinnler, H. E. (1999). Production of sulfur flavors by ten strains of *Geotrichum candidum*. *Applied And Environmental Microbiology*, 65(12) :5510-5514.
- Bernaerts, K., Servaes, R. D., Kooyman, S., Versyck, K. J., et Van Impe, J. F. (2002). Optimal temperature input design for estimation of the square root model parameters : parameter accuracy and model validity restrictions. *International Journal of Food Microbiology*, 73(2-3) :145-157.
- Bimbenet, J.-J., Dumoulin, E., et Trystram, G. (1994). *Automatic control of food and biological processes*. Elsevier.
- Bimbenet, J. J., Schubert, H., et Trystram, G. (2007). Advances in research in food process engineering as presented at icef 9. *Journal of Food Engineering*, 78(2) :390-404.
- Bisseret, A., Sebillote, S., et Falzon, P., editors (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Toulouse, France : Octares.
- Béné, C., Doyen, L., et Gabay, D. (2001). A viability analysis for a bio-economic model. *Ecological Economics*, 36(3) :385-396.
- Bonaiti, C., Leclercq-Perlat, M. N., Latrille, E., et Corrieu, G. (2004). Deacidification by debaryomyces hansenii of smear soft cheeses ripened under controlled conditions : Relative humidity and temperature influences. *Journal of Dairy Science*, 87(11) :3976-3988.

- Bonneuil, N. (2000). Viability in dynamic social networks. *Journal Of Mathematical Sociology*, 24(3) :175–192.
- Bonneuil, N. (2003). Making ecosystem models viable. *Bulletin Of Mathematical Biology*, 65(6) :1081–1094.
- Bonneuil, N. et Mullers, K. (1997). Viable populations in a prey-predator system. *Journal Of Mathematical Biology*, 35(3) :261–293.
- Bonneuil, N. et Saint-Pierre, P. (2004). The hybrid guaranteed capture basin algorithm in economics. *Hybrid Systems : Computation And Control, Proceedings, 2993* :187–202.
- Bouchon-Meunier, B., Rifqui, M., et Bothorel, S. (1996). Towards general measures of comparison of objects. *Fuzzy Sets and Systems*, 84 :143–153.
- Bourgine, P. (2008). *Déterminismes et complexités. Du physique à l'éthique.*, chapter Les systèmes complexes obeissent-ils à des lois ?, pages 377–395. La découverte.
- Bozkurt, H. et Erkmen, O. (2001). Predictive modeling of yersinia enterocolitica inactivation in turkish feta cheese during storage. *Journal of Food Engineering*, 47(2) :81–87.
- Buche, P., Dibie-Barthelemy, J., Haemmerle, O., et Thomopoulos, R. (2006). Fuzzy concepts applied to the design of a database in predictive microbiology. *Fuzzy Sets And Systems*, 157(9) :1188–1200.
- Cardaliaguet, P., Quincampoix, P., et Saint-Pierre, P. (1999). *Stochastic and differential games : theory and numerical methods*, chapter Numerical analysis for optimal control and differential games, pages 177–247. Birkhauser.
- Cellier, J., Eyrolle, H., et Marine, C. (1997). Expertise in dynamique environments. *Ergonomics*, 40 :28–50.
- Chapel, L., Deffuant, G., Martin, S., et Mullon, C. (2008). Defining yield policies in a viability approach. *Ecological Modelling*, 212(1-2) :10–15.
- Charpentier, J.-C. (2002). *Génie des procédés alimentaires. Des bases aux applications.*, chapter La nouvelle approche du génie des procédés : de la molécule au produit possédant la valeur d'usage formulée par le consommateur. Le bel exemple des industries alimentaires, pages 7–9. Dunod.
- Chase, W. et Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive psychology*, 4 :55–81.
- Chavalarias, D. (2008). *Déterminismes et complexités. Du physique à l'éthique.*, chapter Physiques et formalismes. Introduction., pages 17–24. La découverte.
- Chi, M., Feltovich, P., et Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science.*, 5 :121–152.
- Choisy, C., Desmazeaud, M., Gripon, J.-C., Lamberet, G., et Lenoir, J. (1997). *Le fromage*, chapter La biochimie de l'affinage, pages 86–164. Lavoisier, Tec&Doc.
- Coeurjolly, D. et Montanvert, A. (2007). Optimal separable algorithms to compute the reverse euclidean distance transformation and discrete medial axis in arbitrary dimension. *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence*, 29(3) :437–448.
- Curt, C., Perrot, N., Allais, I., Agioux, L., Ioannou, I., Edoura-Gaena, B., Trystram, G., et Hossenlopp, J. (2004). *Intelligent sensory evaluation. Methodologies and applications.*, chapter Formalization of at-line human evaluations to monitor product changes during processing : The concept of sensory indicator, pages 157–174. Springer, Berlin, Germany.

