



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

FACULTE DES SCIENCES & TECHNOLOGIES



CENTRE DE  
RECHERCHE EN  
AUTOMATIQUE DE  
NANCY

U.F.R. : Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique et Automatique

Ecole Doctorale : IAEM Lorraine

Département de Formation Doctorale : Automatique

Thèse  
présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Lorraine

en Sciences, spécialité Automatique, Traitement du  
Signal et Génie Informatique

par **Benjamin ALMECIJA**

**APPORTS DES CONNAISSANCES METIERS**  
**POUR LA CONCEPTION D'UN SYSTEME MULTI-CAPTEURS**  
**DE TRI QUALITE BILLON**

Soutenue publiquement le 10 Décembre 2013

**Membres du jury :**

<i>Rapporteurs :</i>	Pr. Maurice PILLET	Professeur, Université de Savoie
	Dr. Régis CLOUARD	Maître de Conférences HdR, ENSICAEN
<i>Examineurs :</i>	Pr. Pascal LHOSTE	Professeur, Université de Lorraine
	Dr. Renaud DAQUITAINE	Scierie Siat-Braun, France
	Pr. Patrick CHARPENTIER	Professeur, Université de Lorraine (Directeur de thèse)
	Dr. Vincent BOMBARDIER	Maître de Conférences, Université de Lorraine, (Co-directeur de thèse)

**Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN-CNRS UMR 7039)**

Campus Sciences, B.P. 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy





*A Claude Almecija  
et Patrick Mertz,*

*La vie des morts est de survivre dans l'esprit des vivants.  
(Cicéron - merci Onyx174)*



## **Remerciements**

Je tiens à remercier les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette thèse.

En premier lieu, Monsieur Paul Siat, Président-Directeur Général de la scierie Siat-Braun, pour avoir rendu ce projet possible et pour son soutien, Renaud Daquitaine, mon superviseur, pour m'avoir encadré durant ces trois années. Mais aussi, les « gars de ROB » : Alain, Christian, Fatih, Guillaume, Hervé, Hubert, Jean-François, Jean-Luc, Pascal, Rémi, Taner et Thibaut, pour leur bienveillance et nos échanges. Je pense aussi aux collègues que je n'ai pas cités et qui m'ont permis de trouver les réponses que je cherchais.

En second lieu, je tiens à remercier l'équipe du CRAN, Patrick Charpentier et Vincent Bombardier, mes directeurs de thèse, toujours à mon écoute, me préparant et me formant aux tâches que je devais accomplir, et tous les autres aussi pour nos échanges qui m'ont permis de prendre du recul et d'aborder d'autres points de vue.

Ensuite, je tiens à remercier chaleureusement, Pascal Lhoste, Maurice Pillet et Régis Clouard, mes examinateurs et rapporteurs, pour avoir pris le temps d'évaluer et corriger ce mémoire.

Finalement, je remercie plus personnellement, ma mère et ma sœur, pour ces longues discussions et pour leur totale confiance en moi dissipant mes doutes, mes deux amis nancéens, Jérémy et Kévin, qui ont traversé les mêmes moments et qui ont été une motivation supplémentaire à chaque moment de ce projet.

Merci à tous, et merci aussi à tous ceux que je n'ai pas cités,



# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>I</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>III</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>1 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIEL DU PROJET.....</b>	<b>9</b>
1.1 FILIERE BOIS FRANÇAISE.....	10
1.1.1 Organisation usuelle de la filière .....	10
1.1.2 Spécificités de la filière Bois française .....	12
1.1.3 Contexte particulier des scieries.....	14
1.2 SYSTEMES DE VISION DANS LES SCIERIES .....	16
1.2.1 Système de vision vu comme un élément du système d'observation .....	16
1.2.2 Architecture générale d'un système de vision .....	18
1.2.3 Etapes spécifiques aux systèmes de vision Bois en scierie.....	19
1.3 CONTROLE DES PRODUITS FINIS APRES SCIAGE.....	24
1.3.1 Contrôle dimensionnel d'un produit fini.....	24
1.3.2 Classement esthétique d'un produit fini.....	24
1.3.3 Détermination de la résistance mécanique d'un produit fini.....	27
1.3.4 Classement structurel d'un produit fini .....	29
1.4 CONTROLE DES BOIS RONDS EN ENTREE DE SCIERIE.....	30
1.4.1 Fonctionnement des systèmes dédiés au bois rond.....	31
1.4.2 Contrôle dimensionnel du bois rond.....	32
1.4.3 Tri du bois rond en vue d'un classement esthétique .....	32
1.4.4 Détermination de la résistance mécanique du bois rond.....	33
1.4.5 Tri du bois rond en vue d'un classement structurel.....	33
1.5 PARC A GRUMES DE NOTRE PARTENAIRE INDUSTRIEL SIAT-BRAUN .....	36
1.5.1 Contexte particulier de la scierie Siat -Braun.....	37
1.5.2 Caractéristiques du bois à extraire et systèmes de vision adaptés.....	41
1.5.3 Système de vision choisi par Siat-Braun pour le parc à grumes.....	44

<b>2</b>	<b>MODELISATION DES CONNAISSANCES POUR LA MISE EN RELATION DE LA QUALITE BILLON AVEC LA QUALITE SCIAGE .....</b>	<b>51</b>
2.1	METHODE DE MODELISATION DE LA CONNAISSANCE .....	52
2.1.1	<i>Définition de la connaissance experte .....</i>	52
2.1.2	<i>Modélisation de la connaissance experte.....</i>	60
2.1.3	<i>Méthode NIAM-ORM.....</i>	69
2.2	CREATION DES MODELES ONTOLOGIQUES DES QUALITES BILLON ET SCIAGE .....	74
2.2.1	<i>Acquisition des connaissances « Qualité » dans l'entreprise .....</i>	74
2.2.2	<i>Formalisation des modèles ontologiques.....</i>	78
2.2.3	<i>Vérification et validation des modèles ontologiques .....</i>	83
2.3	ETABLISSEMENT DU MODELE FONCTIONNEL DU SYSTEME .....	84
2.3.1	<i>Extraction du modèle fonctionnel idéal .....</i>	85
2.3.2	<i>Agrégation du modèle de connaissance de l'intégrateur.....</i>	88
2.3.3	<i>Intégration du modèle de connaissance de la matière Bois.....</i>	89
<b>3</b>	<b>PARAMETRAGE DU SYSTEME DE TRI QUALITE BILLON PAR INTEGRATION DE CONNAISSANCES .....</b>	<b>95</b>
3.1	EXPLOITATION DU MODELE FONCTIONNEL ENRICHIS POUR LA CONCEPTION DU SYSTEME DE TRI .	97
3.1.1	<i>Extraction des critères caractérisant la qualité .....</i>	98
3.1.2	<i>Spécification des classes de Qualité Billon du système de tri.....</i>	101
3.1.3	<i>Détermination des liens entre les classes E/S/L/E et les classes Opérateur.....</i>	103
3.2	PARAMETRAGE INITIAL DU SYSTEME DE TRI QUALITE BILLON .....	105
3.2.1	<i>Sélection des critères pertinents pour le Tri Qualité Billon.....</i>	105
3.2.2	<i>Evaluation des seuils par simulation .....</i>	110
3.2.3	<i>Détermination des seuils à partir d'études bibliographiques .....</i>	115
3.3	VALIDATION DU PARAMETRAGE EN PHASE D'EXPLOITATION .....	120
3.3.1	<i>Validation des critères par retour d'expérience sur le système. ....</i>	121
3.3.2	<i>Validation des seuils par analyse de leur influence sur les Billons ou Sciages.....</i>	126
3.3.3	<i>Validation du paramétrage par analyse de données .....</i>	132
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>139</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>145</b>
	<b>REFERENCES TECHNIQUES.....</b>	<b>165</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>169</b>
	ANNEXE 1 : ETAT DE L'ART SUR LES METHODES DE DECISION APPLIQUEES AU DOMAINE DU BOIS.....	169
	ANNEXE 2 : SYNTHESE EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES A EXTRAIRE SUR UN AVIVE .....	173
	ANNEXE 3 : EQUIVALENCE UML/ORM SELON [HALPIN T., 1999].....	174
	ANNEXE 4 : MODELES ONTOLOGIQUES DES QUALITES SCIAGE ET BILLON .....	175

---

ANNEXE 5 : MODELE DE CONNAISSANCE DE LA MATIERE BOIS .....	183
ANNEXE 6 : RESULTATS D'EVALUATION DES SEUILS DE DIAMETRE DE NŒUDS.....	190
ANNEXE 7 : RESULTATS DE DETERMINATION DES SEUILS DE FLACHE.....	192
<b>RESUME.....</b>	<b>196</b>



## Table des illustrations

### Figures

Figure 1-1 : Organisation de la filière Bois.....	11
Figure 1-2 : Processus divergent de la filière Bois et particulièrement en scierie .....	15
Figure 1-3 : Boucle cybernétique d'un système [Le Moigne J.L., 1990].....	16
Figure 1-4 : Architecture générale d'un système de vision .....	18
Figure 1-5 : Spectre des ondes électromagnétiques et acoustiques.....	21
Figure 1-6 : Flux matière et d'information de la scierie Siat-Braun.....	39
Figure 1-7 : Représentation de la grume par le système multi-capteurs .....	45
Figure 1-8 : Flux matière et informationnel du système ROB .....	46
Figure 2-1 : Pyramide DIKW selon [Hey J., 2004].....	53
Figure 2-2 : Définition des termes "Donnée", "Information" et "Connaissance" selon [Grundstein M., 2002].....	53
Figure 2-3 : Commensurabilité des schémas interprétatifs .....	54
Figure 2-4 : Iceberg de Vinck D. [Vinck D., 1997] .....	55
Figure 2-5 : Modèle SECI proposé par [Nonaka I., 2000].....	56
Figure 2-6: Processus généraux de la modélisation selon [Blaise J.C., 2003].....	61
Figure 2-7 : Taxonomie de l'acquisition de connaissance selon [Payne P., 2007].....	63
Figure 2-8 : Approche ascendante (a), approche descendantes (b) et approche mixte (c) selon [Duribeux-Cocquebert M., 2000].....	65
Figure 2-9 : Démarche de construction du modèle conceptuel au travers des concepts de Système Objet et de Système d'Abstraction selon [Blaise J-C., 2003].....	70
Figure 2-10 : Organisation et structure de la méthodologie NIAM-ORM selon [Blaise J-C., 2003].....	72

---

Figure 2-11 : Notions sur le formalisme ORM .....	73
Figure 2-12 : Approche mixte d'acquisition de la connaissance implémentée dans notre étude .....	75
Figure 2-13 : Partie d'un questionnaire et des réponses fournies par un expert qualité Sciage	77
Figure 2-14 : Formalisation d'un modèle de « faits » avec ORM.....	80
Figure 2-15 : Formalisation des contraintes d'unicité et de totalité.....	81
Figure 2-16: Formalisation de la contrainte d'exclusivité .....	81
Figure 2-17 : Modèle générique complété par l'ajout des contraintes.....	82
Figure 2-18 : Transcription du modèle en phrases binaires .....	83
Figure 2-19 : Explication des liens directs, indirects et manquants entre la qualité Billon et la qualité Sciage .....	87
Figure 2-20 : Modèle fonctionnel idéal du système de tri Qualité billon.....	87
Figure 2-21 : Modèle fonctionnel intermédiaire du système de tri Qualité billon .....	89
Figure 2-22 : Extrait du modèle de connaissance de la matière Bois.....	90
Figure 2-23 : Modèle Fonctionnel Enrichi (MFE) du système de tri.....	92
Figure 3-1 : Processus d'intégration des connaissances .....	96
Figure 3-2 : Principe de conception du système d'observation .....	98
Figure 3-3 : Processus de valorisation.....	102
Figure 3-4 : Inclusions des classes Opérateurs.....	103
Figure 3-5 : Démarche de sélection des critères a priori pertinents .....	106
Figure 3-6 : Planches de rive acceptées ou refusées en fonction des nœuds noirs.....	108
Figure 3-7 : Flache résultant du sciage d'un avivé dans un bois rond .....	108
Figure 3-8 : Modèle d'un billon par l'outil de simulation .....	111
Figure 3-9 : Modèle d'un verticille par l'outil de simulation.....	112
Figure 3-10 : Application d'un schéma de sciage sur un Billon Simulé .....	112
Figure 3-11 : Obtention du graphique de l'indice de déclassement.....	114
Figure 3-12 : Représentation des nœuds dans la simulation créée sous Excel© .....	115
Figure 3-13 : Relevé terrain du taux de bois de compression en fonction de l'excentricité et de l'ellipticité.....	118
Figure 3-14 : Critère a priori de détermination du bois net de nœud .....	119
Figure 3-15 : Schéma de sciage dit « en plot » .....	119
Figure 3-16 : Obtention de la représentation d'un billon contenant du bois net de nœud .....	123
Figure 3-17 : Graphique de calcul du critère de bois net de nœud.....	124

---

Figure 3-18 : Illustration de la différence d'expertise entre le domaine de la vision et celui de la scierie.....	125
Figure 3-19 : Résultats du critère TBNN .....	126
Figure 3-20 : Première phase d'analyse du seuil de flache.....	127
Figure 3-21 : Seconde phase d'analyse du seuil de flache.....	130
Figure 3-22 : Description graphique des algorithmes de sélection des critères .....	134

## Tables

Table 1-1 : Synthèse en fonction des caractéristiques à extraire sur un bois rond.....	42
Table 3-1 : Critères issus des modèles de connaissances .....	100
Table 3-2 : Liens entre les groupes de classes E/S/L/E et les classes Opérateur .....	104
Table 3-3 : Critères pertinents du groupe d'emploi « Planches de choix ».....	109
Table 3-4 : Résultats de la méthode réduction des critères .....	110
Table 3-5 : Seuils associés au critère « courbure max Billon » en fonction de l'épaisseur du produit fini et des données techniques .....	116
Table 3-6 : Résultats des calculs pour les seuils du flache.....	117
Table 3-7 : Seuils a priori associés au critère "Bois net de nœud".....	120
Table 3-8 : Premiers critères mesurés par le système d'observation .....	121
Table 3-9 : Résultats d'analyse du flache obtenus dans la première phase .....	129
Table 3-10 : Extrapolation des résultats sur les seuils de flache au reste du groupe.....	130
Table 3-11 : Résultats des méthodes de sélection des critères SFFS et SFBS .....	134



# **INTRODUCTION**

---



## **Introduction**

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été rendus possibles grâce à une collaboration entre le CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) et la scierie Siat-Braun dans le cadre d'une CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche).

Dans la filière Bois, les scieries transforment les arbres issus de la forêt, appelés grumes, en produits finis (planches, poutres, etc...). On distingue deux étapes principales de transformation de la matière en scierie. La première est réalisée par le parc à grumes qui vise à tronçonner les grumes en billons (bois toujours ronds mais de longueur égale à celle du produit fini) puis à les trier par qualité et dimensions similaires réalisant ainsi un premier stock tampon. La seconde est effectuée par la ligne de sciage qui transforme les billons triés en produits finis dont la qualité et les dimensions correspondent aux exigences des clients.

Afin de moderniser son outil de production et de toujours mieux répondre aux exigences de ses clients, la scierie Siat-Braun a investi 25 millions d'euros pour renouveler son parc à grumes. Ce nouveau parc à grumes est équipé d'un système de vision multi-capteurs permettant d'analyser la matière sous différentes formes, et dont l'innovation principale est l'intégration d'un tomographe à rayons X. Il permet une visualisation interne de la matière à une cadence de 120 mètres par minute, 16 heures par jour. Ce projet est une première mondiale et le tomographe acquis par l'entreprise est un prototype encore en cours de développement et d'amélioration.

