

## L'ingénierie des Connaissances, un outil pour intégrer les connaissances sur les procédés de la chaîne alimentaire et aider à la décision.

Guy Della Valle, Nathalie Perrot, Cédric Baudrit, Patrice Buche, Kamal  
Kansou, Amadou Ndiaye, Rallou Thomopoulos

### ► To cite this version:

Guy Della Valle, Nathalie Perrot, Cédric Baudrit, Patrice Buche, Kamal Kansou, et al.. L'ingénierie des Connaissances, un outil pour intégrer les connaissances sur les procédés de la chaîne alimentaire et aider à la décision.. Innovations Agronomiques, INRA, 2012, 19, pp.107-116. <<http://www6.inra.fr/ciag/Revue>>. <lirmm-00764369>

**HAL Id: lirmm-00764369**

**<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00764369>**

Submitted on 21 Dec 2012

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

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

## **L'ingénierie des Connaissances, un outil pour intégrer les connaissances sur les procédés de la chaîne alimentaire et aider à la décision.**

**Della Valle G.<sup>1</sup>, Perrot N.<sup>2</sup>, Beaudrit C.<sup>2</sup>, Buche P.<sup>3</sup>, Kansou K.<sup>1,4</sup>, Ndiaye A.<sup>4</sup>, Thomopoulos R.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> INRA- CEPIA, UR 1268 BIA, rue de la Géraudière, Nantes, 44316 France

<sup>2</sup> UMR 782 GMPA, AgroParisTech, INRA-CEPIA, Thiverval Grignon, 78850 France

<sup>3</sup> INRA - CEPIA / LIRMM / EPI GraphIK, 2 place Viala, Montpellier, 34000 France

<sup>4</sup> UMR 927 I2M, INRA-CEPIA, CNRS, Univ. Bordeaux 1, Talence, 33405 France

Correspondance : dellaval@nantes.inra.fr, nathalie.perrot@grignon.inra.fr

### **Résumé**

Au croisement des sciences cognitives, de l'informatique et des mathématiques appliquées, l'ingénierie des connaissances propose des concepts, méthodes et techniques permettant de modéliser et/ou d'acquérir les connaissances dans des domaines où la formalisation est difficile ou la compréhension des phénomènes partielle. L'acquisition des connaissances est apparue comme une discipline avec un objet de recherche à la fin des années 80. À la suite des développements des systèmes experts durant la décennie, la question de la modélisation et de l'acquisition des connaissances pour ces systèmes est apparue comme cruciale et problématique. Les travaux en Ingénierie des connaissances sont donc fondés sur la nécessité de modéliser de manière explicite les connaissances. Il s'agit de construire des modèles adaptés à la nature des connaissances à décrire pour pouvoir ensuite les représenter dans des formalismes adéquats (Charlet, 2002).

L'ingénierie des connaissances peut être schématiquement définie par trois étapes : l'acquisition de connaissances disponibles, leur représentation informatique et l'utilisation de celles-ci à des fins de simulation, de prédiction, de validation, d'optimisation pour aider à la décision. Un archipel de méthodes existe pour traiter cette problématique. Elles sont chacune plus ou moins adaptées au problème traité et des compétences spécifiques sont nécessaires pour choisir et mettre en œuvre les méthodes les plus appropriées. La démarche et certaines méthodes sont illustrées pour différentes applications dans l'industrie alimentaire, telles que la chaîne de transformation du blé dur, le pétrissage de la pâte à pain, l'affinage du fromage. Ces illustrations s'appuient sur des approches spécifiques, comme les arbres de décision et les graphes conceptuels, le raisonnement qualitatif, les réseaux bayésiens et l'optimisation sous contraintes, respectivement. L'application de ces approches ouvre des perspectives pour la conception virtuelle de produits alimentaires dans le cadre d'une chaîne alimentaire durable.

**Mots-clefs** : blé dur, fromage, modèle, multi-échelles, pain, système complexe.

### **Abstract: Knowledge Engineering, a useful tool for integrating food chain**

Issued from cognitive sciences, computer sciences and applied mathematics, Knowledge (K) Engineering encompasses modelling and can be roughly defined by three steps: acquisition of available K, representation of acquired K and computational use of represented K for simulation, validation and optimisation purposes. These different steps are illustrated for various applications to food industry like the durum wheat chain, dough mixing for bread making, cheese ripening, based on specific approaches like decision trees and conceptual graphs, qualitative reasoning, Bayesian networks and optimisation under uncertainty and multi-criteria flexible querying, respectively. The application of such approaches

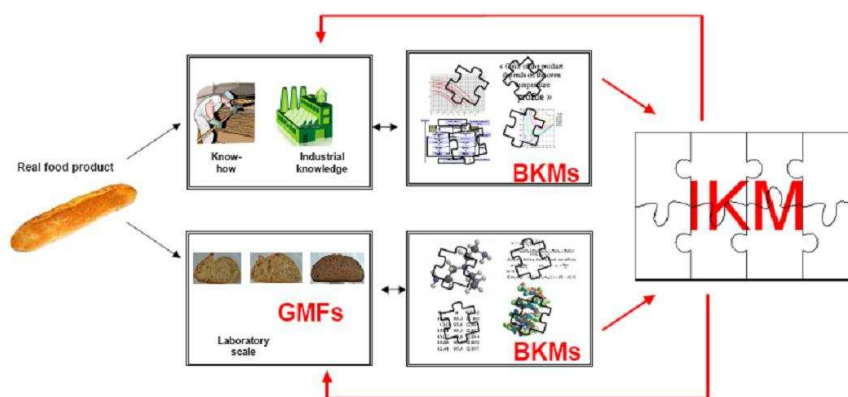
opens prospects for the virtual design of food products which will be of help for the sustainable production of high quality foods.