- Danzart, M. (2009). *Evaluation sensorielle. Manuel méthodologique.*, chapter Comparaison de produits, pages 405–420. Lavoisier, Tec&Doc, Paris, France.
- Darses, F., Hoc, J.-M., et Chauvin, C. (2004). *Psychologie ergonomique : tendances actuelles*, chapter Cadres théoriques et méthodes de production de connaissances en psychologie ergonomique, pages 221–251. Le travail humain puf.
- Davidson, V. J. (1994). Expert-systems in-process control. *Food Research International*, 27(2) :121–128.
- Dreyfus, H.-L. et Dreyfus, S.-E., editors (1986). *Mind over Machine : the power of human intuition and expertise in the era of the computer*. Oxford ; Basil Blackwell.
- Ericsson, K., Krampe, R., et Tesh-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100 :363–406.
- Fagan, C. C., Everard, C., O'Donnell, C. P., Downey, G., Sheehan, E. M., Delahunty, C. M., et O'Callaghan, D. J. (2007). Evaluating mid-infrared spectroscopy as a new technique for predicting sensory texture attributes of processed cheese. *Journal of Dairy Science*, 90(3) :1122–1132.
- Farrington-Darby, T. et Wilson, J. R. (2006). The nature of expertise : A review. *Applied Ergonomics*, 37(1) :17–32.
- Ferchichi, M., Hemme, D., et Nardi, M. (1986). Induction of methanethiol production by *brevibacterium-linens* cnrz 918. *Journal Of General Microbiology*, 132 :3075–3082.
- Fito, P., LeMaguer, M., Betoret, N., et Fito, P. J. (2007). Advanced food process engineering to model real foods and processes : The "safes" methodology. *Journal of Food Engineering*, 83(2) :173–185.
- Garcia, M. S. G., Balsa-Canto, E., Alonso, A. A., et Banga, J. R. (2006). Computing optimal operating policies for the food industry. *Journal Of Food Engineering*, 74(1) :13–23.
- Getz, I., editor (1996). *L'expertise cognitive aux échecs*. Psychologie d'aujourd'hui. Presse Universitaire de France, Paris, France.
- Gibson, E. (1969). *Principles of perceptual learning and development*. Gibson, E.J., Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- Goelzer, A., Charnomordic, B., Colombie, S., Fromion, V., et Sablayrolles, J. M. (2009). Simulation and optimization software for alcoholic fermentation in winemaking conditions. *Food Control*, 20(7) :635–642.
- Guéguen, M., Desmasures, N., Corroler, D., Henri-Dubernet, S., Gente, S., et C., L. (2005). *Les fermentations au service des produits de terroir*, chapter Ecologie microbienne des laits et des fromages de Camembert, pages 227–231. INRA Editions.
- Guillemin, H. (2007). Cric 2.0.
- Guillemin, H., Trelea, I. C., Picque, D., Perret, B., Cattenoz, T., et Corrieu, G. (2006). An optical method to monitor casein particle size distribution in whey. *Lait*, 86(5) :359–372.
- Guillier, L., Stahl, V., Hezard, B., Notz, E., et Briandet, R. (2008). Modelling the competitive growth between *listeria monocytogenes* and biofilm microflora of smear cheese wooden shelves. *International Journal Of Food Microbiology*, 128(1) :51–57.
- Hélias, A., Mirade, P. S., et Corrieu, G. (2007a). Modeling of camembert-type cheese mass loss in a ripening chamber : Main biological and physical phenomena. *Journal of Dairy Science*, 90 :5324–5333.