L'objectif des travaux de thèse est de concevoir, de paramétrer puis de tester le système de tri Qualité implémenté sur le parc à grumes en collaboration avec le fournisseur du tomographe. Les travaux se focalisent sur la Qualité permettant que le tri des billons soit en accord avec la Qualité des produits finis vendus par la scierie Siat-Braun.

La **section 1** du mémoire positionne notre projet en décrivant la filière bois et les contraintes auxquelles elle est confrontée. Un état de l'art sur les systèmes de vision est réalisé et permet de constater leur utilisation de plus en plus courante dans les industries du Bois et, plus particulièrement, en scierie. Cet état de l'art permet également d'affiner les objectifs de la thèse vis-à-vis des informations que les systèmes de vision sont capables de fournir. Cette section se poursuit en décrivant les contraintes industrielles de notre partenaire et les raisons qui ont motivé son investissement. Le système de vision propre à notre étude est finalement présenté.

Un système de vision est un processus d'observation dont la conception et le paramétrage dépend essentiellement du *produit* analysé, de son *environnement* et des *objectifs* visés [Rodd M.G., 1989 ; Schmitt E., 2007a]. La spécification du système peut être obtenue par l'exploitation des données issues du capteur, mais également par l'intégration des connaissances Métiers relatives au triplet *produit - environnement - objectifs*. Or, dans la phase de conception du système, la partie « Données » est absente, ainsi nous avons exploité les connaissances Métiers dans les premiers temps de notre projet.

La **section 2** présente le processus de modélisation permettant de structurer, de formaliser puis d'enrichir les connaissances de l'entreprise liées à la qualité du bois. Pour cela, un état de l'art sur la connaissance au sens large puis focalisé sur la modélisation de connaissance nous a conduit à utiliser et à appliquer la méthode NIAM-ORM.

L'application de cette méthode permet de modéliser la Qualité en cours au parc à grumes et celle appliquée sur la ligne de sciage, respectivement appelées Qualité Billon et Qualité Sciage. L'analyse des liens entre les deux qualités permet, par la suite, d'obtenir par déduction les relations manquantes que l'instrumentation du nouveau parc à grumes doit chercher à compenser. L'analyse permet également de définir le modèle fonctionnel idéal (théorique) du parc à grumes. Toujours en exploitant les connaissances, les travaux suivants veulent rendre le modèle fonctionnel plus proche de la réalité en l'enrichissant par les contraintes de l'intégrateur (fournisseur du tomographe) et celles liées à la matière « bois ». Le modèle fonctionnel enrichi, qui sert de base à la conception et au paramétrage du système de tri qualité Billon du parc à grumes, est au final présenté.

La **section 3** expose les résultats obtenus à travers des exemples concrets. On distingue les résultats obtenus dans la phase de conception basée sur l'utilisation des connaissances modélisées et ceux obtenus dans la phase d'exploitation couplant l'exploitation des modèles de connaissances et les données obtenues une fois le système de vision opérationnel.

En effet, les modèles de connaissances sont tout d'abord utilisés pour définir l'architecture et les fonctionnalités du système d'aide au tri Qualité puis à son paramétrage initial. Il s'agit de la détermination des critères de qualité à mesurer sur les bois ronds, puis de l'évaluation de leurs valeurs limites associées pour définir les classes de Qualité. Le paramétrage initial est validé dans la phase d'exploitation. Les conclusions de ces tests enrichissent le modèle fonctionnel, puis sont intégrées au système opérationnel permettant son amélioration itérative. Cette section se conclut par des propositions évaluées hors production afin d'améliorer les performances globales du système.

Enfin, la **conclusion** synthétise les apports de nos travaux et des décisions qu'ils ont permis de prendre afin de paramétrer le système de tri avant sa mise en fonctionnement. Les travaux de validation de ce paramétrage initial sont discutés et ouvrent sur les **perspectives** à leur donner. Elles concernent la mise en œuvre d'autres tests d'évaluation du système de tri et des améliorations possibles. Une vision élargie de nos travaux à différents domaines est également proposée.



# CHAPITRE 1 : POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIEL DU PROJET

---

1.1	FILIERE BOIS FRANÇAISE.....	10
1.1.1	Organisation usuelle de la filière .....	10
1.1.2	Spécificités de la filière Bois française.....	12
1.1.3	Contexte particulier des scieries.....	14
1.2	SYSTEMES DE VISION DANS LES SCIERIES .....	16
1.2.1	Système de vision vu comme un élément du système d'observation .....	16
1.2.2	Architecture générale d'un système de vision .....	18
1.2.3	Etapés spécifiques aux systèmes de vision Bois en scierie.....	19
1.3	CONTROLE DES PRODUITS FINIS APRES SCIAGE.....	24
1.3.1	Contrôle dimensionnel d'un produit fini.....	24
1.3.2	Classement esthétique d'un produit fini.....	24
1.3.3	Détermination de la résistance mécanique d'un produit fini.....	27
1.3.4	Classement structurel d'un produit fini .....	29
1.4	CONTROLE DES BOIS RONDS EN ENTREE DE SCIERIE.....	30
1.4.1	Fonctionnement des systèmes dédiés au bois rond.....	31
1.4.2	Contrôle dimensionnel du bois rond.....	32
1.4.3	Tri du bois rond en vue d'un classement esthétique .....	32
1.4.4	Détermination de la résistance mécanique du bois rond.....	33
1.4.5	Tri du bois rond en vue d'un classement structurel.....	33
1.5	PARC A GRUMES DE NOTRE PARTENAIRE INDUSTRIEL SIAT-BRAUN .....	36
1.5.1	Contexte particulier de la scierie Siat -Braun.....	37
1.5.2	Caractéristiques du bois à extraire et systèmes de vision adaptés.....	41
1.5.3	Système de vision choisi par Siat-Braun pour le parc à grumes.....	44



# **1 Positionnement scientifique et industriel du projet**

Le matériau Bois accompagne l'homme depuis plusieurs siècles, de la découverte du feu à notre ère. La maîtrise du feu a tout d'abord permis à l'Homme de se chauffer, de repousser les prédateurs, de s'éclairer, de cuisiner, mais aussi de conserver les aliments sous forme déshydratée ou fumée. Ainsi, une vraie activité est née autour de la collecte du bois. Puis est venu le temps de la fonte, des métaux et celui du verre où le bois était toujours utilisé pour chauffer ces matériaux et les travailler. La simple collecte du bois dans les forêts naturelles laisse place à un véritable aménagement du territoire afin de subvenir aux besoins en combustible. La découverte du pétrole réduisit fortement cette utilisation et le bois est dès lors utilisé majoritairement dans la construction ou l'ameublement entre autres matériaux. Le bois connaît aujourd'hui un renouveau, on constate depuis plusieurs années un regain d'intérêt pour cette matière naturelle aux propriétés environnementales, esthétiques et mécaniques intéressantes.

La section 1.1 situe la filière Bois au niveau européen puis au niveau national et s'attarde plus particulièrement sur le cas des scieries. L'objectif est d'introduire les contraintes auxquelles ces dernières sont soumises, notamment en terme de qualité ou de satisfaction client, et ainsi d'introduire l'utilisation des systèmes de vision comme outils de contrôle qualité non destructifs. La section 1.2 présente l'architecture générale des systèmes de vision adaptés au domaine du bois. Ensuite, les sections 1.3 et 1.4 proposent deux états de l'art sur les systèmes de vision dédiés aux scieries respectivement sur les produits finis (aussi appelés « sciage ») et sur les bois ronds. Enfin, la section 1.5 détaille le système acquis par la scierie Siat-Braun.

## 1.1 Filière Bois française

Le matériau Bois est de plus en plus sollicité dans des usages quotidiens tels que la construction, l'ameublement, le parement, l'emballage, la tonnellerie ou encore le papier. Des décisions gouvernementales sont mêmes prises afin de valoriser ce matériau [Décret 2010-273 ; Grenelle, 2010 ; PrioriTerre]. La France l'utilise de plus en plus dans les constructions publiques [Théâtre Jean-Claude Carrière (Montpellier), Centre Pompidou (Metz), Cabane aux Loisirs (Magnanville), Le Channel (Calais)], mais aussi dans les constructions individuelles privées. La filière Bois française est actuellement en pleine mutation comme ce fut le cas de l'industrie automobile il y a plusieurs décennies.

Afin de comprendre ces mutations, la section 1.1.1 présente l'organisation usuelle de la filière française, puis la section 1.1.2 se concentre sur ses spécificités et la section 1.1.3 se focalise sur le cas particulier des scieries.

### 1.1.1 Organisation usuelle de la filière

L'organisation de cette filière Bois est classiquement divisée en plusieurs domaines qui sont la gestion forestière, les industries de la première transformation, celles de la seconde transformation puis la mise en œuvre (consommation). Le négoce et la distribution permettent de lier ces domaines à l'international. La Figure 1-1 schématise l'organisation de cette filière.

La **gestion forestière** est le premier maillon de cette chaîne. Elle mène une politique d'aménagement des espaces forestiers qui comprend le choix, le mode de culture des arbres jusqu'à leur abattage, le débardage en bord de route, puis la livraison chez l'acheteur. Une partie de ce niveau est dédiée à la transformation des bois de petits diamètres ou du houpier (partie haute de l'arbre) en plaquettes forestières pour les industries de la pâte à papier ou des panneaux de particules (trituration). L'aménagement d'une forêt prend en compte l'accessibilité du terrain, la richesse du sol et les besoins des industries à proximité. La gestion forestière est une véritable science nécessitant des connaissances de la ressource face à son environnement, mais également ses utilisations potentielles. Ce niveau voit ainsi collaborer ingénieurs forestiers, propriétaires des parcelles, bucherons, débardeurs et transporteurs grumiers. Quelle que soit la nature de la ressource (bois de résineux ou de feuillus), la gestion forestière travaille sur des périodes longues, car il faut des dizaines

d'années de travail avant la première récolte d'une parcelle. De fait, elle doit aussi songer à l'avenir en préservant l'écosystème forestier afin qu'il se régénère.

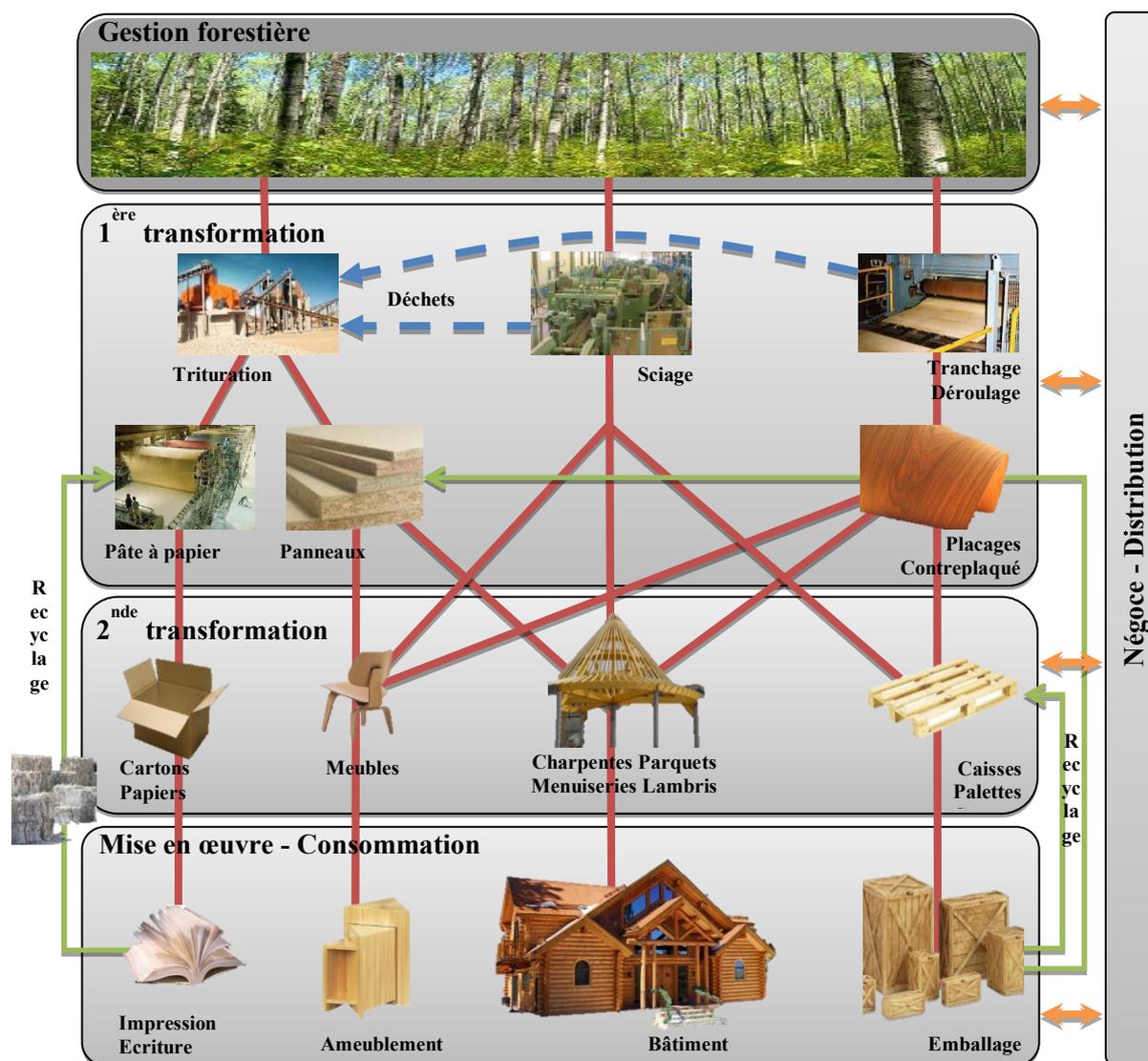


Figure 1-1 : Organisation de la filière Bois

Les **industries de la première transformation** sont principalement des industries lourdes dont la rentabilité est fragile. On y trouve notamment les scieries, l'industrie du bois tranché/déroulé ou celle de la trituration. Les deux premières utilisent des bois ronds en entrée du processus afin de fournir respectivement des avivés (bois de section rectangulaire de plus de dix millimètres d'épaisseur) ou des feuilles de bois (de quelques millimètres d'épaisseur). Les industries de la trituration utilisent les plaquettes et rondins (reste des coupes) issues de la

forêt, mais aussi tous les déchets des autres industries (de la première transformation à la consommation sous forme de sciure ou de plaquettes).

Les produits issus de la première transformation sont utilisés par les **industries de la seconde transformation** afin de leur donner un usage particulier. On trouve dans ce domaine les industries du bois abouté, du lamellé-collé, celles de l'emballage, mais encore celle de l'ameublement, des menuiseries, de la tonnellerie ou encore du carton. L'industrie du papier est elle aussi une industrie lourde nécessitant de gros moyens de production, mais les autres sont généralement organisées sous formes d'ateliers de production permettant une flexibilité dans la planification des tâches, mais dont l'organisation des flux est bien plus complexe. Depuis quelques années, on constate également une augmentation des industries de fabrication de pellets, quelquefois associées à la fabrication d'électricité et de chauffage (cogénération).

Le **négoce et la distribution** sont spécialisés dans la revente des bois. Les premiers sont des courtiers en bois et travaillent sur des marchés dont les bois sont généralement destinés à l'exportation. L'essentielle de la distribution est aujourd'hui réalisée par des grandes enseignes dites des Grandes Surfaces du Bâtiment (GSB) qui vendent aux particuliers comme aux professionnels.