**Keywords:** bread, complex system, cheese, durum wheat, modelling, multi-scale.

## Introduction: vers une ingénierie des connaissances pour maîtriser les procédés alimentaires

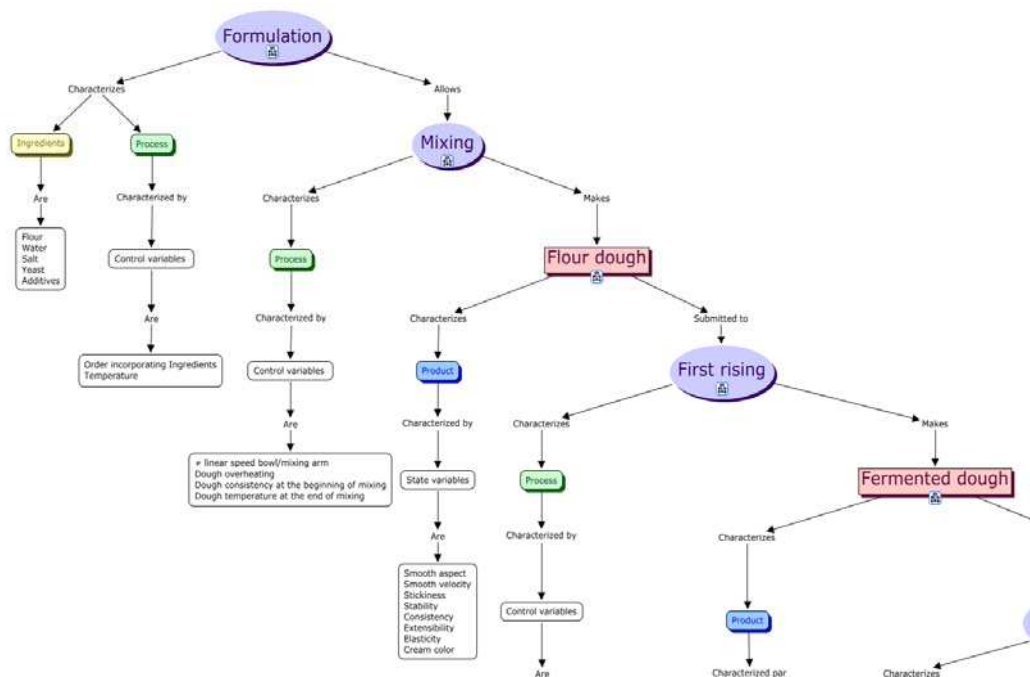
De nos jours, les aliments sont élaborés en réponse aux nouvelles demandes des consommateurs, préoccupés par les questions environnementales et nutritionnelles. Une évolution du savoir-faire dans l'industrie alimentaire est nécessaire, pour contribuer à améliorer simultanément la qualification du personnel et le niveau technologique des lignes de production. Il est donc important de soutenir le développement des pratiques de gestion de la qualité et de choix technologiques dans la chaîne de transformation des aliments. Ceci est d'autant plus important que, sur le plan scientifique, la modélisation complète des phénomènes couplés physiques, chimiques et microbiologiques au cours de la transformation des aliments est particulièrement difficile, en raison de l'interaction étroite entre les modifications structurales de la matière et les mécanismes de transfert mis en œuvre par les procédés. Ainsi, malgré l'augmentation des publications scientifiques dans le domaine « Sciences & technologie des aliments » et les progrès de notre compréhension sur les changements survenant au sein de l'aliment aux différents niveaux d'organisation de la matière, la connaissance demeure fragmentée et incomplète (Perrot et al., 2006 & 2011).

Nous proposons d'adapter et de mettre en œuvre des concepts capables d'intégrer les connaissances pour pallier cette complexité. Leur application s'appuie sur des outils capables de prendre explicitement en compte le caractère fragmentaire et hétérogène de la connaissance disponible sur un processus et sa dynamique, avec une incertitude sur le comportement global du système. Récemment, certains de ces outils (Monte-Carlo, réseaux neuronaux et bayésiens, logique floue, systèmes experts, ...) ont été appliqués dans des domaines aussi variés que l'immunologie (Cohen et Harel, 2007), l'ingénierie des systèmes (Beckerman, 2000), la bioinformatique (Desiere et al., 2001). Dans notre contexte, ces outils sont testés pour aider à la maîtrise des processus d'élaboration d'aliments-modèles (fruit charnu, tissu carné, gel laitier, mousse céréalière,...). Un exemple de projet intégrant ces approches est le projet Européen DREAM (Figure 1) « Conception et réalisation de modèles d'aliments » dans lequel l'ingénierie des connaissances est appliquée sur des aliments-modèles (notés GMF). Ceux-ci ont pour vocation de représenter une classe d'aliments réels obtenus suite à des changements de source d'approvisionnement ou de procédés d'élaboration. A partir des briques de connaissances dont on dispose sur ces aliments modèles, notés BKM dans le projet, les connaissances sont intégrées par ingénierie des connaissances dans un module noté IKM.