- Helias, A., Mirade, P. S., et Corrieu, G. (2007b). Modeling of camembert-type cheese mass loss in a ripening chamber : Main biological and physical phenomena. *Journal Of Dairy Science*, 90(11) :5324–5333.
- Helias, A., Mirade, P.-S., et Corrieu, G. (2007c). Sensitivity analysis of a simplified cheese ripening mass loss model. In *10th International IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology. Cancun, Mexico*.
- Hemme, D., Bouillane, C., Métro, F., et Desmazeaud, M. (1982). Microbial catabolism of amino acids during cheese ripening. *Sciences des aliments*, 2 :113–123.
- Hoc, J.-M. & Darses, F., editor (2004). *Psychologie ergonomique : tendances actuelles*. Le Travail Humain. PUF, Paris, France.
- Hoc, J.-M. (1996). *Supervision et control de processus*. Sciences et technologies de la connaissance. Press Universitaire de Grenoble, Grenoble, France.
- Hoffman, R. R., Shadbolt, N. R., Burton, A. M., et Klein, G. (1995). Eliciting knowledge from experts - a methodological analysis. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 62(2) :129–158.
- Holding, D. (1992). Theorie of chess skill. *Psychological Research*, 54 :10–16.
- Howell, D. C., editor (1998). *Methodes statistiques en sciences humaines*. Méthodes en sciences humaines. DeBoeck, Paris, France., 2 edition.
- Huber, P., Fertsch, B., Schreiber, R., et Hinrichs, J. (2001). Dynamic model system to study the kinetics of thermally-induced syneresis of cheese curd grains. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 56(10) :549–552.
- Ilyukhin, S. V., Haley, T. A., et Singh, R. K. (2001). A survey of automation practices in the food industry. *Food Control*, 12(5) :285–296.
- Ioannou, I., Mauris, G., Trystram, G., et Perrot, N. (2006). Back-propagation of imprecision in a cheese ripening fuzzy model based on human sensory evaluations. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9) :1179–1187.
- Ioannou, I., Perrot, N., Hossenlopp, J., Mauris, G., et Trystram, G. (2002). The fuzzy set theory : a helpful tool for the estimation of sensory properties of crusting sausage appearance by a single expert. *Food Quality and Preference*, 13(7-8) :589–595.
- Ioannou, I., Perrot, N., Mauris, G., et Trystram, G. (2003). Experimental analysis of sensory measurement imperfection impact for a cheese ripening fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems - Ifsa 2003, Proceedings*, 2715 :595–602.
- Jakobsen, M. et Risbo, J. (2009). Carbon dioxide equilibrium between product and gas phase of modified atmosphere packaging systems : Exemplified by semihard cheese. *Journal Of Food Engineering*, 92(3) :285–290.
- Jimenez-Marquez, S. A., Thibault, J., et Lacroix, C. (2005). Prediction of moisture in cheese of commercial production using neural networks. *International Dairy Journal*, 15(11) :1156–1174.
- Kahneman, D. et Tversky, A. (1972). Subjective probability : a judgement of representativeness. *Cognitive Psychology*, 3 :430–454.
- Karoui, R., Mouazen, A. M., Dufour, E., Pillonel, L., Picque, D., Bosset, J. O., et De Baerdemaeker, J. (2006). Mid-infrared spectrometry : A tool for the determination of chemical parameters in emmental cheeses produced during winter. *Lait*, 86(1) :83–97.