La **mise en œuvre et la consommation** regroupent tous les corps de métier spécialisés ou non dans le domaine utilisant les produits bois dans leur état final. Il est possible de citer les constructeurs de maisons ossature bois, les métiers de l'agencement, les créateurs-artistes.

### 1.1.2 Spécificités de la filière Bois française

Le territoire français est depuis plusieurs siècles géré de manière durable (construction navale lors de la colonisation ou des guerres, bois de construction pour le développement des villes moyenâgeuses, etc.). Le savoir-faire des industries de la seconde transformation (meubles ou parqueterie tels que les meubles Louis XV ou les parquets de Versailles) est mondialement reconnu.

L'ensemble des métiers de la filière Bois française représente aujourd'hui plus de 550 000 emplois pour plus de 100 000 entreprises. En 2011, la France métropolitaine compte un espace boisé de 16,3 millions d'hectares soit près de 30% de sa superficie. Dans les départements d'Outre-Mer, on atteint des taux de 39% en Guadeloupe, 46% en Martinique,

53% à La Réunion ou encore 96% en Guyane. La diversité géographique des territoires cultivés propose aux industries plusieurs essences et donc plusieurs débouchés pour les produits.

Les forêts françaises sont principalement constituées d'arbres de différentes essences, feuillus et résineux sur les mêmes parcelles [IFN, 2013]. Ceci permet une gestion durable des forêts et des écosystèmes environnants. Le rôle du gestionnaire forestier est de sélectionner les arbres les plus prometteurs, puis de dégager les alentours par des éclaircies et des coupes afin que l'arbre sélectionné ait les meilleures conditions de croissance. Cette sylviculture, mais aussi la topographie des sols, entraînent une forte hétérogénéité dans les arbres issus des forêts françaises.

Les arbres sont hétérogènes en diamètre, en longueur, mais également de par la constitution de la matière elle-même. En effet, le bois est une matière vivante hétérogène de par son patrimoine génétique (d'une essence à l'autre ou d'une origine à l'autre), sa situation géographique de sylviculture, sa situation stationnelle (sol et ensoleillement de l'arbre) et la zone de l'arbre considérée (de la bille de pied au houppier). A cette hétérogénéité naturelle s'ajoute les facteurs environnementaux (attaques d'insectes, tempêtes, attaques fongiques ou dégâts de gibier) qui affectent le comportement de l'arbre, sa structure et donc la qualité des différents produits pouvant en être issus.

Le gestionnaire forestier décide de la revente qu'il fait par lot de bois ronds *en bord de route* ou *sur pied*. Lors de la revente en bord de route, il décide du conditionnement des bois ronds en fonction des conditions d'abattage et de débardage (terrain, qualité du bois, etc.) : on parle de **grume** si le bois est seulement ébranché mais laissé à sa longueur naturelle (dans un maximum de dix-sept mètres pour être transportés sur les routes) ou de **billon de forêt** si le bois est débité à longueurs standards métriques. Le débit en billon facilite l'extraction des bois de la forêt jusqu'à la route, et minimise le coût de transport car les camions grumiers ont un taux de remplissage plus important. Les marchés locaux expliquent aussi la préférence des acheteurs pour les billons. Les pays où le séchage du bois est systématique peuvent ensuite abouter les bois pour obtenir des produits finis de grande longueur. De plus, le débit par les bûcherons tient peu compte de l'aspect qualitatif des bois car chaque scierie a des clients, des stratégies et des modes de production différents et donc, valorise différemment la matière. Les grumes sont, quant à elles, plus difficiles à débarder et plus chères à transporter, mais elles permettent aux acheteurs de la première transformation de valoriser le tronçonnage de la grume en billons en fonction de la qualité et de la longueur des produits qu'ils fabriquent.

Ceci permet un gain pour l'acheteur qui utilise au mieux sa matière au regard de sa propre production. Les scieries françaises utilisent énormément ce mode d'achat car le marché français ne nécessite pas le séchage des bois (utilisation historique en charpente contrairement à l'utilisation en ossature dans d'autres pays). Elles développent donc des stratégies fortement tournées vers la valorisation qualitative des grumes tout en conservant une valorisation quantitative optimale.

### 1.1.3 Contexte particulier des scieries

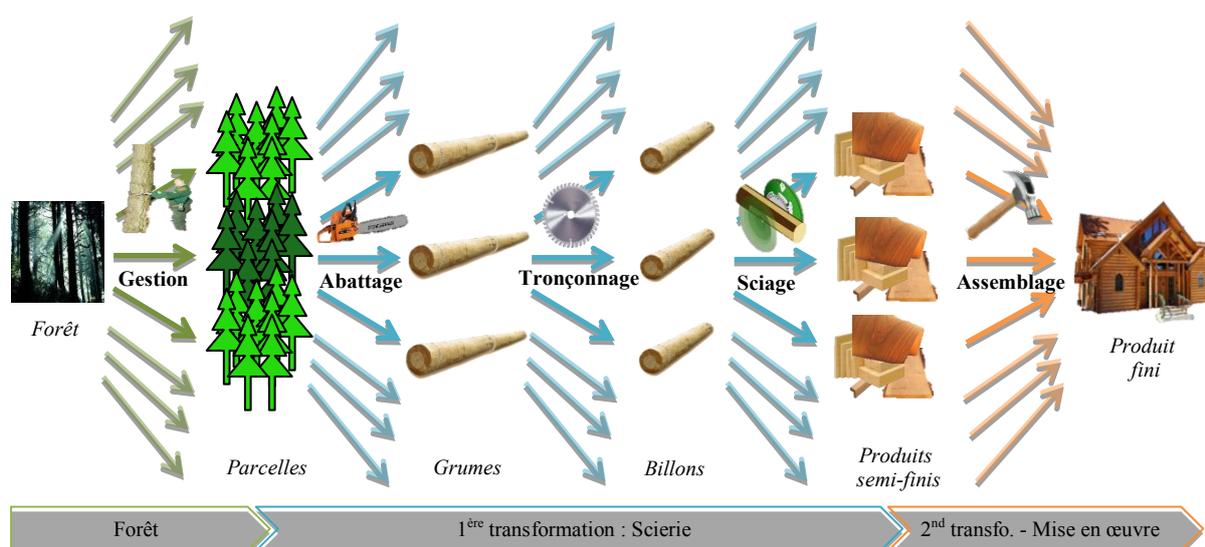
Pour valoriser au mieux la matière, on distingue différentes filières : le fendage/Déroutage et les scieries (Ruban ou Canter). Les unités dédiées au fendage/déroutage produisent des feuilles de parements de quelques centimètres de large (fendage) pour l'ébénisterie ou des feuilles de bois de plusieurs mètres (déroutage) pour les panneaux contreplaqués. Cette transformation nécessite une bonne estimation de la qualité interne du billon qui est débité.

La scierie Ruban est l'organisation la plus ancienne. Il s'agit d'un outil aux cadences relativement lentes (environ 1000 m<sup>3</sup> par semaine) mais extrêmement flexible permettant de débiter différentes sections d'avivés dans un même billon. Ces produits sont généralement destinés à la construction. Les scieries ruban débitent généralement des bois de feuillus car la flexibilité de l'outil est un atout pour traiter l'hétérogénéité de ces bois. Néanmoins, certaines portent sur des bois de résineux dans le cas de sections particulières non standardisées ou de débits sur liste (demande spéciale du client).

Pour les sections d'avivés couramment utilisées dans la construction, les scieries Canter sont les plus adaptées. Ce sont des industries lourdes dont la production peut atteindre aisément 10 000 m<sup>3</sup> par semaine mais dont la flexibilité est réduite. En effet, les scieries canter sont rythmées par des campagnes de sciages de plusieurs heures durant lesquelles des billons aux caractéristiques similaires sont sciés afin d'obtenir les mêmes produits finis, définis par le même schéma de sciage. Le marché du bois de résineux répond le mieux à un tel sciage car les feuillus sont valorisés différemment d'un billon à l'autre.

De la description de ces modes de production résultent les quatre objectifs principaux des scieries. Le premier objectif est d'avoir un approvisionnement adapté aux produits que la scierie vend à ses clients, autant sur le plan financier que sur le plan qualitatif. Pour cela, elle

doit être en mesure de suivre et connaître les origines de son approvisionnement afin d'évaluer les peuplements qui lui permettent de répondre aux exigences de ses clients. Ceci introduit la problématique de la traçabilité des bois, de son origine en forêt à sa valorisation en scierie jusqu'à son client final. Cette problématique donne lieu à une multitude de projets académiques ou industriels tels que Linset [Nicosia S., 2002], The Indisputable Key [Pischeda D., 2007] ou encore des recherches novatrices sur le marquage dans la masse [Jover J., 2011]. Les problématiques principales résident dans le fait que la filière bois est un processus de transformation divergent comme le montre la Figure 1-2 où un zoom sur l'activité des scieries est réalisé. Les divergences apparaissent lors de la gestion des parcelles de forêt, lors de l'abattage d'une parcelle donnant plusieurs grumes, lors du tronçonnage de la grume en billons et lors du débit des billons en produits semi-finis (sciages, feuilles, moulures, plateaux). Un processus convergent apparaît dans l'ameublement ou la construction lors de l'assemblage de plusieurs pièces de bois pour la réalisation de produits finis.



**Figure 1-2 : Processus divergent de la filière Bois et particulièrement en scierie**

Le second objectif est interne à la scierie et consiste à déterminer le bon billon pour le bon produit. C'est classiquement le rôle d'un parc à grumes pour les scieries équipées d'une ligne canter ou du scieur de tête d'une ligne ruban. L'objectif visé est l'amélioration du rendement matière et du taux déclassement (le pourcentage de produits vendus dans une qualité différente de celle prévue avant le débit du billon).

Le troisième objectif est de maximiser le taux d'occupation de sa ligne de sciage (poste goulot) grâce à un approvisionnement régulier en bois ronds.

Le dernier objectif est de maximiser la satisfaction client à travers le produit lui-même (exigences qualitatives et dimensionnelles), à travers le service client (livraison, service commercial, etc.) et de plus en plus, à travers la justification de l'origine de ses produits.

Ces quatre objectifs nécessitent l'implantation de points de contrôle Qualité non destructifs associés à des instruments de mesure de plus en plus sophistiqués. Ainsi, les scieries investissent dans des systèmes de vision qui sont capables de transformer un flux matière en un flux informationnel associé durant tout ou partie du processus de transformation. Les informations numériques peuvent ensuite être traitées par des systèmes informatiques permettant des gains en termes de précision, de répétabilité et de productivité.

## 1.2 Systèmes de vision dans les scieries

Cette section a pour objectif de présenter les systèmes de vision adaptés ou spécifiquement développés pour le domaine du bois. La section 1.2.1 définit les entités principales d'un système de vision puis la section 1.2.2 décrit son architecture générale. La section 1.2.3 se focalise sur la description des éléments de l'architecture qui sont spécifiques au domaine du bois.

### 1.2.1 Système de vision vu comme un élément du système d'observation

Les **systèmes d'observation** peuvent être vus selon l'approche systémique comme un opérateur de nature, transformant un flux matière (procédé) en un flux d'information [Le Moigne J.L., 1990]. Ce flux d'information est ensuite traité (analysé) afin de mettre en place des actions agissant de nouveau sur le flux matière comme le montre la Figure 1-3, participant ainsi à la boucle de rétroaction ou boucle cybernétique.

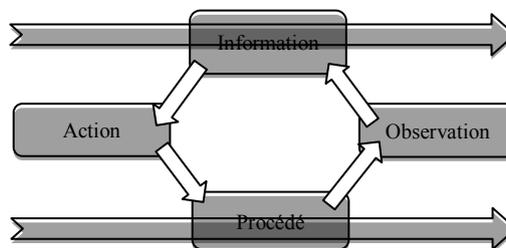


Figure 1-3 : Boucle cybernétique d'un système [Le Moigne J.L., 1990]

Le système de vision peut être considéré comme un sous-ensemble du système d'observation dont le but est d'obtenir une image. Il est défini selon trois entités : le Produit à observer, l'Information cherchée et l'Environnement du système [Rodd M.G., 1989 ; Schmitt E., 2007a]. Le **produit** à observer en scierie est la matière Bois. Ce produit est marqué durant sa constitution (croissance) par des événements et des processus qui perturbent sa structure. Ces « défauts » ont des origines anatomiques ou naturelles, on parle alors de singularités ou d'altérations du bois, ou sont issus des aléas lors du processus de transformation. Les normes descriptives EN NF 844-7, 844-8 et 844-9 en définissent plus d'une trentaine. Au-delà de ses caractéristiques intrinsèques, le bois réagit également aux conditions extérieures. En effet, une scierie est approvisionnée en bois humides voire gelés durant l'hiver, ou plus généralement, que les dimensions de la pièce changent en fonction de son hygrométrie. Le système de vision doit donc être adapté à l'analyse du produit Bois en fonction de l'essence, des défauts à percevoir et de leur variabilité.

L'étude préliminaire faite par Hodges D.G. en 1990 [Hodges D.G., 1990] estime que l'utilisation d'un système de vision est toujours rentable à condition que le choix du capteur soit adapté aux **objectifs** à atteindre. D'une façon plus générale, nous pensons que c'est toute la chaîne de traitements d'images qui doit être adaptée aux Objectifs à atteindre. Que ce soit, par exemple, pour le tri couleur à forte cadence d'avivés [Bombardier V., 2009] ou la valorisation du tronçonnage d'une grume en fonction de ses propriétés internes [Giudiceandrea F., 2011], le monde de la scierie n'échappe pas à cette règle. Dans l'**environnement** des scieries, les systèmes de vision doivent faire face à un milieu hostile avec de la poussière, de fortes vibrations et éventuellement des débris de matière. L'intégration physique (position dans la chaîne de production) doit également être considérée. Les scieries sont principalement des industries de process ayant nécessité une organisation du flux adaptée, dans lesquelles les nouveaux systèmes de vision viennent s'insérer. Dans le cas d'installations neuves, la position du système dans le flux doit être envisagée dès la conception afin d'en optimiser les performances.

L'utilisation de systèmes de vision se justifie toujours par l'amélioration de la précision, des cadences et/ou de la répétabilité, mais aussi, plus récemment, par l'accès à des informations internes sur la matière. De manière quantitative, [Buehlmann U., 2002] évalue l'erreur faite par l'homme dans un tri de produits finis et la rapporte aux gains potentiels permis par l'utilisation d'un système de vision. Cette étude montre qu'un opérateur humain

est précis à 68% en moyenne et que, dès lors, un système de vision a seulement besoin d'être précis à plus de 68% pour remplacer ou aider les hommes dans leurs décisions.

Un système de vision ne peut être conçu qu'en connaissant le Produit à observer, son Environnement et les spécificités des Objectifs à atteindre. Néanmoins, il possède une structure générale indépendante de ces 3 entités.

### 1.2.2 Architecture générale d'un système de vision

La chaîne de traitement d'un système de vision, présentée dans la Figure 1-4 se décompose classiquement en deux avec les traitements de « bas niveau » et les traitements de « haut niveau ».