**Figure 1:** Exemple de modèle d'intégration (IKM) dans le cadre du projet Européen FPVII-Dream (GMF= aliment-modèle générique; BKM = modèle de connaissance élémentaire).

L'ensemble des procédés conduisant aux GMFs peut être représenté sur des cartes conceptuelles ou graphes sémantiques. En exemple est présenté (Figure 2) le procédé de panification, transcrit sous la forme d'un graphe sémantique. L'enchaînement des opérations unitaires est représenté par des nœuds (ronds bleus) auxquels sont associées les variables impliquées dans chaque procédé, variables de contrôle ou variables d'état.



**Figure 2:** Exemple de graphe sémantique représentant une partie du processus de panification (formulation, pétrissage, fermentation...) et les variables d'état de chaque opération (extrait d'un livre de connaissances, d'après Turbin et al., 2010). L'axe horizontal oriente vers la finalité de l'opération (ici la pâte ou le pain, pour quoi ?), et l'axe vertical permet de décliner les définitions (comment ?), les icônes permettant d'ouvrir d'autres cartes lorsque cette représentation est implantée sur Web.

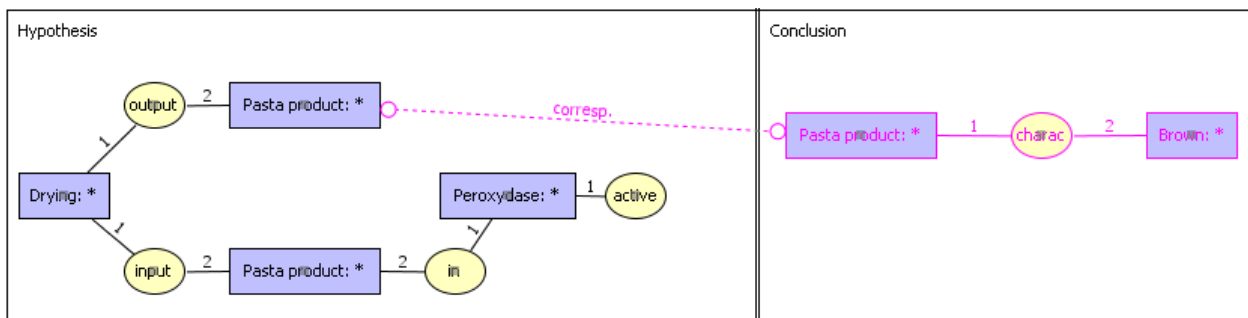
Au delà des cartes cognitives qui peuvent être établies sur un processus de fabrication, les exemples suivants, la chaîne de transformation du blé dur, la panification, l'affinage du fromage ; seront traités pour illustrer quelques approches de l'ingénierie des connaissances.

### Un système d'aide à la décision pour le management de la chaîne de transformation du blé dur.

L'objectif de sécurité sanitaire des aliments a conduit au développement d'outils de microbiologie prédictive, combinant les modèles issus de bases de données, comme Sym'Previus (Haemmerlé et al., 2007). Mais, à notre connaissance, il n'existe pas d'outils disponibles pour piloter la chaîne alimentaire complète, depuis la matière première jusqu'aux produits alimentaires, qui intègrent des sources d'information hétérogène sur les aspects nutritionnels, sensoriels et technologiques. En raison du rôle fondamental des céréales dans l'alimentation humaine, le management des produits à base de blé dur a été récemment abordé, en tenant compte des données expérimentales issues de la bibliographie scientifique et des déclarations d'experts décrivant les mécanismes communément admis d'un point de vue qualitatif (Thomopoulos et al., 2009). Puisque cette approche n'est pas basée sur des modèles prédéterminés, une technique d'apprentissage spécifique a été utilisée, à savoir les arbres de décision.

