

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

C3PO : Une ontologie développée pour le pilotage de la production fromagère au Québec

LUCAS GUILHEN

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Août 2020

© Lucas Guilhen, 2020.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

C3PO : Une ontologie développée pour le pilotage de la production fromagère au Québec

présenté par **Lucas GUILHEN**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Bruno AGARD, président

Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

Christophe DANJOU, membre et codirecteur de recherche

Martin TRÉPANIÉ, membre

DÉDICACE

A Max.

REMERCIEMENTS

Il me paraît important de remercier un certain nombre de personnes qui ont joué un rôle clé durant cette maîtrise. Évidemment, je souhaite remercier mon directeur de recherche, Robert Pellerin, pour m'avoir guidé durant ces deux années, et pour ses conseils précieux. Je tiens à remercier également mon codirecteur, Christophe Danjou, pour son aide plus que bienvenue, son expérience et son entrain. Avec leur encadrement, je ne pouvais qu'être dans un bon environnement pour réussir cette maîtrise.

J'aimerais également consacrer quelques mots à mes collègues de bureaux : Mathieu, Joffrey, et Marine. Le bureau n'est pas le même sans l'un d'entre eux, et je crois que nous avons réussi à y laisser notre marque pour un certain temps. Merci également à Jérémie et Quentin, à nos réunions tous les 6, et à l'entraide que nous nous sommes apportée. Bien que nos sujets soient différents, nous avons pratiquement tout partagé ces derniers mois : questionnements et réflexions, bonnes et mauvaises nouvelles, doutes, soutien, et j'en passe!

Merci également au CEFQ, et tout particulièrement à Etienne Biotteau, pour tout ce qu'il m'a appris et fait découvrir à travers notre collaboration. Je sais que les projets de cette envergure sont souvent décourageants, mais je suis extrêmement fier d'y avoir pris part. Merci d'avoir mis tout en œuvre pour que ma maîtrise se déroule dans les meilleures conditions possibles. Merci m'avoir apporté énormément d'informations et de m'avoir soutenu et aidé lorsque j'en avais besoin. Merci aussi à tous les artisans fromagers qui ont accepté de m'accueillir sur leur site et d'avoir pris le temps de répondre à toutes mes questions, ils ont montré beaucoup de bienveillance et de soutien dans ce projet.

Enfin, j'aimerais remercier aussi tout mon entourage proche, ma famille, mes colocataires, mes amis, et Nolwenn, pour m'avoir soutenu et encouragé. Merci de m'avoir fait vivre une expérience incroyable à Montréal ces deux dernières années!

RÉSUMÉ

À l'image de tous les autres secteurs, les PME manufacturières dans l'industrie fromagère sont soumises à une réalité économique difficile. La récente modification des accords de libre-échange nord-américain ainsi que l'introduction rapide des nouvelles technologies numériques adaptées au secteur manufacturier ont imposé plus de pression sur les petits artisans fromagers. Ces derniers doivent à la fois améliorer leur productivité tout en assurant une qualité de produit répondant aux exigences à la fois de la clientèle, mais aussi respecter la régulation agroalimentaire, et cela en maintenant des coûts d'exploitation réduits.

Ces nouvelles technologies, rassemblées sous le giron de l'industrie 4.0, permettent de regrouper l'ensemble des ressources des entreprises au sein de systèmes d'information tels que les systèmes de gestion intégrée (ERP) ou les systèmes d'exécution manufacturière (MES). Ils facilitent ainsi la prise de décision basée sur des données pertinentes en temps réel. Ces systèmes, auparavant utilisés par les grandes entreprises pour lesquelles ils ont été développés, doivent donc être adaptés pour le secteur fromager dans lequel ils sont pratiquement inexistantes. Face à ce constat, le Centre d'Expertise Fromagère du Québec (CEFQ) a lancé un projet de grande envergure afin de doter les fromagers artisans du Québec d'outils modernes leur permettant de faire face à cette nouvelle réalité.

L'ontologie est un outil très ancien utilisé dans de nombreux domaines, allant de la philosophie à l'anthropologie, de la médecine à l'informatique. L'ontologie désigne un modèle de données permettant de représenter un ensemble de concepts dans un domaine, ainsi que les relations liant ces concepts. Son emploi permet d'exploiter les objets du domaine concerné, avec raison. La variété et l'hétérogénéité des données et le vocabulaire inter- ou intradomaine représentent une difficulté que les ontologies peuvent permettre de surmonter en proposant un vocabulaire commun liant les différentes sources de données. Malgré l'intérêt croissant de la communauté scientifique pour les atouts représentés par l'industrie 4.0, il semble qu'aucun outil ou aucune ontologie ne permettent aujourd'hui de représenter de manière suffisamment globale les données spécifiques au pilotage d'une fromagerie au Québec. De nombreuses études et projets ont porté sur certains aspects de la transformation fromagère, mais nos recherches montrent qu'à ce stade, il n'existe pas d'outil proposant un modèle standard. De ce fait, nous avons donc proposé le développement d'une ontologie d'application permettant la représentation des concepts clés liés à la transformation

fromagère, ainsi que leurs liens. Elle permet ainsi de saisir le fonctionnement d'une fromagerie, et constitue de ce fait un premier pas vers le développement futur d'outils modernes permettant de tirer parti des leviers de l'industrie 4.0. En effet, cette ontologie pourra être utilisée afin de mettre en œuvre diverses techniques de valorisation de données en fromageries au Québec, et permettra le développement d'un outil de pilotage de la transformation fromagère.

La méthodologie DRM (*Design Research Methodology*) a été employée afin de diriger le développement de l'ontologie. Cette méthodologie allie à la fois des études empiriques et des études scientifiques. Une étape de validation de l'ontologie a été réalisée, mettant à profit un cas d'étude portant sur la production d'un fromage Cheddar. Cette évaluation a permis de vérifier la pertinence logique et sémantique de l'ontologie proposée.

ABSTRACT

Just like all other economic sectors, manufacturing SMEs in the cheese industry are subject to a difficult economic reality. The recent modification of North American free trade agreements and the rapid introduction of new digital technologies adapted to the manufacturing sector have put more pressure on small artisanal cheese makers. They must both improve their productivity while ensuring product quality that meets customer requirements and comply with agri-food regulations while maintaining low operating costs.

These new technologies, bundled within Industry 4.0, make it possible to group all company resources within information systems such as integrated management systems (ERP) or manufacturing execution systems (MES). They thus facilitate decision-making based on relevant data in real time. These systems, previously used by the large companies for which they were developed, must therefore be adapted for the cheese sector in which they are practically non-existent. Faced with this situation, the Centre d'Expertise Fromagère du Québec (CEFQ) has launched a large-scale project to provide Quebec's artisanal cheese makers with the modern tools they need to deal with this new reality.

Ontology is a very old tool used in many fields, from philosophy to anthropology, from medicine to computer science. It refers to a data model used to represent a set of concepts in a given domain, as well as the relationships linking these concepts. Its use makes it possible to exploit the objects of the domain concerned, and rightly so. The variety and heterogeneity of the data and the inter- or intra-domain vocabulary represent a difficulty that ontologies can help overcome by proposing a common vocabulary linking the different data sources. Despite the growing interest of the scientific community for the benefits represented by Industry 4.0, it seems that no tool or ontology today makes it possible to represent in a sufficiently global manner the data specific to the management of a cheese factory in Quebec. Numerous studies and projects have dealt with certain aspects of cheese processing, but our research shows that, at this stage, there is no tool offering a standard model. Therefore, we have proposed the development of an application ontology to represent the key concepts related to cheese processing and their interrelations. This ontology allows the understanding of the functioning of a cheese factory, and thus constitutes a first step towards the future development of modern tools that will allow to take advantage of the levers of the 4.0 industry. Indeed, this ontology could be used to implement various data enhancement techniques

in Quebec cheese factories, and will allow the development of a tool for managing cheese processing.

The Design Research Methodology (DRM) was used to direct the development of the ontology. This methodology combines both empirical and scientific studies. An ontology validation stage was carried out, using a case study on the production of a Cheddar cheese. This assessment made it possible to verify the logical and semantic relevance of the proposed ontology.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Les différentes étapes de la transformation fromagère	3
2.1.1 Traitement du lait	3
2.1.2 Ensemencement et caillage	4
2.1.3 Décaillage.....	5
2.1.4 Soutirage, moulage et pressage	5
2.1.5 Saumurage et affinage.....	6
2.2 Identification des données dans l'industrie fromagère.....	6
2.2.1 Modélisation des processus.....	7
2.2.2 Développement de systèmes d'information	10
2.3 Identification des relations entre les données de l'industrie fromagère	12
2.3.1 Modèles de données dans l'industrie fromagère	13
2.3.2 Intelligence artificielle et données fromagères.....	13

2.3.3	Ontologie dans l'industrie fromagère.....	15
2.4	Revue critique	18
2.5	Conclusion.....	18
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE.....	20
3.1	Objectifs spécifiques	20
3.2	Cadre d'étude	20
3.3	Démarche proposée	20
3.3.1	Analyse de la littérature.....	23
3.3.2	Analyse empirique.....	23
3.3.3	Développement d'une ontologie	23
3.3.4	Expérimentation	27
3.4	Conclusion.....	27
CHAPITRE 4	ANALYSE EMPIRIQUE	28
4.1	Analyse de l'existant	28
4.1.1	Collecte de données.....	28
4.1.2	Cartographie des processus d'affaires des fromageries québécoises	34
4.2	Expertise du CEFQ.....	39
4.2.1	Documentation	39
4.2.2	Bonnes Pratiques de Fabrication	39
4.3	Conclusion.....	40
CHAPITRE 5	CONSTRUCTION D'UN MODÈLE ONTOLOGIQUE	41
5.1	Sélection des concepts clés	41
5.1.1	Méthodologie	41
5.1.2	Résultats	43

5.2	Identification des liens sémantiques.....	46
5.2.1	Méthodologie	46
5.3	Construction de l'ontologie.....	47
5.4	Conclusion.....	52
CHAPITRE 6 VALIDATION		54
6.1	Méthodologie	54
6.1.1	Validation structurelle.....	54
6.1.2	Validation sémantique.....	55
6.2	Validation structurelle.....	58
6.2.1	Conclusion.....	60
6.3	Validation sémantique.....	60
6.3.1	Présentation de l'étude de cas	61
6.3.2	Résultats	61
6.4	Conclusion.....	64
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		65
RÉFÉRENCES.....		68
ANNEXES		72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Profils des fromageries observées	29
Tableau 6.1 Résultat du scanneur OOPS !	58
Tableau 6.2 Score de représentation des données tests	62
Tableau A.1 Liste des données à prélever pour la plan HACCP	72
Tableau D.2 Concepts issus de l'expertise du CEFQ	75
Tableau D.3 Concepts issus de la cartographie de processus	76
Tableau D.4 Concepts issus de la revue de littérature.....	77
Tableau E.2 Liste des concepts sélectionnés.....	79
Tableau F.1 Comparaison entre les concepts tests et les concepts de l'ontologie.....	86
Tableau G.1 Comparaison entre les liens tests et celles de l'ontologie.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Fonctionnalités d'un MES adaptées de la norme ANSI/ISA-95	11
Figure 3.1 Méthodologie générale	22
Figure 3.2 Sélection des concepts clés	25
Figure 4.1 Notation ANSI.....	35
Figure 4.2: Fiche-activité de la tâche "Emprésurer"	38
Figure 5.1 Représentation graphique d'une ontologie simple.....	42
Figure 5.2 Exemple de la sélection des concepts potentiels appliqués au concept <i>Article</i>	44
Figure 5.3 Interface du logiciel <i>Protégé</i> , sur la vue des <i>Classes</i> (concepts).....	49
Figure 5.4 Interface du logiciel <i>Protégé</i> , vue sur les <i>Object properties</i> (Liens sémantiques)	50
Figure 5.5 Interface du logiciel <i>Protégé</i> , vue sur les <i>Data properties</i> (Propriétés de concept).....	51
Figure 5.6 Vue globale de l'ontologie, représentation simplifiée avec concepts et liens uniquement	53
Figure 6.1 Méthodologie de validation de l'ontologie.....	57
Figure B.1 Processus d'inspection de la marchandise lors d'une réception.....	73
Figure B.2 Processus de stockage du lait	73
Figure C.1 Fiche-activité pour l'activité "Choisir le fournisseur"	74
Figure H.1 Partie de l'ontologie concernant les opérations de fabrication.....	89
Figure H.2 Partie de l'ontologie concernant les matières premières	89
Figure H.3 Partie de l'ontologie concernant les produits finis	89

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ANSI	American National Standards Institute
BPML	Business Process Master List
BPMN	Business Process Model
CDO	Common Dairy Ontology
CEFQ	Centre d'Expertise Fromagère du Québec
DEVS	Discrete Event System Specification
DRM	Design Research Methodology
EPC	Event-driven Process
ERP	Entreprise Ressource Planning
FMEA	Failure Mode Effect Analysis
GMP	Good Manufacturing Practices, ou Bonnes pratiques de fabrication
IDEF	Integration Definition
KPI	Key Performance Indicator
LSS	Lean Six Sigma
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MES	Manufacturing Execution System
MRD	Modèle relationnel de données
OWL	Web Ontology Language
PDCA	Plan Do Check Action
PGI	Progiciel de Gestion Intégré
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PO ²	Process and Observation Ontology

RDF	Resource Description Framework
SSOP	Sanitation Standard Operating Procedures
SysML	System Modeling Language
UHT	Ultra Haute Température
UML	Unified Modeling Language
VSM	Value Stream Mapping
ALENA	Accords de libre-échange nord-américain
AEUMC	Accords États-Unis Mexique Canada
HACCP	Analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise
PO ² -DG	Process and Observation Ontology – Application to Dairy Gels

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Drosinos & Siana (2007) – Liste des données à prélever pour le plan HACCP.....	72
Annexe B Exemple de fichiers de cartographie	73
Annexe C Exemple de Fiche-activité.....	74
Annexe D Listes des concepts clés potentiels selon leur source.....	75
Annexe E Liste des concepts sélectionnés	79
Annexe F Liste des concepts tests et leurs concepts adéquats	86
Annexe G Liste des liens tests et leurs équivalents adéquats.....	88

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le fromage au Québec s'est développé à l'image de la nation du Québec. Importés par les premiers colons français au 17^e siècle, les premiers fromages sont rudimentaires et faits avec les « moyens du bord ». Il faut ensuite attendre jusqu'au milieu du 19^e siècle pour que la production fromagère québécoise s'approprie les procédés de fabrication, avec l'influence de la présence britannique. Depuis, et au fil du temps, les fromagers du Québec ont peaufiné leur art de la fabrication du fromage.

Le Québec et l'Ontario sont les provinces produisant de très loin le plus de lait au Canada. En 2018, ces deux provinces regroupent respectivement 48.3% et 33.4% des producteurs laitiers canadiens (AGÉCO, 2018). Il est donc normal de retrouver dans ces provinces une très grande utilisation du lait. Concernant le Québec, le rapport entre la consommation directe du lait et sa transformation (en divers produits) était en 2017 de 19/81, un des plus faibles du pays. Les Québécois sont donc très friands de produits laitiers transformés, en particulier le fromage qui représente plus de 50% de la transformation laitière de la province.

A l'image de tous les autres secteurs, les PME manufacturières dans l'industrie fromagère sont soumises à une réalité économique difficile. Historiquement, le Québec et le Canada étaient très fermés aux importations de produits laitiers étrangers. La récente modification des accords de libre-échange nord-américain (ALENA), devenu aujourd'hui l'accord États-Unis – Mexique – Canada (AEUMC), impose plus de pression sur les petits artisans fromagers pour améliorer leur productivité tout en assurant une qualité de produit répondant aux exigences à la fois de la clientèle, mais aussi de la régulation agroalimentaire, et cela en maintenant des coûts d'exploitation réduits.

L'introduction rapide des nouvelles technologies numériques adaptées au secteur manufacturier a encore plus accentué ces pressions. Ces nouvelles technologies permettent de regrouper l'ensemble des ressources des entreprises, facilitant ainsi la prise de décision basée sur des données pertinentes en temps réel. Ce nouveau contexte industriel, né au début des années 2010, porte le nom d'Industrie 4.0 et le secteur fromager a tout intérêt à prendre part à cette nouvelle ère de l'industrie. Parmi les changements importants, on note en particulier les nouvelles pratiques de gestion des opérations et de contrôle de la production au sein des PME qui adoptent et mettent à profit des systèmes de gestion intégrée (ERP), des systèmes d'exécution manufacturière (MES) ainsi que de multiples outils favorisant le suivi des activités de transformation en temps réel. Ces systèmes,

auparavant utilisés par les grandes entreprises pour lesquelles ils ont été développés, doivent donc être adaptés pour le secteur fromager dans lequel ils sont pratiquement inexistant.

Face à ce constat, le Centre d'Expertise Fromagère du Québec (CEFQ) a lancé un projet de grande envergure afin de doter les fromagers artisans du Québec d'outils modernes leur permettant de faire face à cette nouvelle réalité. Les missions de cet organisme sont d'ailleurs de développer des outils adaptés aux besoins du secteur fromager et d'amener une réflexion sur les processus mis en place dans la production fromagère, en développant de nouvelles compétences et technologies, souvent en partenariat avec des universitaires dans le cadre de projets de recherche.

Ainsi, l'objectif général de ce programme de recherche est de développer un modèle opérationnel de pilotage des procédés de transformation pour les petits fromagers du Québec. Concrètement, ce modèle opérationnel comprend la définition de processus standards intégrés et le développement de modèles de valorisation des données de pilotage. La connaissance des données utilisées ou générées lors des activités de transformation est cruciale au développement de ses deux éléments du programme de recherche. Le CEFQ rencontre cependant des difficultés à identifier toutes les données entrant en jeu dans les fromageries québécoises. Le nombre et la variété de ces dernières se reflètent dans les données qu'elles créent. De plus, les liens entre ces données et leur potentiel de valorisation demeurent incertains ou inconnus. À titre de premier projet du programme de recherche, ce mémoire vise ainsi à définir les données issues de la transformation fromagère et à établir les relations entre elles.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante. Nous détaillerons dans un premier temps une revue de littérature mettant en avant des solutions envisagées au problème d'identification des données et de leurs liens. Dans le chapitre 3, nous introduirons la méthodologie de recherche préconisée. Cette méthodologie s'appuie fortement sur l'analyse de cas réels. Le chapitre 4 porte d'ailleurs sur la collecte de données et la cartographie qui a été réalisée dans des fromageries. Le traitement de ces données et la création du modèle sont par la suite présentés dans le chapitre 5. Dans le chapitre 6, nous testerons la robustesse du modèle développé avant de discuter des résultats. Nous concluons dans le chapitre 7 avec une présentation des principales contributions de ce projet et des opportunités de recherche subséquentes à ces travaux.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le cas du projet du CEFQ, il est nécessaire d'identifier les données pertinentes dans la production fromagère. Pour y parvenir, il est capital de passer par une étape d'analyse des processus existants afin d'identifier les améliorations potentielles, comme on le fait par exemple dans des projets de réingénierie des processus ou d'amélioration continue. Ce chapitre s'articule de la manière suivante : en premier lieu, nous effectuons une courte mise en contexte où nous définissons les différentes activités de la transformation fromagère, avant d'effectuer une revue de littérature. Cette revue de littérature est composée de deux parties. Dans la première partie, nous effectuons une revue des projets ayant réalisé des activités d'identification de données dans l'industrie fromagère ou laitière. Dans une deuxième partie, nous nous penchons sur les différents travaux adressant l'identification des relations entre ces données. Enfin, nous concluons en effectuant une revue critique de la littérature afin de montrer les manques des solutions proposées.

2.1 Les différentes étapes de la transformation fromagère

Le principe général de la transformation fromagère est le suivant : le fromager souhaite garder tous les composants intéressants du lait, par exemple certaines bactéries ou protéines, et éliminer les indésirables, comme la graisse ou les minéraux, dans le sérum (i. e le petit lait). Ceci est possible grâce à la coagulation du lait. C'est de cette manière que l'on peut séparer et évacuer le plus possible d'eau du lait. Pour maîtriser sa transformation fromagère, le fromager peut jouer sur deux paramètres : la température et l'acidité du lait. Ce sont deux courbes à surveiller et à maîtriser tout au long du processus de transformation et qui impacteront le fromage final réalisé. Après la coagulation du lait, différents procédés existent pour produire différentes sortes de fromages, mais bien souvent les opérations se ressemblent.

2.1.1 Traitement du lait

La toute première étape, c'est évidemment la réception du lait et son traitement. Celui-ci peut être produit sur place si le fromager a une exploitation laitière, ou il peut être réceptionné d'une coopérative laitière. La réception du lait se fait le plus souvent de manière quotidienne. Il existe de nombreux traitements du lait différents qui auront des impacts différents sur le fromage qui sera produit par la suite. L'homogénéisation du lait consiste à réduire la taille des molécules de graisse

dans le lait entier pour que ce dernier reste homogène. Le gras a tendance à se regrouper en surface et former de la crème, voire même du beurre. La standardisation du lait est la séparation par effet centrifuge du lait et de la crème puis la reconstitution à dose exacte afin de donner un lait demi-écrémé ou lait entier avec un pourcentage exact de matière grasse. C'est un procédé très utilisé dans l'industrie laitière, mais moins chez les fromagers artisanaux. La thermisation du lait est le chauffage du lait cru pendant au moins 15 secondes à des températures comprises entre 57 et 68 °C. Le but de ce procédé est la destruction des bactéries pathogènes avec une altération du lait cru moindre qu'avec la pasteurisation. La pasteurisation du lait est un chauffage court (entre 15 et 20 secondes) du lait à des températures comprises entre 72 et 80 °C. Là aussi, le but est la destruction des bactéries pathogènes, tout en préservant les vitamines et protéines du lait cru. Enfin, la stérilisation du lait UHT (CEFQ, 2020b) comprend le chauffage à une température bien plus élevée [135-145 °C] pendant une période très courte, de 2 à 4sec. Le but étant de faire subir au lait un choc thermique fort afin de complètement éliminer la population bactérienne. Elle a l'avantage de faiblement altérer les valeurs nutritives ou le goût du lait, mais de lui permettre une durée de conservation très élevée. Le type de traitement opéré sur le lait est important, car cela va impacter des paramètres comme sa population bactérienne ou encore son taux de matières grasses, qui ont des effets considérables sur la production fromagère par la suite.

En fonction des réglementations du pays, le lait réceptionné doit être stocké pendant une durée maximum et doit être réfrigéré ou congelé. Il est en général utilisé dans les 24 h suivant sa réception.

2.1.2 Ensemencement et caillage

Le caillage est le fait de laisser le lait coaguler, ce qui correspond à la solidification des protéines du lait et l'évacuation de l'eau du lait. La coagulation du lait peut être obtenue de différentes manières. En particulier, ce sont deux composants qui vont provoquer cette coagulation : les ferments et la présure. Bien qu'ils aient des effets très différents sur le caillé, ils sont souvent utilisés simultanément. Le défi des fromagers est donc d'équilibrer ces deux composants pour obtenir le caillé désiré. À cette étape, il est très important de spécifier le type et la quantité de ferments utilisés, ainsi que les conditions d'ensemencement.

Les ferments peuvent être présents naturellement dans la population bactérienne du lait, ou ils peuvent être ajoutés par le fromager lors de l'ensemencement. Ils entraînent une acidification du

lait et une coagulation lente. Ils sont essentiels pour le goût, la texture et l'activité enzymatique et bactérienne du fromage. La présure est un coagulant naturel qui peut provenir de 3 origines différentes (animale, végétale, microbienne). Elle provoque une réaction enzymatique et une coagulation rapide.

Il existe de nombreuses sortes de ferments et de présure, avec des effets bien différents. Nous comprenons ainsi comment le fromager peut jouer sur ces deux composants du fromage pour créer de nouvelles variétés de fromages. Afin d'optimiser les effets de ces composants, il est souvent nécessaire de chauffer le lait et de le brasser afin que l'action de la présure et la réaction des ferments se fassent de manière homogène, on appelle ça la période de maturation.

2.1.3 Décaillage

Une fois que le lait a suffisamment coagulé, il faut ensuite procéder au décaillage (CEFQ, 2020b), c'est-à-dire au découpage du caillé. C'est l'expérience du fromager qui lui permet de décider du moment propice où le décaillage est possible. Pour cela il teste la fermeté du caillé à la main ou avec une pelle (CEFQ, 2020a). Des outils et sondes existent, mais ils sont très onéreux et ne sont pas nécessairement plus précis que l'expérience du fromager.

Cette étape est particulièrement importante, car la qualité du découpage impactera directement la qualité du fromage final. Plus le découpage sera fin, plus l'évacuation de l'eau sera efficace, car on augmente la surface de contact entre le caillé et le sérum. De plus, lors du moulage et pressage éventuel qui suivra, on obtiendra une pâte plus homogène si le caillé est fin. Dans le cas contraire, il est facile de trouver des trous dans la meule finale.

2.1.4 Soutirage, moulage et pressage

Lorsque le fromager estime avoir suffisamment découpé le caillé et que la quantité de sérum extraite est assez importante, il faut soutirer le caillé, c'est-à-dire le filtrer.

Le sérum est le plus souvent récupéré pour être utilisé à d'autres fins : il peut être utilisé dans d'autres produits alimentaires (la bière notamment), il peut servir pour l'alimentation d'animaux (des porcs notamment) ou encore être utilisé comme carburant dans une centrale de méthanisation.

Il est possible d'évacuer encore plus de sérum du caillé filtré en utilisant des presses mobiles installées sur la cuve de soutirage. Le caillé est ensuite réparti dans des moules en forme de meule.

Le fromager fait bien attention de remplir chaque moule avec la même quantité de caillé afin d'obtenir des meules à peu près identiques en fin d'affinage. A ce stade, il est important de calculer les différentes quantités des matières (sèches ou liquides) afin de pouvoir faire des premières estimations de rendement fromager.

Une fois les moules remplis, ils sont installés sous presse pour des durées allant de 12 h à 48 h afin de finir l'évacuation complète de sérum. Différentes courbes de pressage existent en fonction du type de fromage que l'on souhaite réaliser. Il est de norme de retourner la meule à l'intérieur du moule à la moitié de la période de pressage afin de rendre ce dernier plus homogène. À la fin de cette étape, on obtient une meule ferme et fraîche.

2.1.5 Saumurage et affinage

Il est alors possible de saumer la meule, c'est-à-dire la plonger dans une solution saline afin de favoriser la formation de la croûte. Le sel va d'abord assécher l'extérieur de la meule puis pénétrer l'intérieur de la meule en fonction du temps de plongée. Ce temps peut varier de quelques heures pour un fromage à pâte molle à quelques jours pour un fromage à pâte dure. Il est important de maîtriser les paramètres de la saumure (concentration de sel notamment) afin d'obtenir les résultats désirés (CEFQ, 2020a).