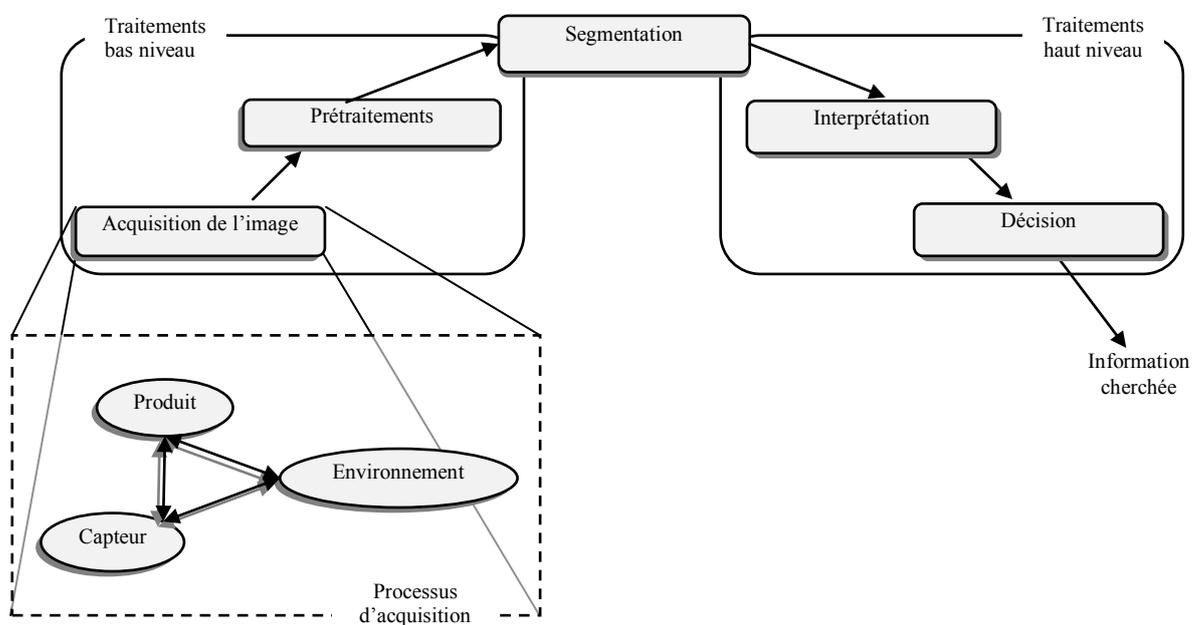


Figure 1-4 : Architecture générale d'un système de vision

L'acquisition d'image est réalisée par un capteur dont l'objectif est de fournir une représentation numérique d'un produit physique grâce à l'analyse d'ondes particulières. La représentation fournie par le capteur n'est pas exploitable directement. Elle est souvent dégradée soit directement par le capteur utilisé, soit par l'environnement du capteur. Ces imperfections sont filtrées lors des *prétraitements*. La plupart du temps, il s'agit d'opération de restauration (filtrage du bruit), d'améliorations (renforcement des contrastes, suppression des distorsions), ou de compression (en vue d'un stockage ou d'un transfert). L'objectif

principal de ces actions est de fournir des informations exploitables pour les traitements suivants. Les techniques employées sont décrites dans l'ouvrage de référence de Gonzalez [Gonzalez R.C., 2002].

La *segmentation* est une étape clé car elle permet de passer du domaine de l'image aux autres domaines nécessaires à la phase d'interprétation. La transition réalisée explique la position charnière de l'étape entre le « bas niveau » et le « haut niveau ». L'objectif de la segmentation est de partitionner l'image en domaines indépendants puis de les décrire par des caractéristiques chiffrées (niveau de gris, valeur RGB (Red Green Blue) de la couleur, surface, etc.) dans le cas d'une représentation dans un espace paramétrique par exemple.

Les étapes d'*interprétation* et de *décision* extraient et fournissent l'information cherchée. L'interprétation correspond à la sélection et au calcul de paramètres pertinents en fonction de l'Objectif, mais aussi, de la méthode de décision retenue. La méthode de décision traite les données fournies par l'interprétation afin de délivrer l'information recherchée sous la forme adéquate. Les méthodes de décision ont un rôle primordial et agissent directement sur les performances globales du système car elles peuvent palier aux manques du capteur ou à l'inverse être inadaptées aux hautes performances du capteur. De fait, une vraie réflexion liant le capteur à la méthode de décision doit être menée lors de la conception du système afin d'optimiser les performances [Clouard R., 2010].

### 1.2.3 Etapes spécifiques aux systèmes de vision Bois en scierie

Le bois, qui est un matériau organique, possède des propriétés entrant en interaction avec les ondes. Il existe plusieurs *capteurs* permettant de l'analyser. Cependant, ce matériau possède une variabilité intrinsèque importante qui doit être prise en compte par le système de vision, et notamment par la *segmentation*. La multitude de défauts que peut contenir le bois est également une difficulté face à laquelle les méthodes de *décision* doivent être robustes. Nous détaillons les spécificités de ces trois points pour le domaine du bois.

Le **capteur** est un élément physique sensible à une ou plusieurs caractéristiques ondulatoires. On distingue deux types d'onde : les ondes électromagnétiques et les ondes

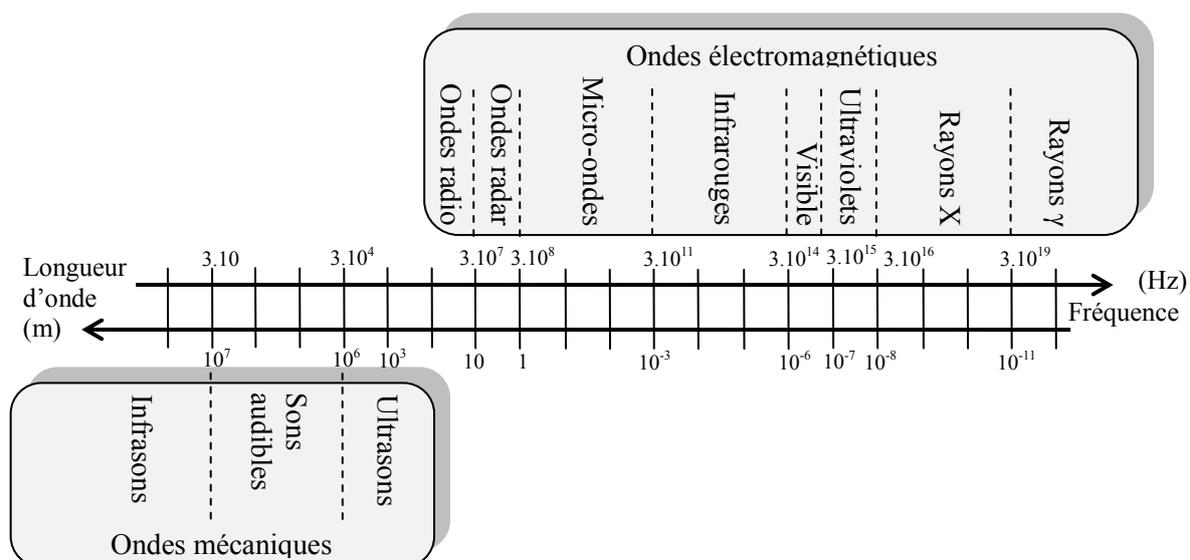
mécaniques. Les ondes mécaniques nécessitent un support pour leur propagation alors que les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide.

Lorsque l'onde interagit avec le bois, le capteur mesure un comportement différent de l'onde en fonction des composants de la matière. Le principe d'un capteur est de générer une de ces ondes, de la faire entrer en interaction avec la matière puis de capter l'onde retournée pour obtenir une « image », au sens large, de la matière.

Plus la longueur d'onde est courte plus l'onde a un pouvoir pénétrant, et plus elle est capable de fournir des informations internes à la matière. Comme le montre la Figure 1-5, le spectre des ondes mécaniques est divisé en trois domaines que sont les infrasons, les sons audibles et les ultrasons. Le spectre des ondes électromagnétiques est quant à lui divisé en huit domaines que sont les ondes-radio, les ondes radar, les micro-ondes, les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets, les rayons X et les rayons Gamma. En fonction du domaine et du capteur, les données fournies, appelées « images », peuvent avoir différentes formes, comme un signal (monodimensionnel ou multi-spectral), une cartographie en deux ou trois dimensions (nommée couramment image 2D ou image 3D) ou une séquence d'images (3D+T).

Les systèmes émettant un signal corrélient directement une caractéristique monodimensionnelle de l'onde avec une propriété de la matière. Ce premier groupe est constitué des capteurs de vibrations mécaniques « hautes », acoustiques (audibles) et à ultrasons qui sont sensibles à des ondes mécaniques dont les fréquences sont respectivement comprise entre 20 et 50 Hz, 20 et  $20 \cdot 10^3$  Hz, et, supérieure à  $20 \cdot 10^3$  Hz. D'autres capteurs de cette catégorie utilisent les ondes électromagnétiques telles que les micro-ondes comprises entre  $3 \cdot 10^8$  et  $3 \cdot 10^{11}$  Hz (en longueur d'onde : entre 1 mm et 1 m), les ondes radars situées entre  $3 \cdot 10^7$  et  $3 \cdot 10^8$  Hz qui sont celles des Ground Penetrating Radar (GPR) ou, les radiofréquences inférieures à  $3 \cdot 10^7$  Hz.

Les autres systèmes nécessitent plusieurs corrélations pour obtenir une cartographie multidimensionnelle de la matière. Dans ce second groupe, se trouvent les capteurs à rayons X (entre  $3 \cdot 10^6$  et  $3 \cdot 10^9$  Hz), les caméras (longueurs d'onde entre 380 et 780 nm, soit entre  $3 \cdot 10^{14}$  et  $3 \cdot 10^{15}$  Hz) et les capteurs infrarouges lointains (entre 100 et 500  $\mu\text{m}$ , soit  $3 \cdot 10^{11}$  et  $3 \cdot 10^{12}$  Hz). Les capteurs micro-ondes peuvent aussi être placés dans ce groupe car des recherches visent à développer l'imagerie par micro-ondes.



**Figure 1-5 : Spectre des ondes électromagnétiques et acoustiques**

Les problématiques associées à la **segmentation** de manière générale sont posées avec l'étude de [Riseman E., 1977]. Le but de la segmentation est de transformer l'espace « Image » en un autre espace utilisable par la phase d'Interprétation. Ces espaces peuvent être une chaîne de caractères, une image ou un vecteur caractéristique. Une revue des méthodes de segmentation est faite par Munoz X. en 2003 [Munoz X., 2003] qui en recense plus d'une centaine à travers deux familles : les approches « contours » basées sur la recherche de transition, la discontinuité, et les approches « régions » basées sur la recherche d'homogénéité, de similarité.

Ces deux approches possèdent chacune leurs avantages et leurs inconvénients : les approches « contours » sont sensibles au bruit et peuvent définir des « contours » de petite taille (peu de pixels), alors que les approches « régions » nécessitent un large voisinage de pixels pour obtenir suffisamment d'informations. La combinaison des deux approches peut être une solution pour limiter les inconvénients de chacune. Malgré la quantité de méthodes existantes, Ruz G.A. explique en 2005 que la segmentation d'image Bois est une des étapes du traitement qui prend le plus de temps et dont les résultats sont les moins satisfaisants [Ruz G.A., 2005]. Ceci se confirme par le peu d'études dédiées à la segmentation d'un produit « bois ». L'étude de Funck J.W. [Funck J.W., 2003] fait partie des rares références dans le domaine. Elle met en compétition plusieurs méthodes de segmentation pour la mise en

évidence de plusieurs défauts dans le domaine du bois. Elle a permis plusieurs conclusions et généralités qu'il faut prendre en compte lors de la segmentation dont les principales sont :

- il n'y a pas d'algorithme adapté pour toutes les situations rencontrées dans le domaine du bois, *a fortiori* en scierie,
- les zones de défauts dans le bois représentent entre 10 et 20 % de l'image,
- les zones de défauts ont un faible contraste avec le fond de l'image,
- le fond des images est souvent bruité,
- toutes les méthodes demandent un jeu de paramètres pertinents et adaptés et,
- les différentes mesures telles que les fausses-positives ou fausses-négatives doivent avoir un poids dans le choix de la méthode.

L'étape de **décision** doit fournir l'information recherchée en fonction de l'Objectif. Dans les systèmes de vision, la décision fait souvent référence au domaine de la reconnaissance de formes (RdF), mais les méthodes employées conviennent pour d'autres objectifs. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette étape. Elles portent des noms différents en fonction de l'information qu'elles fournissent au final : méthodes de classification, de reconnaissance, de comparaison, d'identification, etc. [Newman T. S., 1995] propose une distinction des approches en trois catégories : la comparaison directe, la reconnaissance structurelle et la reconnaissance globale. La reconnaissance globale est la plus utilisée dans les recherches actuelles.

Les méthodes basées sur les réseaux de neurones sont les plus répandues car elles sont simples et facilement adaptables à la plupart des cas applicatifs. C'est pourquoi, c'est une des premières méthodes appliquées au bois et, qui a subi le plus d'améliorations au cours des années. Les algorithmes sont désormais capables d'apprendre à tout instant, on les appelle des systèmes « On-line » ou « Incrémental » [Ramírez Alonso G. M., 2005]. Dernièrement, [Yu G., 2010] compare deux algorithmes issus de cette méthode : les MLP (MultiLayer Perceptron) et les PNN (Probabilistic Neural Network). Les résultats de classification sont satisfaisants dans les deux cas allant de 68,8% à 100% pour les MLP et de 81,3% à 100% pour les PNN.

Les méthodes statistiques (ou paramétriques), utilisées pour la reconnaissance de formes, se développent sur le produit « bois ». [Cavalin P., 2006] compare un algorithme de type SVM (Support Vector Machine) et un de type Réseau de Neurones pour la détection de défauts sans identification. Dans ce cas et avec des critères pertinents, SVM donne de meilleurs résultats. Néanmoins, ces méthodes restent également contraintes par le nombre d'échantillons nécessaires à la construction du modèle paramétrique. Les méthodes intégrant la connaissance des experts du bois peuvent aussi s'affranchir des échantillons d'apprentissage. Ainsi, [Andreu J.P., 2003] utilise une décision par seuillage dans laquelle les seuils sont fixés par les experts de manière empirique.

Des méthodes cumulent les gains d'un système supervisé (sans que le nombre d'échantillons devienne une contrainte) et les gains de l'intégration de la connaissance experte (avec un système interprétable). [Mazaud C., 2006] et [Bombardier V., 2010] travaillent sur la classification couleur d'avivés en bois par l'intermédiaire de règles linguistiques floues.

Finalement, chaque méthode nécessite d'être paramétrée pour fonctionner correctement. Le paramétrage pertinent de chaque méthode requiert un expert ayant une bonne connaissance de la méthode en question. La liste des méthodes présentées n'est pas exhaustive, mais cible les méthodes dans lesquelles des progrès récents ont été fait pour un produit « bois ». Une étude bibliographique plus large est proposée à l'Annexe 1.

Les systèmes de vision dédiés au bois ont ainsi une architecture courante mais nécessitent des outils spécifiques pour être mis en œuvre. L'Environnement de notre étude étant celui des scieries, nous proposons dans les deux sections suivantes de définir les systèmes de vision à travers leurs performances en fonction des principaux états du Produit en scierie et en fonction des Objectifs de l'analyse. On distingue deux états principaux du bois en scierie : le bois rond et le produit fini. Le bois rond est soit une grume issue de forêt soit un billon. Le produit fini, quant à lui, est généralement un avivé (appelé indifféremment « sciage »), mais il peut aussi être une feuille de bois.