### Représentation et exploitation de la connaissance experte

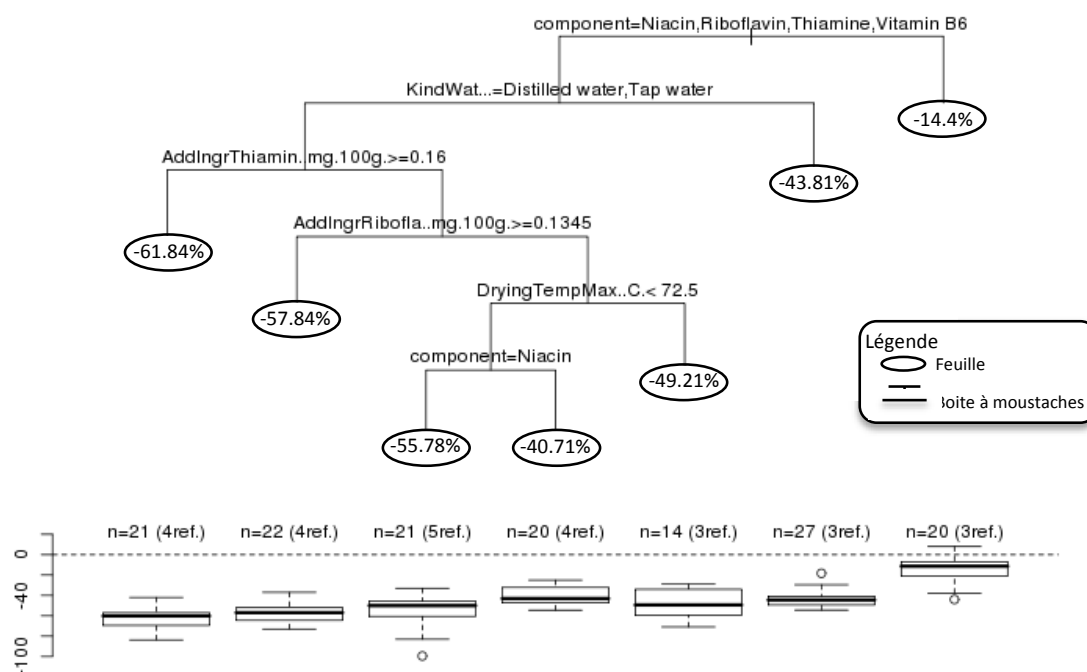
Dans la mesure où nous abordons une chaîne alimentaire complète, nous devons construire un système pour traiter des informations disparates présentées sous des formats divers (quantitative, descriptive ...) et se référant à des domaines très différents (les opérations de transformation, la qualité des produits ...). A cet égard, le modèle des graphes conceptuels et les règles peuvent être utilisés pour représenter des connaissances d'experts. Les règles sont illustrées par le lien "Si ... alors ...", comme par exemple (Figure 3) : "Si la peroxydase est active lors du séchage de pâtes alimentaires, alors la pâte aura une couleur marron". Ici "séchage" est une opération unitaire et la «couleur» une variable qualitative. Il est possible d'enchaîner ces règles « vers l'avant » afin de prédire un résultat de sortie en termes de qualité, ou « vers l'arrière » afin de déterminer les conditions qui peuvent conduire à des propriétés attendues (ingénierie reverse). Une fois l'ensemble des règles retranscrites, on obtient un système informatique qui permet de simuler l'ensemble de la chaîne de production et les impacts des chemins de production choisis sur les propriétés des produits en sortie.



**Figure 3:** Exemple d'utilisation de connaissance experte: une règle représentée par le modèle de graphe conceptuel.

### Exploitation de données expérimentales par arbres de décision

Le management de la chaîne alimentaire peut être réalisé par des arbres de décision, qui peuvent être considérés comme un ensemble de règles de mise en œuvre de ses différentes variables. Dans l'arbre de décision, les feuilles (extrémités) représentent la valeur moyenne (pour une variable continue) ou la classe (pour une variable symbolique), tandis que la branche représente la conjonction d'entrées qui mènent à cette valeur ou à cette classification. Une fois les arbres établis ou appris d'après l'ensemble des données, ils peuvent être utilisés pour prédire la classification, ou la valeur moyenne d'une variable, à partir des paramètres d'entrée. Le système de gestion des connaissances, pris en exemple ici, portait sur 29 opérations unitaires de la chaîne de blé dur et 56 variables de la qualité qui caractérisent les différentes familles de produits (céréales précuites, couscous, pâtes ...). Parmi ceux-ci, on peut étudier l'exemple de l'impact de l'opération «cuisson dans l'eau» sur la variable qualité "contenu en vitamines", pour lequel 145 résultats expérimentaux ont été signalés, à partir de 11 références. A partir de la composition initiale en vitamines et des étapes de traitement précédant la cuisson, une fois les paramètres les plus discriminants identifiés (ici le type de vitamines), une famille d'arbres de décision peut être générée. L'un d'eux est représenté sur la Figure 4. Cet arbre fournit les pourcentages moyens de la diminution de vitamines (les feuilles de l'arbre), et la répartition des valeurs autour de la moyenne (les boîtes à moustaches). Un tel arbre permet d'avoir le pourcentage moyen de diminution de vitamines relativement aux principales variables du procédé qui conduisent à cette diminution.



**Figure 3:** Exemple d'un arbre de décision établi à partir d'une base de données expérimentales sur "la cuisson des pâtes dans l'eau". Outre le pourcentage moyen de diminution de vitamines indiqué aux feuilles de l'arbre, les nœuds intermédiaires indiquent le type d'eau de cuisson, l'addition éventuelle de vitamines, la température maximale de séchage. *n* est le nombre de données disponibles pour le nombre de références indiqué.

La connaissance experte et les données expérimentales issues de travaux scientifiques se complètent avec un effet synergique selon deux modes : (1) une confrontation peut être effectuée en testant les règles d'expert selon un taux de confiance ; des exceptions relatives aux règles peuvent être détectées et ainsi conduire à la création de nouvelles règles (Thomopoulos, 2008) ; (2) Johnson et al., (2010) ont proposé une procédure interactive pour améliorer les résultats de l'arbre de décision par élicitation (explicitation et recueil) des connaissances.