- Kraggerud, H., Skeie, S., Hoy, M., Rokke, L., et Abrahamsen, R. K. (2008). Season and ripening temperature influence fatty acid composition and sensory properties of semi-hard cheese during maturation. *International Dairy Journal*, 18(8) :801–810.
- Leclercq-Perlat, M. N., Buono, F., Lambert, D., Latrille, E., Spinnler, H. E., et Corrieu, G. (2004a). Controlled production of camembert-type cheeses. part i : Microbiological and physicochemical evolutions. *Journal of Dairy Research*, 71(3) :346–354.
- Leclercq-Perlat, M. N., Corrieu, G., et Spinnler, H. E. (2004b). Comparison of volatile compounds produced in model cheese medium deacidified by *debaryomyces hansenii* or *kluyveromyces marxianus*. *Journal of Dairy Science*, 87(5) :1545–1550.
- Leclercq-Perlat, M. N., Corrieu, G., et Spinnler, H. E. (2007). Controlled production of camembert-type cheeses : Part iii role of the ripening microflora on free fatty acid concentrations. *Journal of Dairy Research*, 74(2) :218–225.
- Leclercq-Perlat, M. N., Latrille, E., Corrieu, G., et Spinnler, H. E. (2004c). Controlled production of camembert-type cheeses. part ii. changes in the concentration of the more volatile compounds. *Journal of Dairy Research*, 71(3) :355–366.
- Leclercq-Perlat, M. N., Oumer, A., Bergere, J. L., Spinnler, H. E., et Corrieu, G. (1999). Growth of *debaryomyces hansenii* on a bacterial surface-ripened soft cheese. *Journal of Dairy Research*, 66(2) :271–281.
- Leclercq-Perlat, M. N., Oumer, A., Bergere, J. L., Spinnler, H. E., et Corrieu, G. (2000). Behavior of *brevibacterium linens* and *debaryomyces hansenii* as ripening flora in controlled production of smear soft cheese from reconstituted milk : Growth and substrate consumption. *Journal of Dairy Science*, 83(8) :1665–1673.
- Leclercq-Perlat, M. N., Picque, D., Riahi, H., et Corrieu, G. (2006). Microbiological and biochemical aspects of camembert-type cheeses depend on atmospheric composition in the ripening chamber. *Journal of Dairy Science*, 89(8) :3260–3273.
- Legland, D. (2005). *Morphométrie de structures cellulaires biologiques partiellement observées*. PhD thesis, Université Paris Descartes Paris 5.
- Lenoir, J. (1983). The surface microflora and their actions during cheese ripening. *International Dairy Federation.*, Bull. FIL-IDF 171 :3–19.
- Leplat, J., editor (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail, Contribution à la psychologie ergonomique*. PUF, Paris.
- Linko, S. (1998). Advanced and intelligent control of food processes. *Food Australia*, 50(8) :407–411.
- Liu, S. et Puri, V. M. (2008). Dynamic growth models for *l. monocytogenes* during ripening in camembert cheese. *Lwt-Food Science and Technology*, 41(3) :511–520.
- Liu, S., Puri, V. M., et Demirci, A. (2007). Spatial distribution of population of *listeria monocytogenes* during manufacturing and ripening of camembert cheese. *Journal Of Food Safety*, 27(1) :43–55.
- Liu, S. et Puri, V. M. (2008). ph spatial distribution model during ripening of camembert cheese. *Lwt-Food Science And Technology*, 41(8) :1528–1534.
- Martin, N., Savonitto, S., Molimard, P., Berger, C., Brousse, M., et Spinnler, H. E. (1999). Flavor generation in cheese curd by coculturing with selected yeast, mold, and bacteria. *Journal of Dairy Science*, 82(6) :1072–1080.