## 1.3 Contrôle des produits finis après sciage

Bien que notre thèse ait pour but la conception d'un système de tri Qualité déployé sur un parc à grumes, il est nécessaire de faire un état de l'art sur les systèmes de vision dédiés aux produits finis (sur la ligne de sciage) car les deux entités de production ne sont pas totalement indépendantes. Ainsi, cette section présente un état de l'art sur les systèmes de vision dédiés aux produits finis selon quatre Objectifs d'analyse des scieries inspiré du travail de [Malamas E.N., 2003]:

- le contrôle dimensionnel (section 1.3.1);
- le classement esthétique (section 1.3.2);
- la détermination de la résistance mécanique (section 1.3.3) et;
- le classement structurel (section 1.3.4).

Pour aborder les systèmes de vision de manière structurée en fonction des objectifs, le choix est fait de les expliciter en les groupant par type de capteur utilisé.

### 1.3.1 Contrôle dimensionnel d'un produit fini

Le contrôle dimensionnel a été le premier objectif de la scierie. Ce type de contrôle est relativement rapide à déployer et généralement peu coûteux à mettre en place.

Il existe plusieurs constructeurs de systèmes de vision tels que Microtec, Luxscan, RemaControl pour ne citer qu'eux. Pour mesurer les sciages, des barrières laser (**caméras**) disposées linéairement sont le plus souvent utilisées. Si ces capteurs permettent une mesure dimensionnelle précise et rapide, ils restent cependant sensibles à leur environnement (poussières, vibrations, débris, etc).

Cette technique dite de *profilométrie* laser est maîtrisée industriellement. Toutes les scieries industrielles modernes sont équipées de ces systèmes.

### 1.3.2 Classement esthétique d'un produit fini

Le classement esthétique en scierie est appliqué sur des produits vendus aux industries du bois d'ameublement, celles d'ornement ou aux ébénisteries. Ainsi, les critères de sélection

esthétiques sont prioritaires face à toute autre considération. Les industries du lamellé-collé utilisent elles aussi des critères esthétiques (couleur) après un classement de résistance afin d'obtenir un produit fini (constitué de plusieurs avivés collés) homogène en couleur.

Le classement est fait généralement avec des caméras CCD, souvent complétées par d'autres capteurs pour améliorer la phase d'identification des caractéristiques du bois. Ces capteurs complémentaires utilisent d'autres ondes comme les capteurs micro-ondes ou à rayons X ou, utilisent différemment ou plus largement le visible comme les infrarouges ou le couple caméra/laser.

A l'aide d'une **caméra CCD**, [Hagman O., 1997] présente une étude sur le bois de compression avec l'utilisation des ultraviolets. Le taux de bonnes détections oscille entre 92 et 94%. En 1999, [Nyström J., 1999] continue l'étude jusqu'à la prédiction de la proportion de bois de compression mais ne donne pas de résultat chiffré. [Bombardier V., 2007] améliore la détection des nœuds noirs grâce à l'utilisation conjointe du rouge et du proche infrarouge permis par une caméra CCD classique. En 2006, [Cavalin P., 2006] compare une caméra couleur et une caméra noir & blanc. Bien que son objectif soit simplement de détecter et de localiser un défaut pour le purger, la similarité des deux résultats prouve que la sélection de critères pertinents est primordiale dans cette analyse vis à vis des performances d'une caméra. Les algorithmes de traitement des images ont aussi un impact sur les performances du système. En 2010, grâce à une caméra couleur, Bombardier V. propose un classificateur flou couleur permettant de trier les avivés [Bombardier V., 2010]. Les résultats qu'il expose montrent que les classificateurs courants ont un taux supérieur à 72% et que le classificateur flou proposé atteint 83%. De plus, les performances du classificateur sont atteintes avec un nombre très réduit d'échantillons d'apprentissage.

La texture d'un bois scié est également mesurable par une **caméra associée à un laser** (point laser). La réflectance du laser est mesurée et reliée directement à la texture du bois

(effet scatter<sup>1</sup>). Ces systèmes ont d'excellentes performances dans l'analyse de surface, autant en cadence qu'en taux de reconnaissance. [Lee S.M., 2003] propose une détection du flache<sup>2</sup> en utilisant seulement la discontinuité du bois à la surface à travers deux critères : la direction normale de la surface principale et la courbure du flache. Le système caméra/laser décrit permet également de détecter les fentes et les trous. [Nyström J., 2003] propose de détecter le fil du bois. Le coefficient de corrélation annoncé est de 0.999 avec une déviation de l'angle du fil de 0.2° sur bois sec ou humide. Il est également possible de détecter les nœuds sains, la pourriture et le bois de compression, car chacune de ces singularités a un impact différent sur le point laser. La principale contrainte de ce système est que les surfaces du sciage doivent être planes et perpendiculaires à la direction du point laser.

Le principal désavantage des systèmes optiques sur un produit Bois est lié à leur sensibilité à leur environnement : la variation de la lumière d'éclairage, les environnements enfumés, poussiéreux et où des débris peuvent être projetés, réduisent les performances du système.

Le principal avantage des capteurs **micro-ondes** est qu'ils fonctionnent dans des environnements où les capteurs optiques sont inexploitable. En revanche, ils nécessitent le développement de techniques de reconstruction d'image. [Baradit E., 2006] propose une reconstruction d'image 2D. Les résultats sont prometteurs, mais la résolution des images doit être améliorée. Les résultats préliminaires que Baradit E. annonce sur la détection des nœuds à partir de sa reconstruction ne sont pas encore viables industriellement car leur obtention demande un temps de calcul trop long.

Les analyses d'aspect sont également réalisées par des **scanners à rayons X (RX)**. L'étude comparative de [Silvennoinen R., 2000] sur la détection du fil du bois met en avant que l'investissement dans un RX ne se justifie pas face aux caméras CCD ou aux

---

<sup>1</sup> L'effet Scatter est la déviation forcée d'une onde à cause d'un élément de matière. Cette déviation dépend de la position de l'élément par rapport au faisceau de l'onde et de la constitution de la matière.

<sup>2</sup> Selon la norme EN 844-3:1995, « le flache est une portion de la surface arrondie de la bille [bois rond] restant apparente sur le bois scié ». Cette caractéristique est illustrée dans la Figure 3-7.

caméras/lasers car les résultats obtenus sont similaires sur les produits finis. Notre étude préliminaire montre que l'utilisation d'un RX permet d'augmenter les performances d'une raboterie à la seule condition qu'il soit couplé à un système de vision optique (automatique ou humain) permettant la détection des colorations [Almecija B., 2013].

Les caméras ont été les premiers systèmes développés pour l'analyse d'aspect. Ainsi, ces systèmes sont les plus avancés en termes de développement et leur prix est compétitif. Les RX permettent de visualiser les défauts internes du bois mais le retour sur investissement doit être précisément calculé. La technologie micro-ondes est prometteuse par son faible coût et sa faible dangerosité, mais les principaux verrous scientifiques doivent être levés. Enfin, de tous les systèmes utilisés, la caméra couleur est le seul système de vision permettant de visualiser les colorations et la texture du bois qui ont un rôle essentiel dans ce type d'analyse.

### 1.3.3 Détermination de la résistance mécanique d'un produit fini

Les sciages sont majoritairement utilisés dans la construction pour leurs propriétés mécaniques. Dans ce cas, l'aspect du bois n'est plus le critère principal, bien que les produits doivent être « acceptables » aux yeux du client. Les capteurs présentés ici permettent tous de lier *directement* une caractéristique de l'onde analysée avec la résistance mécanique d'un avivé.

Le système **accéléromètre/marteau** permet une analyse de la réponse fréquentielle d'un produit à une onde mécanique. Des constructeurs spécialisés dans le domaine tels que Microtec, Alpha, Autolog, Mudata, Scanmeg, MPM ou Jörg proposent plusieurs systèmes fournissant d'excellents résultats sur les sciages. La résistance de la pièce est obtenue grâce à l'analyse de la fréquence de résonance. L'onde vibratoire est provoquée par un contact direct sur la pièce par l'intermédiaire d'un marteau d'où son appellation « Bing » dans l'industrie.

[Hu C., 2006] propose une étude dédiée à la détection des manques de matière grâce aux ondes mécaniques. L'auteur conclut qu'une analyse correcte et fiable avec ce système n'est possible que si le produit est suffisamment rigide et relativement homogène. De même, les défauts ne doivent pas être trop proches les uns des autres et la surface de contact doit être

propre. L'avantage est qu'il n'est pas nécessaire d'avoir de connaissances préliminaires sur le bois sans défaut.

Le « Bing » a deux inconvénients. Le premier est lié à sa mise en place qui nécessite un contact avec la matière, rendant son insertion dans les scieries peu aisée (un transfert transversal des pièces est nécessaire afin de ne pas ralentir le flux matière). Le second est le manque d'information associé au résultat, i.e., on connaît la valeur de résistance mais pas les causes qui influencent la valeur.

Les **ultrasons** sont les ondes mécaniques les plus pénétrantes. Waterhouse J.F., dans son étude préliminaire [Waterhouse J.F., 1993], corrèle la résistance des bois avec la vélocité de l'onde. Les résultats sont satisfaisants mais nécessitent là encore un contact avec la pièce. Les études de Kabir M.F. [Kabir M.F., 1998 & 2000] permettent de distinguer et de mesurer l'humidité du bois, la direction du fil, la présence d'entre-écorce, les nœuds morts ou sains par le croisement de plusieurs caractéristiques de l'onde. [Jordan R., 1998] corrèle l'onde ultrason avec quatre essences différentes (Chêne, Pin, Erable et Aulne). Cependant, les échantillons utilisés sont nets de nœud, sans fissure et sans fil tord rendant une application industrielle irréaliste.

En 2008, [Vun R.Y., 2008] propose une étude préliminaire sur les scanners à ultrasons sans contact. Cette étude développe uniquement un calcul de l'humidité relative du bois et envisage son application dans des domaines tels que l'analyse en continu durant le séchage.

[Steele P.H., 2003] utilise un système basé sur les **radiofréquences** pour déterminer le module d'élasticité de sciages. Le coefficient de détermination obtenu,  $R^2$  proche de 0.67, est équivalent à celui donné par un banc d'essai mécanique ou un RX. Sa technique est cependant sensible à l'humidité relative du bois ce qui le conduit à implémenter un algorithme adapté à l'approvisionnement pour la corriger. Le principal avantage donné à cette technique est son coût bien inférieur à celui d'un RX.

[Lundgren N., 2007] démontre que la corrélation entre la résistance mécanique et le signal **micro-onde** est nettement plus robuste que celle obtenue via la densité du bois par

rayons X. Cependant, aucun prototype ou application industrielle ne vient étayer ce discours. Malgré tout, [Baradit E., 2006] propose une autre utilisation des micro-ondes grâce l'interprétation d'images 2D et 3D obtenues dans son étude : il s'agit de l'analyse structurelle qui vise à corrélérer la résistance mécanique avec la composition du sciage.

#### 1.3.4 Classement structurel d'un produit fini

Le classement structurel d'un produit en bois est lié à ses propriétés anatomiques [Tong Q.J., 2005] et est encadré par des normes. En France, c'est la norme NF B 52-001 qui lie l'aspect visuel du bois à sa résistance, mais il existe aussi les normes NF EN 1611 et NF EN 1927 qui lient l'aspect visuel à une classe d'emploi (dite classe de « qualité »). Les normes fixent des limites sur la présence des singularités et leur sévérité en fonction de la classe de résistance ou de la classe d'emploi.

Les systèmes de vision permettant une reconstruction se basent couramment sur la densité (rayons X) ou la couleur de la matière (caméra CCD) et, plus rarement, sur d'autres caractéristiques telles que la température (infrarouges) ou la composition atomique de la matière (micro-ondes et ondes radars). Des systèmes dits multi-capteurs associent plusieurs technologies afin d'obtenir plus d'informations.

En 2011, [Halabe U.B., 2011] présente un scanner utilisant les **ondes radar** (Ground Penetrating Radar-GPR) pour détecter les défauts sévères dans les sciages tels que les nœuds, la pourriture ou le métal. Ce type de scanner nécessite une zone de contact avec le sciage mais propose une détection rapide mais ne permet ni une localisation précise ni une identification du défaut.

L'étude [Hansson L., 2005] portant sur le signal **micro-onde** est encourageante. Il obtient un spectre représentatif de l'humidité d'une pièce en tout point mais montre aussi que cette technique est sujette au bruit dû à la diffusion et la réflexion des ondes.

En 2010, [Dyk H., 2010] propose de chauffer les avivés pour obtenir des images **infrarouges** des défauts. Il présente plusieurs techniques de chauffage permettant de détecter (mais pas d'identifier) les nœuds, les trous et les fentes. Il est à noter que les techniques de chauffage présentées sont applicables industriellement car les temps d'exposition sont courts.

En 2007, [Buehlmann U., 2007] étudie les gains potentiels générés par l'utilisation d'un système **multi-capteurs**. Il compare un capteur optique, un RX et un système multi-capteurs les combinant. Des gains plus importants sont obtenus avec le système multi-capteurs car il permet de tirer parti des avantages de chaque capteur et d'en limiter les effets négatifs. L'auteur rappelle également que les gains potentiels afin de justifier le prix plus élevé du système multi-capteurs.

En 2005, [Giudiceandrea F., 2005] expose une solution industrielle de détermination de la résistance des sciages en combinant un système « Bing » mesurant la fréquence propre et le module d'élasticité, et un RX mesurant la densité et la nodosité. Ces quatre données permettent selon l'auteur de prédire la résistance du bois avec un taux de détermination  $R^2$  de 0.8.

Grâce à ces systèmes, les scieurs améliorent leur flux de production et ont les moyens de fournir à leurs clients des produits finis répondant à leurs exigences. Cependant, en aucun cas, ces systèmes appliqués aux produits finis n'améliorent le taux de déclassement des sciages, i.e., l'écart entre les produits finis attendus (prévisionnels) lors du tronçonnage en billon sur le parc à grumes et les produits finis réellement obtenus lors du débit des billons. Pour répondre à cette problématique, les constructeurs de systèmes de vision proposent des systèmes applicables aux bois ronds lors de l'approvisionnement en scierie, au niveau du parc à grumes.

## 1.4 Contrôle des bois ronds en entrée de scierie

Cette section a pour objectif de présenter les systèmes de vision dédiés aux bois ronds qui sont directement en relation avec la conception du système de tri Qualité sur le parc à grumes de Siat-Braun. Tout d'abord, la section 1.4.1 présente le fonctionnement des systèmes

dédiés à cette catégorie. Ensuite, un état de l'art sur les performances des systèmes est fait à travers quatre objectifs du parc à grumes des scieries : le contrôle dimensionnel (section 1.4.2), le tri des bois ronds en vue d'un classement esthétique des produits finis (section 1.4.3), la détermination de la résistance mécanique (section 1.4.4) et le tri des bois ronds en vue d'un classement structurel des produits finis (section 1.4.5).

#### 1.4.1 Fonctionnement des systèmes dédiés au bois rond

Les **scanners d'enveloppe** sont classiquement implémentés à l'aide de trois caméras associées à des lasers linéaires (profilométrie laser). Les trois lasers sont espacés de  $120^\circ$  autour du bois rond formant une ligne circulaire et permettant aux trois caméras associées de mesurer les distances capteur/billon par triangulation en tout point de cette ligne. La forme du bois est représentée sur cette section (la ligne circulaire), puis la répétition de ces représentations sur la longueur permet une reconstruction de l'enveloppe du billon.

Les RX 2d (2 directions) et 4d (4 directions) sont composés respectivement de deux sources de **rayons X** à  $90^\circ$  et quatre sources à  $45^\circ$  l'une de l'autre. Les traitements croisent les deux ou quatre images (RX 2d ou 4d) en deux dimensions pour obtenir une reconstruction 3D sur laquelle l'analyse est faite. Les RX 2d sont les plus utilisés dans l'industrie car ils ont un excellent rapport performance/prix et permettent une reconstruction acceptable du billon en 3D grâce à des interpolations [Flood K., 2003].