### Formalisation de la connaissance experte en panification française

La panification revêt un rôle particulier dans la chaîne de transformation des céréales. L'outil décrit par Young (2007), «Bread advisor», est l'un des premiers logiciels basés sur la connaissance d'experts, qui propose des informations sur les procédés de transformation et des diagnostics sur les éventuels défauts. Cet outil ne concerne toutefois que la fabrication industrielle de pains de mie, à l'anglo-saxonne, et la panification artisanale de pains français (baguettes et autres...) relève encore de l'empirisme. A partir de connaissances d'experts en panification française, et en prenant en compte des résultats scientifiques en rhéologie des pâtes, un système à base de connaissances (KBS), fondé sur la représentation algébrique formelle des opérations de panification, a donc été développé afin de prédire l'état de pâte ou de pain à partir des entrées et des conditions de traitement. En outre, un glossaire des termes de pâtes alimentaires de qualité et de pains français a été proposé afin d'harmoniser langages professionnel et scientifique.

#### *Connaissances et contexte technologique : des processus de fabrication artisanale*

La panification française a longtemps été une activité traditionnelle s'appuyant sur des compétences manuelles artisanales. Aujourd'hui, une partie du savoir-faire est automatisée et cette activité est aussi

industrielle, ce qui démontre une bonne connaissance des ingrédients et de la cuisson (Roussel et Chiron, 2002). Cette industrialisation a été favorisée par le travail des sélectionneurs et des généticiens pour fournir des blés stables pour la panification, mais elle comporte, à long terme, des risques d'uniformisation des approvisionnements et de dépendance économique de l'artisanat. En outre, les relations causales entre les composants, les mécanismes physico-chimiques et les caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles des pains, au cours des différentes opérations unitaires (pétrissage, cuisson,...) du processus de panification restent méconnus.

Pour tout processus manufacturier, les connaissances relatives à l'explication et à la mise en œuvre des opérations de transformation relèvent pour une grande partie de la connaissance tacite. L'explicitation de cette connaissance nécessite une analyse scientifique des mécanismes impliqués, par une formalisation des résultats de cette analyse, mais aussi une enquête pour extraire les connaissances des différents acteurs impliqués dans ces processus. L'utilisation d'une formalisation commune de ces deux composantes permet de construire une base de connaissances complète. Cette base permettra d'établir les pratiques actuelles et elle constituera un point de départ pour proposer des pratiques futures.

### *Démarche et résultats : l'algèbre qualitative et le système à base de connaissances*

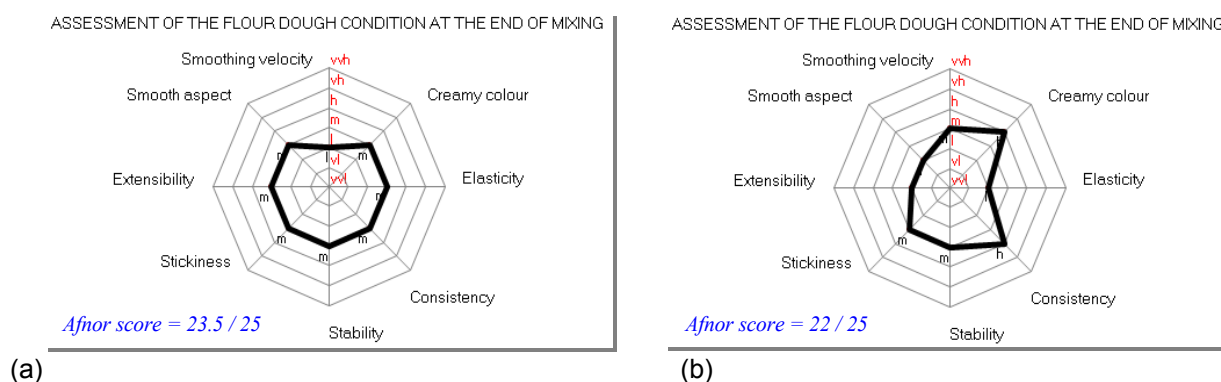
Une algèbre dite « Q-algèbre » a été développée pour traduire, par une fonction qualitative, chaque ensemble de règles permettant d'évaluer une caractéristique de la pâte de farine de blé et du pain. Cette algèbre a été utilisée pour modéliser les états de la pâte à la fin de la première étape de pétrissage (frassage ou mélange des ingrédients) et de la seconde, appelée « texturation », par référence à la création du réseau de gluten (Ndiaye et al., 2009). L'état de la pâte à la fin du frassage est influencée par les caractéristiques des ingrédients (% de farine, d'eau, de protéines et teneur en pentosanes, ...); l'état de la pâte à la fin de texturation est défini par les 8 descripteurs suivants: vitesse de lissage (SV), aspect lisse (SA), extensibilité (Ext), collant (Stic), stabilité (Stab), consistance (Cons), élasticité (Elas) et Couleur crèmeuse (CC). Cet état est influencé par la consistance de la pâte à la fin du frassage (ou début de texturation,  $w$ ), par la température visée à la fin du pétrissage ( $x$ ), et par les conditions de pétrissage (ou paramètres opératoires) : la différence de vitesse linéaire entre le bras et la cuve du pétrin ( $y$ ) et la chaleur dissipée au cours de la texturation ( $z$ ). Les mots utilisés pour décrire le comportement de la pâte et le pain ont été sélectionnés grâce à un glossaire développé en français et disponible sur le Web (Roussel et al., 2010).