- Martin, S. (2004). The cost of restoration as a way of defining resilience : a viability approach applied to a model of lake eutrophication. *Ecology And Society*, 9(2) :8.
- Martin-del Campo, S. T., Picque, D., Cosio-Ramirez, R., et Corrieu, G. (2007). Middle infrared spectroscopy characterization of ripening stages of camembert-type cheeses. *International Dairy Journal*, 17(7) :835–845.
- McGrath, M. J., O'Connor, J. F., et Cummins, S. (1998). Implementing a process control strategy for the food processing industry. *Journal Of Food Engineering*, 35(3) :313–321.
- Merlet, A. (1995). Influence des paramètres d'ambiance sur l'affinage des fromages.
- Mesmoudi, S., Alvarez, I., Martin, S., Sicard, M., et Wuillemin, P.-H. (2009). Geometric analysis of a capture basin. application to cheese ripening process. In *ECCS09*, Warwick (UK).
- Michalski, M. C., Gassi, J. Y., Famelart, M. H., Leconte, N., Camier, B., Michel, F., et Briard, V. (2003). The size of native milk fat globules affects physico-chemical and sensory properties of camembert cheese. *Lait*, 83(2) :131–143.
- Mietton, B. (1987). *Cours de fromagerie*. ENIL-Bio, Poligny, France.
- Molimard, P., Lesschaeve, I., Issanchou, S., Brousse, M., et Spinnler, H. E. (1997). Effect of the association of surface flora on the sensory properties of mould-ripened cheese. *Lait*, 77(1) :181–187.
- Molimard, P., Vassal, L., Bouvier, I., et Spinnler, H. E. (1995). Growth of penicillium-camemberti and geotrichium-candidum in pure and mixed cultures on experimental mold ripened cheese of camembert-type. *Lait*, 75(1) :3–16.
- Mounier, J., Gelsomino, R., Goerges, S., Vancanneyt, M., Vandemeulebroecke, K., Hoste, B., Scherer, S., Swings, J., Fitzgerald, G. F., et Cogan, T. M. (2005). Surface microflora of four smear-ripened cheeses. *Applied And Environmental Microbiology*, 71(11) :6489–6500.
- Mullon, C., Curry, P., et Shannon, L. (2004). Viability model of trophic interactions in marine ecosystems. *Natural Resource Modelling*, 17(1) :27–58.
- Ndiaye, A., Della Valle, G., et Roussel, P. (2009). Qualitative modelling of a multi-step process : The case of french breadmaking. *Expert Systems With Applications*, 36(2) :1020–1038.
- Norman, D. et Bobrow, D. (1975). On data-limited and resource limited processes. *Cognitive psychologie*, 7 :44–64.
- Ochanine, D. (1978). Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail. *Psychologie et Education*, 2 :63–72.
- O'Mahony, J. A., McSweeney, P. L. H., et Lucey, J. A. (2006). A model system for studying the effects of colloidal calcium phosphate concentration on the rheological properties of cheddar cheese. *Journal of Dairy Science*, 89(3) :892–904.
- O'Toole, A. J., Deffenbacher, K. A., Valentin, D., McKee, K., Huff, D., et Abdi, H. (1998). The perception of face gender : The role of stimulus structure in recognition and classification. *Memory & Cognition*, 26(1) :146–160.
- Pajonk, A. S., Saurel, R., et Andrieu, J. (2003). Experimental study and modeling of effective nacl diffusion coefficients values during emmental cheese brining. *Journal of Food Engineering*, 60(3) :307–313.