S'ensuit la période la plus connue du fromage, l'affinage. Cette opération consiste à stocker le fromage dans une pièce où la température et l'humidité sont contrôlées, pendant un certain temps (de quelques jours pour un fromage frais, à quelques années pour des fromages à pâte dure). Les soins apportés à sa croûte, ainsi que les conditions de stockage du fromage, influenceront son goût, sa couleur et sa texture. Il existe une grande différence de goût entre un fromage dont la croûte a été laissée sèche et un autre dont la croûte a été régulièrement humidifiée. À l'issue de l'affinage, la meule est généralement prête à la consommation. Durant l'affinage, le fromager tient un registre où les actions effectuées (brossage, retournements, ...) sont consignées.

2.2 Identification des données dans l'industrie fromagère

L'identification des données pertinentes dans un contexte de production est nécessaire dans de nombreux projets, car elle permet d'avoir une vision précise du problème considéré. Elle peut être

réalisée notamment via des techniques de cartographie de processus. Depuis longtemps, les chercheurs se sont penchés sur les méthodes de représentations des processus et données afin de répondre à ce besoin d'identification. De nombreux langages et modèles ont été développés, permettant de couvrir tous les aspects d'un système (fonctionnel, comportemental, informationnel...) et de doter les ingénieurs chercheurs d'outils de représentations des processus et de représenter les flux de données. On peut notamment citer les plus connus : BPMN—Business Process Model and Notation, UML—Unified Modeling Language, EPC—Event-driven Process Chain, ... Ces outils ont été utilisés dans différents travaux de recherches afin d'identifier les données nécessaires, par exemple pour le développement de système d'information ou l'amélioration de processus de fabrication. Dans cette section, nous détaillons d'une part les travaux qui ont été réalisés dans le but de cartographier des processus de transformation fromagère, et d'autre part les projets de développement de systèmes d'information dans ce domaine.

2.2.1 Modélisation des processus

L'industrie alimentaire a généré de nombreux projets mettant en œuvre des activités de cartographie de processus. Cette industrie est soumise à de nombreuses contraintes en termes de productivité, mais également en qualité et en coût. Il est donc très pertinent d'appliquer ces méthodes afin d'identifier les éléments des processus en place présentant des améliorations possibles. L'industrie fromagère ne fait pas défaut dans cette catégorie et plusieurs travaux ont été entrepris dans ce domaine afin d'identifier ses données.

Parmi ceux-ci, De Cicco et al. (2007) ont effectué une modélisation du processus de production de fromage, de la production du lait à la transformation fromagère, en utilisant le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification—Spécification de système à événements discrets). L'étude a été réalisée en se consacrant uniquement sur les aspects et facteurs liés aux propriétés sensorielles du fromage produit et la cartographie concerne un type de fromage (chèvre, à pâte molle).

Coelho et al. (2017) ont présenté une cartographie des processus de production et de distribution d'un fromage d'appellation protégée dans le but d'améliorer leur efficacité globale. Ce travail a été réalisé dans le but de soutenir le développement durable (gain économique, partage social avec le respect et la promotion des traditions, réduction des déchets) de ce fromage. L'analyse systémique utilisant des techniques ethnographiques (observations, entretiens), ainsi qu'une analyse du cycle de vie, a été employée pour identifier les points critiques à améliorer, en représentant les flux

d'énergie et de matière. La carte produite est un diagramme d'influence représentant les éléments du système et leurs interactions. Elle identifie les intrants des différents processus (matières premières, énergies, eau, emballages), les différentes activités (stockage, transformation fromagère, conditionnement, ...) et les extrants (déchets solides et liquides, produits finis valorisables, énergies perdues). Cette cartographie a le mérite d'être très globale pour représenter l'ensemble de la production et de la transformation fromagère, mais elle ne liste pas de manière fine l'ensemble des données.

D'autres projets ont vu le jour afin de réduire ou d'éliminer les sources de déchets. La méthodologie Lean Six Sigma (LSS) a été appliquée chez un producteur de produits laitiers en Norvège pour promouvoir le développement durable. Cette méthodologie, relativement peu utilisée dans l'agroalimentaire (Powell et al., 2017), est une méthode de gestion de la qualité qui combine les principes du Lean avec la méthode structurée Six Sigma. La méthode Six Sigma comprend notamment une phase de cartographie du processus que l'on vise à améliorer. L'étude longitudinale sur le terrain a permis d'observer un cycle complet du procédé, par l'intermédiaire d'entretiens, d'observations, d'activités de groupe. Une comparaison puis une sélection des meilleurs critères de succès (dans l'industrie à production continue) ont été menées. Les effets de cette étude ont été d'augmenter la sensibilité aux déchets (sources, réduction), la création d'un nouvel ensemble d'indicateurs de performances (KPI) et de leurs utilisations. Le cadre d'étude proposé par la méthode Lean Six Sigma permet l'emploi d'outils de modélisation des processus, mais ne représente pas en soi un outil de modélisation de processus. De plus, le cas d'étude a été réalisé dans une coopérative laitière produisant différents types de laits, de yaourt et de crème.

De façon similaire, l'utilisation de la technique VSM (Value Stream Mapping—flux informationnel et matériel, une carte de « l'état actuel ») par Melvin & Baglee (2008) a permis d'identifier les sources de déchets et de trouver des solutions potentielles à leur réduction dans l'industrie laitière britannique. Pour utiliser cette méthode, il a d'abord fallu définir la valeur de chaque processus et son lien avec le produit final, puis identifier les ressources et activités nécessaires à sa production et livraison (en intégrant les fournisseurs et clients également). La carte a été construite à partir de l'observation du processus complet et de discussions avec les opérateurs, ce qui peut prendre beaucoup de temps. La carte produite comprend principalement la durée de chaque étape, précisée de manière approximative, et le nombre d'opérateurs impliqués dans la

chaîne d'activités. Le détail des informations liées au processus n'est pas assez approfondi pour notre étude.

Lors de projets d'amélioration de la qualité, des activités d'analyse et d'identifications des procédés sont mises en place. C'est le cas par exemple lors de l'implantation des GMP (Good manufacturing practices, ou Bonnes manières de fabrication) ou d'un plan sanitaire (HACCP par exemple). Le rapport produit par Costa Dias et al. (2012) sur l'implantation des GMP dans une usine de fabrication de mozzarella a montré une nette réduction du ratio de non-conformités/conformités avant et après le projet. L'identification des non-conformités a été réalisée à travers un cycle PDCA (Plan Do Check Action) et a permis de relever des données concernant les locaux et les équipements, l'utilisation de l'eau, les opérateurs, le flux de production et le contrôle de qualité. L'efficacité du plan HACCP qui a été mis en place est vérifiée à l'aide d'indicateurs, par exemple la densité de certaines bactéries sur des échantillons.

D'ailleurs, l'article de Drosinos & Siana (2007) décrit le fonctionnement d'un plan HACCP de la création de l'équipe responsable du projet à l'élaboration d'un diagramme du processus complet le plus détaillé possible. L'article se base sur un exemple dans la production du fromage Feta en Italie. Le projet HACCP s'appuie sur l'identification des dangers potentiels avec 3 sources possibles : chimique, physique et microbienne, sur la définition des limites à considérer (CCP) et la surveillance de ces limites. Un plan HACCP peut être accompagné de la mise en place d'actions correctives, mais doit être constitué de procédures de suivi, de vérification, et de consignation des données. Plusieurs outils et prérequis (GMP, SSOP, autre protocole de contrôle de qualité) servent de base au plan HACCP. Dans le cas de la production du fromage Feta, une cartographie du processus de production a été réalisée en identifiant les différentes activités et leurs paramètres (températures et durées principalement). Il s'agit d'un diagramme de flux représentant le trajet et les transformations subies par le lait tout au long de processus de production. Chaque activité est accompagnée d'une description détaillant les bonnes pratiques de production. Les sources de dangers potentiels sont principalement bactériennes : l'article identifie les différentes bactéries dangereuses que l'on trouve dans le lait et définit les limites à ne pas dépasser en termes de populations bactériennes. L'article prescrit également les données à récolter à chaque étape afin de suivre ce plan HACCP, ces dernières sont présentées en annexe A

Également, la gestion des risques peut mettre en œuvre des outils de cartographie des processus. Yu & Huatuco (2016) ont exploré les processus d'une compagnie laitière chinoise, par des entretiens avec des cadres de la firme et des experts. L'entreprise est consciente des risques liés à la chaîne logistique laitière, mais n'a pas mis en place de programme de gestion de risques au niveau opérationnel. Le cadre FMEA (Failure Mode Effet Analysis) a permis d'identifier et de prioriser les risques à traiter. Les risques les plus importants : qualité du tirage du lait, la disponibilité de la nourriture pour les exploitations laitières, les pratiques de manipulation du lait, son conditionnement et son transport.

Nous avons vu dans cette partie que des travaux ont déjà été effectués pour décrire et modéliser des processus de transformations fromagères. Ils ont tous été réalisés dans un cadre spécifique afin de répondre aux objectifs de recherches des équipes scientifiques. Ils ne répondent pas à notre besoin de représentation globale du pilotage de la transformation fromagère, mais permettent de montrer l'intérêt de la modélisation des processus étudiés.

2.2.2 Développement de systèmes d'information

De nombreuses entreprises dans l'alimentaire ont adopté des systèmes d'information depuis leur essor il y a quelques dizaines d'années. Aujourd'hui, ils sont pratiquement incontournables et ils en existent de nombreuses sortes. Les systèmes d'information sont des ensembles de ressources (souvent informatiques) permettant de regrouper, stocker, traiter et partager les informations. Depuis une dizaine d'années, un nouveau courant de l'industrie s'est développé, portant le nom d'Industrie 4.0. Les technologies numériques et connectées ont été adaptées au secteur manufacturier, permettant de regrouper l'ensemble des ressources des entreprises. Parmi les changements importants, on note en particulier les nouvelles pratiques de gestion des opérations et de contrôle de la production au sein des PME qui adoptent et mettent à profit des systèmes de gestion intégrée (ERP) (Moeuf et al. (2018)), des systèmes d'exécution manufacturière (MES) ainsi que de multiples outils favorisant le suivi des activités de transformation en temps réel. Ces systèmes, auparavant utilisés par les grandes entreprises pour lesquelles ils ont été développés (Danjou et al., 2017), sont de plus en plus utilisés dans les petites entreprises. Un champ très important de l'Industrie 4.0 est l'essor des systèmes d'information tels que les ERP ou les MES

(Mantravadi et al., 2018). Les champs d’actions des MES, présentés en figure 2.1, regroupent des activités de gestion de la production, de la qualité, et des ressources humaines.



Figure 2.1 Fonctionnalités d’un MES adaptées de la norme ANSI/ISA-95

Ce type de logiciel permet théoriquement de gérer les exigences techniques des produits, ainsi que l’intégration verticale et horizontale des processus et données. Le développement de tels types de systèmes d’information, comme c’est le cas pour le projet du CEFQ, nécessite l’identification des processus et données clés d’une entreprise. De nouvelles techniques d’ingénierie sont en développement afin de faciliter le déploiement de ces systèmes d’information.

Dans un projet de développement d’un système de contrôle informatique d’une boulangerie (Blagodatsky et al., 2019), une étude des processus en place a été réalisée. Les auteurs ont choisi de réaliser des études de cas pour modéliser les processus grâce à la notation UML ce qui a permis de créer différentes classes pour la production boulangère. Un travail similaire a été réalisé par Chen & Chen (2009) dans un projet de développement d’un système de traçabilité pour le riz organique en Indonésie. Une étude des processus tout au long de la chaîne d’approvisionnement a été réalisée. Les auteurs ont choisi de réaliser des études de terrain (sondage, entretiens, analyses de documents et observations) pour modéliser les processus grâce à la notation UML. Ils ont pu décrire : les cas d’utilisations, les acteurs, les associations entre les acteurs et les limites du système.

Les différentes étapes de production, traitement et distribution du riz ont également été cartographiées pour permettre d'identifier les points potentiels de capture de données. Un travail similaire serait intéressant dans d'autres domaines de l'industrie alimentaire, notamment dans l'industrie fromagère. Nous n'avons pas trouvé d'articles décrivant le développement de systèmes d'information spécialisés dans la transformation fromagère.

Les travaux menés dans l'industrie alimentaire, et en particulier dans l'industrie laitière et fromagère, ont mis en œuvre des activités de modélisation des processus. Nous avons vu qu'une grande variété de langages et de modélisations existe. Dans la plupart des cas, les études ont été réalisées dans un but précis et les modélisations sont très influencées par ce but : réduction des déchets ou de la pollution, gain de productivité, développement d'un système d'information... D'autre part, nous n'avons pas trouvé à ce jour de cartographie de processus suffisamment développée prenant en compte tous les processus en place en fromagerie. Très souvent, les cartographies se concentrent sur un type de produit, ou sur une fromagerie. Nous aimerions disposer d'un modèle plus universel, pouvant correspondre au plus de fromageries possible. Toutefois, les articles mentionnés ci-dessus montrent la possibilité de mener à bien une cartographie de la transformation fromagère et ont permis d'identifier certaines données essentielles à prendre en considération.

2.3 Identification des relations entre les données de l'industrie fromagère

Au-delà d'identifier les données pertinentes dans l'industrie fromagère, il est aussi vital d'identifier les relations entre ces données afin de comprendre leurs mécanismes. Le développement d'outils de prises de décisions ne peut se faire que si les liens sont correctement définis. Au cours des dernières années, de nombreux travaux ont été menés afin de doter cette industrie d'instruments de valorisation des données. Dans cette section, nous faisons une revue des projets qui ont proposé de nouvelles technologies en lien avec l'Industrie 4.0 pour l'industrie fromagère ou laitière. Il sera notamment question de traiter des sujets comme la fouille de données et l'intelligence artificielle, ainsi que les modèles de données et les ontologies qui ont été développés dans ce domaine.

2.3.1 Modèles de données dans l'industrie fromagère

C'est le cas par exemple de l'ingénierie propulsée par la modélisation. De récents travaux dans ce domaine ont tenté de montrer la possibilité de générer automatiquement du code informatique à partir de modèles.

Dans les travaux de Aikenhead et al. (2015), une cartographie des processus et du système en place sur un site de production laitière canadien. Cette cartographie a permis d'identifier les sources de pollution et de prendre des mesures préventives contre celle-ci. Parmi les sources identifiées, nous retrouvons des données concernant l'utilisation de l'eau, de l'énergie et des produits chimiques ainsi que des données sur les pertes de produits et les problèmes de production et d'ordonnancement. Les diagrammes de boucle causale ont permis de montrer les répercussions entre toutes les opérations du site (effet boule de neige,) et d'identifier l'inefficacité de l'utilisation des ressources à travers les processus, ainsi que certains risques.

De son côté, Fairweather (2010) a utilisé des cartes causales et/ou cognitives pour construire des cartes des environnements socioéconomiques des fermes laitières en Nouvelle-Zélande. Les cartes de chaque ferme ont pu être rassemblées pour former une synthèse globale représentant ce que les exploitants pensent de l'écosystème de leurs fermes. Cette carte globale comprend 41 facteurs (économique, environnemental et sociétal) influençant les décisions prises par les fermiers interrogés. L'utilisation de la cartographie causale et la méthode Q (McKeown et al., 1988) pour sélectionner les facteurs les plus pertinents pour la construction des cartes s'est avérée efficace dans ce cas. La métacarte rassemblée permet néanmoins plus la représentation de potentiels plutôt que l'identification et l'explication de manière précise du fonctionnement du système, ce qui ne permet pas de répondre au besoin exprimé par le CEFQ de représenter le pilotage de la transformation fromagère.

Nous n'avons pas trouvé à ce jour de modèles de données suffisamment détaillé de l'industrie fromagère permettant de représenter le pilotage de cette dernière.

2.3.2 Intelligence artificielle et données fromagères

L'Industrie 4.0, c'est aussi l'utilisation des techniques de traitement de données sur les grands volumes générées afin de les valoriser et de proposer des outils de prises de décision. Nous avons vu dans la section précédente que de nombreux projets ont identifié des données pertinentes en

fromagerie. D'autres projets ont tenté de valoriser ces données. Les techniques de fouille de données et l'intelligence artificielle tentent de tirer parti de la puissance informatique afin de faire émerger des patterns et des indicateurs pertinents à partir des données de production. Bien que les algorithmes diffèrent, leur but est similaire : entraîner un modèle sur des jeux de données et affiner ses paramètres pour lui permettre d'accomplir ensuite des tâches de manière automatique.

Par exemple, Zakeri et al. (2018) ont développé une méthode proactive de suivi de la qualité de lait en surveillant la température et le niveau de remplissage des cuves de lait avec la création de règles « If-then » basée sur l'expertise d'un professionnel. L'utilisation de ces règles couplées à des arbres de décisions permet de suivre et analyser en temps réel les événements et l'état de la cuve, puis de détecter dès que possible les éventuelles pertes de qualité du lait, afin de réagir rapidement.

De leur côté, Vuppalapati et al. (2017) ont tenté de montrer les liens entre les médicaments administrés aux vaches d'un troupeau et la qualité et quantité du lait qu'elles produisent. Pour cela, ils ont utilisé des données collectées sur un troupeau de vaches et ont appliqué des règles couplées à un algorithme de détection de modèle. Les données utilisées sont : les médicaments et vitamines administrés aux vaches, les états de santé de ces dernières (maladies détectées), les facteurs saisonniers et la composition du lait.

L'utilisation de réseau de neurones peut également permettre de faciliter les tests de qualité. Chang & Heinemann (2018) ont mis au point une technique de prédiction automatique de l'appréciation de l'odeur. Les données fournies par des capteurs olfactifs ont été analysées par un réseau de neurones afin de classer les odeurs de différents fromages provenant de 3 fromageries différentes. Le réseau de neurones ayant été entraîné auparavant grâce à des experts, l'étude a permis d'atteindre une précision de 5 % par rapport à la note d'appréciation des experts, sur 63 % des échantillons indépendants considérés.

Plusieurs techniques d'apprentissage automatique (« machine learning ») ont été mises en œuvre par Yan et al. (2015) pour développer des méthodes de prédiction du rendement laitier. Ils ont notamment utilisé des données issues d'une exploitation laitière telles que la courbe historique de lactation, les caractéristiques des vaches (race, âge et saison de vêlage), les caractéristiques de la gestion du troupeau (habitudes de traite notamment) afin de déterminer la courbe de lactation future. Les techniques utilisées étaient diverses : réseaux de neurones artificiels, machines à support vectoriel, programmation génétique...

Ils arrivent parfois que des producteurs de lait tentent d'altérer le lait qu'ils ont produit pour cacher sa mauvaise qualité ou simplement augmenter le volume produit de manière artificielle. Pour les petites fromageries, il peut s'avérer compliqué de déceler de telles altérations. Neto et al. (2019) ont mis au point une méthode de détection de l'altération frauduleuse du lait en analysant le spectre infrarouge du lait. Les pics dans le spectre permettent d'identifier les substances présentes dans le lait. Pour automatiser l'analyse, ils ont entraîné des réseaux de neurones et des arbres de décisions sur des échantillons de laboratoire pour affiner leurs modèles. Une fois entraînés, les algorithmes atteignaient des précisions de 86,06 à 98,76 % selon la méthode employée, par rapport aux analyses effectuées par des experts.

De nombreux travaux ont été menés afin de tirer parti des données issues de la transformation laitière ou fromagère. L'exploitation de ces données permet d'ajouter de la valeur à la production, en termes de qualité, de réduction de coût et/ou de déchets. Nous voyons ainsi l'intérêt dans ce projet de proposer une méthode ou un outil permettant de structurer les données, ce qui ouvrira la porte par la suite à de nombreuses possibilités de valorisation des données fromagères.

2.3.3 Ontologie dans l'industrie fromagère

Le problème de la complexité et de la diversité des données est un problème récurrent dans l'industrie manufacturière. Le développement des outils de traitements des données nécessite en premier lieu de comprendre les interactions entre ces données, si elles existent, ou de trouver la manière de les lier afin d'exploiter le potentiel des nouvelles technologies de valorisation de données, que nous avons pu citer précédemment. Pour répondre à ce problème, les chercheurs et ingénieurs ont proposé diverses solutions permettant l'intégration et le lien des données. Une solution intéressante à ce problème est l'utilisation d'une ontologie. L'ontologie est un outil très ancien utilisé dans de nombreux domaines, allant de la philosophie à l'anthropologie, de la médecine à l'informatique. Déjà citée par Aristote, dans son œuvre « L'Organon » (Smith, 2019), l'ontologie désigne un modèle de données permettant de représenter un ensemble de concepts dans un domaine, ainsi que les relations liant ces concepts. Son emploi permet d'exploiter les objets du domaine concerné, avec raison. La variété et l'hétérogénéité des données et le vocabulaire inter- ou intradomaine représentent une difficulté que les ontologies peuvent permettre de surmonter en proposant un vocabulaire commun liant les différentes sources de données (Ibanescu et al., 2016). Il existe plusieurs types d'ontologies : les ontologies globales, de domaines, et d'applications

(Guarino, 1998). Dans ce projet, nous développerons une ontologie d'application. Une ontologie d'application est dédiée à un champ d'application à l'intérieur d'un domaine et offre le plus fin niveau de spécificité en décrivant le rôle particulier des entités de l'ontologie. Dans cette section, nous explorons les projets de développement d'ontologies dans le domaine laitier.

Un travail intéressant a été réalisé par l'équipe de Pénicaud et al. (2019). Leur travail a été de développer une ontologie, basée sur PO² (Process and Observation Ontology), spécialisée sur la production de fromage à pâte cuite. Le but de cette ontologie est de créer un vocabulaire commun, afin d'exploiter une base de données présentant des données de sources et de natures différentes pour les lier et résoudre différentes problématiques. Par exemple, un de leurs objectifs était d'estimer des données manquantes sur certains échantillons (en rhéologie notamment) et permettre de pointer les données particulièrement importantes en termes d'éco design de produit, en calculant l'impact environnemental de la production de fromage. Habituellement, ce sont deux types de données (rhéologie et analyse de cycle de vie) qui sont très difficilement liées. Leurs travaux se basent sur ceux de Ibanescu et al. (2018). Ils ont développé également une ontologie PO² DG spécialisée dans la production de lait caillé pour fournir un vocabulaire commun et aligner les approches touchant au même domaine. Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet NutriSensAI, dont le but est de développer des outils de prises de décisions pour la conception de produit de bonne qualité, mais aussi respectueux de l'environnement. Pour la construction de ces ontologies, le scénario 6 de la méthode NeON (Baonza, 2010) a été utilisé. Nous reviendrons sur cette méthode un peu plus tard, mais ce scénario implique la réutilisation et la fusion d'autres ontologies afin de créer un réseau d'ontologie. Les ontologies qui ont été utilisées sont : l'ontologie de la chaîne d'approvisionnement (Grubic et Fan, 2010), l'ontologie sur la notation des processus d'affaires (Rospocher et al., 2014), BFO¹, IAO², l'ontologie sur les unités de mesure (Grüninger

¹ <https://bioportal.bioontology.org/ontologies/BFO>

² <https://bioportal.bioontology.org/ontologies/IAO>

et al., 2018), GACS³, AgroVoc⁴ et NALT⁵. Leur plus grande inspiration a été l'ontologie développée par Dibia et al. (2016). Leur ontologie porte le nom de [MS] ²O pour Multi-Step and Multi-Scale Ontology - une ontologie multi étapes et multi échelles concernant les procédés de transformation des organismes biologiques. Ils ont eux aussi utilisé la méthode NeOn en développant une ontologie à partir de nombreux documents de sources et natures différentes. Au moment de leur publication, il manquait des modules à l'ontologie (notamment la partie Matériaux et Méthodes) et il serait intéressant d'utiliser le vocabulaire défini par AGROVOC. Des essais dans des domaines précis permettraient également de confirmer la pertinence de l'ontologie.

De leur côté, Verhoosel & Spek (2016) ont développé une ontologie pour l'exploitation laitière. Cette ontologie, nommée CDO – Common Dairy Ontology, a pour but d'uniformiser les données recueillies sur plusieurs années à l'aide de différents capteurs installés dans une exploitation laitière. Ces données proviennent à la fois des vaches, des équipements de traite, des équipements de traitement et de stockage du lait, etc. L'objectif de leur travail était de pouvoir valoriser toutes ces données en créant des outils de prises de décisions, en utilisant des techniques d'apprentissage automatique comme nous avons pu le voir dans la partie précédente.

De manière plus générale, d'autres projets ont été menés afin de développer des ontologies dans le domaine alimentaire. C'est le cas de Pizzuti & Mirabelli (2013) qui ont souhaité développer une ontologie de domaine pour supporter la traçabilité des aliments dans les chaînes d'approvisionnements. Il existait déjà des ontologies sur les aliments, mais aucune ne regroupe tous les types d'aliments. Cette ontologie a été développée en triant les aliments en fonction du type de procédé. Différents scénarios ont été développés pour tester la pertinence de l'ontologie.

Nous avons vu que de nombreux travaux ont tenté d'identifier les relations entre les données issues de l'industrie fromagère ou alimentaire. C'est le cas dans des projets visant à créer des modèles de données, des travaux de fouilles de données utilisant des techniques d'intelligence artificielle, ou

³ http://aims.fao.org/global_agricultural_concept_scheme_gacs

⁴ <http://aims.fao.org/fr/agrovoc>

⁵ <http://agroportal.lirmm.fr/ontologies/NALT>

encore des ontologies. Le but de ces dernières est spécifiquement d'identifier les concepts clés d'un domaine et leurs relations.

2.4 Revue critique

Dans les parties précédentes, nous avons examiné plusieurs travaux. Après avoir expliqué brièvement les principes de la transformation fromagère, nous avons fait une revue des projets ayant cartographié et analysé des processus dans l'industrie fromagère et laitière, ou ayant développé des systèmes d'information. Nous avons ainsi vu des exemples concrets d'identifications des données de l'industrie fromagère. Les cartographies développées sont pertinentes, mais ne correspondent pas à ce que nous recherchons, car elles couvrent seulement certains pans et n'intègrent pas la globalité de l'industrie fromagère. Dans la deuxième partie, nous avons examiné des travaux qui ont cherché à identifier les relations entre les données issues de l'industrie fromagère. En particulier, nous nous sommes penchés sur les techniques d'apprentissage automatique, les modèles de données, ou encore les ontologies, qui exploitent les données issues du domaine considéré. Dans le cas de l'industrie fromagère au Québec actuellement, il n'y a aucun travail qui a été réalisé afin d'identifier les données pertinentes de l'industrie fromagère, ou de cartographie des processus en place dans les fromageries. En effet, il n'existe pas de travaux qui ont permis de décrire à la fois la production laitière et la transformation fromagère dans sa globalité, qui prennent en compte les aspects de gestion de la qualité et de la production, tout en assurant la traçabilité et la tenue des inventaires d'une entreprise. Les outils proposés pour identifier les données proposent des vues partielles de l'industrie fromagère, car ils identifient seulement une partie des données et leurs relations en fonction de leurs objectifs de recherche.