L'écriture des fonctions qualitatives traduisant l'ensemble des règles expertes permet de calculer l'état d'une pâte selon l'état des variables d'entrée de l'opération et les paramètres opératoires (Figure 5).

$$\begin{aligned} SV &\approx (1 \otimes w) \oplus \alpha(y, z) \\ SA &\approx T((1 \otimes w) \oplus (1 \otimes \perp(x)) \oplus T(z) \oplus (1 \otimes \perp(z))) \\ Ext &\approx (1 \otimes \perp(w)) \oplus (1 \otimes \perp(x)) \oplus T(z) \oplus (1 \otimes \perp(z)) \\ Stic &\approx \perp((1 \otimes w) \oplus \perp(\perp(x) \oplus z)) \\ Stab &\approx \perp((1 \otimes w) \oplus \perp(x) \oplus z) \\ Cons &\approx w \oplus (1 \otimes \perp(x)) \oplus (1 \otimes z) \\ Elas &\approx (1 \otimes \perp(w)) \oplus x \oplus T(z) \\ CC &\approx (1 \otimes z) \end{aligned}$$

**Figure 5:** Fonctions qualitatives, définies dans l'algèbre qualitative ( $Q, \approx, \oplus, \otimes$ ), des descripteurs de la pâte à l'issue du pétrissage. La représentation par fonction qualitative permet de calculer des valeurs de fonction non incluses dans les connaissances recueillies auprès des experts. Cette propriété rend la représentation fonctionnelle bien plus opérationnelle que la représentation par règles de connaissance

Une fois mises en œuvre (implémentées) dans le KBS, ces fonctions permettent de simuler les états des variables de sortie (par exemple, état de la pâte en sortie de pétrissage) en fonction de différentes conditions d'entrée de l'opération de pétrissage (température de l'opération) (Figure 6).



**Figure 6:** Exemples de prédictions (sorties) réalisées par le KBS: descripteurs des états de la pâte à la fin du pétrissage, en partant d'une consistance initiale moyenne ( $350 \leq w \leq 450$  Unités Brabender), une température visée moyenne ( $22 \leq x \leq 25$  °C), une différence de vitesse linéaire  $y$  et une dissipation de chaleur  $z$  (a) moyennes et (b) basses. L'échelle part de vvh (très excessif) jusqu'à vvl (très insuffisant). Le système fournit aussi la note de pâte selon la norme AFNOR.

L'algèbre qualitative est également utile pour explorer le raisonnement de l'expert afin de construire la base de connaissance (Kansou et al., 2008); ce système pourra être utilisé pour déterminer les paramètres de l'opération, et la composition de la pâte, qui conduisent à un état souhaité de la pâte (ingénierie reverse) comme cela a été réalisé pour la conception de matériaux composites (Michaud et al., 2009).

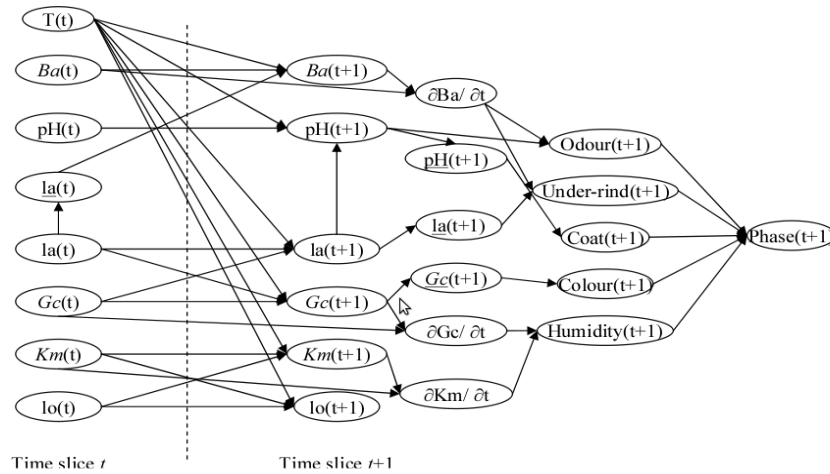
### Une autre approche de l'intégration des connaissances sur un exemple concernant la fabrication de fromage

Après la panification, la fabrication du fromage est certainement le domaine d'activité le plus représentatif de l'industrie alimentaire en France, dans lequel est transformé la moitié du lait produit dans ce pays. En dépit de cette importance industrielle, le fromage à pâte molle comme le camembert est à la fois un écosystème et un bioréacteur dont le comportement et l'élaboration sont encore difficiles à contrôler en intégralité. Malgré des recherches approfondies menées sur ce produit, les connaissances restent fragmentaires et incomplètes et aucun modèle ne fournit une représentation complète du processus d'élaboration. Dans ce contexte, nous avons combiné les connaissances détenues par les experts et les données issues d'expérimentations afin de prédire l'évolution du fromage en cours d'affinage aux différentes échelles (microscopique à sensoriel). Pour cela, un réseau bayésien dynamique est implémenté. Celui-ci modélise le réseau d'interactions intervenant aux différentes échelles d'organisation à partir de l'expertise humaine et des données disponibles (Baudrit et al., 2010).