- Paquet, J., Lacroix, C., et Thibault, J. (2000). Modeling of pH and acidity for industrial cheese production. *Journal of Dairy Science*, 83(11) :2393–2409.
- Pearl, J., editor (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Morgan Kaufman, San Diego, USA.
- Pereira, R. B., Bennett, R. J., et Luckman, M. S. (2005). Instrumental and sensory evaluation of textural attributes in cheese analogs : A correlation study. *Journal Of Sensory Studies*, 20(5) :434–453.
- Perrot, N. (2004). *De la maîtrise des procédés alimentaires par intégration de l'expertise humaine. Le formalisme de la théorie des ensembles flous comme support*. HDR. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- Perrot, N., Agioux, L., Ioannou, I., Mauris, G., Corrieu, G., et Trystram, G. (2004). Decision support system design using the operator skill to control cheese ripening-application of the fuzzy symbolic approach. *Journal of Food Engineering*, 64(3) :321–333.
- Perrot, N., Ioannou, I., Allais, I., Curt, C., Hossenlopp, J., et Trystram, G. (2006). Fuzzy concepts applied to food product quality control : A review. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9) :1145–1154.
- Perrot, N., Trystram, G., LeGuennec, D., et Guely, F. (1996). Sensor fusion for real time quality evaluation of biscuit during baking. comparison between bayesian and fuzzy approaches. *Journal of Food Engineering*, 29(3-4) :301–315.
- Picque, D., Leclercq-Perlat, M. N., et Corrieu, G. (2006). Effects of atmospheric composition on respiratory behavior, weight loss, and appearance of camembert-type cheeses during chamber ripening. *Journal of Dairy Science*, 89(8) :3250–3259.
- Picque, D., Trelea, I. C., Gauzere, Y., Mietton, B., et Corrieu, G. (2004). Modelling of pH, dry matter and mineral content of curds during soft cheese drainage. *Lait*, 84(5) :463–472.
- Pionnier, E., Engel, E., Salles, C., et Le Quere, J. L. (2002). Interactions between non-volatile water-soluble molecules and aroma compounds in camembert cheese. *Food Chemistry*, 76(1) :13–20.
- Poirazi, P., Leroy, F., Georgalaki, M. D., Aktypis, A., De Vuyst, L., et Tsakalidou, E. (2007). Use of artificial neural networks and a gamma-concept-based approach to model growth of and bacteriocin production by streptococcus macedonicus aca-dc 198 under simulated conditions of kasseri cheese production. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(3) :768–776.
- Pripp, A. H., Skeie, S., Isaksson, T., Borge, G. I., et Sorhaug, T. (2006). Multivariate modelling of relationships between proteolysis and sensory quality of prast cheese. *International Dairy Journal*, 16(3) :225–235.
- Rabinowitz, M. et McAuley, M. (1990). *Interactions among aptitudes, strategies, and knowledge in cognitive performance.*, chapter Conceptual knowledge processing : an oxymoron? New York : Springer-Verlag.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction : An approach to cognitive engineering*. Elsevier Science Ltd, Amsterdam, The Netherlands : North-Holland.
- Raufaste, E. (2001). *Les mecanismes cognitifs du diagnostic medical, optimisation de l'expertise*. Le Travail Humain. PUF, Paris, France.
- Raufaste, E., Neves, R. D., et Marine, C. (2003). Testing the descriptive validity of possibility theory in human judgments of uncertainty. *Artificial Intelligence*, 148(1-2) :197–218.