2.5 Conclusion

Après avoir expliqué brièvement les principes de la transformation fromagère, nous avons fait une revue des projets ayant identifié des données pertinentes dans l'industrie fromagère et laitière. Nous nous sommes ensuite penchés sur les travaux qui ont tenté de créer des liens entre ces données ou qui ont cherché à les exploiter. Nous avons par la suite montré les lacunes de ces travaux en gardant en tête notre problématique en démontrant qu'il n'existe pas de travaux qui ont permis de décrire à la fois la production laitière et la transformation fromagère dans sa globalité, qui prennent en compte les aspects de gestion de la qualité et de la production, tout en assurant la traçabilité et la

tenue des inventaires d'une entreprise. De ce constat, nous proposons le développement d'un nouvel outil permettant d'identifier et de modéliser la globalité des données de l'industrie fromagère au Québec, comprenant également leurs relations. Cet outil permettra d'apporter une structure exploitable dans l'optique de valoriser les données issues de la transformation fromagère. Dans le chapitre suivant, nous détaillons la méthodologie employée pour développer cet outil.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Au chapitre précédent, nous avons effectué une revue de littérature des travaux qui ont tenté d'identifier les processus et données de l'industrie fromagère, ainsi que leurs liens. Nous avons vu qu'aucun modèle actuel ne permet d'identifier toutes les données pertinentes du domaine ni toutes les relations qui les lient. Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie pour développer un outil décrivant le pilotage de la production fromagère au Québec, un outil permettant de répondre aux besoins identifiés. Avant de détailler la méthodologie, nous décrirons dans un premier temps que nos objectifs spécifiques ainsi que les hypothèses de recherches que nous avons dû formuler afin de définir notre méthodologie.

3.1 Objectifs spécifiques

Afin de répondre aux besoins du CEFQ et en considérant les résultats de la revue de littérature que nous avons menée, nous pouvons définir les objectifs spécifiques de recherche :

- Objectif 1 : identifier les données existantes dans l'industrie fromagère québécoise;
- Objectif 2 : identifier les liens entre les données issues du premier objectif; et
- Objectif 3 : développer et valider un modèle permettant d'exploiter ces données et leurs relations.

3.2 Cadre d'étude

Afin de guider notre travail, nous définissons notre cadre d'étude :

1. L'étude sera réalisée au Québec et prendra en compte les réalités de l'industrie fromagère québécoise (législation, marché, provenance des matières premières...)
2. L'étude sera réalisée auprès du CEFQ et de ses fromagers clients.

3.3 Démarche proposée

Pour répondre à ces objectifs, nous proposons une méthodologie qui mettra en œuvre plusieurs activités, notamment une analyse de l'état actuel des fromageries grâce à une cartographie de leurs

processus d'affaires. De cette cartographie, nous développerons une ontologie décrivant le pilotage de la production fromagère au Québec. Nous proposons le développement d'une ontologie car il s'agit d'un type de modèle de données suffisamment riche pour permettre l'identification à la fois des données et de leurs liens. Les ontologies, dans le domaine de l'ingénierie, permettent d'apporter des pistes des solutions à des besoins fondamentaux :

- Le partage et la diffusion des connaissances en ingénierie est d'un intérêt général. Cela permet d'enrichir toute la communauté scientifique. Les ontologies sont complètement inscrites dans le principe de partage et de diffusion des connaissances;
- Il est nécessaire de développer de nouveaux mécanismes ou outils évolutifs et participatifs. Cela doit permettre d'obtenir des retours et de la rétroaction de la part des différents acteurs impliqués dans le domaine en question. Les ontologies sont réutilisables et modifiables, ce qui permet leur emploi dans de nouveaux projets et augmente donc leur valeur;
- Les outils d'aide à la décision sont très importants en ingénierie pour permettre des conceptions innovantes de produits ou de services. Les ontologies sont particulièrement adaptées à la création d'outils d'aide à la prise de décision car elles permettent de définir les données, leur sens, leurs relations.

Nous nous basons sur la méthodologie DRM — Design Research Methodology afin de cadrer notre démarche globale. Cette méthodologie prévoit plusieurs phases : une phase de clarification de la recherche, une phase d'étude descriptive de l'existant, une phase de développement ontologique et enfin une phase d'expérimentation de l'ontologie développée. Afin de développer notre ontologie, dans la 3^e phase, nous nous aidons de la méthode NeOn (Network of Ontologies), développée par Baonza (2010). Dans sa thèse, Baonza propose un certain nombre d'outils et nous nous intéressons particulièrement au scénario qui permet le développement d'une nouvelle ontologie. La méthodologie NeOn a été employée a de nombreuses reprises dans des projets afin de construire des ontologies (Ibanescu et al., 2016 ; Pénicaud et al., 2019 ; Dibie et al., 2016 ; Caracciolo et al., 2012 ; Muljarto et al., 2017).

La figure 3.1 représente une vue globale de la méthodologie employée. La première activité concerne l'identification des concepts clés. Un concept clé est une représentation abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets, d'une idée générale, ayant des caractères communs et un comportement commun. Les étapes suivantes concernent la sélection des concepts clés à conserver

dans l'ontologie développée, ce que nous détaillons par la suite. S'ensuivront des activités de conceptualisation, dans laquelle les connaissances sont organisées et structurées en modèles, et de formalisation, dans laquelle les modèles conceptuels sont transformés en modèles semi-informatiques. Enfin, une activité d'implantation permet de transcrire les modèles semi-informatiques dans le langage d'implantation ontologique défini à l'activité de spécification. Nous obtiendrons une ontologie qu'il nous incombera ensuite de peupler avec les données récoltées dans la phase d'acquisition des connaissances. Une fois l'ontologie peuplée, nous effectuerons une activité de validation et discuterons de sa pertinence avant de conclure sur notre projet.

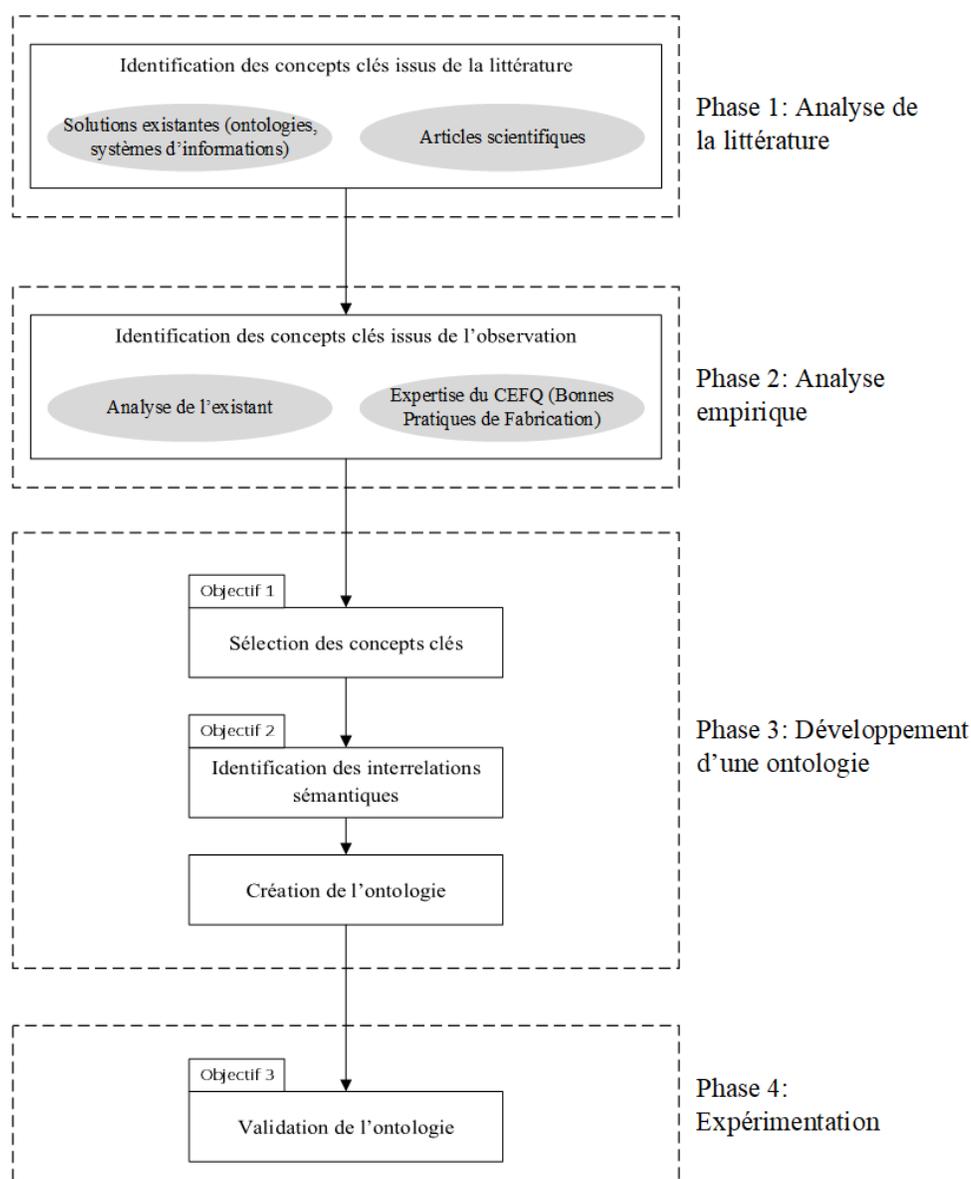


Figure 3.1 Méthodologie générale

3.3.1 Analyse de la littérature

Lors de notre revue de littérature, nous avons identifié un certain nombre de solutions techniques existantes ou d'ontologies pouvant répondre partiellement à nos besoins. Dans un premier temps, il sera intéressant d'identifier parmi toutes ces sources les concepts clés qui pourront être réutilisés dans notre projet. Nous dresserons ainsi une liste des concepts clés issus de la littérature potentiellement pertinents pour notre projet.

3.3.2 Analyse empirique

Il faudra récupérer le plus d'informations sur les données utilisées dans les fromageries au Québec, pour compléter les premiers concepts identifiés et s'assurer de la cohérence de la liste, ainsi que de la présence de toutes les informations pertinentes. Pour y parvenir, nous nous baserons sur plusieurs sources de données : un portrait de l'état actuel des fromageries et de leurs modes de fonctionnement, la documentation et de l'expertise fournies par le CEFQ. Il sera donc nécessaire d'explorer les fromageries pour identifier puis cartographier les processus clés et leurs indicateurs de performance. Étant donné la nature du projet, nous avons pris la décision d'utiliser le modélisme ANSI, qui reste très simple et facilement partageable aux fromagers qui sont novices dans ce domaine.

Après avoir cartographié tous les processus observés, nous utilisons les fiches activités, décrites plus bas dans le chapitre 4, pour extraire les concepts clés. Les fiches activités contiennent toutes les informations et données utilisées dans chacune des activités cartographiées en fromagerie (intrants, extrants, équipements utilisés, paramètres à surveiller, etc.).

3.3.3 Développement d'une ontologie

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la construction de l'ontologie va s'effectuer en plusieurs étapes. Après avoir collecté les données et connaissances, et identifié tous les concepts clés, il nous faudra sélectionner les concepts à conserver. Par la suite, nous identifierons les liens sémantiques entre ces concepts puis nous les formaliserons afin de créer un modèle intermédiaire, avant de finalement les implémenter dans le langage ontologique choisi.

3.3.3.1 Sélection des concepts clés

Les deux premières phases de la méthodologie DRM ont permis de générer une liste très exhaustive de concepts clés potentiellement intéressants pour notre projet. Avant de développer plus en détail le modèle ontologique, il est vital d'effectuer un tri dans ces concepts. Pour ce faire, nous avons développé une méthode reproductible afin de sélectionner les concepts clés et valider ces derniers. Nous présentons ci-dessous cette méthode, résumée à la figure 3.2. Cette dernière a d'ailleurs été testée par un chercheur indépendant afin de valider sa reproductibilité.

Cette méthode permet de tester et valider itérativement les concepts potentiels de notre liste initiale. Pour chaque concept, nous effectuons plusieurs tests. Le premier concerne son applicabilité dans la production fromagère. Un concept est applicable dans la production fromagère s'il est défini par sa nature dans le milieu fromager ou si sa définition est suffisamment générale pour l'appliquer dans le contexte d'une fromagerie. Le second test concerne les objectifs du projet du CEFQ. Un concept est intéressant pour le projet du CEFQ s'il permet de décrire le fonctionnement de la production fromagère et/ou de la chaîne logistique d'une fromagerie et/ou de la gestion de la qualité en fromagerie. Le troisième test concerne le choix de terme employé pour désigner le concept et l'éventualité d'avoir des synonymes dans la liste de concepts. Il se peut qu'il y ait un conflit sémantique des concepts synonymes et il faut par conséquent élucider ce conflit. Élucider un synonyme revient à choisir le terme le plus pertinent pour un concept. Deux termes peuvent définir exactement le même concept, ou bien avoir des définitions et propriétés complètement différentes dans le contexte de la production fromagère. Après avoir choisi le terme adéquat, il faut ensuite fixer son rôle dans l'ontologie. En effet, à l'issue de cette sélection, nous pourrions nous rendre compte qu'un terme identifié comme potentiel concept clé peut en réalité être une instance d'un concept, ou même une propriété d'un concept, et non un concept. On peut ainsi valider le concept, ou définir le terme comme une instance ou une propriété. L'étape suivante revient à placer logiquement les concepts validés dans la hiérarchie ontologique. La hiérarchie impose de définir correctement les liens d'héritage entre concepts et sous concepts, de définir correctement la granularité de chaque concept afin de garantir la bonne cohérence de l'ontologie. Cette réflexion se fait itérativement, car la validation d'un nouveau concept peut changer la hiérarchie ontologique. Une fois que tous les concepts ont été traités, nous obtenons une liste de concepts validés et ordonnés. Nous pouvons éventuellement consigner les concepts éliminés à des fins d'archives ou pour des révisions.

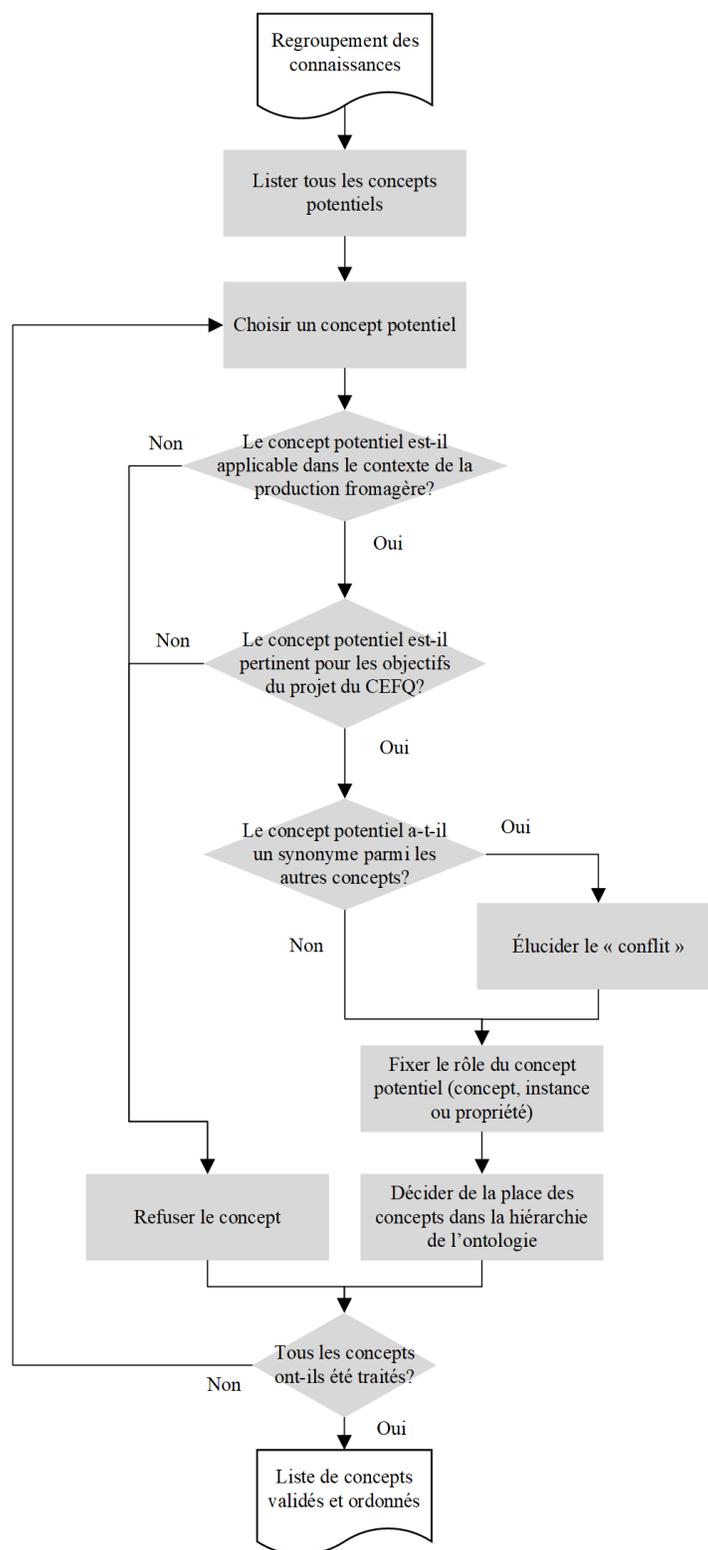


Figure 3.2 Sélection des concepts clés

3.3.3.2 Identification des liens sémantiques

Après avoir validé les concepts et ordonné ces derniers, il faut ensuite identifier et valider les liens sémantiques entre ces derniers. Nous nous baserons sur les observations, la documentation disponible, les entretiens effectués et les cartographies réalisées. La difficulté de cette tâche résidera dans la bonne identification des liens : une identification trop fine risque de présenter des redondances d'informations, tandis qu'un choix trop vague ne permettra pas de répondre aux besoins des fromagers. Ces liens possèdent des dénominations, mais aussi des caractéristiques qu'il faudra définir.

3.3.3.3 Création de l'ontologie

Une fois que les données auront été identifiées et sélectionnées, nous pourrons ensuite construire l'ontologie à proprement parler en implémentant le modèle dans un langage ontologique. Nous choisissons de réaliser cette implémentation dans le langage OWL, pour Web Ontology Language, qui est un langage de représentation des connaissances qui se base sur les modèles RDF (Resource Description Framework). Le langage OWL fournit les moyens pour définir des ontologies Web structurées. C'est le langage d'implémentation le plus utilisées et le plus reconnu. Il permettra facilement le réemploi de l'ontologie et son partage. Il possède toutes les annotations dont nous avons besoins pour définir correctement le domaine d'application. Son utilisation est recommandée par le W3C⁶ (*World Wide Web Consortium*). Il peut notamment être couplé à des descripteurs logiques qui vérifient en tout temps la cohérence des liens et concepts sémantiques entre eux. L'implémentation se fera grâce à l'outil *Protégé*⁷, qui est un logiciel gratuit dont le code source est libre d'accès. Il a été développé par des chercheurs de l'université Stanford pour permettre la création d'ontologie et est très populaire dans le domaine du Web sémantique.

Après avoir réalisé ces activités, nous aurons construit une ontologie du pilotage de la production fromagère qu'il faudra ensuite tester afin de valider ou non sa pertinence.

⁶ <https://www.w3.org>

⁷ <https://protege.stanford.edu>

3.3.4 Expérimentation

Nous consacrerons l'avant-dernier chapitre à l'évaluation puis à la validation de l'ontologie développée. Dans un premier temps, nous pourrions peupler l'ontologie avec les données collectées lors de notre phase d'analyse de l'existant. Il ne s'agit pas d'une évaluation ou d'une validation à proprement parler puisque l'ontologie a été construite à partir de ces données. Il ne devrait donc pas y avoir de conflit à ce niveau.

Dans un deuxième temps, il sera pertinent de confronter notre ontologie à des données provenant d'autres sources n'ayant pas été utilisées dans son processus de développement. Ces données proviendront d'autres projets, issus de la revue de littérature et d'une nouvelle collecte de données. Il faut évidemment que ces nouvelles données respectent les hypothèses et conditions émises au début de chapitre. Les données prises en compte par l'ontologie ainsi que celles qui ne le sont pas seront comptabilisées afin de valider ou non la pertinence de l'ontologie.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini nos objectifs spécifiques de recherche puis nous avons posé plusieurs hypothèses afin de pouvoir proposer une méthodologie de recherche. Cette méthodologie s'appuie sur la méthode DRM afin d'identifier nos concepts clés, et leurs relations, pour finalement construire une ontologie. Cette méthodologie permettra de remplir nos objectifs de recherche. Nous effectuerons également une évaluation sémantique et structurelle de l'ontologie réalisée afin de valider ou non sa pertinence. Les différentes activités de cette méthodologie sont réalisées dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 4 ANALYSE EMPIRIQUE

Dans les chapitres précédents, nous avons effectué une revue de la littérature concernant tous les travaux pertinents pour notre projet et nous avons décrit la méthodologie que nous adoptons pour développer une ontologie. Dans ce chapitre, nous décrivons la première étape de nos travaux, qui concerne la phase d'analyse de l'existant. Cette étape nous a permis d'identifier les concepts clés en lien avec l'industrie et l'artisanat fromager au Québec. En premier, nous détaillons une série de collectes de données effectuées dans des fromageries québécoises, qui nous a permis par la suite de dresser une cartographie des processus d'affaires en place dans ces fromageries. En deuxième, nous détaillons les connaissances que nous avons pu extraire de l'expertise du CEFQ, grâce à la documentation ou le partage des bonnes pratiques de fabrications.

4.1 Analyse de l'existant

4.1.1 Collecte de données

La première étape est de récupérer le plus d'informations sur les processus en place dans les fromageries au Québec. Afin de dresser un portrait de l'état actuel des fromageries et de leurs modes de fonctionnement, il a été nécessaire d'explorer les fromageries pour identifier les processus clés et les indicateurs de performance relatifs au processus. Le défi principal résidait ici dans la diversité des pratiques artisanales non documentées des nombreuses fromageries de petite taille. Au cours de ces visites, nous avons effectué de nombreuses observations, à la fois des actions entreprises, mais aussi des équipements et installations, pour prendre en compte les possibilités actuelles et futures dans un contexte de numérisation des entreprises. Nous avons également pu interroger les fromagers et les gérants des fromageries afin d'éclaircir certains points. Ces échanges ont également permis d'assurer un bon fonctionnement et un partage des informations avec le CEFQ, avec les différents responsables du projet.

Au total, nous avons visité 4 fromageries différentes, dont les profils sont dressés dans le tableau 4.1. Pour respecter les accords de confidentialités, nous ne mentionnerons pas les noms des fromageries.

Tableau 4.1 Profils des fromageries observées

	Fromagerie A	Fromagerie B	Fromagerie C	Fromagerie D
Ancienneté	70 ans	8 ans	20 ans	15 ans
Personnel	10-15	10-15	1-5	5-10
Marché	Canada	Amérique du Nord	Québec	Canada
Producteur/transformateur	Transformateur	Transformateur	Les deux	Les deux

4.1.1.1 Fromagerie A

Le site est composé de 4 bâtiments principaux : deux usines de production, une usine de méthanisation et une maison musée accompagnée d'un bar laitier. La première usine regroupe le premier site de production, les bureaux et la boutique de la laiterie.

Chaque usine de production possède ses salles d'affinage et ses salles de stocks de produits divers (entretiens, cuve de stockage de lait, congélateurs et réfrigérateurs pour les ferments/présure, auxiliaires de production, etc.). Chaque usine de production est autonome en ce qui concerne la production (pas d'échange de sous-produits entre les sites).

Les deux usines de production possédaient plusieurs cuves de production avec des volumes atteignant jusqu'à 2000 L. La plupart des cuves étaient équipées d'automates pour gérer le brassage/chauffage du lait en fonction des étapes de production.

Tous les équipements (cuves, outillages, presse, moules, tuyaux...) sont lavés entre les différentes séries de production de fromages avec plusieurs sortes de produits nettoyants (eau oxygénée, Javel...)

La laiterie possède une dizaine de salles d'affinage, celles-ci comprennent des zones internes. Ces zones ont des étagères numérotées, ce qui permet de repérer chaque meule durant l'affinage. Les salles d'affinages sont équipées de régulateurs de température, permettant également de contrôler la ventilation et l'humidité intérieure (avec un logiciel à distance). Les différents types de fromages sont répartis sur les différentes salles d'affinages. Les saumures peuvent être conservées dans de telles salles pour mieux les préserver. Les fromagers tiennent un suivi des fromages assez simples

dans les salles d'affinages avec différents indicateurs comme la date de production, la date d'entrée à l'affinage, la date de sortie prévue et les actions effectuées pendant l'affinage.

Nous nous sommes également entretenus avec l'employé responsable de la gestion des stocks et des commandes. Il tient un carnet de commandes avec une feuille de commande par fournisseur pour les différents produits (majoritairement présures et ferments). Il fonctionne par recompléments à intervalle régulier en vérifiant régulièrement, souvent aux 2 semaines, l'état du stock. Il commande donc une certaine quantité pour recompléter le stock en conséquence selon une limite par produit qu'il a déterminé par expérience.

4.1.1.2 Fromagerie B

Pour cette deuxième visite, nous nous sommes concentrés sur la gestion de la qualité dans une fromagerie en effectuant une tournée typique des inspecteurs qualité du gouvernement. Cette inspection consiste à vérifier les différentes salles et équipements ainsi que les registres. Les inspecteurs appliquent en général le principe du « dur, lisse, et nettoyable » : les équipements doivent être en bon état, entretenus régulièrement et avec les bonnes techniques et produits.

Le site est composé d'un seul bâtiment, qui regroupe l'usine, les bureaux, et un bar laitier et espace de vente. Elle possède trois 3 hâloirs (salle d'affinage), un petit et grand réfrigérateur (pour le stockage de matières premières et produits finis), une salle de conditionnement, une salle de réception des marchandises (sèches), une salle de réception lait et de traitement thermique, une zone de production avec 4 lignes différentes, une salle de stockage des produits chimiques (fermée à clé), une salle de nettoyage des outils ainsi qu'un laboratoire très bien équipé.

L'usine a été conçue pour respecter la marche avant (pas de retour en arrière lors du processus de fabrication, donc moins de risques de contamination). Les cuves sont équipées d'automates pour gérer le brassage/chauffage du lait en fonction des étapes de production. Tous les équipements (cuves, outillages, presse, moules, tuyaux...) sont lavés entre les différentes séries de production de fromages avec plusieurs sortes de produits nettoyants (eau oxygénée, Javel...).