Le concept de réseaux bayésiens dynamiques fournit un formalisme mathématique pratique qui permet de décrire des systèmes dynamiques complexes entachés d'incertitude. Les RBD sont une extension des réseaux bayésiens classiques, qui s'appuient sur des modèles graphiques probabilistes dans lequel les nœuds représentant des variables aléatoires sont indexés par le temps. Ce sont des outils très utiles pour combiner des connaissances d'experts avec des données à différents niveaux de connaissances ; en effet, leur structure peut être explicitement construite sur la base de connaissances d'experts, et les



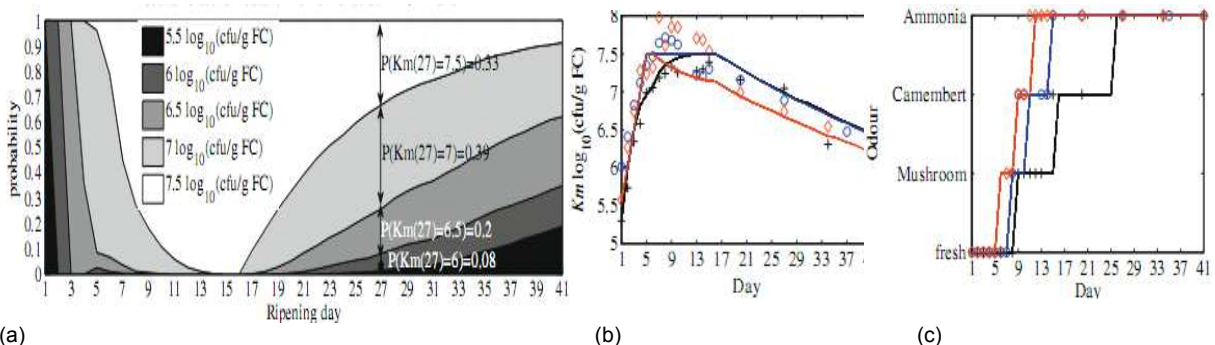
probabilités conditionnelles, qui quantifient la dépendance entre les variables, peuvent être apprises automatiquement sans connaissance *a priori* de la base d'un ensemble de données.



**Figure 7:** Exemple de Réseau Bayésien Dynamique représentant les dynamiques couplées de croissance de micro-organismes avec la consommation en substrats sous l'influence de la température et leur effet sur les modifications de propriétés sensorielles pendant l'affinage.

A partir de connaissances opérationnelle et scientifique, Baudrit et al. (2010) ont défini la structure d'un RBD qui établit une représentation qualitative de la dynamique couplée du comportement de microorganismes (*Kluyveromyces marxianus* (*Km*), *Geotrichum candidum* (*Gc*), *Brevibacterium aurantiacum* (*Ba*)), avec leurs consommations en substrats (lactose (*lo*), lactate (*la*)) influencées par la température (*T*) et impliquant les changements sensoriels (odeurs, aspect crémeux de la sous croûte, couverture de la croûte, couleur et humidité) du fromage en cours d'affinage (Figure 7).

Après l'étape d'apprentissage qui définit les distributions de probabilités conditionnelles à partir d'essais expérimentaux à différentes températures et humidités, des simulations permettent de prédire le comportement multi-échelle en cours d'affinage depuis le comportement d'activités microbiennes jusqu'au développement sensoriel, comme, par exemple, les trajectoires possibles de la levure *Km* pendant l'affinage à 8 °C (Figure 8a) sous une humidité (HR) de 98%. Ce chiffre signifie, par exemple, que lors du 27<sup>ème</sup> jour d'affinage, la concentration en *Km* a une probabilité de 39% d'être proche de 10<sup>7</sup> colonies / g fromage frais, et qu'elle ne peut pas être inférieure à 3.10<sup>5</sup>.



**Figure 8:** Résultats de simulations par RBD (a) évolution des distributions de probabilités de *Km*(*t*) à 8°C; comparaison des évolutions expérimentales et prédites de (b) croissance microbienne *Km* et (c) de l'odeur, pour un affinage à 8 (+), 12 (o) et 16°C (Δ), HR=98%.

À partir de ces résultats issus de simulations par RBD, l'évolution moyenne de *Km* (Figure 8b) ainsi que celle modale de l'odeur (Figure 8c) peuvent être évaluées et comparées à des données expérimentales.