Les plus récents sont les RX CT (Computed Tomography ou Tomographe). Ils permettent d'acquérir plusieurs vues projetées (jusqu'à 720 actuellement) par rotation de la seule source ou de la pièce. Selon le type de scanner, la reconstruction 3D est faite soit par empilage d'images 2D (*fan beam*) soit par un algorithme de reconstruction directe du volume (*cone beam*). Ces techniques ont longtemps posé problème pour leur industrialisation. En effet, le *fan beam* nécessite un temps d'acquisition généralement incompatible avec les contraintes de cadences industrielles et le *cone beam* impose des approximations plus ou moins importantes [Magnusson Seger M., 2003]. Néanmoins, grâce à [Katsevich A., 2004] qui a mis au point un algorithme de reconstruction en volume (*cone beam*) rapide et précis, les RX CT offrent désormais une réponse adaptée aux besoins des scieries listés par [Giudiceandrea F., 2011]. L'étude expose aussi les verrous technologiques qui ont été levés et

ceux qui ne sont pas encore levés comme la création d'une source à rayons X de grande puissance permettant l'analyse de bois de diamètre supérieur à 500 millimètres.

#### 1.4.2 Contrôle dimensionnel du bois rond

Un **capteur d'enveloppe** est un système de vision qui permet une analyse dimensionnelle. Il est couramment utilisé en entrée de ligne Canter pour optimiser la position angulaire des billons et maximiser le rendement matière. Une autre utilisation pour les scieurs est la gestion de leur approvisionnement à travers le cubage des billons ou des grumes.

Le défaut principal de ce type de capteurs est qu'ils ne peuvent pas détecter les concavités du bois rond. En revanche, tous les systèmes utilisant des ondes pénétrantes et permettant une reconstruction en 3D de la pièce rendent possible une analyse dimensionnelle précise. Cependant, il est difficile de justifier un investissement pour de tels systèmes avec l'unique objectif d'une analyse dimensionnelle.

#### 1.4.3 Tri du bois rond en vue d'un classement esthétique

En utilisant un scanner **RX 2d** [Magnusson Seger M., 2003] montre que la résolution des capteurs ne permet pas de localiser, d'identifier et de mesurer précisément les singularités à des cadences industrielles (de 2 à 3 mètres par seconde). En s'appuyant sur cette étude, [Flood K., 2003] réussit à reconstruire une image acceptable d'un billon en 3 dimensions avec le même type de scanner, puis détecte la moelle et les nœuds du billon au niveau des verticilles. En utilisant des RX CT en laboratoire (sans contrainte de temps), il est possible de visualiser les plus petits défauts du bois comme les fentes ou les piqures d'insectes [Bhandarkar S.M., 2005]. Le RX CT proposé par [Giudiceandrea F., 2011] trouve une application industrielle dans l'analyse de billons destinés au déroulage, mais cette analyse se focalise principalement sur les défauts supérieurs au centimètre.

A notre connaissance, il n'existe pas actuellement d'étude faisant état de l'utilisation à des cadences industrielles d'un scanner RX CT pour l'analyse fine des singularités et défauts internes d'un bois rond.

#### 1.4.4 Détermination de la résistance mécanique du bois rond

A l'aide d'un système **accéléromètre/marteau**, [Edlund J., 2006] corrèle la fréquence de résonance de l'onde du billon avec le module d'élasticité (MOE) des sciages qui en sont issus. Cependant, cette corrélation doit être améliorée pour les bois verts (approvisionnés couramment en scierie) en fonction de leur humidité.

Les constructeurs proposent ce type de capteur pour l'analyse de grumes, puis mettent en relation, dans un premier temps, la résistance de la grume avec celles des billons qui en sont issus puis, dans un second temps, celle du billon avec celles des sciages issus de ce billon. Aucun résultat prévisionnel n'est donné sur cette double extrapolation.

Les dimensions et la forme des bois ronds rendent difficile la détermination de la résistance directe par d'autres technologies.

#### 1.4.5 Tri du bois rond en vue d'un classement structurel

Les systèmes de vision optique (**caméra** et **caméra/laser**) sont les plus courants car ils ont été les premiers à être industrialisés à ce niveau de la chaîne. Ainsi, des études sont consacrées à la réutilisation d'un outil déjà présent dans la chaîne de production afin de l'améliorer. [Jappinen A., 1997] utilise la décroissance des bois, les irrégularités de l'enveloppe et les mesures de dimensions faites par un scanner d'enveloppe 3D afin d'améliorer le tri des billons. [Longuetaud F., 2005] consacre une partie de son étude à la détection des verticilles sur le billon grâce à l'irrégularité de l'enveloppe qu'ils induisent. L'étude montre cependant que le scanner d'enveloppe a des résultats peu satisfaisants à la cime de l'arbre car le verticille est moins marqué à ce niveau.

[Warensjo M., 2003] lie la forme d'une grume et la position de la moelle avec le bois de compression grâce à l'analyse de l'enveloppe et d'une image de la section prise avec une caméra. [Norell K., 2008] améliore l'estimation de la position de la moelle sur les sections en bout par l'utilisation de la méthode de la pyramide Laplacienne. [Vaz C., 2004] mesure la largeur de cerne grâce à une caméra. Les temps de calcul obtenus en laboratoire sont supérieurs à 2 minutes et les images traitées doivent être sans singularité, ce qui rend ces résultats incompatibles avec un contexte industriel. En 2011, [Norell K., 2011] se sert de sa précédente étude pour pouvoir compter le nombre de cernes d'accroissement sur la section du

billon et propose une méthode industrialisable ayant de meilleures performances globales que les gradeurs (opérateurs) de scierie. Cette méthode automatisée peut se faire sur des coupes propres ou irrégulières. L'auteur note tout de même que les performances de son système sont limitées quand les cernes sont trop larges car le bruit présent entre chaque cerne perturbe la mesure.

En 2011, [Thomas L., 2011] utilise une nouvelle génération de capteurs optiques permettant une image plus fidèle de l'enveloppe. Bien que l'étude porte sur la détection des zones d'intérêt (défaut du bois), l'auteur note les perspectives qu'offre un tel scanner pour l'interpolation de défauts internes à partir de défauts externes identifiés et mesurés précisément.

Wyckuyse [Wyckhuysen A., 2001] détermine la présence de pourriture par la chaleur qu'elle émet en utilisant un capteur **infrarouge**. L'étude est appliquée à des pylônes électriques déjà en place. La transposition de cette étude à la scierie est limitée car le système ne permet de localiser que la pourriture proche de la surface. [Arnerup F., 2002] étudie la détection de la limite aubier/duramen par le biais d'un scanner à infrarouge faisant apparaître un fort contraste entre les zones. L'auteur compare quatre algorithmes de détections donnant tous des taux de détection et de précision jugés satisfaisants. Cependant, les temps de calculs compris entre 5 et 20 secondes sont trop élevés pour une industrialisation. Sandberg montre la faisabilité de différencier l'aubier du duramen dans un bois ronds sec en Epicéa à l'aide d'une analyse en proche infrarouge [Sandberg K., 2009]. Son modèle de prédiction est basé sur une analyse de données multi-variables et une régression optimisée selon la méthode des moindres carrés. Sur ces 17 échantillons de validation, 1 seul n'a pas été correctement classé.

[Pfautsch S., 2012] utilise la spectroscopie proche infrarouge dans le but de déterminer la proportion d'aubier dans le bois de plusieurs espèces d'eucalyptus. Les résultats montrent la faisabilité d'une telle méthode d'analyse sur des bois verts. Les modèles de prédiction établis sur la base des spectres infrarouges sont spécifiques à chaque espèce car un modèle commun ne donne pas de bons résultats (coefficient de détermination de 0.63 bien que les certains modèles spécifiques soient légèrement meilleurs). [Schimleck L., 2003] puis [Mora C., 2011] ont utilisé la spectroscopie proche infrarouge par imagerie hyper-spectrale pour déterminer l'humidité et la densité du bois. Les conclusions de l'étude de Mora C.

indiquent que cette méthode est satisfaisante avec des coefficients de corrélation de 70 à 80 %. De même, [Zhu X., 2009] ont obtenus des coefficients de corrélation supérieur à 90 % entre la densité mesurée par spectroscopie infrarouge et celles mesurées par les méthodes conventionnelles.

[Choi F., 2007] étudie une nouvelle configuration du système **accéléromètres/marteau** pour déterminer la sévérité des défauts et plus seulement leurs positions. Les résultats sont encourageants malgré la présence de faux positifs.

Les recherches préliminaires entreprises sur l'onde mécanique **acoustique** ont permis de démontrer la possibilité de détecter la pourriture dans un arbre sur pied (résultat transposable en scierie) à condition que celle-ci soit en surface ou proche de la surface [Ouis D., 1999]. Ces recherches montrent aussi que la distinction entre la pourriture et les autres singularités n'est pas aisée avec ce capteur.

[Lin C.J., 2008] utilise des **ultrasons** et montre qu'il est possible de localiser et mesurer la pourriture ou les fentes des bois sur pied, donc, *a fortiori*, dans les bois ronds abattus. En 2009, [Wang L., 2009] propose un système de vision ultrason capable de distinguer le bois sain et les nœuds à plus de 90% puis, le bois sain et les trous à plus de 80%.

Les **scanners à rayons X** actuels ayant une résolution suffisante, la plupart des verrous portent sur les algorithmes de détection et d'identification des défauts qui limitent les performances du système. [Longuetaud F., 2004] propose de détecter en priorité la moelle car elle facilite la détection des nœuds et le comptage des cernes d'accroissement. En 2012, [Boukadida H., 2012] améliore l'étude de Longuetaud F. en proposant un algorithme de détection plus robuste mais, qui est appliqué sur des images haute résolution obtenues en laboratoire. Ainsi, les résultats se doivent d'être validés avec des scanners industriels.

[Longuetaud F., 2005] propose un algorithme de détection des nœuds en combinant les données internes du billon issues du CT avec celles de l'enveloppe. L'auteur différencie notamment les nœuds d'un verticille annuel et ceux d'une reprise de croissance en cours de

saison (« llamas shoot ») car ces derniers influencent peu la résistance mécanique. L'essence joue un rôle dans la résistance du bois ainsi [Charpentier P., 2013] propose plusieurs mesures faites sur les nœuds du bois afin de différencier cinq essences de résineux.

En 2009, [Freyburger C., 2009] mesure la densité avec un scanner CT. L'erreur commise est inférieure à  $7,7 \text{ kg/m}^3$  mais dépend fortement de la calibration du scanner. [Entacher K., 2007a] étudie la détection des cernes d'accroissement du bois rond qui est, selon l'étude, un facteur plus pertinent que la densité seule du bois.

En 2007, Brännström M. propose une étude comparative de plusieurs scanners RX pour prédire la résistance des produits issus du billon [Brännström M., 2007]. Pour cela, il utilise la mesure de la densité du bois. Son étude montre que les résultats sont améliorés si on arrive à mesurer le cerne d'accroissement.

D'autres singularités telles que les entre-écorces ou les fentes jouent un rôle dans la résistance du bois. En 1999, [Bhandarkar S., 1999] propose un logiciel expérimental appelé CATALOG et basé sur l'imagerie X. Il se veut être un logiciel d'aide à la décision pour l'opérateur de sciage en lui permettant de visualiser plusieurs défauts du bois. Neuf ans plus tard, [Bhandarkar S., 2008] améliore son logiciel en proposant une reconstruction 3D des bois ronds, ainsi que des algorithmes de détection pour une majorité des singularités et des altérations.

Dès les années 90, des scanners à rayons X étaient déjà à l'étude industriellement pour le tri automatisé des billons en quelques classes de qualités. En 1999, [Ohman M., 1999] proposait un classement automatique en 3 classes grâce à 8 critères. Les conclusions montraient de bons résultats sur la différenciation de la qualité basse et intermédiaire, mais la différenciation de la qualité intermédiaire et de la qualité haute était plus difficile. En 2003, [Oja J., 2003] utilise la densité et l'enveloppe des billons pour trier les billons en quatre classes de qualité avec un taux de bons classements entre 77% et 83%.

## 1.5 Parc à grumes de notre partenaire industriel Siat-Braun

Dans les sections précédentes, on constate que les performances associées aux systèmes de vision dépendent toutes des conditions d'application (expérimentales ou industrielles), de du système utilisé (industriel, médical ou expérimental) ou encore de la matière elle-même en

fonction de l'essence par exemple. Ces états de l'art apportent donc une vue d'ensemble sur les performances et des informations accessibles dans le domaine spécifique du bois, et notamment sur les bois ronds au niveau des parcs à grumes, au cœur de notre problématique de thèse. Il est nécessaire désormais de focaliser l'étude sur le cas particulier de la scierie Siat-Braun.

Notre scierie partenaire souhaite parfaire la détermination Qualité de ses bois ronds et a des exigences sur les caractéristiques à analyser et les performances associées, i.e., elle n'achète pas un système de vision, elle achète des performances de détection d'une caractéristique à un fournisseur. Cette section propose de décrire les différentes étapes qui ont motivé le choix du système de vision installé sur son parc à grumes.

La section 1.5.1 présente le contexte industriel de la scierie Siat-Braun afin d'introduire les contraintes qui ont motivé son investissement. La section 1.5.2 propose une synthèse sur les caractéristiques qu'un système de vision dédié aux bois ronds permet d'extraire. Cette étude est basée sur l'état de l'art précédent. Une synthèse similaire sur les caractéristiques des sciages est donnée en Annexe 2. Enfin, la section 1.5.3 décrit le système de vision choisi par notre partenaire afin de réaliser le tri des billons sur le parc à grumes.

### 1.5.1 Contexte particulier de la scierie Siat -Braun

La scierie Siat-Braun est aujourd'hui l'un des leaders français du sciage de bois de résineux. Comme toutes les scieries, elle est soumise à de fortes contraintes de rentabilité et donc de performances. Pour répondre à ces contraintes, la scierie s'organise en cinq départements schématisés dans la Figure 1-6 : le service forestier, les parcs à grumes, la ligne de sciage, les expéditions et le service commercial.