Nous avons pu rencontrer la personne responsable de la traçabilité des produits fabriqués sur le site. Au cours des derniers mois, il a développé un classeur Excel permettant de suivre les entrées, déplacements internes et sorties de toute matière du site. Ce type d'outil, bien que très simple, est

vital en cas de rappel afin de déterminer d'une part des responsabilités de différents acteurs (producteur, mais aussi fournisseurs), et d'autre part d'identifier les produits concernés par le rappel et les clients à contacter. Cependant, cela nécessite une tenue consciencieuse des différents registres (réception, production, ventes, etc.). Ces registres sont dans un premier temps renseignés à la main et le responsable de la traçabilité est chargé par la suite de les entrer dans son classeur Excel. Il souhaiterait cependant mettre en place un suivi par code-barre pour simplifier la prise de données.

Nous avons ensuite fait une visite des différentes salles de stockage où nous avons pu remarquer de mauvaises pratiques. Dans le grand réfrigérateur, les produits finis étaient rangés de manière plutôt chaotiques, ce qui augmente le risque d'erreurs dans les expéditions et complique le suivi des stocks.

Notre visite s'est terminée au laboratoire où nous avons eu accès à l'ensemble des procédures et registres mis en place sur le site. Les registres sont divisés en 7 catégories, répertoriées sur le site de l'inspection alimentaire du Canada ("Inspection - MAPAQ"). Chaque fromagerie établit ses propres procédures, c'est évidemment lié à leurs locaux et équipements.

4.1.1.3 Fromagerie C

Le site est composé d'un bâtiment de production fromagère ainsi que d'une exploitation laitière. Le site de production comprend un bureau faisant également office de laboratoire simple, deux hâloirs, une salle de saumurage, une salle de production, un espace boutique et une salle de stockage faisant office de vestiaire également.

Comparée à la fromagerie précédente, celle-ci est bien moins équipée, mais elle fait aussi bien moins de volume de production. Le lait utilisé est produit sur place grâce à l'exploitation laitière pour faire des fromages au lait cru biologique. Leur production est vendue à l'échelle provinciale.

La salle de fabrication est relativement petite et est très encombrée. Elle contient tout le matériel de production, mais aussi de nettoyage. La cuve possède une sonde de température, mais pas d'automate. Il faut tout régler manuellement pour chaque production (température, vitesse de brassage, etc.). C'est l'expérience qui prime pour fixer ces paramètres (en fonction de la

quantité/qualité du lait, du type de fromage, etc.). En production, les employés disposent d'une tablette pour le suivi du pH et d'un ordinateur.

Tous les équipements (cuves, outillages, presse, moules, tuyaux, etc.) sont lavés entre les différentes séries de production de fromages avec plusieurs sortes de produits nettoyants (eau oxygénée, Javel...)

Le site de production ne respecte pas le principe du « toujours vers l'avant » et il y a des allers-retours des produits entre les différentes étapes de production et parfois même des productions de plusieurs produits dans la même salle.

Nous avons pu nous entretenir avec la gérante afin d'avoir des explications sur le fonctionnement de la fromagerie. Elle a tout d'abord expliqué le lien entre leur exploitation laitière et la partie production fromagère, notamment la façon dont ils tiennent des registres pour la traite du lait. Lors de la collecte du lait (effectuée le matin et le soir quotidiennement), la personne responsable consigne différentes informations dans un registre papier pour suivre l'état du lait (tests habituels, odeur, pH, test microbien), des vaches (condition, alimentation, période de l'année, pâturage, etc.) et des équipements de traites (état, entretien, conditions...). Ces registres permettent, avec l'expérience, d'indiquer aux fromagers s'ils doivent modifier leurs paramètres de fabrication, voir même changer de type de fromage produit en fonction de la qualité du lait.

Elle a ensuite détaillé avec précision leur manière de suivre leur production. La gérante a développé un fichier Excel comprenant plusieurs feuilles : une feuille principale avec la fiche de fabrication contenant toutes les étapes de production, à remplir au fur et à mesure avec les données mesurées lors de la production. Les employés notent également la température de la pièce de production et celle du stockage du lait, ce qui peut s'avérer intéressant pour avoir une idée de l'état du lait de la veille. Une deuxième feuille permet de calculer les quantités de ferments et de présure mise dans chaque lot de fabrication et ainsi de suivre correctement les quantités en stock restant. Un suivi de la courbe de température lors de l'étape de délactosage (courbe type, droite, courbe en temps réel et courbe normale) est présent sur une troisième feuille. Enfin, une dernière feuille permet le calcul du temps de caillage : on utilise un ratio entre la quantité de lait et la force de la présure pour estimer le temps de prise, puis c'est l'expérience qui parle pour définir quand décailler exactement.

Nous avons ensuite discuté de la façon dont les stocks sont gérés dans la fromagerie. Étant donné leur faible production, la gérante m'a expliqué tenir un faible stock de matières premières. Très

peu d'employés les utilisent et il n'y a donc pas de suivi précis grâce à un registre d'entrée ou de sortie. La petite taille de l'entreprise leur a permis jusque-là d'avoir une gestion «à l'œil et à l'esprit» de leur stock. Une vérification est faite une à deux fois par mois et des ajustements sont faits sur leur prochaine commande. Cette fromagerie est relativement flexible sur sa production pour ajuster les fromages produits en fonction de leur stock disponible.

Étant donné qu'ils produisent des fromages biologiques, ils n'utilisent pas de pesticides ou de traitements chimiques contre la vermine par exemple. Ils font surtout très attention à la qualité de leur lait et de leur équipement.

4.1.1.4 Fromagerie D

Pour notre dernière visite, le CEFQ nous a proposé de visiter une fromagerie particulièrement intéressante pour ce projet : la particularité de cette fromagerie est leur volonté de conserver une grande quantité de données (production, composition du lait, test et dégustation, analyse qualité/microbienne, vente et traçabilité, rendement) pour chaque lot fabriqué. Leurs procédures de rappel et leur système de traçabilité sont très bien pensés, mais ils consignent toutes ces données à la main sur des registres papier qui sont ensuite rentrés à la main encore sur un fichier Excel. La fromagerie possède des données exploitables sur une dizaine d'années.

Le site est composé d'un bâtiment de production fromagère ainsi que d'une exploitation laitière (grange, prés, etc.). Le site de production comprend un bureau faisant office de laboratoire, une salle de production, une salle de saumure, une salle de séchage des planches, 3 hâloirs frais (avec robot pour retourner et brosser les meules), un hâloir «chaud», une salle de conditionnement (pesage, emballage, étiquetage) et une salle de stockage/expédition. Lors de notre visite, la fromagerie était en partie en travaux : une extension est en cours de construction et installation, ce qui permettra à la fromagerie d'augmenter significativement le volume de production.

Ils n'utilisent que le lait qu'ils produisent eux-mêmes avec leur exploitation laitière pour faire des fromages au lait cru biologique. La traite des vaches est effectuée deux fois par jour (matin et soir) et la production de fromage est faite six fois par semaine en utilisant le lait du matin et du soir de la veille. Le stockage du lait se fait sur l'exploitation laitière et un pipeline relie les deux bâtiments. Le lait est thermisé ou gardé frais.

La pièce de fabrication est de taille moyenne. Elle contient tout le matériel de production, mais aussi de nettoyage. La cuve possède une sonde de température, mais pas d'automate. Il faut tout régler manuellement pour chaque production (température, vitesse de brassage, etc.). C'est l'expérience qui parle pour fixer ces paramètres (en fonction de la quantité/qualité du lait, du type de fromage, etc.).

Tous les équipements (cuves, outillages, presse, moules, tuyaux, etc.) sont lavés entre les différentes séries de production de fromages avec plusieurs sortes de produits nettoyants (eau oxygénée, Javel), c'est-à-dire chaque matin (un programme préopérationnel existe et un registre est tenu).

Le site de production ne respecte pas le principe du « toujours vers l'avant » et il y a des allers-retours des produits entre les différentes étapes de production. Dans la nouvelle extension, ce principe sera cependant respecté.

Après avoir visité ces 4 fromageries, nous avons à notre disposition un nombre important de notes et d'observations sur les processus d'affaires en places dans les fromageries ainsi que les données utilisées.

4.1.2 Cartographie des processus d'affaires des fromageries québécoises

Grâce à toutes les notes et données collectées lors des visites de fromageries, nous avons pu dresser une cartographie des processus observés en fromagerie. Le défi de cette étape est le choix de la méthode de cartographie la plus appropriée au processus non linéaire des fromageries.

4.1.2.1 Méthodologie et langage de modélisation

Dans le domaine de la modélisation de processus et de la réingénierie des procédés, il existe énormément de formalismes différents. La recherche est encore active dans ce domaine et de nouvelles versions sont publiées chaque année. Parmi les plus connus, on peut retrouver les modèles ANSI, BPMN, UML, IDEF, SysML... et bien d'autres encore (Muehlen et al., 2007). Chacun a ses spécificités, ses domaines d'application, ses notations, ses avantages et ses limites. Nous avons choisi la formalisation ANSI, qui reste très simple et facilement partageable aux fromagers qui sont novices dans ce domaine.

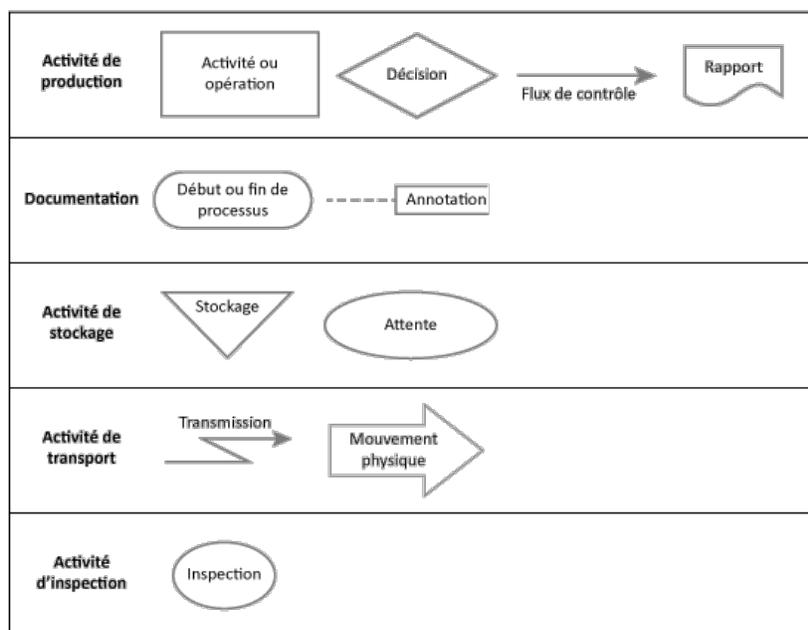


Figure 4.1 Notation ANSI

Cette modélisation simple permettra aussi une transition facilitée vers la spécification technique logicielle. Étant donné l'ampleur et l'envergure du projet et des données collectées lors des visites, il était vital d'avoir une structure claire permettant de se retrouver et de naviguer facilement à travers toute la cartographie. Nous structurons notre cartographie sur trois niveaux de détail, de plus en plus spécifiques. :

- Niveau 1 — BPML : ce niveau est la *Business Process Master List*, soit la liste principale des processus d'affaires. Dans ce niveau, on répertorie de manière très agrégée tous les processus cartographiés. On peut ainsi grouper les processus par catégories différentes (approvisionnement, production, conditionnement, gestion de la qualité...). Chaque

processus possède un titre permettant de l'identifier. On précise par la suite le fichier de cartographie (le niveau 2) associé à ce processus ainsi que le responsable de la cartographie et son statut (en cours, à vérifier, complété, validé...). On précise également quelle organisation est concernée par ce processus.

- Niveau 2 — Cartographie ANSI : c'est le niveau de modélisation. C'est à cette étape que nous avons utilisé le langage de modélisation ANSI pour décrire les processus observés dans les fromageries. Chaque cartographie possède le nom du processus cartographié, et un « tableau » comprenant des couloirs représentant les différents acteurs ou départements concernés par les étapes du processus. Ce niveau permet d'avoir une vue globale du processus en question, avec les acteurs qui sont concernés et les différents processus ou sous-processus liés.
- Niveau 3 — Fiche-activité : pour chaque activité présente dans la modélisation (niveau 2) d'un processus, on détaille un fichier avec toutes les informations de l'activité. Ce fichier permet par exemple d'aller obtenir un détail précis si l'on souhaite effectuer de la réingénierie de processus.

La cartographie comporte un fichier BPML comportant la liste des processus observés, 29 fichiers de processus modélisés et 205 fiches-activités. Des exemples de fichiers de processus et de fiches activités sont donnés en annexe C et D.

4.1.2.2 Identification des concepts clés

Nous nous sommes appuyés sur les modélisations de processus ainsi que sur les fiches-activités pour identifier des concepts clés. Les différentes activités ainsi que les acteurs apparaissant dans la modélisation peuvent correspondre à des concepts clés et nous avons donc recensé tout ce qui nous semblait pertinent pour le pilotage de la production fromagère. De la même manière, nous avons parcouru les fiches-activité pour identifier toutes les données pouvant correspondre à des concepts clés.

Prenons par exemple la fiche-activité de la tâche 4 « Emprésumer » du processus « Production de fromage à pâte pressée cuite ». La fiche-activité est détaillée en figure 4.2.

Le champ **Intrant** contient l'information « Lait mûré ». Nous pourrions retenir le concept de *lait* ou de *lait mûré*. Ce dernier est un produit intermédiaire qui est obtenu après ensemencement du

lait et maturation de celui-ci. Il s'agit d'un mélange de lait et de ferments (ou d'autres additifs). Les ferments ont modifié des caractéristiques du lait (son pH notamment). Nous retiendrons donc les concepts de *lait*, d'*additifs*, de *pH*.

Le champ **Extrant** contient l'information « Lait maturé et présure ». Nous avons déjà traité le lait maturé. Nous retiendrons *présure* comme autre concept potentiel.

Le champ **Différence entre les produits** contient l'explication sur l'effet de la présure donnée dans ce champ, ce qui nous permet d'identifier d'autres concepts : *Caillage*, *Caillé*, et *Lactosérum*.

Le champ **Indicateurs de performance** contient l'information « pH et viscosité ». Nous avons déjà traité pH. En réalité, on parle plus de fermeté ou de consistance que de viscosité. Nous retiendrons le concept *Fermeté*.

Le champ **Équipements** renseigne les ressources matérielles utilisées lors de cette tâche. Nous pouvons retenir les concepts – *Cuve*, *Outils*, *Équipements*, *Balance*, *lecteur pH*, *Ordinateur*, *Pelle*, *Horloge*

Le champ **Matière première** contient « lait maturé et présure », nous les avons déjà traité.

Le champ **Données** contient non pas des concepts potentiels mais plus des propriétés de concepts (*Opération*, *Présure*, *Lait* notamment). Nous les consignons tout de même car il sera important qu'elles figurent dans l'ontologie que nous développerons.

Le champ **Problèmes actuels** fait des références au stockage et à la conservation des produits ainsi que le décaillage, ce qui nous donnent des pistes sur les concepts *Stock*, *Présure*, *Caillé*, *Décaillage*

Le champ **Notes et recommandations** propose une explication de la tâche. Nous obtenons des indices et des informations plus précises sur ce qui est effectué, sur les articles utilisés et les résultats attendus. Nous retiendrons les concepts : *Chauffage*, *Temperature* et *Brassage*.

Grâce à cette fiche activité, nous avons donc identifié les concepts potentiels suivants : *lait, Additifs, Ferments, Présure, pH, Temperature, Caillage, Décaillage, Caillé, Lactosérum, Fermeté, Cuve, Outils, Équipements, Balance, lecteur pH, Ordinateur, Pelle, Horloge, Opération, Stock, Chauffage et Brassage.*



PROJET FROMAGE 4.0
Description des activités

En-tête

Code:	Responsable: Lucas
Description: Emprésurer	Date de création: 06-06-2019
Processus: Processus 2.1 – Tâche 4	Dernière révision: 06-06-2019
Organisation:	Statut: Complété

Description

Intrant: Lait mûré
Extrant: Lait mûré, avec présure
Différences entre les produits : la présure ajoutée va initier la coagulation rapide du caillé, on verra donc apparaître deux phases (un liquide – le lactosérum, et une plus dense – le caillé)
Indicateurs de performance: pH, viscosité
Équipements : cuve de production (avec outils de décaillage/couteaux) et automate, horloge, outils de laboratoire, horloge, balance, lecteur pH, ordinateur, petite pelle
Matières premières: Lait mûré, présure (type, dose, quantité)
Données : Heure d'ajout de la présure, pH au moment de l'ajout, informations sur les ferments (quantité, dose, force, provenance)
Problèmes actuels: Stockage et conservation des sachets de présure ouverts, détermination du moment où le caillé est satisfaisant
Opportunités d'amélioration: RaS
Notes et recommandations: Ajout de la présure et caillage : on stoppe le chauffage et le brassage du lait pour démarrer la coagulation (ou caillage) rapide du lait avec la présure. On change également les outils de brassage pour les remplacer par des couteaux de décaillage pour préparer la prochaine étape. C'est le plus souvent l'expérience du fromager qui permet de savoir quand cette étape est terminée, en testant la consistance du caillé à la main. Il existe des outils pour évaluer la consistance du caillé mais ils sont onéreux et non nécessairement plus efficaces.

Historique des versions	
Versions	Modifications apportées
1.0	- Création du document et première version

Figure 4.2: Fiche-activité de la tâche "Emprésurer"

Ces fiches-activité ont été de véritables mines d'or d'informations et nous ont permis de recenser 99 concepts clés potentiels, présentés en annexe E.

Ce premier travail a été vital pour la première identification de concepts clés issus de l'existant. Nous nous sommes ensuite appuyés sur l'expertise du CEFQ qui représente une des meilleures sources de connaissances pour le domaine considéré.

4.2 Expertise du CEFQ

4.2.1 Documentation

Le partenariat entre Polytechnique Montréal et le CEFQ a permis l'utilisation de nombreuses ressources du CEFQ, en particulier leur documentation. Nous avons eu accès à de nombreux documents « types », comme des registres ou des procédures. Ces documents, proches des fiches-activité que nous avons présentées précédemment, possèdent un nombre important d'informations liées aux processus d'affaires des fromageries. De la même manière que nous avons analysé nos fiches-activité, nous avons également parcouru la documentation du CEFQ afin de recenser les données pouvant être des concepts-clés. La documentation fournie par le CEFQ comprend 37 registres, procédures et formations. Cette documentation nous a permis d'identifier 33 concepts clés potentiels, présentés en annexe E. Il est à noter que de nombreuses données coïncidaient avec celles déjà identifiées par la cartographie des processus et n'ont donc pas généré de nouveaux concepts clés. Les concepts identifiés à cette étape ne chevauchent donc pas ceux déjà identifiés à l'étape précédente.

4.2.2 Bonnes pratiques de fabrication

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons pu extraire des documents du CEFQ un grand nombre d'informations sur le pilotage de la transformation fromagère. Les documents « types » du CEFQ représentent les bonnes pratiques de fabrication ou de contrôle à mettre en place en fromagerie. Elles s'appuient sur l'expertise et l'expérience des conseillers du CEFQ. Nous avons également suivi une formation sur la transformation fromagère et avons eu accès à des documents de formation sur les Bonnes Pratiques de Fabrication. Tout cela nous a permis de confronter nos données collectées dans les fromageries, afin de confirmer leur pertinence ou non. Nous pourrions éventuellement suggérer de petites évolutions dans les processus d'exploitation des fromageries en partageant les bonnes pratiques observées dans les différentes fromageries, mais aussi en suggérant de nouvelles utilisations des équipements en places grâce à l'expertise du CEFQ.

4.3 Conclusion

La première grande étape de notre projet de recherche a été d'analyser l'existant afin de capturer une image la plus proche de la réalité du pilotage de la transformation fromagère au Québec. Cette analyse de l'existant nous a permis d'identifier une centaine de concepts clés potentiels pour l'ontologie que nous souhaitons développer. Pour identifier les concepts, nous nous sommes basés principalement sur la cartographie des processus d'affaires des fromageries québécoises, développée après une collecte de données en fromagerie, ainsi que sur la documentation et l'expertise fournie par le CEFQ. Ajoutés aux concepts clés identifiés dans la revue de littérature, issus des travaux existants (systèmes d'information, projets de valorisation des données, ontologies existantes, ...), nous avons créé une liste de plus de 200 concepts clés, issus de l'analyse empirique de l'existant ainsi que de la littérature. La liste des concepts potentiels est disponible en annexe.

CHAPITRE 5 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE ONTOLOGIQUE

Dans le chapitre précédent, nous avons effectué la première étape de notre méthodologie en identifiant les potentiels concepts clés qui composeront l'ontologie que l'on souhaite développer. Dans ce chapitre, nous allons mettre en œuvre la démarche proposée au chapitre 3 pour construire une ontologie.

5.1 Sélection des concepts clés

En premier lieu, nous avons sélectionné et validé les concepts clés pertinents parmi la liste que nous avons construite au chapitre précédent.

5.1.1 Méthodologie

Afin de procéder à cette sélection, nous avons établi une méthode, que nous avons présentée au chapitre 3. Cette méthode permet l'examen individuel de chaque terme afin de définir d'une part son applicabilité et sa pertinence dans ce projet, ainsi que son rôle et sa place dans l'ontologie que l'on souhaite développer. Un terme est un mot identifié lors de nos différentes recherches et qui semble avoir une importance dans domaine considéré. En effet, un terme est applicable et pertinent dans ce projet s'il est applicable au milieu de la transformation fromagère d'une part, et d'autre part s'il répond à des besoins de suivi de production, de gestion de la qualité, ou de logistique d'une fromagerie. Nous nous concentrons sur ces aspects car il s'agit des objectifs souhaités par le CEFQ. Si un terme est applicable et pertinent pour le projet, il faut ensuite élucider d'éventuels conflits avec d'autres termes puis décider de son rôle et de sa place.

Les différents rôles sont les suivants : *Concept*, *Instance de concept* ou *Propriété de concept*. Un concept est une notion clé d'une ontologie, il s'agit de représenter une idée. Une instance de concept est une version concrète d'un concept, à travers la mise en œuvre de l'ontologie sur un cas. Une propriété est une caractéristique d'un concept.

Afin d'illustrer les différences entre ces rôles, prenons l'exemple d'une vache que l'on nommera Marguerite et qui est une vache vosgienne. Dans cet exemple, *Vache* est un concept, dont *Marguerite* est une instance. On peut définir la race comme propriété du concept *Vache*. Pour l'instance *Marguerite*, la propriété *Race* aura la valeur « Vosgienne ». Si nous définissons le concept *Élevage*, nous pouvons également établir la relation *possède* entre *Élevage* et *Vache*, ainsi

que la relation *appartientA* entre *Vache* et *Élevage*. Afin d'aider à la représentation de ces objets et relations, nous avons illustré cet exemple, à la figure 5.1. Les cercles grisés sont les concepts, et celui en blanc avec un contour double représente l'instance *Marguerite*. Nous avons aussi pu spécifier graphiquement que la propriété *Race* (intitulé *Vache_race* dans l'exemple graphique) doit être de type *string*. Nous avons adopté cette représentation à partir de WebVOWL⁸. Enfin, il est à noter que cette représentation ne comporte pas toutes les caractéristiques et propriétés qu'une ontologie peut contenir (par exemple la cardinalité des relations), afin de simplifier la représentation. Cette dernière doit permettre la compréhension générale de l'ontologie, mais non son fonctionnement détaillé.

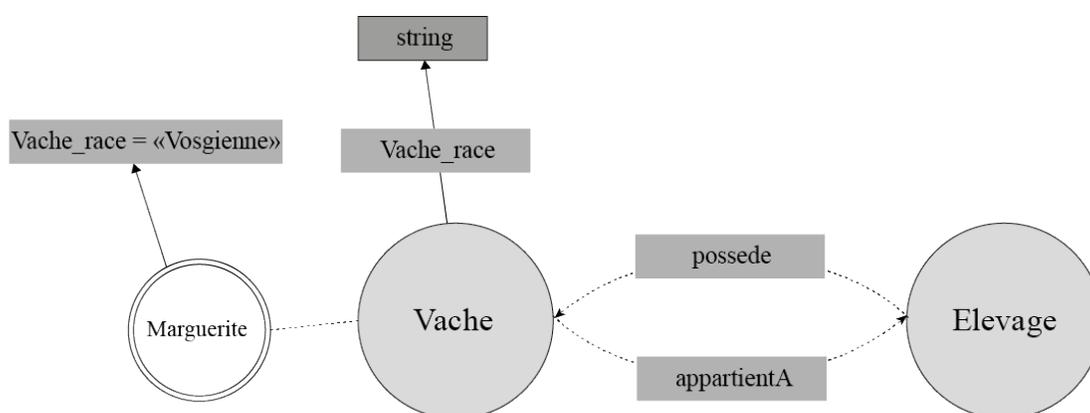


Figure 5.1 Représentation graphique d'une ontologie simple

Nous pouvons donc fixer des rôles similaires aux termes réunis dans la liste de concepts clés potentiels construite au chapitre précédent et disponible en annexe. Ces rôles permettront de faciliter la hiérarchie ontologique ainsi que l'identification des liens sémantiques. Nous entendons par hiérarchie ontologique les relations de concept parent à concept enfant, ce qu'il faut dissocier des liens sémantiques que nous détaillerons par la suite. En soi, la relation de concept et sous concept est une relation sémantique, car elle précise que le sous concept est une spécialisation du concept parent, et que ce dernier hérite des propriétés et liens sémantique du concept parent. Au fur et à mesure que l'on fixe un rôle à chaque terme, nous pouvons affiner par la suite la hiérarchie

⁸ <http://www.visualdataweb.de/webvowl/>

ontologique en plaçant le nouveau terme, en prenant compte de son rôle. La hiérarchie ontologique n'est fixée que lorsque tous les termes de la liste initiale ont été traités.

5.1.2 Résultats

Nous avons appliqué la méthode définie à l'ensemble des concepts clés potentiels identifiés. À titre d'exemple, nous détaillons ci-dessous le processus de sélections pour quelques termes afin de détailler notre démarche. Vous trouverez en annexe F le résultat complet de la sélection effectuée.

Les concepts que nous allons étudier sont les suivants : *Fromage*, *Article*, *Produit*, *Cuir*, *Profit*, *Test*, *Couleur* et *Brassage*. À titre d'exemple, nous représenterons de manière graphique uniquement le cheminement pour le concept *Article*, à la figure 5.2.