## Conclusion

La chaîne de transformation des aliments constitue un système complexe en tant que tel pour lequel des approches d'ingénierie des connaissances peuvent être déployées pour mieux comprendre, optimiser la transformation dans un aller/retour depuis des échelles très fines (depuis le microorganisme et son action) jusqu'à l'échelle industrielle. Après avoir décrit brièvement les principes de cette approche, nous avons présenté quelques-unes de ses applications à la transformation des aliments et décrit brièvement les outils qui peuvent être mis en œuvre dans chaque application pour des fins de pérennisation du savoir-faire et d'aide à la décision. L'application de telles approches ouvre des perspectives pour la conception virtuelle de produits alimentaires, qui sera une aide pour la production durable d'aliments de haute qualité.

## Références bibliographiques

- AFNOR, 2002. BIPEA, une méthode standard pour la panification Française, V03 716 .
- Baudrit C., Sicard M., Wuillemain P.H., Perrot N., 2010. Towards a global modelling of the Camembert-type cheese ripening process by coupling heterogeneous knowledge with dynamic Bayesian networks. *Journal of Food Engineering* 98, 283-293.
- Beckerman L.P., 2000. Application of complex systems science to systems engineering. *Systems engineering* 3, 96-103.
- Cohen I.R., Harel D., 2007. Explaining a complex living system: dynamics, multi-scaling and emergence. *Journal of the Royal Society Interface* 4, 175-182.
- Desiere F., German B., Watzke H., Pfeifer A., Saguy S., 2001. Bioinformatics and data knowledge: the new frontiers for nutrition and foods. *Trends in Food Science & Technology* 12, 215-229.
- DREAM EU Project -7th framework programme. 2009. Design and development of REAListic food Models with well-characterised micro- and macro-structure and composition. Available at: <http://dream.aaeuropae.org/>
- Haemmerlé O., Buche P., Thomopoulos R., 2007. The MIEL system: uniform interrogation of structured and weakly-structured imprecise data. *Journal of Intelligent Information systems* 29, 279-304.
- Helias A., Mirade P.S., Corrieu G., 2007. Modeling of camembert-type cheese mass loss in a ripening chamber: Main biological and physical phenomena. *Journal of Dairy Science* 90, 5324-5333.
- Johnson I., Abécassis J., Charnomordic B., Destercke S., Thomopoulos R., 2010. Making Ontology-Based Knowledge and Decision Trees interact: an approach to enrich knowledge and increase expert confidence in data-driven models. In *Proceedings of KSEM'10, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 6291*: 304-316, Springer.
- Kansou K., Della Valle G., Ndiaye A., 2008. Qualitative modelling to prospect expert's reasoning. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* 179, 94-105.
- Michaud F., Castera P., Fernandez C., Ndiaye A., 2009. Meta-heuristic Methods Applied to the Design of Wood-Plastic Composites, with Some Attention to Environmental Aspects. *Journal of Composite Materials* 43, 533-548.
- Ndiaye A., Della Valle G., Roussel P., 2009. Qualitative modelling of a multi-step process: the case of French breadmaking. *Expert Systems with Applications* 36, 1020-1038.
- Perrot N., Baudrit C., Trelea I.C., Trystram G., Bourguin P., 2011. Modelling and analysis of complex food systems: state of the art and new trends. *Trends in Food Science and Technology* 22, 304-314.
- Perrot N., Ioannou I., Allais I., Curt C., Hossenlopp J., Trystram G., 2006. Fuzzy concepts applied to food product quality control: a review. *Fuzzy Sets and Systems* 157, 1145-1154.
- Roussel P. Chiron H., 2002. Les pains français. Evolution, qualité, production. Vesoul, France: Mae Erti Ed, 433p.

Roussel P., Chiron H., Della Valle G., Ndiaye A., 2010. Recueil de connaissances sur les descripteurs de qualité des pâtes et des pains ou variables d'état pour la panification française. <http://www4.inra.fr/cepia/Editions/glossaire-pains-francais>.

Sicard M., Perrot N., Baudrit C., Reuillon R., Bourguine P., Alvarez I., Martin S., 2009. The viability theory to control food processes. Eur. Conf Complex Systems, Univ. Warwick (UK).

Thomopoulos R., 2008. Learning Exceptions to Refine a Domain Expertise. In Encyclopedia of Data Warehousing and Mining □ 2<sup>nd</sup> Edition, Hershey, PA, USA: Information Science Reference. pp. 1129-1136.

Thomopoulos R., Charnomordic B., Cuq B., Abecassis J., 2009. Artificial intelligence-based decision support system to manage quality of durum wheat products. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods 1, 179-190.

Turbin A., Della Valle G., Fernandez C., Ndiaye A., 2010. Knowledge book on cereal processing, available from Dream: [https://workspaces.inra-transfert.fr/LotusQuickr/dream/PageLibraryC12576E7003B99D8.nsf/h\\_Toc/E275B6801F8D60F7C12577FF00571E52/?OpenDocument](https://workspaces.inra-transfert.fr/LotusQuickr/dream/PageLibraryC12576E7003B99D8.nsf/h_Toc/E275B6801F8D60F7C12577FF00571E52/?OpenDocument)

Young L.S. 2007. Application of Baking Knowledge in Software Systems. In: Cauvain S.P., Young L.S. (Eds.) Technology of Breadmaking 2<sup>nd</sup> Edition, New York, USA: Springer Science+Business Media, LLC, pp. 207-222.