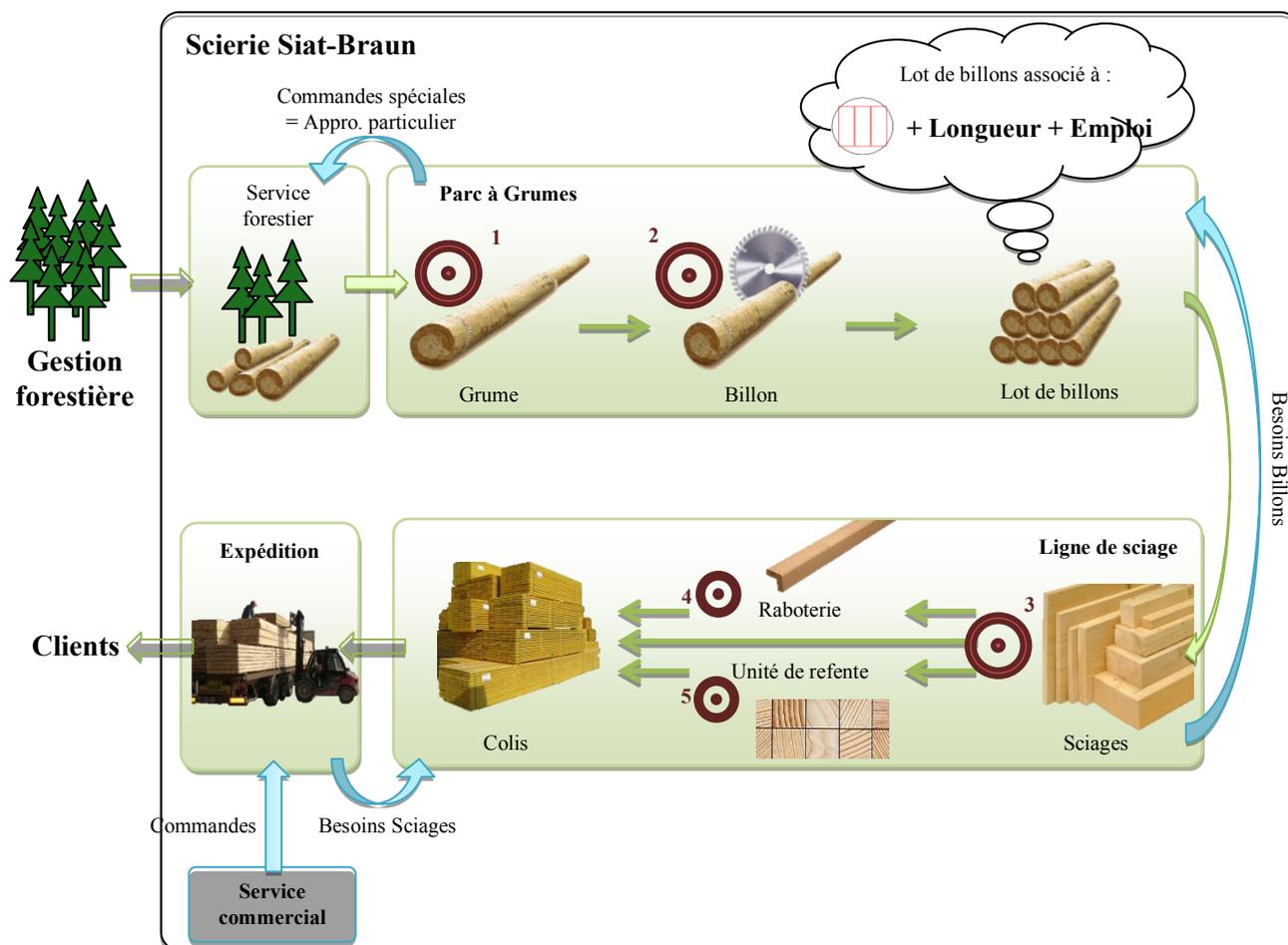
Le *service forestier* achète des grumes (arbres ébranchés au sol) à des propriétaires privés ou publics comme l'Office Nationale des Forêts (ONF). L'accord conclu se base sur la qualité des grumes (dite « qualité Grume ») et un prix par qualité. En forêt, une estimation empirique de la proportion de chaque qualité dans un lot est faite afin d'avoir un prix d'achat « de base ».

Ensuite, les grumes sont livrées aux *parcs à grumes*. Ces parcs remplissent deux fonctions : payer au plus juste la matière première et obtenir des billons triés par caractéristiques similaires. La première est remplie en définissant une qualité Grume pour chaque grume du lot d'achat (point de contrôle qualité 1 dans la figure). La grume est ensuite

tronçonnée en billons en fonction des caractéristiques du bois et des produits finis qui en seront issus (à travers un schéma de sciage). C'est l'objectif du point de contrôle qualité 2 de la Figure 1-6. Les billons ainsi obtenus sont triés par lot homogène.

La *ligne de sciage* comprend les machines de coupes, les machines de tri et d'empilage. Suite au débit des billons en sciages (produits) selon un schéma de sciage, un contrôle qualité est effectué (point 3) afin de fixer une qualité Sciage. En fonction de leurs caractéristiques, certains sciages sont redirigés vers des unités refente ou vers une raboterie pour faire des produits de petites sections à plus grande valeur ajoutée. Les sciages subissent ainsi d'autres transformations et des contrôles sont de nouveau effectués (point 4 et 5). Finalement, les sciages sont empilés par lot homogène en qualité Sciage, longueur et section afin d'être transférés au service expédition.

Le *service expédition* charge les camions et organise les plannings pour répondre au mieux aux commandes issues du *service commercial*. Une commande faite par un client est remontée jusqu'au département des parcs à grumes qui valorise différemment la grume pour l'honorer. Une commande spéciale peut quelquefois remonter jusqu'au service forestier si elle nécessite des grumes particulières (essences, qualité, etc.).



**Légende :**



**Figure 1-6 : Flux matière et d'information de la scierie Siat-Braun**

L'organisation de l'entreprise s'explique également par son historique. En effet, le groupe Siat-Braun est le fruit du rachat de la scierie et de la raboterie Braun, à Heiligenberg et Niederhaslach (France), par la scierie Siat à Urmatt (France). L'entreprise Braun apporte des installations performantes et dédiées à la production de masse, mais ses installations sont **vétustes** ; la scierie Siat apporte un outil de plus petite taille mais plus moderne. Ainsi, l'entreprise détient à la fois des installations **redondantes** et diversifiées, plus ou moins vétustes, réparties sur **trois sites** industriels tous dans un rayon de dix kilomètres.

En 2003, suite à un incendie sur le site d'Urmatt, la scierie est entrée dans une phase de modernisation. En effet, la scierie investit 42 millions d'euros dans une ligne de sciage « Canter » moderne absorbant plus de 95% de la production annuelle de sciage de l'entreprise soit 550 000 m<sup>3</sup> de bois ronds transformés en 330 000 m<sup>3</sup> de sciages. Les 5% restants sont

obtenus avec une ligne de sciage « Ruban » traditionnelle dont la cadence est plus lente mais plus flexible. Pour approvisionner une telle ligne de sciage, la scierie exploite l'ensemble de ses parcs à grumes.

Ainsi, la scierie Siat-Braun doit **moderniser son outil de production** afin de ne plus utiliser ses installations vétustes et redondantes et, **centraliser sa production** sur le site d'Urmatt pour éviter les navettes de matière inter-sites (organisation et coût de transport).

La stratégie de développement de l'entreprise à plus long terme est également de diversifier ses produits et de mieux gérer ses différents flux. La direction cherche ainsi à mettre en place des moyens de production capables de **fournir des produits de haute qualité** tels que les bois sans défauts, ou très spécifiques comme les bois destinés aux industries du lamellé collé. Afin **d'améliorer la gestion et la fiabilisation des flux** d'informations et de matière, ces systèmes de production doivent aussi être capables de fournir des informations détaillées sur les actions effectuées sur la matière.

Finalement, l'analyse des points de contrôle qualité montre que l'estimation donnée sur le billon (Qualité Billon\_ point 2\_ Figure 1-6) s'avère incorrecte au regard de la qualité fixée sur les sciages (Qualité Sciage\_ points 3, 4 et 5\_ Figure 1-6). Les sciages obtenus n'ont pas tous la qualité attendue (déclassement), il y a soit un sur-classement soit un sous-classement. Notre partenaire estime son taux de déclassement de 8 à 10% en fonction des produits débités.

Par conséquent, la scierie Siat-Braun a choisi d'investir plus de 25 millions d'euros dans la construction d'un nouveau parc à grumes qui vient en remplacement des plus anciens et en complément du plus récent. Son objectif principal est de **réduire le taux de déclassement des produits finis** en améliorant le tri des billons avant de les scier sur la ligne de Sciage. Les travaux de thèse s'inscrivent dans cet objectif en se focalisant sur le tri Qualité des billons fait par ce nouveau parc à grumes. Afin de déterminer une qualité adaptée à chaque bois rond, le parc est entièrement informatisé et équipé de systèmes de vision dédiés aux bois ronds. Ces systèmes sont choisis par la scierie au regard des caractéristiques qu'ils permettent d'extraire.

### 1.5.2 Caractéristiques du bois à extraire et systèmes de vision adaptés

La mesure d'une caractéristique du bois se justifie pour un industriel au regard de plusieurs aspects. Nous proposons dans la Table 1-1 d'évaluer la pertinence des systèmes de vision pour l'extraction d'une caractéristique selon dix items qui sont : le coût, l'industrialisation, les performances, la rapidité de la mesure et des traitements, la sensibilité à l'environnement de travail, à l'état de surface et aux bruits extérieurs ou créés par lui-même, l'intégration sur la ligne de production, s'il nécessite un contact avec la matière et sa dangerosité pour l'utilisateur. Cette évaluation est faite de manière empirique selon la littérature et notre propre expérience. Il est à noter que les travaux sur les capteurs les plus anciens (tel que les caméras) donnent des résultats chiffrés qui peuvent être comparés les uns aux autres car les différentes études s'appuient sur des bases d'échantillons communes. Quant aux travaux sur les capteurs plus récents, tel que les RX, les auteurs fournissent des informations qualitatives sur leurs résultats. Dans un souci d'homogénéisation et de généralisation, nous choisissons de ne fournir que des données qualitatives pour avoir une vue globale. Des informations complémentaires sur un capteur vis-à-vis d'une caractéristique peuvent être obtenues en consultant les références apparaissant sur la même ligne dans la dernière colonne.

Les caractéristiques à analyser ont diverses formes, localisations ou impacts sur le bois. Ceci influence les performances de détection, d'identification puis de quantification. Afin d'obtenir une vision synthétique des performances des systèmes, les caractéristiques sont classées en groupes homogènes. On distingue ainsi les caractéristiques dimensionnelles, les défauts présents sur les sections de bout des bois ronds, les défauts internes extrapolés depuis l'extérieur, les défauts internes sévères, les défauts internes courants et la résistance.

Table 1-1 : Synthèse en fonction des caractéristiques à extraire sur un bois rond

Caractéristique analysée	Type Capteur	Critères										Références	
		Coût	Industrialisé	Performances	Rapidité mesure	Sensible envi travail	Sensible état surface	Sensible bruit	Mise en place part.	Contact matière	Dangerosité		
Diamètre/ Longueur/ Volume	Caméra + Laser	↓	++	+	+		X					↓	Jappinen A./97 Skatter S./98
	RX 2d	↑	++	+	-	X		X				↑	
	RX CT	↑	+	++	-	X		X				↑	
Défauts sur section : Moelle, largeur, cerne, pourriture, Limite aubier/duramen	Caméra couleur	↓	+	++	+	X	X					↓	Warensjo M./03 Thomas L./10 Vaz C./04 Norell K./11
	Infrarouge	↓	+	+	+	X						↓	Wyckhuysse A./01 Arnerup F./02 Schimleck L./03 Sandberg K./09 Zhu X./09 Mora C./11 Pfütsch S./12
Défauts internes par extrapolation : Bois de compression, Nœud, Gui Défauts internes sévères Manque matière, nœud, fente, pourriture	Caméra + Laser	↓	++	-	-		X					↓	Jappinen A./97 Warensjo M./03 Longuetaud F./05
	Acc/ Marteau	↓	++	++	+		X		X	X		↓	Choi F.C./07
	Ultrasons	↓	+	+	+					X		↓	Lin C.J./08
Défauts internes : Moelle, nœud, cerne, poche résine, entre- écorce, fente, limite aubier/duramen, densité, fil	Onde acoust.	↓	--	+	-					X	X	↓	Ouis D./99
	RX 2d	↑	++	+	-	X		X				↑	Silvennoimen R./00 Flood K./03 Magnuson Seger M./03
	RX CT	↑	+	++	-	X		X				↑	Thawornwong S./03 Oja J./03 Longuetaud F./04,05,07 Bhandarkar S./05 Entacher K./07a,07b,08 Freyburger C./09 Giudiceandrea F./11 Wei Q./09,11 Boukadida H./12
Résistance par interpolation	RX 2d	↑	++	+	-	X		X				↑	Ohman M./99
	RX CT	↑	+	++	-	X		X				↑	Brännström M./07 Giudiceandrea F./11
Résistance	Acc/ Marteau	↓	++	++	+		X		X	X		↓	Castellini P./06 Choi F.C./07
	Onde acoust.	↓	--	+	-					X	X	↓	Ouis D./99
Essence	RX CT	↑	+	+	-	X		X				↑	Charpentier P./13

Les caméras sont les premiers capteurs utilisés sur les bois ronds, et sont donc ceux qui connaissent le plus d'améliorations, mais ils ne sont pas toujours les plus adaptés. On constate que les caméras ont un excellent rapport coût/performances lorsqu'il s'agit de prise de données externes comme le diamètre, la longueur ou le volume. Cependant, d'autres informations essentielles se trouvent à l'intérieur du bois. Ainsi, les caméras, déjà fortement présentes en entreprise, ont été complétées par des modules d'extrapolation pour tenter d'obtenir des informations sur l'intérieur de la matière. Les résultats liés à ces extrapolations sont satisfaisants et permettent des améliorations notoires dans plusieurs cas industriels. Il est

ainsi possible de distinguer les courbures, les couronnes de nœuds (verticilles), les bosses de gui à partir de l'enveloppe du bois, mais aussi la pourriture, la largeur de cerne, la limite aubier/duramen, ou encore la moelle à partir des sections de bout. La corrélation de ces informations mène à la détermination du bois de compression par exemple.

Des défauts internes sévères tels que la pourriture, les manques de matière, les gros nœuds et les fentes sont analysés par plusieurs capteurs. Les systèmes accéléromètres/marteau permettent de détecter la présence d'un défaut sévère mais ne permettent ni de le localiser, ni de l'identifier. Les capteurs ultrasons et d'ondes acoustiques permettent d'estimer la gravité et la position du défaut. Les capteurs acoustiques ne sont pas encore industrialisés car ils nécessitent une mise en place trop longue au regard de l'information obtenue. Les recherches récentes montrent que les capteurs à ultrasons sont sur la voie de l'industrialisation pour les avivés et les recherches s'appliquent de plus en plus aux bois ronds.

Les petits défauts internes des bois ronds sont obtenus uniquement avec le rayonnement X. Les RX CT actuels, avec les améliorations algorithmiques notamment, rendent industriellement possible la détection, la localisation et l'identification des poches de résine, des petits nœuds, de la moelle, des largeurs de cerne, des entre-écorces, des fentes, des limites aubier/duramen, des densités, etc.

La résistance peut être obtenue soit par corrélation des défauts anatomiques du bois, soit par corrélation du signal porté par l'onde exploitée. Dans le premier cas, tous les systèmes capables de détecter une caractéristique sont utilisables mais on constate que seuls les RX permettent d'obtenir des informations sur plusieurs caractéristiques essentielles simultanément. Les résultats des corrélations anatomiques sont bons mais peu comparables à ceux obtenus avec la corrélation du signal porté par l'onde directement. Le seul système exploitant directement le signal obtenu sur un billon est l'accéléromètre/marteau. Il y a une forte corrélation entre le signal (fréquence de résonance) et la résistance d'un bois rond. Certains industriels proposent des modules d'extrapolation pour passer d'une mesure faite sur une grume aux avivés débités dans celle-ci.

Les caractéristiques dimensionnelles et qualitatives des bois ronds peuvent ainsi être estimées en entrée de scierie afin de déterminer les produits finis qui en seront issus de manière plus ou moins précise et dès le début du processus. Cette synthèse montre également

qu'il n'existe aucun système capable d'extraire toutes les caractéristiques du bois et justifie l'intérêt des systèmes multi-capteurs dont chacun est choisi pour ses performances vis-à-vis d'une ou plusieurs caractéristiques du bois. Le système choisi par la scierie Siat-Braun appartient à cette catégorie.