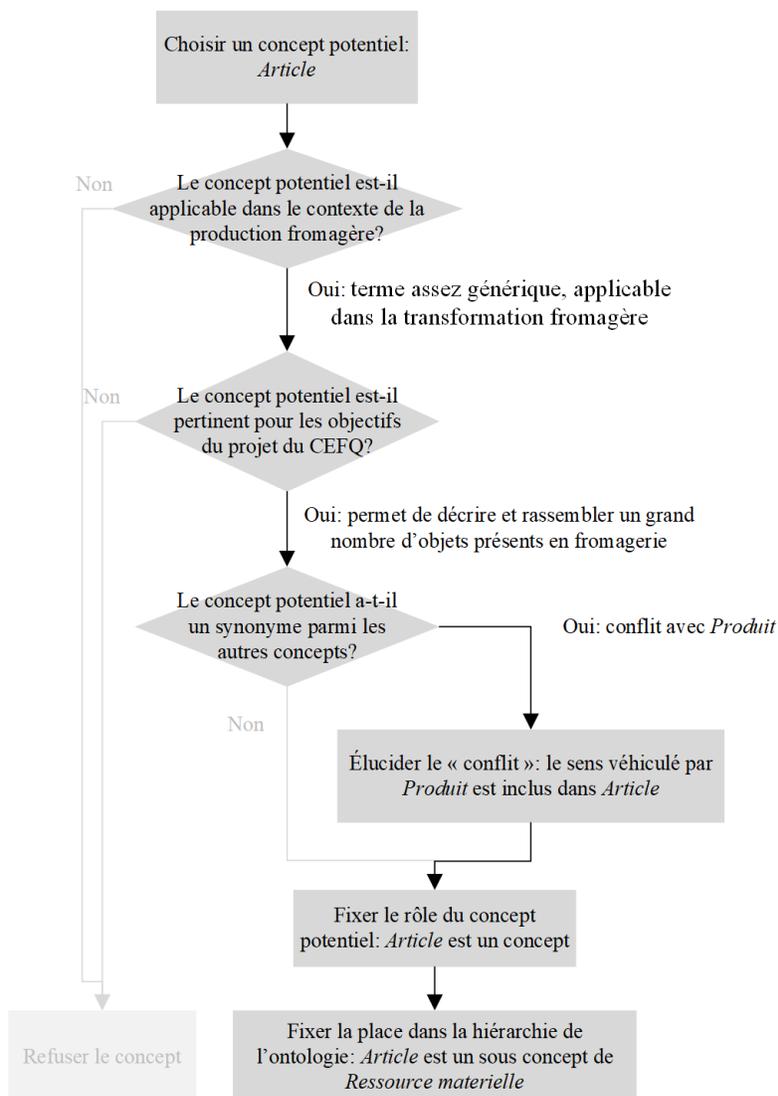


Figure 5.2 Exemple de la sélection des concepts potentiels appliqués au concept *Article*

Prenons en premier le terme *Fromage*. Il est bien applicable au contexte de la transformation fromagère, son lien est assez évident. Il est pertinent pour les objectifs du CEFQ, étant donné que c'est un concept central dans cette étude. Il n'y a pas de conflit sémantique avec d'autres termes dans la liste, et on peut assez aisément fixer son rôle comme concept dans l'ontologie. Nous exerçons le même raisonnement avec le terme *Article*, qui est un terme assez générique, applicable

dans la transformation fromagère donc, et pertinent pour les objectifs du CEFQ. En effet, il permettra de décrire et rassembler un grand nombre d'objets présents en fromagerie. Il existe un éventuel conflit avec le terme *Produit*. En réalité, l'idée véhiculée par *Produit* est incluse dans *Article*, et nous pourrions décider de fixer *Produit* comme un sous concept d'*Article*, car le terme d'*Article* comprend d'autres objets, comme les matières premières ou les auxiliaires de production par exemple. D'ailleurs, à l'étape de hiérarchisation, nous pouvons détailler l'ordre hiérarchique suivant : Fromage est un sous concept de *Produit*, lui-même sous concept d'*Article* (*Article* > *Produit* > Fromage). Les termes *Produit*, *Article* et *Fromage* sont validés et ordonnés.

Le terme de *Cuir* est moins applicable au contexte de la transformation fromagère : c'est un produit dérivé de l'élevage de bovins, d'où sa présence dans la liste initiale, cependant il n'est pas pertinent de le garder pour la suite du développement de l'ontologie. Le terme *Cuir* est donc rejeté.

Le terme de *Profit* est applicable au milieu de l'entreprise de manière générale, il s'applique donc aussi aux entreprises de transformation fromagère. Cependant, il n'est pas pertinent pour les objectifs du CEFQ dans ce projet. Évidemment, l'idée de *Profit* est toujours pertinente pour une entreprise, mais dans ce projet, nous nous intéressons au pilotage de la transformation fromagère, dans ses aspects de production, de qualité, de logistique, et non dans ses aspects financiers. Le terme *Profit* est donc rejeté.

Le terme de *Test* est applicable à notre contexte et est pertinent vis-à-vis de nos objectifs, notamment en suivi de la qualité. Il y a en revanche plusieurs conflits avec d'autres termes de la liste initiale : *Analyse*, *Inspection*, *Évaluation*. Nous choisissons de garder uniquement le terme *Inspection*, car c'est le terme qui est le plus souvent utilisé dans les solutions techniques existantes et dans les progiciels. Il fera plus facilement l'unanimité et ne posera pas d'ambiguïté. Le terme *Test* est donc rejeté. Nous nous sommes appuyés sur les tables de données utilisées par SAP afin de choisir certains termes. En effet, SAP est un des logiciels de type ERP les plus utilisés et reconnus au monde et sert souvent de référence dans le milieu.

Le terme *Couleur* est applicable au contexte de la transformation fromagère. Les fromagers ont l'habitude de décrire la couleur des fromages produits, c'est une caractéristique qui peut décrire la qualité du fromage. Il est pertinent pour les objectifs du CEFQ. Il n'y a pas de conflit avec d'autres termes de la liste initiale. Nous choisissons de lui donner le rôle de propriété du concept *Article*.

Le terme *Brassage* est applicable au contexte de la transformation fromagère. Il correspond à l'action de brasser le lait lors de la production fromagère. Il est pertinent pour les objectifs de description de la production et donc pertinent pour nos objectifs. Il n'y a pas de conflit avec d'autres termes de la liste initiale. Nous choisissons de lui donner le rôle de concept : c'est un sous concept du concept *Opération de fabrication* (non détaillé ici).

Nous ne détaillons pas les raisonnements pour chaque concept de la liste initiale, mais nous avons dressé en annexe un tableau pour résumer les résultats des différents tests appliqués à chaque terme.

5.2 Identification des liens sémantiques

Après avoir sélectionné et validé les concepts clés pertinents, nous avons identifié leurs liens sémantiques.

5.2.1 Méthodologie

Afin de définir les liens sémantiques, nous nous basons sur les mêmes sources de connaissances que pour les concepts : des articles et travaux scientifiques similaires, des solutions techniques existantes incluant des ontologies, l'expertise du CEFQ et la cartographie des processus réalisée à la suite de visites de fromageries.

La définition des liens s'est faite de manière itérative : dans un premier temps, nous avons identifié les relations déjà définies par d'autres travaux et applicables à notre ontologie et nos concepts. Il nous semblait pertinent de reprendre et adapter les progrès déjà atteints par des travaux antérieurs d'autres équipes de recherches. De la même manière que nous avons repris des concepts issus d'autres travaux, nous avons également réutilisé certaines relations.

Par la suite, nous avons identifié grâce à la cartographie des processus d'autres relations en utilisant les fiches-activités qui permettent d'associer des concepts. Nous commençons par les relations les plus évidentes et venons ensuite affiner au fur et à mesure grâce à l'expertise du CEFQ et leurs retours.

Il est possible de se rendre compte à cette étape de l'impertinence de certains concepts qui sont sous-utilisés, peu reliés à d'autres concepts, ou complètement inutilisés. Ils pourront tout de même avoir des instances lors du peuplement de l'ontologie, mais l'absence de relations avec d'autres concepts marque leur relative faible importance dans ce contexte. On parle alors de rupture

sémantique, car ils ne pourront être liés à d'autres concepts, ce qui empêchera leur valorisation ou leur utilisation.

Il est à noter que dans cet exercice de modélisation, une grande part de réflexion et de choix sont liés à l'interprétation du modélisateur, de ses expériences et de ses connaissances du domaine. Un travail collaboratif peut permettre d'ajouter de nouvelles visions et de nouveaux liens entre les concepts, mais il peut aussi freiner l'expression et l'efficacité de la modélisation.

5.3 Construction de l'ontologie

Afin de construire à proprement parler l'ontologie, nous utilisons le logiciel *Protégé* (Musen et Protege, 2015). Selon le site web de Stanford, dont l'équipe de développement fait partie, *Protégé* « est un environnement d'édition d'ontologie riche en fonctionnalités, avec une prise en charge complète du langage d'ontologie Web OWL 2 et des connexions directes en mémoire aux raisonneurs logiques de description comme Hermit et Pellet. ». Ce logiciel permet, grâce à une interface graphique intuitive, de créer et implémenter une ontologie via ses constituants : concepts (appelés *Classes*), liens (appelés *Object properties*), propriétés (appelés *Data properties*), instances (appelés *Individuals*). Parmi les fonctionnalités les plus importantes, on retrouve :

- Interface d'édition graphique intuitive ;
- Modularisation permettant l'utilisation de plusieurs ontologies simultanément ;
- Outils de refonte (renommage, traitement des disjonctions et des différences, création rapide d'une classe définie, diverses transformations sur les restrictions, conversion des identifiants en étiquettes, déplacement des axiomes entre les ontologies) ;
- Supporte les outils logiques et raisonneurs (FaCT, Pellet, Hermit, ...) ;
- Rédaction OWL (fragments URI, analyse des descriptions OWL, édition des règles SWRL,...) ; et
- Architecture hautement extensible avec prise en charge de nombreux types de plug-ins différents, notamment des vues, des menus, des raisonneurs, des préférences, plusieurs gestionnaires...

Nous avons dans un premier temps implémenté tous les concepts, appelés Classes dans *Protégé*, retenus lors de la sélection décrite plus haut, en prenant bien soin de documenter et annoter chacun afin de permettre la bonne compréhension de l'ontologie par tous les utilisateurs. *Protégé* permet l'ajout d'annotations pour chaque objet de l'ontologie. Ces annotations peuvent être de plusieurs types : définition, exemples, source, etc. Il est également possible à cette étape de préciser si des concepts sont équivalents ou disjoints à d'autres, ce qui permettra aux raisonneurs logiques de déceler d'éventuelles erreurs de conception de l'ontologie.

Après avoir implémenté les concepts, nous pouvons définir puis assigner les liens, appelés Object property dans *Protégé*. L'éditeur de liens permet, à l'image des concepts, de spécifier l'équivalence ou le caractère inverse entre des liens. Il est aussi possible de fixer certaines spécifications à des liens : fonctionnalité, transitivité, symétrie ou asymétrie, réflexivité. Enfin, *Protégé* permet de préciser le domaine et la portée d'une relation, qui correspondent respectivement au domaine de définition d'une fonction (en anglais « domain »), et à son ensemble d'arrivée (en anglais, « range »). Imaginons la relation « fabrique » qui relie les concepts Fromagerie et Fromage : « Fromagerie fabrique Fromage ». Dans ce cas, on peut signifier que le domaine de la relation « fabrique » concerne le concept « Fromagerie », et la portée concerne le concept « Fromage ». Cela ne signifie pas que la relation limite en entrée seulement les instances de la classe Fromagerie et en sortie les instances de la classe Fromage, mais plutôt que si une instance est associée en entrée à la relation « fabrique », elle est nécessairement interprétée comme une instance de la classe Fromagerie. Cette nuance est importante à comprendre pour interpréter les résultats des raisonneurs logiques qui vont analyser ces hypothèses. C'est pour cette raison qu'il n'est pas toujours recommandé de spécifier les champs Domaine et Portée, afin de ne pas complexifier l'ontologie outre mesure. Si les liens ont été bien définis, nous pouvons ensuite les affecter à des concepts. En réalité, pour affecter un lien à un concept, il faut le définir comme étant une sous-classe d'une relation. Reprenons la relation « fabrique ». Nous souhaitons spécifier que le concept Fromagerie fabrique des Fromages. Dans ce cas, nous devons spécifier que le concept Fromagerie est un sous concept de la relation « fabrique some Fromage », ce qui signifie que le concept de Fromagerie est inclus dans le groupe des concepts qui respecte la relation « fabrique some Fromage ». Cette nuance est également importante à prendre en considération pour les calculs effectués par les raisonneurs logiques.

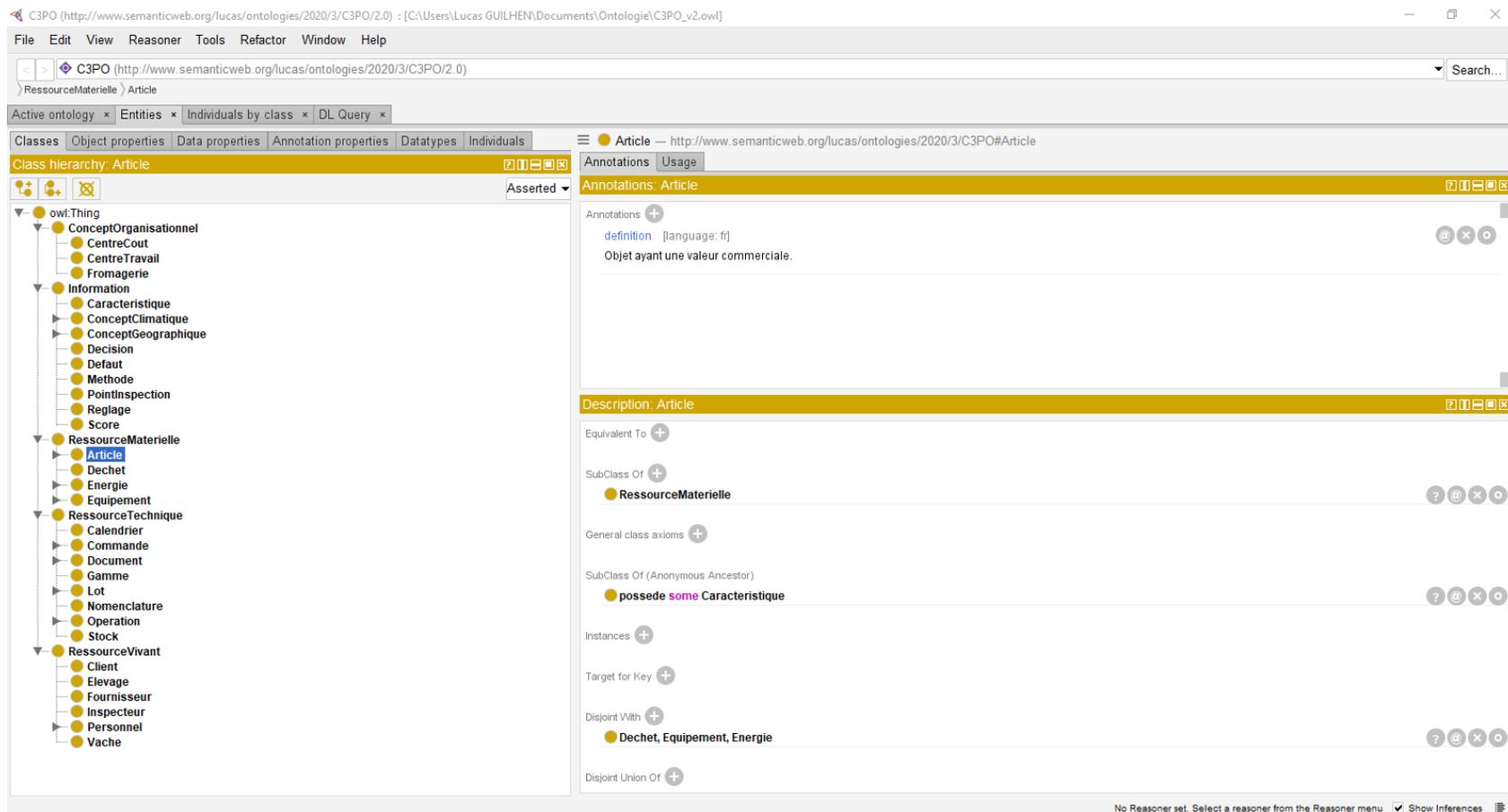


Figure 5.3 Interface du logiciel *Protégé*, sur la vue des *Classes* (concepts)

La fenêtre de gauche présente la liste des concepts implémentés hiérarchisés. Les fenêtres de droite présentent les annotations ainsi que les propriétés et liens associés au concept sélectionné. Nous avons implémenté 136 concepts dans *Protégé*.

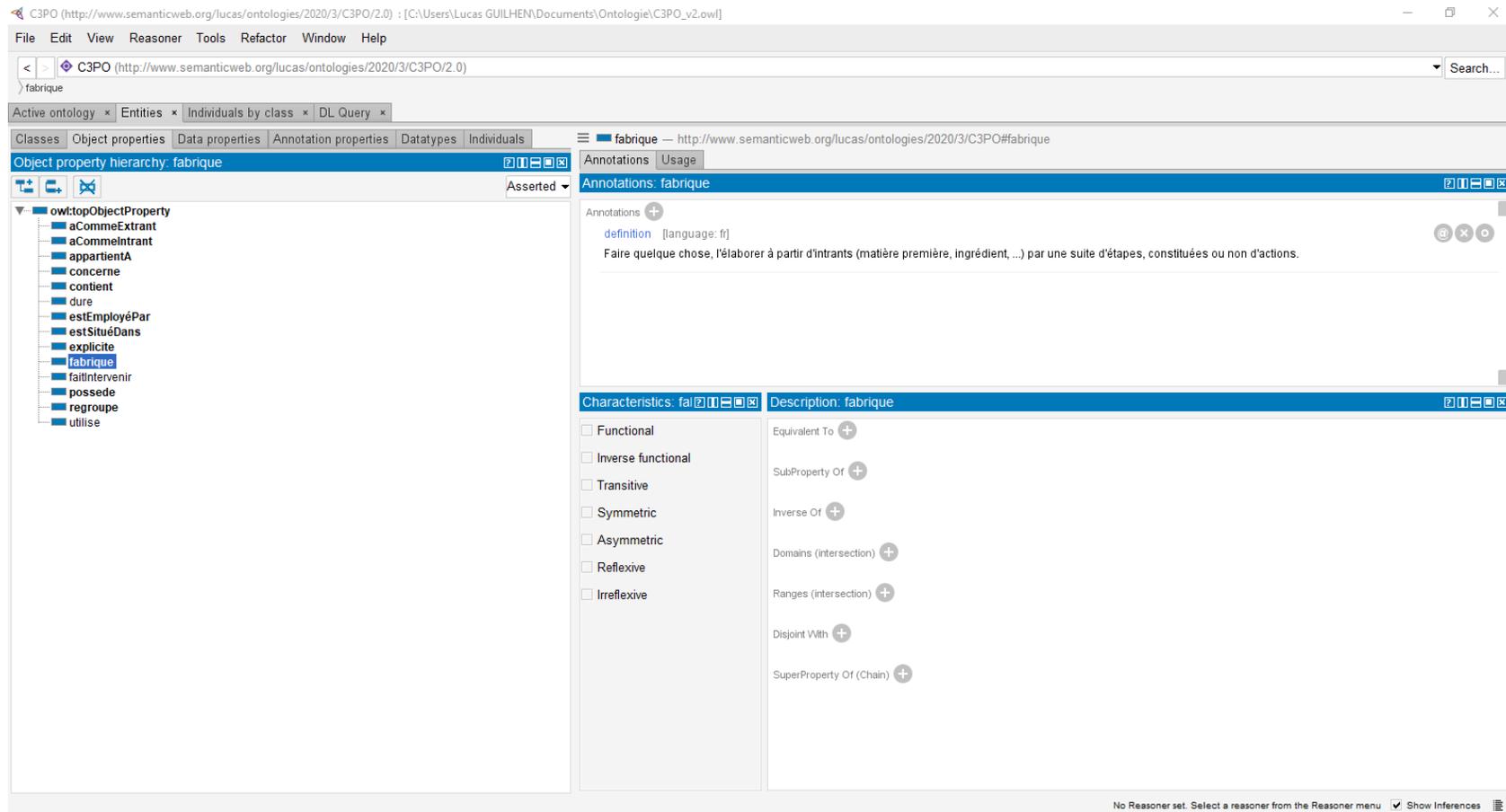


Figure 5.4 Interface du logiciel *Protégé*, vue sur les *Object properties* (Liens sémantiques)

La fenêtre de gauche présente la liste des liens sémantiques implémentés. Les fenêtres de droite présentent les annotations ainsi que les propriétés du lien sémantique sélectionné. Nous avons implémenté 14 liens sémantiques différents, réutilisés de nombreuses fois.

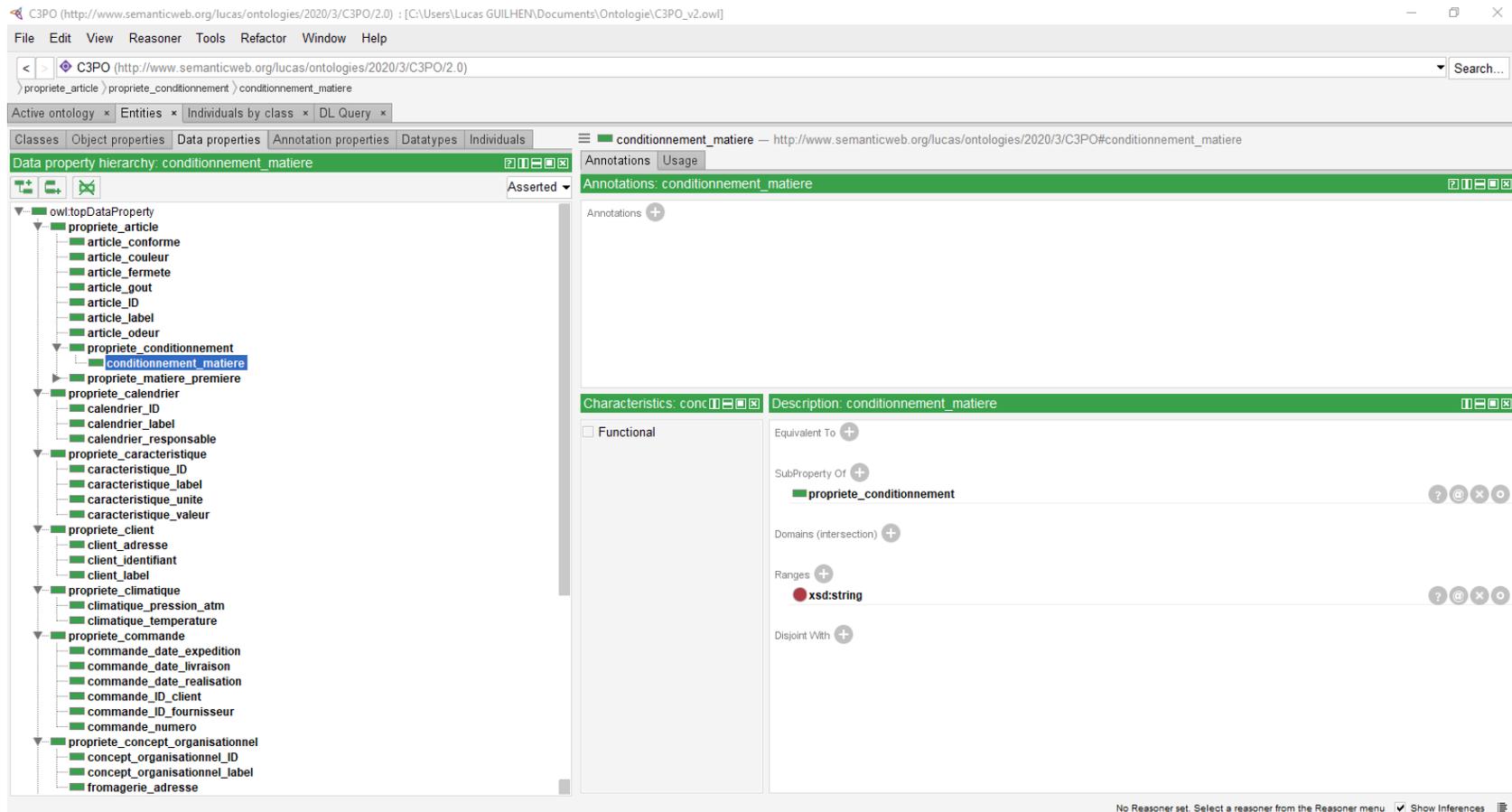


Figure 5.5 Interface du logiciel *Protégé*, vue sur les *Data properties* (Propriétés de concept)

La fenêtre de gauche présente la liste des propriétés implémentées hiérarchisées. Les fenêtres de droite présentent les annotations ainsi que la description de la propriété sélectionnée. Nous avons implémenté 147 propriétés différentes permettant de caractériser les différents concepts.

À noter que nous avons spécifié la relation avec le quantificateur « some » qui permet de préciser qu'il y a au moins un Fromage qui est fabriqué. *Protégé* permet d'indiquer les quantificateurs suivants : some, exactly, minimum, maximum, only.

Nous avons ensuite créé toutes les propriétés liées à chaque concept. Dans *Protégé*, les propriétés sont appelées *Data property*. Elles sont construites de manière similaire aux relations : il est également possible de spécifier le domaine et la portée, avec dans ce cas le domaine qui est le concept auquel la propriété appartient, et la portée qui est le type de donnée. *Protégé* possède un grand nombre de types de donnée, qui correspondent aux types définis par le consortium W3C.

Il est possible de se rendre compte à cette étape de l'impertinence de certains concepts qui sont sous-utilisés, peu reliés à d'autres concepts, ou complètement inutilisés. Ils pourront tout de même avoir des instances lors du peuplement de l'ontologie, mais l'absence de relations avec d'autres concepts marque leur relative faible importance dans ce contexte.

Il est à noter que dans cet exercice de modélisation, une grande part de réflexion et de choix sont liés à l'interprétation du modélisateur, de ses expériences et de ses connaissances du domaine. Un travail collaboratif peut permettre d'ajouter de nouvelles visions et de nouveaux liens entre les concepts, mais il peut aussi freiner l'expression et l'efficacité de la modélisation. Nous avons à ce stade implémenté les concepts, les liens et les propriétés et la prochaine étape consistera à valider la pertinence de l'ontologie.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'élaboration du modèle ontologique et son implémentation. Une représentation globale de l'ontologie est présente à la figure 5.6. La première étape de cette élaboration consistait à sélectionner et valider les concepts pertinents pour notre modèle à partir de la liste de concepts potentiels réalisée au chapitre précédent. Nous avons pu ensuite identifier et définir les liens entre ces concepts pour enfin développer une ontologie, nommée C3PO, grâce au logiciel *Protégé*. Dans le chapitre suivant, nous définirons la méthode de validation que nous avons adoptée et détaillerons sa mise en œuvre, avant de discuter de la pertinence de l'ontologie produite.