- Riahi, M. H., Trelea, I. C., Picque, D., Leclercq-Perlat, M. N., Helias, A., et Corrieu, G. (2007). Model describing debaryomyces hansenii growth and substrate consumption during a smear soft cheese deacidification and ripening. *Journal of Dairy Science*, 90(5) :2525–2537.
- Richard, J. et Zadi, H. (1983). Dominant bacterial-flora of camembert cheese made from raw-milk. *Lait*, 63(623-) :25–42.
- Rodriguez-Aguilera, R., Oliveira, J. C., Montanez, J. C., et Mahajan, P. V. (2009a). Gas exchange dynamics in modified atmosphere packaging of soft cheese. *Journal Of Food Engineering*, 95(3) :438–445.
- Rodriguez-Aguilera, R., Oliveira, J. C., Montanez, J. C., et Mahajan, P. V. (2009b). Mathematical modelling of the effect of gas composition and storage temperature on the gas exchange rate of soft cheese. *Journal Of Food Engineering*, 95(1) :82–89.
- Rousseau, M. (1984). Study of the surface flora of traditional camembert cheese by scanning electron-microscopy. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 39(3) :129–135.
- Saint-Pierre, P. (1994). Approximation of the viability kernel. *Applied Mathematics and Optimization*, 29 :187–209.
- Saporta, G., editor (2006). *Probabilités, analyses de données et statistique*. Technip, Paris, France, 2 edition.
- Schanck, R. et Abelson, R. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding*. Erlbaum, Hillsdale, New Jersey.
- Shanteau, J. (1992). Competence in experts : the role of task characteristics. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 53 :252–266.
- Sihufe, G. A., Zorrilla, S. E., Perotti, M. C., Wolf, I. V., Zalazar, C. A., Sabbag, N. G., Costa, S. C., et Rubiolo, A. C. (2010). Acceleration of cheese ripening at elevated temperature. an estimation of the optimal ripening time of a traditional argentinean hard cheese. *Food Chemistry : 119 (1) 101-107*, 119(1) :101–107.
- Sterling, T., Becker, D., Savarese, D., Dorban, J., Ranawake, U., et Packer, C. (1995). Beowulf : a parallel workstation for scientific computation. *International conference on parallel processing*, pages 11–14.
- Sternberg, R.-J., editor (2007). *Manuel de psychologie cognitive. Du laboratoire à la vie quotidienne*. Ouverture psychologiques. DeBoeck, Bruxelles, Belgique.
- Tijsskens, E. et De Baerdemaeker, J. (2004). Mathematical modelling of syneresis of cheese curd. *Mathematics And Computers In Simulation*, 65(1-2) :165–175.
- Trelea, I. (1997). *Commande prédictive optimale sous contraintes des procédés discontinus non linéaires utilisés dans l'industrie alimentaire*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires.
- Trelea, I. C., Titica, M., et Corrieu, G. (2004). Dynamic optimisation of the aroma production in brewing fermentation. *Journal Of Process Control*, 14(1) :1–16.
- Turhan, M. et Kaletunc, G. (1992). Modeling of salt diffusion in white cheese during long-term brining. *Journal of Food Science*, 57(5) :1082–1085.
- Valentin, D., Chollet, S., et Abdi, H. (2003). Les mots du vin : experts et novices diffèrent-ils quand ils décrivent des vins? *Corpus*, N.2, la distance intertextuelle.

- Van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic modeling of food quality : A critical review. *Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 7(1) :144–158.
- Vermersch, P. (1994). *L'entretien d'explicitation*. ESF, Issy-les-Moulineaux, France, 5 edition.
- Versyck, K. J., Bernaerts, K., Geeraerd, A. H., et Van Impe, J. F. (1999). Introducing optimal experimental design in predictive modeling : A motivating example. *International Journal of Food Microbiology*, 51(1) :39–51.
- Versyck, K. J. et Van Impe, J. F. (2000). Optimal design of a closed loop controller for estimation of parameter couples of microbial growth kinetics. *Chemical Engineering Communications*, 180 :39–59.
- Wickens, C. (1991). *Multiple task performance.*, chapter Processing resources and attention. Taylor&Francis., London.
- Wiles, P. G. et Baldwin, A. J. (1996). Dry salting of cheese .1. diffusion. *Food And Bioproducts Processing*, 74(C3) :127–132.
- Wolff, M. (2003). *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, chapter Apports de l'analyse géométrique des données pour la modélisation de l'activité., pages 196–227. Le Travail Humain. PUF, Paris, France.
- Wood, L. E. et Ford, J. M. (1993). Structuring interviews with experts during knowledge elicitation. *International Journal of Intelligent Systems*, 8(1) :71–90.
- Wooten, T. et Rowley, T. (1995). Using anthropological interview strategies to enhance knowledge acquisition. *Expert Systems with Applications*, 9(4) :469–482.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control.*, 8 :338–353.
- Zorrilla, S. E. et Rubiolo, A. C. (1994). Modeling nacl and kcl movement in fynbo cheese during salting. *Journal of Food Science*, 59(5) :976–980.
- Zwirn, H. P., editor (2006). *Les systèmes complexes. Mathématiques et biologie*. Sciences. Odile Jacob, Paris, France.

Chapitre 7

Annexes

**Cinétiques microbiologiques, physicochimiques et biochimiques
des affinages expérimentaux**

Contrôle organoleptique des affinages expérimentaux par les Maisons du Goût (ACTILAIT)

**Résultats statistiques des analyses de données des dégustations
sensorielles par le panel des Maison du Goût**

Résumé

De nombreux procédés alimentaires comme l'affinage de Camembert peuvent être considérés comme des systèmes complexes. De nombreuses variables sont en interactions dynamiques à différents niveaux d'échelle (microscopique, macroscopique...). Contrôler ces procédés pour maintenir la qualité nutritionnelle, sanitaire et organoleptique des produits est un enjeu primordial pour l'industrie alimentaire. Les connaissances manquent toujours pour le permettre.

Dans cette thèse, les approches utilisées par la communauté des systèmes complexes ont été envisagées pour résoudre cette problématique. La première piste a été de reconstruire les dynamiques des phénomènes pour différentes conditions de température et d'humidité relative d'affinage. Les réactions microbiologiques, physicochimiques et biochimiques ont été étudiées en hâloir pilote. Puis les évolutions des propriétés organoleptiques durant l'affinage ont été étudiées grâce au recueil de connaissances expertes et à la formalisation d'indicateurs sensoriels. Les dynamiques recueillies à ces différents niveaux d'échelle ont permis de modéliser de manière globale l'affinage.

La seconde piste a été d'explorer l'affinage à partir d'un modèle mécanistique en utilisant les méthodes développées dans le cadre de la théorie de la viabilité. Cette théorie a été appliquée à l'affinage avec deux objectifs, connaître les domaines de viabilité du système en fonction des contraintes de contrôle (durée d'affinage) et évaluer la sensibilité du procédé à des perturbations dans ces domaines. Cette étude a permis de proposer une trajectoire optimisée d'affinage avec un temps réduit de 4 jours. Cette trajectoire a été testée avec succès en hâloir pilote, les équilibres microbiens ont été préservés ainsi que les propriétés organoleptiques des fromages.

Les concepts, méthodes et outils des systèmes complexes ont ainsi été utilisés avec succès pour le contrôle de l'affinage de Camembert. D'autres procédés alimentaires pourront à l'avenir être étudiés de la même manière pour envisager une généralisation des méthodes.

Mots clés : Systèmes complexes ; théorie de la viabilité ; recueil d'expertise ; affinage de fromage.

Abstract

The Camembert cheese ripening process could be considered as a complex system such as many other food processes. Many variables are in interaction throughout time at different scale level (microscopic to macroscopic). The food industries have to control these processes to preserve nutritional, sanitary and organoleptic quality but knowledge are still missing to reach this goal.

In this work, it was attempt enhance food process control with the approaches developpe in the complex systems sciences. In our application, the first step was to collect kinetics of the microbiological, physicochemical and biochemical phenomena at different ripening conditions (various temperature and relative humidity). In parallel, organoleptic properties were monitored during the process. The sensory indicators used were collected and formalized from cheese expert knowledge. Then the kinetics at the “microscopic” level were integrated to those at the “macroscopic” level in order to model the cheese ripening process at a global point of view.

In a second step, the viability theory was used as a framework to explore the cheese ripening process from a mecanistic model previously developped. Two aim were reached with the theory : the viability domain of the system as a fonction of constraint set (such as ripening duration) and the sensibilité of the process to perturbations in this domain. This work allow to propose a new ripening trajectory with a ripening time reduced of 4 days. This trajectory from virtual experiments was tested with success in a ripening pilot. The micro-organisms balance was preserved such as the organoleptic properties of the manufactured cheeses.

The concept, methodes and tools of complex systems were used successfully to enhance the Camembert cheese ripening process. In the futur, they could be evaluated to control other food processes.

Key words : Complex systems, Viability theory, Expert knowledge, Cheese ripening.