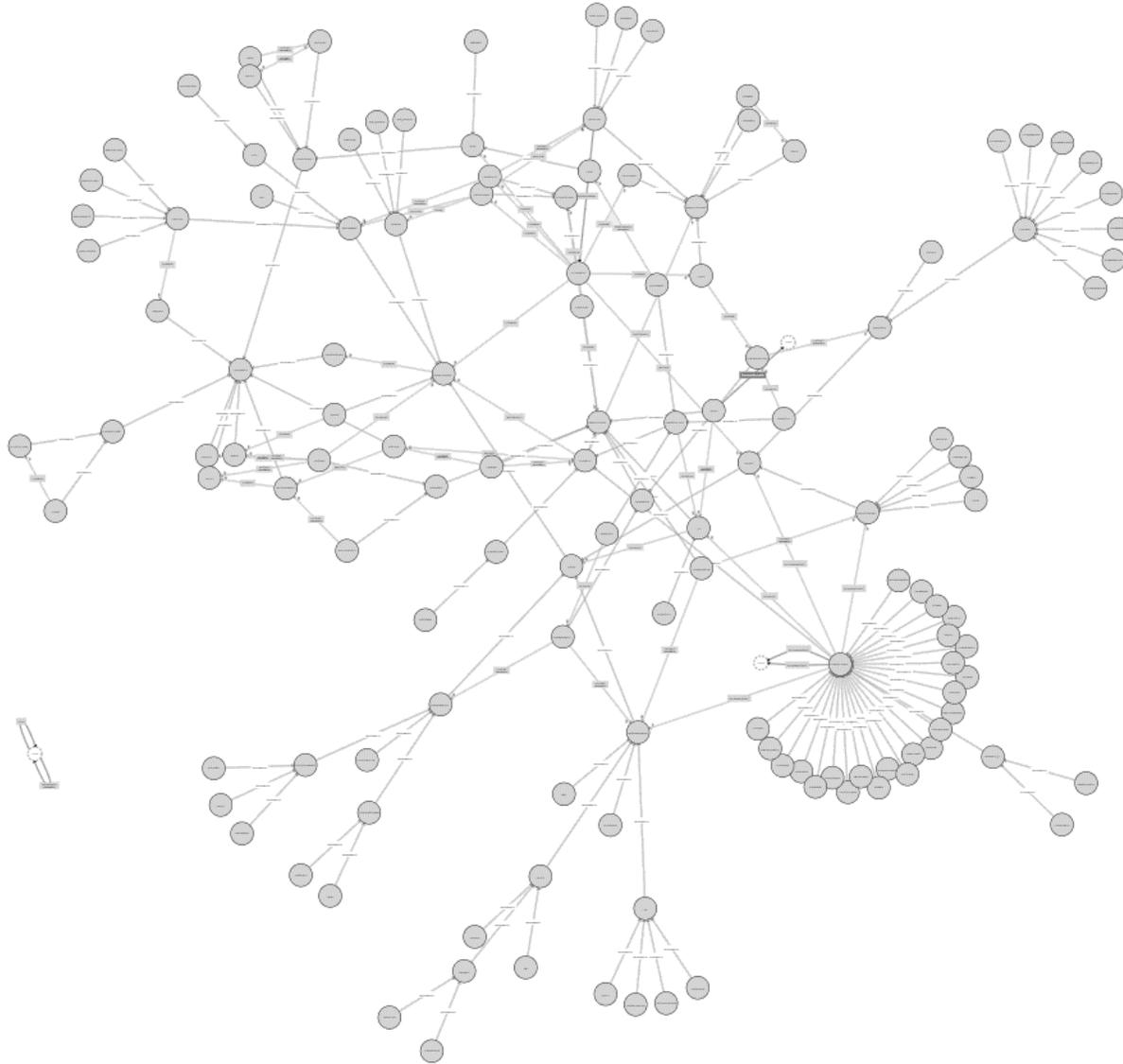


Figure 5.6 Vue globale de l'ontologie, représentation simplifiée avec concepts et liens uniquement

° L'ontologie est explorable à l'adresse suivante : <https://bit.ly/2ZABqL2>

CHAPITRE 6 VALIDATION

Dans les chapitres précédents, nous avons détaillé la méthodologie et le développement d'une ontologie. Cette dernière a été créée pour permettre la représentation du pilotage de la transformation fromagère au Québec. Afin d'évaluer la pertinence de cet outil, il a été nécessaire d'effectuer une étape de validation. Plus précisément, ce chapitre vise à vérifier la cohérence structurelle et sémantique de l'ontologie proposée.

6.1 Méthodologie

La méthodologie générale de validation sera présentée à la figure 6.1. Les deux prochaines sections décrivent en détail l'évaluation de la logique structurelle puis de la cohérence sémantique.

6.1.1 Validation structurelle

Le premier aspect correspond aux choix de structures et de règles définis lors de la construction de l'ontologie, nous cherchons ici à nous assurer qu'il n'y a pas d'incohérence logique au sein des axiomes de l'ontologie. Par exemple, nous pourrions nous rendre compte à l'usage que la définition des propriétés de certains liens vient s'opposer à la définition de certaines propriétés de concepts. Ce type d'incohérence peut par exemple intervenir par l'intermédiaire des relations d'héritage qui transmettent liens et propriétés de concept parent à sous-concept.

Pour parvenir à la validation structurelle de l'ontologie, nous avons fait appel à des outils et descripteurs logiques qui utilisent les règles implantées et définies dans *Protégé* pour déceler les incohérences logiques. Il existe un nombre important de raisonneurs logiques qui ont été développés dans ce but. Les plus connus sont :

- **Hermit**¹⁰ : à partir d'un fichier OWL, Hermit peut déterminer si l'ontologie est cohérente ou non, identifier les relations de subsomption entre les classes, et bien plus encore ;

¹⁰ <http://www.hermit-reasoner.com>

- Pellet¹¹ : Pellet est un raisonneur OWL 2, il intègre des optimisations pour les noms, la réponse à des requêtes contextuelles et le raisonnement incrémental ;
- FaCT++¹² : la nouvelle génération du célèbre raisonneur FaCT OWL-DL. FaCT++ utilise les algorithmes FaCT établis, mais avec une architecture interne différente. De plus, FaCT++ est implémenté en C++ afin de créer un outil logiciel plus efficace et de maximiser la portabilité; et
- OOPS!¹³ : (OntOlogy Pitfall Scanner!) aide à détecter certains des pièges les plus courants qui apparaissent lors du développement d'ontologies.

HermiT et Pellet étant les raisonneurs les plus reconnus dans le domaine, nous avons choisi de les utiliser tout au long du développement de l'ontologie. Des plug-ins permettant leur utilisation dans *Protégé* nous ont permis de vérifier au fur et à mesure de la construction de l'ontologie la cohérence structurelle de celle-ci.

Nous avons aussi utilisé OOPS ! à la fin du développement de l'ontologie afin de vérifier si nous avons commis des erreurs. Le résultat de ces vérifications est donné à la section 6.2.

6.1.2 Validation sémantique

Le second aspect de la validation concerne la sémantique choisie. Le but de cette validation est de vérifier si l'ontologie développée permet la bonne représentation du domaine choisi et que les concepts et la terminologie qui a été adoptée sont pertinents. Nous pourrions nous rendre compte à cette étape que nous avons une ontologie très complète sur certains points, mais peu détaillée sur d'autres, ou que nous avons un décalage par rapport au domaine visé.

La validation sémantique d'une ontologie est la plus compliquée à effectuer, car elle nécessite une vision et une compréhension experte du domaine considéré. Tout comme la modélisation comporte

¹¹ <https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Pellet>

¹² <http://owl.man.ac.uk/factplusplus/>

¹³ <http://oops.linkeddata.es>

une part de subjectivité et d'interprétation, il est fort possible que la validation sémantique en comporte également.

Afin de procéder à cette vérification, nous avons décidé de nous baser sur une étude de cas d'analyse de cycle de vie (ACV) de la production d'un fromage Cheddar au Québec. Les hypothèses de travail et le cadre d'étude du travail effectué par une équipe de recherche indépendante sont similaires, ce qui nous conforte dans la pertinence de l'utilisation de ces données. Cette étude ACV a été réalisée dans le cadre d'un projet de doctorat à l'Université Laval à Québec afin de valider la pertinence d'un logiciel de simulation de procédé de transformation laitière (Benoit, 2018). Nous avons de plus contacté le doctorant responsable de l'étude en question afin qu'il puisse effectuer une vérification de la terminologie utilisée avec son regard d'expert indépendant.

Nous avons choisi d'utiliser des données issues d'une ACV suivant l'assertion suivante : si l'ontologie que nous avons développée permet la représentation des données d'une ACV (dans un cadre de travail similaire et avec les mêmes hypothèses), alors nous pouvons considérer que notre ontologie est suffisamment fine et adaptée à la représentation du domaine considéré.

Nous détaillons plus loin dans ce chapitre la validation sémantique qui a été effectuée.

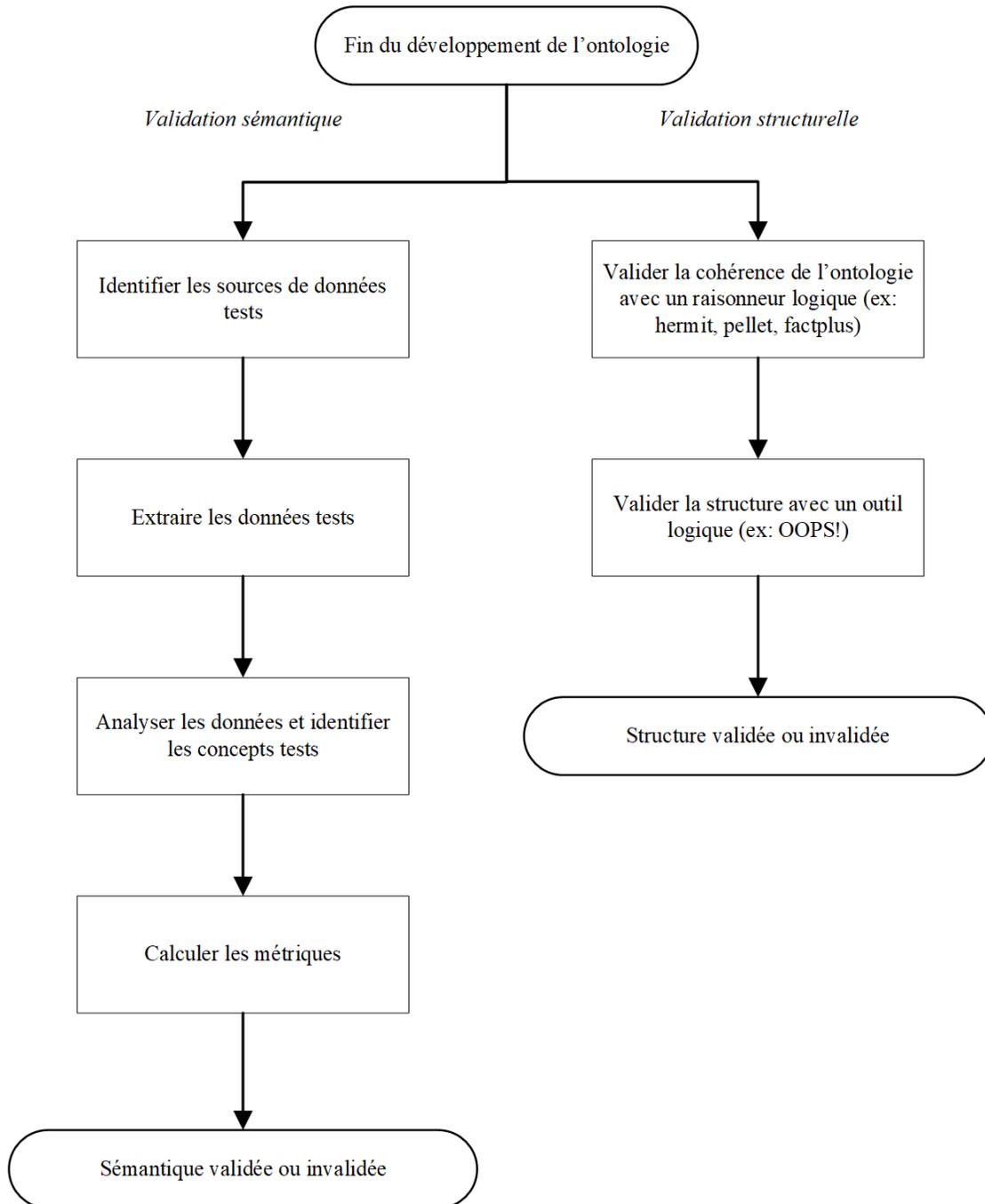


Figure 6.1 Méthodologie de validation de l'ontologie

6.2 Validation structurelle

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les raisonneurs logiques Hermit et Pellet ont été utilisés tout au long de la construction et de l'implémentation de l'ontologie dans *Protégé*. Cela nous a permis de vérifier « en temps réel » si des erreurs de cohérence logique étaient présentes, et de les rectifier immédiatement. Nous avons également utilisé l'outil OOPS ! (Poveda-Villalón, 2014) à la fin du développement de l'ontologie afin de vérifier les erreurs commises. Les résultats de cette vérification sont résumés dans le tableau 6.1 et nous discutons de ces résultats dans la suite.

Tableau 6.1 : Résultat du scanner OOPS !

Type de piège	Occurrence	Importance
Création d'éléments d'ontologie non connectés	1	Mineur
Annotations manquantes	297	Mineur
Domaine ou portée manquante dans les propriétés.	157	Important
Relations inverses non explicitement déclarées.	12	Mineur
Utilisation de différentes conventions de dénomination dans l'ontologie.	Toute l'ontologie	Mineur

- **Création d'éléments d'ontologie non connectés**

Les éléments de l'ontologie (classes, propriétés des objets et propriétés des types de données) sont créés isolément, sans relation avec le reste de l'ontologie. Le concept concerné par ce message d'erreur est le concept *Information*. Ce concept a été spécialement implémenté pour regrouper certains concepts « orphelins » afin de simplifier la hiérarchie ontologique. Il regroupe de nombreux sous-concepts très distincts les uns des autres et qui partagent peu ou aucun lien. Le concept *Information* n'est donc relié à aucun autre concept, si ce n'est à ses sous-concepts par les relations d'héritage. Nous pouvons donc considérer ce message d'erreur avec une faible importance.

- **Annotations manquantes**

Ce piège consiste à créer un élément d'ontologie et à ne pas fournir les annotations lisibles par l'homme qui y sont attachées. En conséquence, les éléments de l'ontologie manquent de propriétés d'annotation qui les étiquettent (par exemple `rdfs:label`) ou qui les définissent (par exemple `rdfs:comment` ou `dc:description`). Ce manque d'annotations peut être un inconvénient si l'ontologie est réutilisée par d'autres équipes qui doivent s'approprier le travail réalisé et comprendre l'ontologie et la terminologie employée. Il s'agit plus d'un avertissement que d'une erreur de logique. Il serait pertinent de parfaire la description des éléments de l'ontologie à l'aide d'étiquettes ou de descriptions afin de garantir une compréhension maximale.

- **Domaine ou portée manquante dans les propriétés.**

Les propriétés des objets et/ou des types de données sans domaine ni portée (ou aucune d'entre elles) sont incluses dans l'ontologie. Nous avons expliqué dans le chapitre précédent la nuance à comprendre lors de la définition des Domaines et Portées, qui peut fortement complexifier une ontologie et induire des erreurs logiques. Dans le développement de notre ontologie, nous avons choisi de peu spécifier les Domaine et Portée des propriétés afin d'éviter les erreurs de logiques. Il faudra toutefois prêter une forte attention lors du développement d'outils ou de solutions techniques utilisant notre ontologie à la bonne définition des Domaine et Portée.

- **Relations inverses non explicitement déclarées.**

Ce piège apparaît lorsque toute relation (sauf celles qui sont définies comme des propriétés symétriques à l'aide de `owl:SymmetricProperty`) n'a pas de relation inverse (`owl:inverseOf`) définie dans l'ontologie. Il serait pertinent d'ajouter les relations inverses afin de maximiser la couverture à la fois logique et sémantique de l'ontologie.

- **Utilisation de différentes conventions de dénomination dans l'ontologie.**

Les éléments de l'ontologie ne sont pas nommés selon la même convention (par exemple CamelCase ou utilisation de délimiteurs comme « — » ou « _ »). Ce piège a été décelé du fait de la présence dans certains mots de caractères ponctués ou avec accents, et qui ne sont pas pris en compte par OOPS!. Ces mots relèvent de la langue française utilisée au Québec et choisie pour le

développement de cette ontologie. Les termes en question ont été corrigés pour remplacer les caractères accentués par des caractères non accentués.

Il est également possible de calculer différentes métriques propres à l'ontologie qui pourront témoigner de la bonne structuration de cette dernière. Ces indicateurs ont été proposés par Tartir et al. (2010).

- **Richesse des héritages**

Cet indicateur mesure la qualité de la distribution de l'information à travers la hiérarchie ontologique. Il correspond à la moyenne de sous concepts par concept. Nous obtenons un score de 4 sous concepts en moyenne par concept. Nous pouvons en déduire que l'ontologie couvre un champ d'application relativement précis et de manière détaillée. On peut qualifier l'ontologie comme verticale.

- **Richesse des propriétés**

Cet indicateur mesure la qualité et la quantité des informations attribuées à chaque concept. Il s'agit du nombre moyen de propriétés par concept. Nous obtenons un score de 4,25 propriétés en moyenne par concept.

6.2.1 Conclusion

La validation structurelle a été réalisée tout au long du développement de l'ontologie grâce à l'utilisation de raisonneur logique. Un outil de détection d'erreurs systématiques fréquentes a également été employé afin de vérifier la bonne construction de l'ontologie. Ces différents outils n'ont pas révélé d'erreurs majeures et nous a permis d'identifier des éventuelles corrections mineures à apporter à l'ontologie.

6.3 Validation sémantique

Comme mentionné précédemment, nous nous sommes appuyés sur une étude de cas pour réaliser la validation sémantique de notre ontologie. Celle-ci a pris la forme d'une analyse de cycle de vie, réalisée dans le cadre d'un projet de doctorat, antérieurement au projet dont le présent mémoire fait état.

6.3.1 Présentation de l'étude de cas

L'analyse de cycle de vie a été réalisée afin de vérifier la pertinence d'un outil de simulation (Benoit et al., 2019). Cet outil de simulation doit permettre la modélisation de procédés de transformation laitière, ainsi que le calcul d'impact environnement et économique du procédé en question.

L'auteur du document a choisi de modéliser la production d'un fromage Cheddar selon plusieurs scénarios. En effet, selon Benoit (2018), ce type de fromage est le plus produit au Canada, en particulier au Québec. Le choix de cette modélisation est donc particulièrement adapté au contexte de notre étude. La comparaison de plusieurs scénarios de transformation laitière et de production de fromage Cheddar a permis de montrer l'impact sur le rendement fromager et économique d'une étape de filtration par membrane du lait de fromagerie.

L'étude d'ACV réalisée comprend les étapes allant de la production du lait cru jusqu'au conditionnement du fromage produit et son départ du transformateur fromager. Elle exclut donc les étapes de distribution et de consommation du fromage sont exclues. Ce n'est pas dérangent pour notre validation puisque ce sont des étapes du cycle de vie du produit que ne sont pas ou que légèrement représentées dans notre ontologie. Toutes les étapes du cycle de vie modélisées dans l'étude ACV sont considérées comme ayant lieu dans la province du Québec (Canada), avec les hypothèses financières, sociales et environnementales qui en découlent. Cette étude de cas, réalisée indépendamment de notre projet, correspond donc parfaitement à nos hypothèses de travail et au contexte de notre projet.

Nous avons utilisé la thèse écrite par Benoit (2018) et qui comprend une description détaillée de l'étude ACV ainsi que des diagrammes de procédés des différents scénarios étudiés.

6.3.2 Résultats

D'après la méthodologie présentée à la figure 6.1, nous avons commencé par l'identification et l'extraction des données tests (concepts tests et liens tests). Une fois les données tests identifiées, il nous est possible de formuler quelques indicateurs et de les comparer aux données présentées de notre ontologie. Notre objectif est de vérifier si l'ontologie développée pour notre projet est capable de représenter les données nécessaires à la réalisation d'une étude ACV.

D'une manière similaire à l'identification et à la sélection des concepts de notre ontologie, nous avons parcouru la description et les diagrammes présents dans la thèse de Benoit (2018) pour

extraire les concepts tests. Ainsi, les mots essentiels utilisés pour décrire l'étude de cas ont été recensés et consignés pour obtenir une liste détaillée de concepts tests. Cette liste comprend 94 concepts tests, et est présente en annexe F. Un travail similaire a été réalisé pour l'identification des liens tests, dont la liste est disponible également en annexe G.

Nous avons pu ensuite comparer et associer les différents concepts et liens avec ceux de notre ontologie, et obtenir des scores de représentation. Nous considérons qu'un concept de notre ontologie est capable de représenter avec adéquation une conception test s'il n'y a pas d'ambiguïté entre les deux termes et que leurs propriétés sont équivalentes. Le même raisonnement est applicable à la comparaison des liens. Les scores de représentation sont résumés au tableau 6.2. Un score de représentation de 100 % indique que la totalité des données tests est représentable par des données de notre ontologie.

Tableau 6.2 Score de représentation des données tests

Représentation des concepts	Représentation des liens
<i>Nombre de concepts tests : 94</i>	<i>Nombre de liens tests : 16</i>
95 %	67 %

6.3.2.1 Représentation des concepts

Nous pouvons remarquer plusieurs cas d'adéquation lorsque l'on compare les données tests à l'ontologie développée :

- Adéquation parfaite : le terme employé dans les deux cas est le même et il ne peut y avoir aucune ambiguïté ;
- Adéquation sémantique : les termes employés diffèrent légèrement ou sont synonymes. Dans ce cas, nous avons considéré qu'il n'y avait pas d'ambiguïté sémantique si le sens véhiculé par les deux termes était le même. Cette décision relève en grande partie d'une bonne connaissance du domaine et d'un choix subjectif de modélisation et représentation.

Ces cas représentent la grande majorité des comparaisons. Cependant, il existe aussi des cas où les données tests ne correspondent pas directement à des éléments de notre ontologie :

- Le concept test correspond à une propriété d'un concept de l'ontologie. Prenons par exemple le concept test *Dimension*. Il n'y a pas de concept équivalent dans l'ontologie développée, cependant il s'agit d'une propriété du concept *Équipement*. Dans ce cas, nous pouvons donc considérer que cette donnée est représentée dans l'ontologie ;
- Le concept test correspond en réalité à un résultat de calcul ou à un indicateur lié à un calcul issu de plusieurs propriétés de concepts. Prenons par exemple le concept test *Dépense énergétique*. Il n'y a pas de concept équivalent, cependant il pourrait être calculé grâce aux propriétés de consommation des *Équipements* par exemple. Dans ce cas, nous pouvons donc considérer que cette donnée est représentée dans l'ontologie.

Ces cas sont compris dans le score de représentation. Enfin, il subsiste encore les cas où les concepts tests ne correspondent à aucun élément de l'ontologie et ne sont pas représentés. Nous pouvons considérer qu'ils couvrent un champ d'application manquant qu'il serait pertinent d'ajouter à l'ontologie. C'est le cas des concepts tests : *Fluide, Vapeur, Traitement des eaux usées, Lactose, Environnement*. Ainsi, la validation vient apporter une valeur ajoutée au développement de l'ontologie en permettant d'augmenter le nombre de concepts représentés.

6.3.2.2 Représentation des liens

De la même manière que pour les concepts, il peut y avoir plusieurs cas possibles :

- Adéquation parfaite : le terme employé dans les deux cas est le même et il ne peut y avoir aucune ambiguïté ;
- Adéquation sémantique : les termes employés diffèrent légèrement ou sont synonymes. Dans ce cas, nous avons considéré qu'il n'y avait pas d'ambiguïté sémantique si le sens véhiculé par les deux termes était le même. Cette décision relève en grande partie d'une bonne connaissance du domaine et d'un choix subjectif de modélisation et représentation ;
- Lien inverse manquant : le lien test correspond à une relation inverse d'un lien présent dans l'ontologie, mais qui n'a pas été implémenté. C'est le cas des liens suivants : *estFabriquéPar, estConditionné* ;
- Lien manquant : le lien test ne correspond à aucun lien de l'ontologie. C'est le cas des liens suivants : *commande, facture, estConfiguréSuivant, opèreSuivant*.

Dans les deux derniers cas, il est pertinent de compléter l'ontologie avec ces informations afin de couvrir les données manquantes. Là aussi, nous pouvons remarquer que la validation vient apporter une valeur ajoutée au développement de l'ontologie en permettant d'augmenter le nombre de concepts représentés.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une évaluation de l'ontologie développée dans les chapitres précédents, afin d'en valider sa pertinence. Nous avons testé à la fois la cohérence structurelle et la cohérence sémantique, qui sont les deux pans fondamentaux d'une ontologie. En effet, l'objectif d'une ontologie, en particulier une ontologie d'application, est de permettre la représentation fonctionnelle d'un domaine, grâce à la définition détaillée des concepts clés de ce domaine et leurs liens. Elle doit donc présenter un choix justifié et adapté de terminologie, mais aussi une structuration permettant de lier habilement les données du domaine considéré. Afin de réaliser ces évaluations, nous nous sommes basés sur plusieurs outils et sources d'expertise. Des raisonneurs logiques, reconnus dans le milieu du développement d'ontologie, ont permis de valider la structure de l'ontologie. L'utilisation d'une étude de cas indépendante à notre projet a permis d'obtenir une expertise extérieure afin de valider la cohérence sémantique. Cette évaluation a permis de confirmer l'applicabilité fonctionnelle de l'ontologie, ainsi que l'identification de quelques améliorations mineures à apporter.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Face au constat des atouts représentés par l'industrie 4.0, le CEFQ a lancé un projet d'envergure afin de doter les fromageries québécoises d'outils numériques de pilotage de la transformation fromagère. De nombreux travaux ont été menés afin de développer divers systèmes et outils, spécialisés dans certains aspects de la production ou de la transformation laitière. Cependant, aucun outil ne permet l'identification des données et liens liés au pilotage de la transformation fromagère québécoise. Afin de répondre aux objectifs de recherche basés sur les manques de la littérature scientifique, ce mémoire présente un modèle permettant de répondre au besoin d'identification des données existantes dans l'industrie fromagère québécoise ainsi que leurs liens, remplissant ainsi nos 2 premiers objectifs de recherches.

Après un travail d'identification des données, grâce à une cartographie détaillée des procédés en place dans les fromageries, nous avons développé un modèle de données standard, sous la forme d'une ontologie. Cet outil permet la représentation et la compréhension du pilotage d'une fromagerie, en mettant à disposition tous les concepts clés pertinents, ainsi que leurs relations. Ce premier travail est la base solide qui permettra le développement d'un outil applicatif destiné au CEFQ et à ses membres, et qui servira à la fois à stocker les données issues des fromageries, mais aussi et surtout à les valoriser. Nous répondons ainsi au 3^e objectif de ce mémoire, en proposant un outil permettant l'exploitation des données issues des fromageries. L'ontologie développée a été soumise à une évaluation structurelle et sémantique, qui a permis de valider sa pertinence et son applicabilité à un cas d'étude.

Au cours de ce projet, nous avons pu découvrir de nombreuses problématiques liées au développement d'une ontologie. En premier lieu, il est nécessaire de discuter du rôle prépondérant de l'expertise du domaine concerné. Du début à la fin du projet, il est nécessaire d'avoir accès à une forme d'expertise du domaine modélisé. En effet, que ce soit pour la bonne définition du cadre du projet, ou pour la validation des choix de modélisation, il est important de disposer de connaissances solides sur le domaine. Cette expertise peut être présente sous de nombreuses formes et être disponible via divers acteurs du domaine. Le modélisateur responsable du développement de l'ontologie a tout intérêt à se familiariser le plus possible au domaine en question. Aussi, le développement en mode collaboratif peut influencer le développement d'une ontologie. Lors de la modélisation de procédés et de connaissances, il est important de fixer le rôle de chacun dans

l'équipe de modélisation. La collaboration sur ce type de projet peut apporter de nombreux avantages au moment du développement, dans le choix de la terminologie par exemple, mais il faut aussi reconnaître que le développement collaboratif peut représenter un frein, en ce sens que les discussions n'apportent pas toujours une plus-value par rapport au travail d'un modélisateur travaillant seul. Il est parfois plus efficace pour une personne de travailler seul afin d'obtenir une modélisation cohérente.

Nous avons remarqué qu'il était capital de bien définir en phase de préprojet le cadre et les limites de l'ontologie, car il est facile de déborder sur des aspects non pertinents. Les limites peuvent parfois ne pas être évidentes à cerner, et si le cadre de l'étude n'est pas clairement défini, le développement de l'ontologie peut rapidement s'alourdir et prendre du retard. De manière similaire, il est important dès le lancement du projet de définir le niveau de détail qu'on souhaite couvrir, car là aussi, il est facile de se lancer dans un niveau de détails trop important qui ne fait qu'alourdir l'ontologie. Il est parfois difficile de choisir si un terme est un concept ou plutôt une instance d'un concept. Par exemple, est-il préférable de modéliser une machine, un type de machine, une machine en particulier, une marque de machine, ou un modèle précis de machine ?

Enfin, nous aimerions discuter de la capacité de l'ontologie développée à être assez généraliste, mais suffisamment détaillée pour répondre à ses besoins opérationnels. Sera-t-il possible de représenter toutes les productions possibles réalisables (actuelles et futures) dans les fromageries québécoises ? À l'heure actuelle, cet objectif semble atteint. Cependant, cela pose la question de l'actualisation ontologie au fur et à mesure de l'évolution du domaine, des nouvelles pratiques, des nouveaux équipements, de nouveaux produits, etc. À l'avenir il serait pertinent d'apporter de nouvelles contributions à cette ontologie, par exemple par l'ajout de concepts concernant la production et la transformation d'autres produits dérivés du lait (yaourt, crème, lait en poudre, caséine...), ou de concepts concernant d'autres pans de l'industrie laitière (gestion du personnel, gestion financière, gestion de la maintenance...).

Les principes de la sémantique web et du développement ontologique prônent le partage de l'information et des connaissances en offrant des solutions ouvertes, accessibles, compréhensibles par le plus grand nombre. À ce titre, il serait pertinent d'offrir une traduction de l'ontologie développée, en anglais au moins, pour permettre une diffusion plus grande de ce nouvel outil.

La validation effectuée a été réalisée sur un cas d'étude d'un projet indépendant portant sur l'analyse de cycle de vie d'une production de Cheddar. Pour notre projet, cette validation a été pertinente. Il serait toutefois intéressant d'effectuer une validation auprès d'une fromagerie disposant d'outils et de technologies de collectes automatiques de données. En effet, l'objectif ultime du projet de collaboration entre le CEFQ et Polytechnique Montréal est de permettre la création d'un outil de valorisation de données issues des fromageries. L'évaluation de l'ontologie proposée auprès d'une fromagerie capable d'offrir un nombre important de données serait idéale dans cet objectif.

En somme, nous avons exprimé le besoin de développer un outil de représentation du domaine de la transformation fromagère, qui s'inscrit dans le courant de la révolution numérique en cours. Nous avons ensuite répondu aux objectifs de ce mémoire, en développant une ontologie spécialisée sur le pilotage de la transformation fromagère. Ce nouveau modèle, favorisant l'interopérabilité entre les systèmes, permettra la réalisation et le développement de projets innovants au sein des fromageries québécoises, leur permettant ainsi rentrer dans l'ère du 4.0.

RÉFÉRENCES

- AGÉCO, G. (2018). Statistiques globales. Tiré de <http://www.groupeageco.ca/fsl/>
- Aikenhead, G., Farahbakhsh, K., Halbe, J., & Adamowski, J. (2015). Application of process mapping and causal loop diagramming to enhance engagement in pollution prevention in small to medium size enterprises: case study of a dairy processing facility. *Journal of Cleaner Production*, 102, 275-284. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.069
- Baonza, M. d. C. S. d. F. (2010). *NeOn Methodology for Building Ontology Networks: Specification, Scheduling and Reuse*. (Universidad Politécnica de Madrid).
- Benoit, S. (2018). *Évaluation de l'éco-efficacité des procédés de transformation des produits laitiers : développement d'un outil de simulation*. (Université Laval).
- Benoit, S., Margni, M., Bouchard, C., & Pouliot, Y. (2019). A workable tool for assessing eco-efficiency in dairy processing using process simulation. *Journal of Cleaner Production*, 236. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117658
- Blagodatsky, G. A., Vologdin, S. V., Gorokhov, M. M., & Dokuchaev, D. E. (2019). Information system UML-model development by OMG RUP technology for Food industry enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537. doi:10.1088/1757-899x/537/4/042037
- Caracciolo, C., Heguiabehere, J., Gangemi, A., Baldassarre, C., Johannes, K., & Taconet, M. (2012). Knowledge management at FAO: A case study on network of ontologies in fisheries. Dans *Ontology Engineering in a Networked World* (p. 383-405).
- CEFQ. (2020a). Guide pour la maîtrise de l'hygiène et de la sécurité des aliments.
- CEFQ. (2020b). Les bases d'un lexique fromager.
- Chang, F., & Heinemann, P. H. (2018). Optimizing prediction of human assessments of dairy odors using input variable selection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 402-410. doi:10.1016/j.compag.2018.05.017
- Chen, H. H., & Chen, S. C. (2009). *Constructing the process models for the traceability of rice production and distribution*. Communication présentée à WMSCI 2009 - The 13th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Jointly with the 15th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, ISAS 2009 - Proc. (vol. 1, p. 1-6). Tiré de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867277421&partnerID=40&md5=66715fb9b154ac03dd629c3581397eac>
- Coelho, D., Carrola, T., & Couvinhas, A. (2017). Improvement of Certified Artisan Cheese Production through Systemic Analysis—Serra da Estrela PDO. *Sustainability*, 9(3). doi:10.3390/su9030468
- Costa Dias, M. A., Sant'Ana, A. S., Cruz, A. G., Faria, J. d. A. F., Fernandes de Oliveira, C. A., & Bona, E. (2012). On the implementation of good manufacturing practices in a small processing unity of mozzarella cheese in Brazil. *Food Control*, 24(1-2), 199-205. doi:10.1016/j.foodcont.2011.09.028

- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). *Le passage au numérique: Industrie 4.0: des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*: CEFRIO.
- De Cicco, A., De Gentili, E., & Santucci, J. F. (2007). *Modelling and simulation applied to the cheese tradition*. Communication présentée à Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007 (p. 3900-3906). doi:10.1109/ICMA.2007.4304198
- Dibie, J., Dervaux, S., Doriot, E., Ibanescu, L., & Pénicaud, C. (2016). [MS]2O - A multi-scale and multi-step ontology for transformation processes: Application to micro-organisms. *vol. 9717. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (p. 163-176).
- Drosinos, E. H., & Siana, P. S. (2007). Haccp in the Cheese Manufacturing Process, a Case Study. Dans *Food Safety* (p. 91-111).
- Fairweather, J. (2010). Farmer models of socio-ecologic systems: Application of causal mapping across multiple locations. *Ecological Modelling*, 221(3), 555-562. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.10.026
- Grubic, T., & Fan, I.-S. (2010). Supply chain ontology: Review, analysis and synthesis. *Computers in Industry*, 61(8), 776-786. doi:10.1016/j.compind.2010.05.006
- Grüninger, M., Aameri, B., Chui, C., Hahmann, T., & Ru, Y. (2018). Foundational ontologies for units of measure. *vol. 306. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* (p. 211-224).
- Guarino, N. (1998). Semantic Matching: Formal Ontological Distinctions for Information Organization, Extraction, and Integration. 1299. doi:10.1007/3-540-63438-X_8
- Ibanescu, L., Allard, T., Dervaux, S., Dibie, J., Guichard, E., Pénicaud, C., & Raad, J. (2018). *A use case of data integration in food production*. Communication présentée à CEUR Workshop Proceedings (vol. 2262, p. 17-20). Tiré de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85058179509&partnerID=40&md5=bf47af82c5cbc91ec9649e95633aa677>
- Ibanescu, L., Dibie, J., Dervaux, S., Guichard, E., & Raad, J. (2016). PO2 - A process and observation ontology in food science. Application to dairy gels. *vol. 672. Communications in Computer and Information Science* (p. 155-165).
- Inspection - MAPAQ.). Tiré de <https://www.inspection.gc.ca/au-sujet-de-l-acia/responsabilisation/modernisation-de-l-inspection/modele-d-inspection-integre-de-l-agence/fra/1439998189223/1439998242489>
- Mantravadi, S., Moller, C., & Christensen, F. M. M. (2018). *Perspectives on Real-Time Information Sharing through Smart Factories: Visibility via Enterprise Integration*. Communication présentée à Proceedings of International Conference on Smart Systems and Technologies 2018, SST 2018 (p. 133-137). doi:10.1109/SST.2018.8564617
- Melvin, A., & Baglee, D. (2008). *Value stream mapping: a dairy industry prospective*. Communication présentée à 2008 IEEE International Engineering Management Conference (IEMC-Europe 2008), 28-30 June 2008, Piscataway, NJ, USA (p. 5 pp.). doi:10.1109/IEMCE.2008.4618003

- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118–1136.
- Muehlen, M. Z., Indulska, M., & Kamp, G. (2007). *Business process and business rule modeling: A representational analysis*. Communication présentée à Proceedings - IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop, EDOC. doi:10.1109/EDOCW.2007.8
- Muljarto, A. R., Salmon, J.-M., Charnomordic, B., Buche, P., Tireau, A., & Neveu, P. (2017). A generic ontological network for Agri-food experiment integration – Application to viticulture and winemaking. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 433-442. doi:10.1016/j.compag.2017.06.020
- Musen, M. A., & Protege, T. (2015). The Protege Project: A Look Back and a Look Forward. *AI Matters*, 1(4), 4-12. doi:10.1145/2757001.2757003
- Neto, H. A., Tavares, W. L. F., Ribeiro, D., Alves, R. C. O., Fonseca, L. M., & Campos, S. V. A. (2019). On the utilization of deep and ensemble learning to detect milk adulteration. *BioData Min*, 12(1), 13. doi:10.1186/s13040-019-0200-5
- Pénicaud, C., Ibanescu, L., Allard, T., Fonseca, F., Dervaux, S., Perret, B., . . . Guichard, E. (2019). Relating transformation process, eco-design, composition and sensory quality in cheeses using PO2 ontology. *International Dairy Journal*, 92, 1-10. doi:10.1016/j.idairyj.2019.01.003
- Pizzuti, T., & Mirabelli, G. (2013). *FTTO: An example of Food Ontology for traceability purpose*. Communication présentée à Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS 2013 (vol. 1, p. 281-286). doi:10.1109/IDAACS.2013.6662689
- Poveda-Villalón, M., Asunción Gómez-Pérez, Mari Carmen Suárez-Figueroa. (2014). OOPS!(Ontology Pitfall Scanner!): An on-line tool for ontology evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 10, 7-34.
- Powell, D., Lundebj, S., Chabada, L., & Dreyer, H. (2017). Lean Six Sigma and environmental sustainability: the case of a Norwegian dairy producer. *International Journal of Lean Six Sigma*, 8(1), 53-64. doi:10.1108/ijlss-06-2015-0024
- Rospocher, M., Ghidini, C., & Serafini, L. (2014). An ontology for the business process modelling notation. vol. 267. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* (p. 133-146).
- Smith, R. (2019). Aristotle's Logic. Dans E. N. Zalta (édit.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Tiré de <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/aristotle-logic/>
- Tartir, S., Arpinar, I., & Sheth, A. (2010). Ontological Evaluation and Validation. Dans (p. 115-130).
- Verhoosel, J. P. C., & Spek, J. (2016). *Applying ontologies in the dairy farming domain for big data analysis*. Communication présentée à CEUR Workshop Proceedings (vol. 1783, p. 91-100). Tiré de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85013230939&partnerID=40&md5=872765d74348291475f5c1d88227438e>
- Vuppalapati, J. S., Kedari, S., Ilapakurthy, A., Ilapakurti, A., Kedari, S., & Vuppalapati, C. (2017). *Smart Dairies - Enablement of Smart City At Gross Root Level*. Communication présentée

- à 2017 IEEE Third International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), 6-10 April 2017, Los Alamitos, CA, USA (p. 118-123). doi:10.1109/BigDataService.2017.35
- Yan, W. J., Chen, X., Akcan, O., Lim, J., & Yang, D. (2015). *Big data analytics for empowering milk yield prediction in dairy supply chains*. Communication présentée à Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Big Data, IEEE Big Data 2015 (p. 2132-2137). doi:10.1109/BigData.2015.7363997
- Yu, C., & Huatuco, L. H. (2016). *Supply chain risk management identification and mitigation: A case study in a Chinese dairy company*. Communication présentée à 3rd International Conference on Sustainable Design and Manufacturing, SDM 2016, April 4, 2016 - April 6, 2016, Chania, Greece (vol. 52, p. 475-486). doi:10.1007/978-3-319-32098-4_41
- Zakeri, A., Saberi, M., Hussain, O. K., & Chang, E. (2018). An early detection system for proactive management of raw milk quality: an australian case study. *IEEE Access*, 6, 64333-64349. doi:10.1109/ACCESS.2018.2877970

ANNEXE A DROSINOS & SIANA (2007) – LISTE DES DONNÉES À PRÉLEVER POUR LE PLAN HACCP

Tableau A.1 Liste des données à prélever pour la plan HACCP

Étape	Données à prélever
Réception du lait	N° lot du lait
	Code de la ferme origine
	pH
	Densité spécifique
	MG (%)
	Composition solide (non-MG)
	Présence d'antibiotique (O/n)
	Température (°C)
	Durée de stockage
	Altération (O/n)
	Mesures bactériennes
	Mesures pathogènes
Pasteurisation	Température de l'échangeur thermique
	Durée de traitement
	Test d'activité phosphatase
	Test d'activité superoxydase
	Mesures bactériennes
Production	Température de maturation
	Durée de maturation
	pH
	Taux d'eau du fromage
	MG (%)
	Humidité de la salle
	Mesures bactériennes
	Mesures pathogènes
	Nettoyage des équipements
	Analyse de l'eau
	Analyse du sel
	Analyse des ferments et de la présure
	Analyse de l'air
Informations sur les intrants (n° lot)	

ANNEXE B EXEMPLE DE FICHIERS DE CARTOGRAPHIE

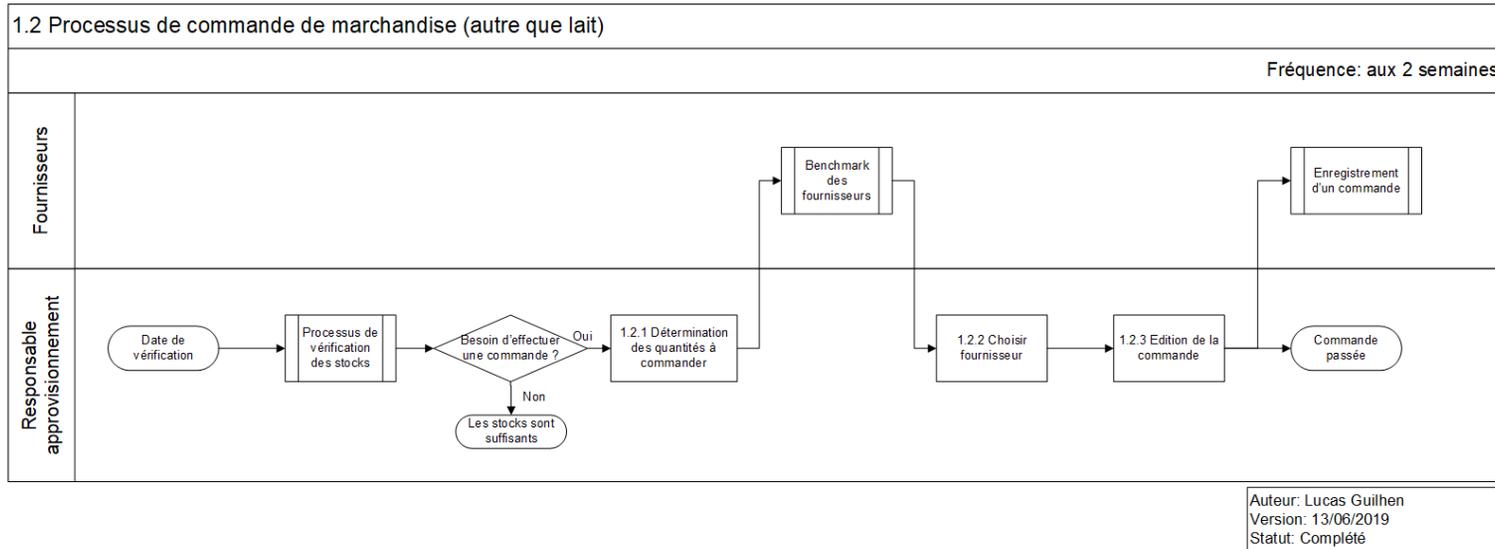


Figure B.1 Processus d'inspection de la marchandise lors d'une réception

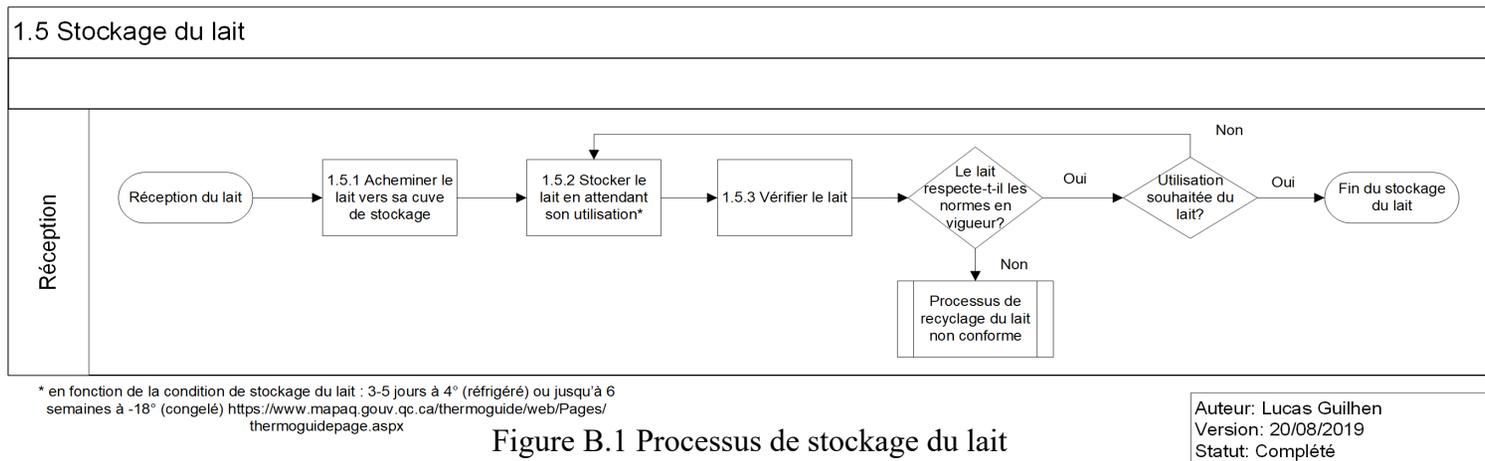


Figure B.1 Processus de stockage du lait

ANNEXE C EXEMPLE DE FICHE-ACTIVITÉ



Fiche-activité

En-tête

Code:	Responsable: Lucas Guilhen
Description: Choisir le fournisseur	Date de création: 13/06/2019
Processus : 1.2 Commande marchandise – Tâche 2	Dernière révision: 13/06/2019
Organisation:	Statut: Complété

Description

Intrant: Benchmark des fournisseurs
Extrant: Fournisseur choisi
Différences entre les produits : Réduction du nombre de fournisseur considéré (n à 1)
Indicateurs de performance: RaS
Équipements : classeur de suivi stock, classeur fournisseur, calculatrice, ordinateur, équipement de bureau
Matières premières: RaS
Données : Quantité en stock, quantité ciblée, informations fournisseurs (nom, produits, délais, tarification, ...)
Problèmes actuels: RaS
Opportunités d'amélioration: RaS (ou alors mise en place d'un système code barre?)
Notes et recommandations: Le responsable des approvisionnements s'occupe de vérifier les stocks aux 2 semaines des différents produits nécessaires à la production (ferments, présures, emballages.). Il tient un registre des stocks pour chaque produit et compare les quantités restantes aux quantités ciblées. En fonction de la différence, il contacte les fournisseurs pour passer commande. Il évalue lui-même les différents fournisseurs et choisit le fournisseur en fonction de différents critères (que je n'ai pas)

Figure C.1 Fiche-activité pour l'activité "Choisir le fournisseur"

ANNEXE D LISTES DES CONCEPTS CLÉS POTENTIELS SELON LEUR SOURCE

Tableau D.1 Concepts issus de l'expertise du CEFQ

Concepts issus de l'expertise du CEFQ		
Additif	Analyse	Brassage
Caillage	Caillé	Climatisation
Composition solide (non MG)	Courbe de lactation	Décision
Défaut	Densité spécifique	Dosage
Effet	Ferment	Fermeté
Fiche de pasteurisation	Goût	Haloir
Instrument de mesure	Lactosérum	Matériel de transformation alimentaire
Médicament	Mesure bactérienne	Mesure pathogène
Taux de MG	Odeur	pH
Odeur	Potabilité de l'eau	Présence d'antibiotique
Score de qualité	Substance	Taux bactérien
Taux d'eau du fromage		

Tableau D.2 Concepts issus de la cartographie de processus

Concepts issus de la cartographie de processus		
Accessoires	Humidité	Race (de vache)
Auxiliaire de production	Laboratoire	Réception
Capteur	Lait	Remplissage
Caractéristique	Local	Saumure
Carton	Lot	Soutirage
Client	Machine	Stock
Conditionnement	Maladie	Système de pasteurisation
Conformité	Matière première	Tables de travail
Couleur	N° lot	Température
Cuves et bassins de travail	Nettoyage	Test
Décaillage	Nomenclature	Vache
Élevage Laitier	Opération de Fabrication	Ventilation
Emballage	Opération de Lancement	Circuit d'eau
Équipement	Opération logistique	État du camion
Étape de production	Outil	Gestion des vermines
Étiquette	Paramètre	Poubelle
Expédition	Pre pressage	Lavabo
Fournisseur	Préparation	Manuel
Fromage	Pressage	Murs, portes
Fromagerie (=entreprise)	Présure	Plafond
Gamme	Procédure de nettoyage	Pédiluve
Drain	Affinage	Ensemencement
Plancher	Nettoyage cuve	Standardisation
Planification	Caillage	Mélange
Programme de contrôle qualité	Refroidissement	Conditionnement
Programme de maintenance	Chauffage	Dé lactosage
Taux de stock	Moulage	Pasteurisation
Transport	Démoulage	Thermisation
Toilettes	Décaillage	Saumurage
Salage	Aromatisation	Pressage
Brassage	Gélification	Emprésurage
Traitement thermique	Homogénéisation	Repos
Filtrage	Composé chimique	Écrémage
Gas	Eau	Électricité

Tableau D.3 Concepts issus de la revue de littérature

Concepts issus de revue de littérature		
Article	Région	Papier
Besoin client	Réglage	Pâturages
Calendrier	Rendement	Perte de chaleur
Capacité	Responsable	Plan
Centre de coût	Ressource humaine	Plan de commande
Centre de travail	Ressource matérielle	Point de rapport statistique
Certificat	Ressource Technique	Processeur
Code	Conditions climatiques	Profit net avant les taxes
Commande client	Satisfaction	Programmation
Concept géographique	Site	Rations
Concept temporel	Spécification d'inspection	Régulations
Consommables	Supports et ustensiles	Santé du sol
Date	Tabliers	Service
Déchet	Climat	Travail
Détergent	Uniforme	Type de sol / topographie
Document	Unité organisationnel	Vêlage
Durée	Vestiaires	Vétérinaire
Eau	Vitamines	Assemblage
Échantillon	Altération	Besoins familiaux
Energie	Balances	Bois
EPI	Charge	Boyaux
Identifiant	Compétence	Contrôleur
Ingrédient	Configuration	Cuir
Instant	Égout	Défaut géométrique
Javel	Électricité	Dépenses de travail à la ferme
Maintenance	Entité administrative	Diversité des plants / du bétail
Médicaments	Entité de Coût	Entité géométrique
Méthode d'inspection	Entité technologique	Environnement de la ferme comme lieu de vie
Module de Young	Événement	Environnement de la ferme en santé
Notification de qualité	Fertilisants	Gaz combustible
Opérateur	Fourrage	Laine
Pays	Fuite	Moulin
Personnel	Gestion du troupeau	Publicité
Plan d'inspection	Distributeur	Qualité des plants / du bétail
Point d'inspection	Manutention	Quantité des plants / du bétail
Poste	Mouvement de matière	Quarantaine
Produit	Nourriture	Rebus
Produit fini	Opération humaine	Revenus de la ferme
Produit intermédiaire	Ordre d'achats	Script fonctionnel
Quantité	Ordre de production	Temps de travail à la ferme

Tableau D.3 Concepts issus de la revue de littérature (suite et fin)

Concepts issus de revue de littérature		
Recyclable	Ordre planifié	Viande
Textile	Voisins	Action
Appréciation	Lait cru	Lait standardisé
Crème		

ANNEXE E LISTE DES CONCEPTS SÉLECTIONNÉS

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes
Accessoire	0	0	0	Supprimé	Machine / outillage / ustensile / outil / Accessoire
Action	0	0	0	Supprimé	Opération / Sous-opération / Activité / Sous activité / Tâche
Analyse	0	0	0	Supprimé	Inspection / Évaluation / Analyse / Test
Appréciation	0	0	N	I	
Article	0	0	0	C	Article / Produit
Auxiliaire de production	0	0	N	C	
Besoin client	0	N			
Brassage	0	0	N	I	
Caillage	0	0	N	I	
Caillé	0	0	N	I	
Calendrier	0	0	N	C	
Capacité	0	N			Capabilité
Capteur	0	0	N	I	
Caractéristique	0	0	0	C	Caractéristique / Spécification / Propriété / Paramètre
Carton	0	0	0	C	Emballage / Conditionnement / Carton
Centre de coût	0	0	N	C	
Centre de travail	0	0	N	C	Atelier / Ligne / Usine
Certificat	0	0	0	C	Rapport / Documentation / Registre / Notification / Certificat
Client	0	0	N	C	
Climatisation	0	0	0	I	Ventilation / Climatisation
Code	0	0	0	C	Identifiant / Code
Commande client	0	0	N	C	
Composition solide (non-MG)	0	0	N	I	
Concept géographique	0	0	N	C	
Concept temporel	0	0	0	C	Cadre temporel
Conditionnement	0	0	0	C	Emballage / Conditionnement / Carton
Conformité	0	0	N	P	
Consommable	0	0	0	C	Matière première / Consommable
Couleur	0	0	N	P	
Cuve et bassis de travail	0	0	N	I	
Date	0	0	N	C	

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés (suite)

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes
Décaillage	0	0	N	I	
Déchet	0	0	N	C	
Décision	0	0	N	C	
Défaut	0	0	N	C	
Détergent	0	0	N	C	
Document	0	0	O	C	Rapport / Documentation / Registre / Notification / Certificat
Dosage	0	0	N	I	
Durée	0	0	N	C	Durée / Période
Eau	0	0	N	I	
Échantillon	0	0	N	C	
Élevage Laitier	0	0	N	C	
Emballage	0	0	O	C	Emballage / Conditionnement / Carton
Energie	0	0	N	C	
EPI	0	0	O	C	EPI / Tablier / Uniforme
Équipement	0	0	O	C	Machine / outillage / ustensile / outil / Accessoire
Étape de production	0	0	O	C	Opération / Sous-opération / Activité / Sous activité / Tâche
Étiquette	0	0	N	C	
Expédition	0	0	N	C	Sortie de marchandise
Ferment	0	0	N	C	
Fermeté	0	0	N	P	
Fiche de pasteurisation	0	0	N	I	
Fournisseur	0	0	N	C	
Fromage	0	0	N	C	
Fromagerie	0	0	N	C	Fabricant / Usine / Corporation / Entreprise / Organisation / Compagnie
Gamme	0	0	N	C	Séquence / Procédure / Processus
Goût	0	0	N	P	
Haloir	0	0	N	I	
Humidité	0	0	N	I	
Identifiant	0	0	N	C	
Ingrédient	0	0	O	Supprimé	Matière première / Ingrédient
Instant	0	0	N	C	Date
Javel	0	0	N	I	
Laboratoire	0	0	N	I	
Lactosérum	0	0	N	C	
Lait	0	0	N	C	
Local	0	0	N	C	Emplacement
Lot	0	0	N	C	Contenant unitaire
Machine	0	0	N	C	

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés (suite)

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes
Maintenance	0	0	N	I	
Maladie	0	0	N	P	
Matière première	0	0	N	C	Sous-système / Composant / Consommable
Médicament	0	0	N	P	
Mesure bactérienne	0	0	N	I	
Mesure pathogène	0	0	N	I	
Méthode d'inspection	0	0	O	C	Spécification / Méthode d'inspection
MG (%)	0	0	N	I	
Module de Young	0	0	N	I	
N° lot	0	0	N	P	
Nettoyage	0	0	N	I	
Nomenclature	0	0	N	C	
Notification de qualité	0	0	O	Supprimé	Rapport / Documentation / Registre / Notification / Certificat
Odeur	0	0	N	P	
Opérateur	0	0	O	C	Opérateur / Inspecteur / Personne / Personnel
Opération de Fabrication	0	0	N	C	
Opération de Lancement	0	0	N	C	
Opération logistique	0	0	N	C	
Outil	0	0	O	C	Machine / outillage / ustensile / outil / Accessoire
Paramètre	0	0	O	Supprimé	Caractéristique / Spécification / Propriété / Paramètre
Pays	0	0	N	C	
Personnel	0	0	O	C	Opérateur / Inspecteur / Personne / Personnel
PH	0	0	N	I	
Plan d'inspection	0	0	N	C	
Point d'inspection	0	0	N	C	
Poste	0	0	O	P	Rôle / Métier / Responsabilité
Pre pressage	0	0	N	I	
Préparation	0	0	N	I	
Présence d'antibio (0/n)	0	0	N	I	
Pressage	0	0	N	I	
Présure	0	0	N	C	
Procédure de nettoyage	0	0	N	I	
Produit	0	0	O	C	Article / Produit
Produit fini	0	0	N	C	
Produit intermédiaire	0	0	O	C	Produit semi-fini
Quantité	0	0	N	P	
Race (de vache)	0	0	N	P	
Réception	0	0	N	C	
Recyclable	0	0	N	P	
Région	0	0	N	C	

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés (suite)

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes	
Réglage	0	0	O	C	Préparation	
Remplissage	0	0	N	I		
Rendement	0	0	N	I		
Responsable	0	0	N	P		
Ressource humaine	0	0	N	C		
Ressource matérielle	0	0	N	C		
Ressource Technique	0	0	N	C		
Conditions climatiques	0	0	O	C		
Satisfaction	0	0	N	P		
Saumure	0	0	N	C		
Score de qualité	0	0	N	C		
Site	0	0	O	C		Usine / bâtiment / zone de bâtiment
Soutirage	0	0	N	I		
Spécification d'inspection	0	0	O	Supprimé		Spécification / Méthode d'inspection
Stock	0	0	N	C	Stockage / Compartiment	
Support et ustensile	0	0	O	Supprimé	Machine / outillage / ustensile / outil / Accessoire	
Système de pasteurisation	0	0	N	I	EPI / Tablier / Uniforme	
Table de travail	0	0	N	I		
Tablier	0	0	O	I		
Taux bactérien	0	0	N	I		
Taux d'eau du fromage	0	0	N	I		
Température	0	0	N	I		
Climat	0	0	O	C		
Test	0	0	O	Supprimé		Inspection / Évaluation / Analyse / Test
Uniforme	0	0	O	I	EPI / Tabliers / Uniforme	
Unité organisationnel	0	0	N	C	Ventilation / Climatisation	
Vache	0	0	N	C		
Ventilation	0	0	O	I		
Vestiaire	0	0	N	I		
Vitamines	0	0	N	P		
Salage	0	0	N	C		
Affinage	0	0	N	C		
Nettoyage cuve	0	0	N	C		
Caillage	0	0	N	C		
Refroidissement	0	0	N	C		
Chauffage	0	0	N	C		
Moulage	0	0	N	C		
Démoulage	0	0	N	C		
Décaillage	0	0	N	C		
Aromatisation	0	0	N	C		
Gélification	0	0	N	C		

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés (suite)

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes
Homogénéisation	0	0	N	C	
Ensemencement	0	0	N	C	
Standardisation	0	0	N	C	
Mélange	0	0	N	C	
Conditionnement	0	0	N	C	
Dé lactosage	0	0	N	C	
Pasteurisation	0	0	N	C	
Thermisation	0	0	N	C	
Saumurage	0	0	N	C	
Pressage	0	0	N	C	
Emprésurage	0	0	N	C	
Repos	0	0	N	C	
Écrémage	0	0	N	C	
Brassage	0	0	N	C	
Traitement thermique	0	0	N	C	
Filtrage	0	0	N	C	
Composé chimique	0	0	N	C	
Additif	0	0	N	C	
Médicament	0	0	N	C	
Substances	0	0	N	C	
Instruments de mesures	0	0	N	C	
Matériel de transformation des aliments	0	0	N	C	
Altération	0	N			
Balances	0	N			
Charge	0	N			
Circuit d'eau	0	N			
Compétence	0	N			
Configuration	0	N			
Courbe de lactation	0	N			
Densité spécifique	0	N			
Effet	0	N			
Égout	0	N			
Électricité	0	N			
Entité administrative	0	N			
Entité de Coût	0	N			
Entité technologique	0	N			
État du camion	0	N			
Événement	0	N			
Fertilisant	0	N			
Fourrage	0	N			

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés (suite)

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes
Fuite	0	N			
Gestion des vermines	0	N			
Gestion du troupeau	0	N			
Distributeur	0	N			
Poubelle	0	N			
Lavabo	0	N			
Manuel	0	N			
Manutention	0	N			
Mouvement de matière	0	N			
Mur, porte	0	N			
Nourriture	0	N			
Opération humaine	0	N			
Ordre d'achat	0	N			
Ordre de production	0	N			
Ordre planifié	0	N			
Papier	0	N			
Pâturage	0	N			
Perte de chaleur	0	N			
Plafond	0	N			
Plan	0	N			
Plan de commande	0	N			
Pédiluve	0	N			
Drain	0	N			
Plancher	0	N			
Planification	0	N			
Point de rapport statistique	0	N			
Potabilité de l'eau	0	N			
Potable	0	N			
Processeur	0	N			
Profit net avant les taxes	0	N			
Programmation	0	N			
Programme de contrôle qualité	0	N			
Programme de maintenance	0	N			
Ration	0	N			
Régulation	0	N			
Santé du sol	0	N			
Service	0	N			
Taux de stock	0	N			
Transport	0	N			
Transporteur	0	N			
Travail	0	N			

Tableau E.1 Liste des concepts sélectionnés (suite et fin)

Concepts potentiels	Applicable à la transformation fromagère ?	Pertinent pour les objectifs du CEFQ ?	Conflit sémantique	Concept, instance, paramètre?	Synonymes
Type de sol / topographie	O	N			
Vélage	O	N			
Vétérinaire	O	N			
Assemblage	N				
Besoins familiaux	N				
Bois	N				
Boyaux	N				
Contrôleur	N				
Cuir	N				
Défaut géométrique	N				
Dépenses de travail à la ferme	N				
Diversité des plants / du bétail	N				
Entité géométrique	N				
Environnement de la ferme comme lieu de vie	N				
Environnement de la ferme en santé	N				
Gaz combustible	N				
Laine	N				
Moulin	N				
Publicité	N				
Qualité des plants / du bétail	N				
Quantité des plants / du bétail	N				
Quarantaine	N				
Rebus	N				
Revenus de la ferme	N				
Script fonctionnel	N				
Temps de travail à la ferme	N				
Textile	N				
Toilettes	N				
Viande	N				
Voisins	N				

ANNEXE F LISTE DES CONCEPTS TESTS ET LEURS CONCEPTS ADÉQUATS

Tableau F.1 Comparaison entre les concepts tests et les concepts de l'ontologie

Concepts tests	Concepts
Additifs	Additif
Assainissement	Nettoyage
Ateliers	Local
Bilan de matières préliminaire	<i>Calcul</i>
Caillé	Caillé
Calendrier	Calendrier
Chaudière	Équipement
Chauffage	Chauffage
Cheddar	Fromage
Cheddarisation	Opération
Chlorure de calcium	Additif
Coefficient de rejet protéique	<i>Calcul</i>
Colorant	Additif
Composition	Nomenclature
Concentration	<i>Propriété d'un concept</i>
Conditionnement	Conditionnement
Crème	Crème
Diafiltration	Opération
Dimension	<i>Propriété d'un concept</i>
Distributeurs spécialisés	Fournisseur
Durée	Durée
Échangeur de chaleur	Machine
Écrémage	Écrémage
Électricité	Électricité
Emballage	Emballage
Énergie	Énergie
Enveloppe interne	Emballage
Environnement	<i>Manquant</i>
Équipement	Équipement
Étape	Opération
Évaporateur	Machine
Évaporation	Opération
Ferment	Ferment
Filtration	Filtrage
Formation du caillé	Caillage
Fromage (Cheddar)	Fromage
Fromagerie	Fromagerie
Gaz naturel	Gaz naturel
Humidité	Point d'inspection
Indicateur d'éco-efficacité	Score
Infrastructure	Bâtiment
Ingrédient	Matière première
Lactose	<i>Manquant</i>
Lactosérum	Lactosérum
Lait	Lait
Lait cru	Lait cru
Lait écrémé	Lait écrémé
Lait standardisé	Lait standardisé
Main d'œuvre	Personnel
Marge nette	<i>Calcul</i>

Tableau F.1 Comparaison entre les concepts tests et les concepts de l'ontologie (suite et fin)

Concepts tests	Concepts de l'ontologie
Masse	Point d'inspection OU propriété d'un concept
Matières grasses	Point d'inspection OU propriété d'un concept
Maturation	Maturation
Membrane	Équipement
Minéraux	Substance ou additif
Nettoyage	Nettoyage
Opération	Opération
Paramètre	Réglage
Pasteurisation	Pasteurisation
Perméat	Produit intermédiaire
Planning	Calendrier
Polyéthylène	Composé chimique
Pompe	Machine
Portion	Lot
Poude de lactosérum	Produit intermédiaire
Poudre de perméat	Produit intermédiaire
Pressage	Pressage
Présure	Présure
Produit	Produit
Produit de nettoyage	Article de nettoyage
Protéines	Point d'inspection
Quantité	Point d'inspection OU propriété d'un concept
ratio CN/MG	Point d'inspection
Réception	Réception
Refroidissement	Refroidissement
Rendement fromager	Score
Réseau hydraulique	Équipement
Rétentat	Produit intermédiaire
Sac en papier	Emballage
Séchage	Opération
Séchoir	Machine
Sel	Sel
Séparation par membrane	Opération
Sous-produit	Produit intermédiaire
Soutirage	Soutirage
Standardisation	Standardisation
Stockage	Stock
Température	Point d'inspection
Thermisation	Thermisation
Traitement des eaux usées	<i>Manquant</i>
Transport	Mouvement
Unité de filtration	Machine
Vapeur d'eau	<i>Manquant</i>
Volume	Point d'inspection OU propriété d'un concept
Fluide	<i>Manquant</i>
Élément de procédé	Opération
Surface d'échange	<i>Propriété d'un concept</i>
Perte de charge	<i>Propriété d'un concept</i>
Dépense énergétique	<i>Calcul</i>

ANNEXE G LISTE DES LIENS TESTS ET LEURS ÉQUIVALENTS ADÉQUATS

Tableau G.1 Comparaison entre les liens tests et celles de l'ontologie

Relations	Relations de l'ontologie
possède	possède
comporte	regroupe
appartientA	appartientA
fait intervenir	fait intervenir
intervientDans	estEmployéPar
fabrique	fabrique
estFabriquéPar	<i>manquant</i>
estDivisée	estSituéDans
utilise	utilise
génère	aCommeExtrant
contient	contient
estConditionné	<i>manquant</i>
valorise	fabrique
opèreSuivant	<i>manquant</i>
estConfiguréSuivant	<i>manquant</i>
consomme	aComeIntrant / fait intervenir
commande	<i>manquant</i>
facture	<i>manquant</i>

ANNEXE H PRÉCISIONS SUR CERTAINES PARTIES DE L'ONTOLOGIE

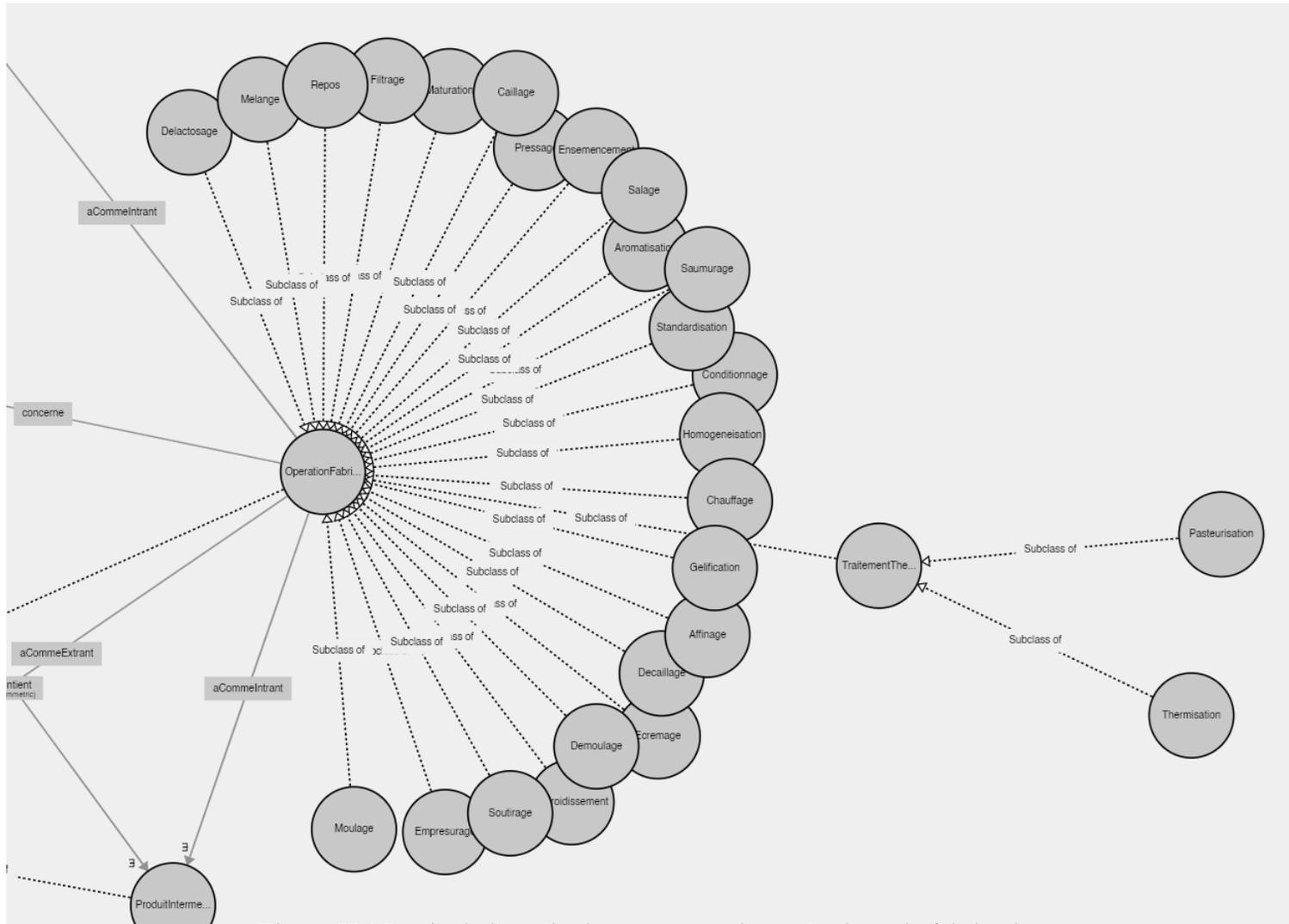


Figure H.1 Partie de l'ontologie concernant les opérations de fabrication

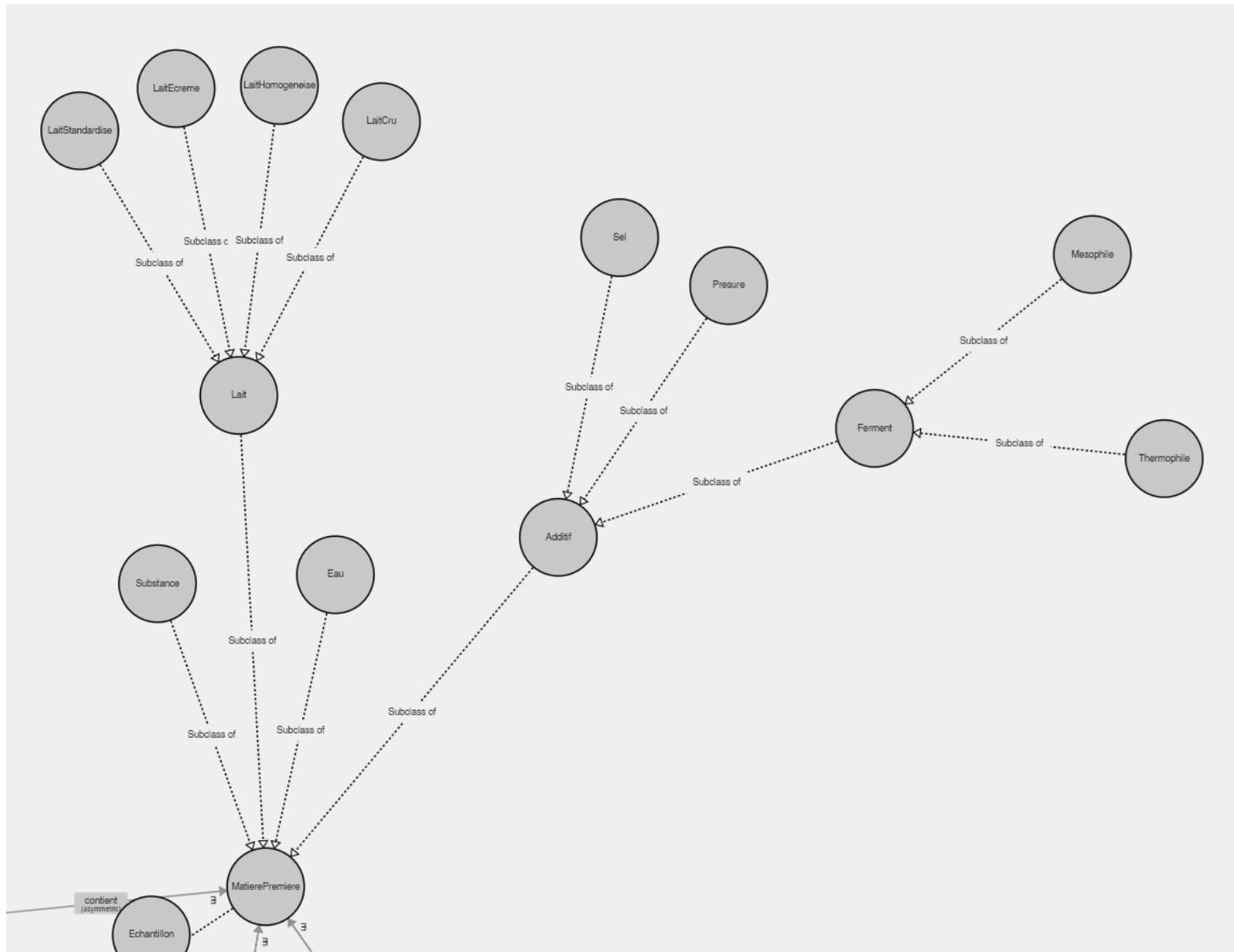


Figure H.2 Partie de l'ontologie concernant les matières premières

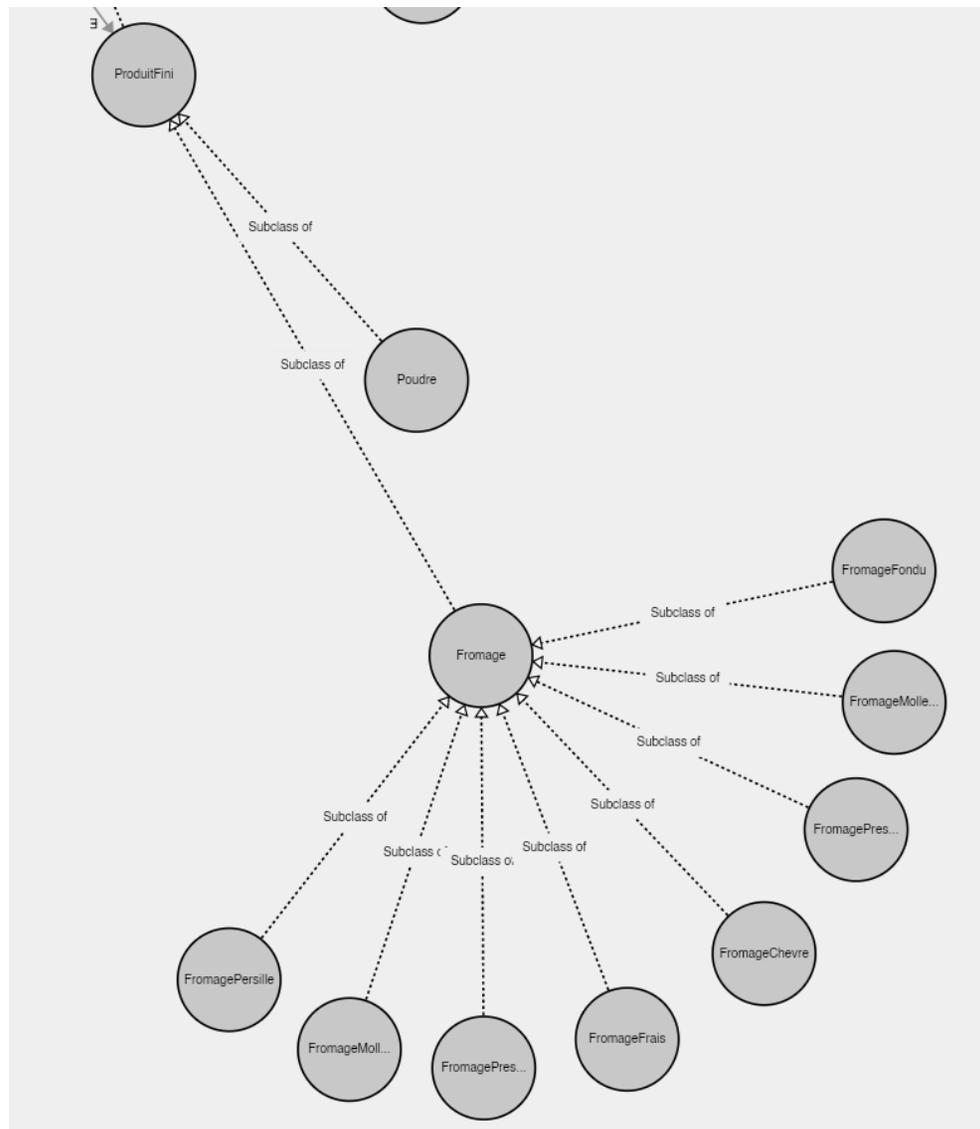


Figure H.3 Partie de l'ontologie concernant les produits finis