### 1.5.3 Système de vision choisi par Siat-Braun pour le parc à grumes

Afin d'expliquer les choix de la scierie Siat-Braun, nous nous basons sur les deux fonctions principales que remplit le parc à grumes au sein de l'entreprise : le **paiement des grumes** aux fournisseurs grâce à leur cubage et la définition d'une qualité Grume et, la **valorisation des grumes** en billons et leur tri en lots homogènes pour répondre aux besoins de la ligne de sciage.

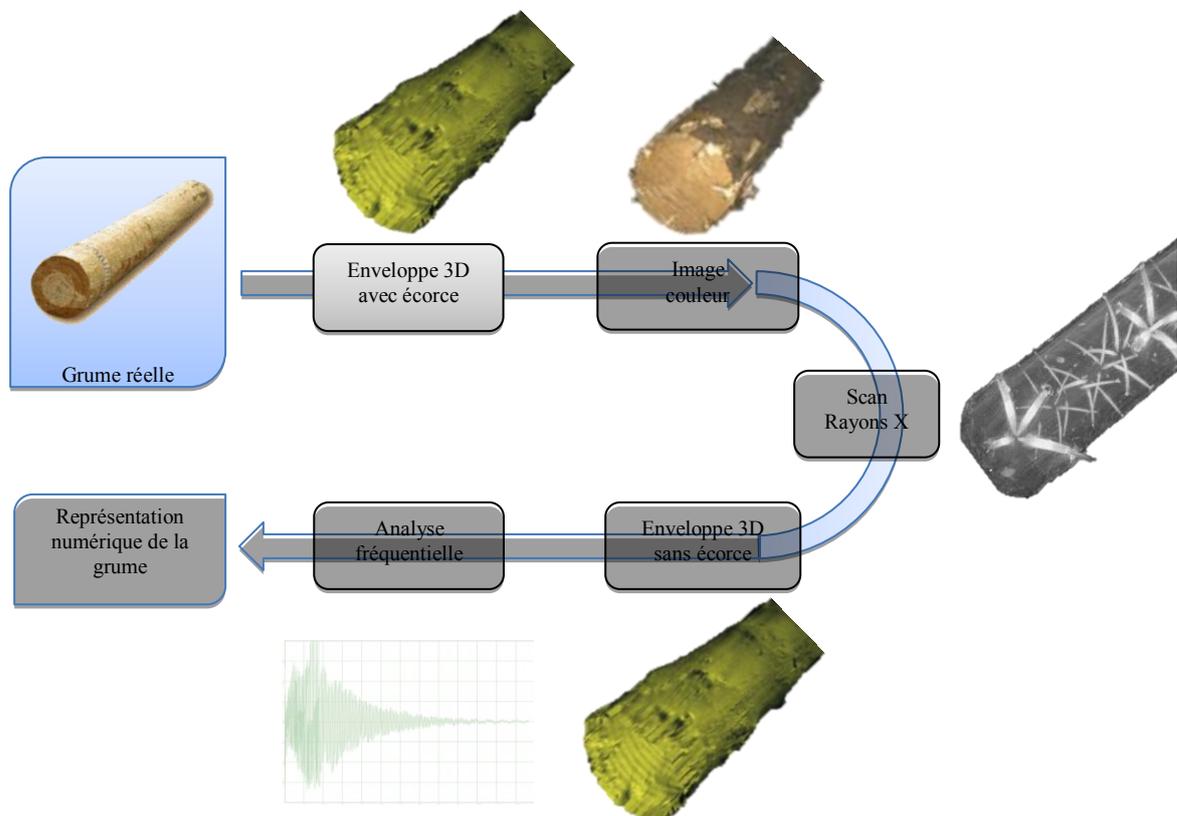
Le parc à grumes doit permettre le paiement de la matière première en fonction de la qualité du bois approvisionné ainsi que de la quantité. Les décideurs s'appuient sur la norme européenne NF EN 1927 définissant des classes de qualités en fonction de la taille des singularités ou des altérations visibles à l'extérieur de la grume. Cependant, la définition d'une qualité est quelquefois remise en question par le client et l'entreprise doit justifier la qualité fixée par la scierie en cas de litige. Le parc à grumes doit donc réaliser les fonctions suivantes pour permettre le paiement des lots de bois à leur juste valeur :

- cuber les grumes avec ou sans écorce ;
- déterminer une ou plusieurs classes de qualité Grume selon son homogénéité;
- mémoriser des informations sur l'état (aspect extérieur) des grumes lors de leur entrée en production en cas de litige.

Le parc à grumes doit également approvisionner la ligne de sciage Canter avec des lots de billons triés selon leur qualité et leurs dimensions. La classe de qualité Billon est définie par les opérateurs de tronçonnage. Ainsi, le nouveau parc à grumes doit permettre de les aider dans cette tâche. La qualité Billon, comparée à la qualité Grume, est définie par l'entreprise afin de répondre aux exigences de sa ligne de sciage et donc, à celles de ses clients. Pour répondre aux besoins de la ligne de sciage, le parc doit :

- cuber les billons sans écorce fournis à la ligne afin d'évaluer les temps de sciage ;
- déterminer une longueur, un schéma de sciage et une classe de qualité Billon adaptés aux commandes clients de la ligne de sciage.

Le parc à grumes est équipé de plusieurs capteurs afin de réaliser les fonctionnalités énoncées. Il inclut un système de vision multi-capteurs permettant plusieurs représentations de la grume comme le montre la Figure 1-7. Le cubage des grumes ou des billons est réalisé par **deux systèmes caméras/lasers**. L'un est placé avant la phase d'écorçage du bois rond et l'autre est placé après. Ces deux capteurs fournissent l'enveloppe du bois rond. En cas de litige avec le fournisseur, une **image** de la grume est prise sur-écorce pour justifier la qualité Grume définie par l'opérateur ou le système. La visualisation des singularités et des altérations du bois est réalisée par l'intermédiaire d'un **tomographe à rayons X (RX CT)**. Il est le support principal à la détermination des classes de qualité Grume et de qualité Billon qui est améliorée par la détermination de la résistance mécanique de la grume au moyen d'un **système accéléromètre/marteau**.

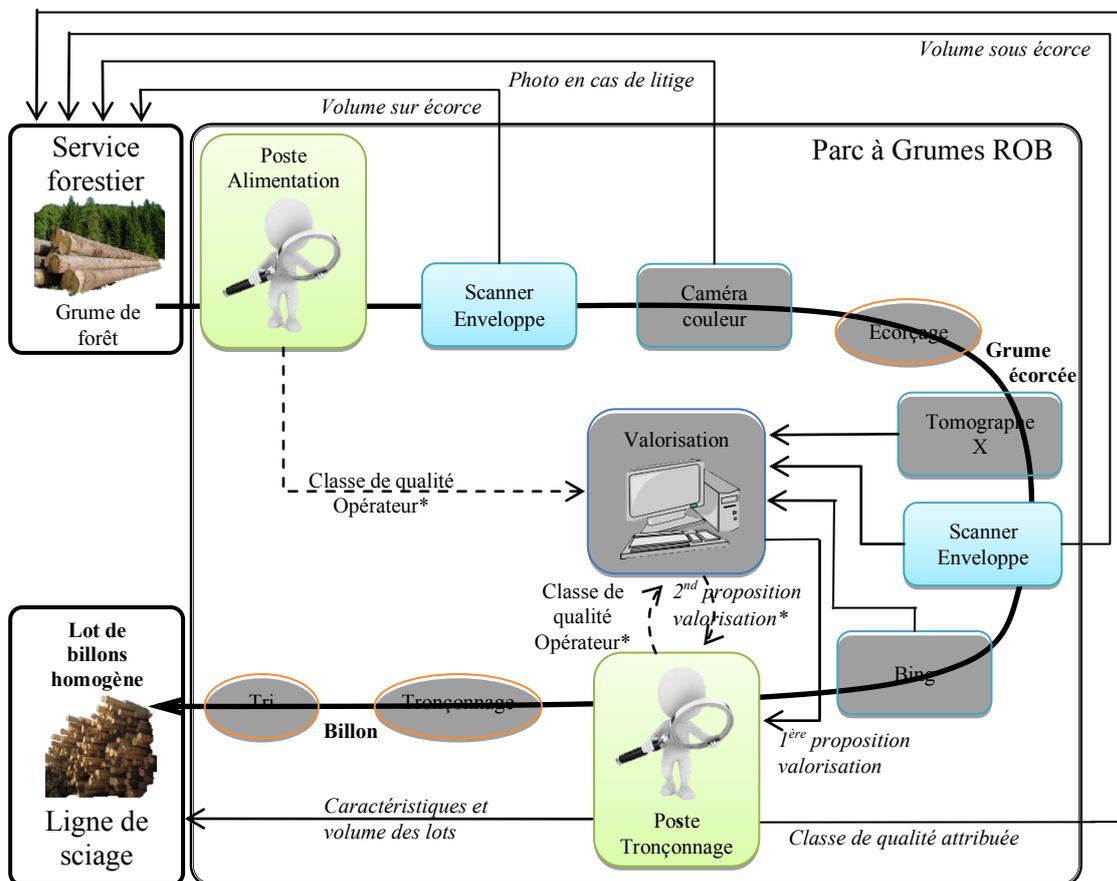


**Figure 1-7 : Représentation de la grume par le système multi-capteurs**

Face à la quantité d'informations que le système de vision est capable de fournir et aux contraintes de temps de la ligne de production, il est nécessaire de proposer un outil permettant de les gérer et de les exploiter automatiquement. Le système de vision est ainsi

complété par un système de valorisation du bois rond. Ce système de valorisation est spécifique au système de vision mais aussi aux méthodes de production et de gestion de l'entreprise. L'ensemble forme le système d'observation fournissant la Qualité Billon pour le système de tri du parc à grumes.

L'amélioration du cubage, de la définition de la qualité Billon et des procédés d'optimisation vont révolutionner les méthodes de production de notre partenaire industriel. De fait, ce nouvel outil de production (l'ensemble du parc à grumes) est nommé **Révolution Optimisation Billons (ROB)**. Un schéma bloc représentant les flux matière et informationnel du système ROB est présenté Figure 1-8.



\*Si l'installation ne permet pas d'analyser la matière (panne) ou, si la 1<sup>ère</sup> proposition de valorisation n'est pas adaptée selon l'opérateur du poste de tronçonnage.

Figure 1-8 : Flux matière et informationnel du système ROB

Le système ROB est avant tout conçu pour être une aide à la décision des opérateurs de tronçonnage. Il doit fournir à l'opérateur une proposition d'optimisation cohérente au regard

des mesures qui ont été faites sur le bois rond. La décision finale est toujours prise par l'opérateur de tronçonnage qui, au regard de ses propres constatations, valide ou refuse la proposition faite par le système.

ROB permet d'absorber plus de 80% de la production de billons, il est dimensionné pour un approvisionnement hétérogène en grumes ou en billons de forêt, une cadence de production rapide de 120 mètres par minute et une aide à la décision assistée par ordinateur grâce au système de vision multi-capteurs et notamment, son tomographe innovant.

Nos travaux de thèse s'intègre dans ce projet en se focalisant sur la conception puis l'exploitation du système de tri Qualité ROB. Les travaux de thèse se déroulent à 80% dans la phase de conception et à 20% dans une phase de mise au point en exploitation. En l'absence de données durant les premiers temps, la spécification du système ne peut être obtenue que par l'intégration des Connaissances Métiers relatives au triplet Bois ronds – Parc à grumes – Tri Qualité (Produit - Environnement – Objectifs). Afin d'aider à la conception du système, l'objectif de la section 2 est d'établir et structurer les connaissances que le système de tri Qualité ROB doit intégrer. L'objectif final présenté dans la section 3 est d'intégrer ces connaissances pour la conception et le paramétrage du système de Tri Qualité Billon.



# CHAPITRE 2 : MODELISATION DES CONNAISSANCES POUR LA MISE EN RELATION DE LA QUALITE BILLON AVEC LA QUALITE SCIAGE

---

2.1	METHODE DE MODELISATION DE LA CONNAISSANCE.....	52
2.1.1	<i>Définition de la connaissance experte</i> .....	52
2.1.2	<i>Modélisation de la connaissance experte</i> .....	60
2.1.3	<i>Méthode NIAM-ORM</i> .....	69
2.2	CREATION DES MODELES ONTOLOGIQUES DES QUALITES BILLON ET SCIAGE .....	74
2.2.1	<i>Acquisition des connaissances « Qualité » dans l'entreprise</i> .....	74
2.2.2	<i>Formalisation des modèles ontologiques</i> .....	78
2.2.3	<i>Vérification et validation des modèles ontologiques</i> .....	83
2.3	ETABLISSEMENT DU MODELE FONCTIONNEL DU SYSTEME .....	84
2.3.1	<i>Extraction du modèle fonctionnel idéal</i> .....	85
2.3.2	<i>Agrégation du modèle de connaissance de l'intégrateur</i> .....	88
2.3.3	<i>Intégration du modèle de connaissance de la matière Bois</i> .....	89

---



## **2 Modélisation des connaissances pour la mise en relation de la qualité Billon avec la qualité Sciage**

Le système de tri Qualité ROB détermine une qualité des bois ronds de longueur standard que les scieurs appellent un **billon**. Cette Qualité à déterminer est ainsi appelée « qualité Billon ». Elle est utilisée pour valoriser la grume en billons et obtenir des produits finis répondant aux exigences des clients de la scierie. Comme la section précédente l'a justifié, la qualité Billon ne peut être obtenue que par l'intermédiaire des connaissances détenues par l'entreprise. Concrètement, il s'agit de connaître les caractéristiques du bois à analyser, comment les analyser et quelles décisions prendre suite aux analyses. Actuellement, sur les parcs à grumes de la scierie Siat-Braun, les billons sont triés selon une essence, un schéma de sciage, une longueur et un emploi. Ces quatre facteurs constituent la base de la qualité Billon. L'essence contraint le billon vis-à-vis des schémas de sciage utilisables. Le schéma de sciage contraint les dimensions du billon dans sa section (le schéma de sciage doit s'inscrire dans un diamètre minimal de billon). La longueur contraint le billon dans sa troisième dimension: la longueur du billon doit être adaptée à la longueur du sciage qui en est issu. L'emploi d'un billon lie toutes les caractéristiques qualitatives du billon à la qualité Billon. Cette notion d'« emploi » contraint le billon à travers ses singularités, ses altérations et ses propriétés mécaniques.

Au regard du processus de production de la scierie Siat-Braun présenté dans la section 1.5.1, il est également nécessaire d'aborder ce que nous appelons la qualité Sciage. La qualité Sciage est définie par des caractéristiques quantitatives (dimensionnelles) et qualitatives comme pour la qualité Billon. Ces caractéristiques sont extraites du produit fini (appelé « sciage » en scierie), une fois le billon scié. La qualité Sciage est évidemment intimement liée à la qualité Billon.

La section suivante a pour objectif de définir la qualité Billon « enrichie » à intégrer dans le système ROB au regard de la qualité Billon déjà appliquée dans l'entreprise, de la qualité Sciage, et des processus de fabrication. Ces trois éléments constituent la **connaissance experte de l'entreprise**. Notre démarche est donc de sélectionner (section 2.1) puis d'appliquer une méthode de modélisation de connaissance (section 2.2) afin d'en exploiter les modèles pour définir la qualité Billon « enrichie » (section 2.3).

## 2.1 Méthode de modélisation de la connaissance

Cette section vise à sélectionner une méthode de modélisation adaptée au cas industriel de notre partenaire. La section 2.1.1 propose un premier état de l'art permettant de définir ce qu'est la connaissance experte d'une entreprise. La section 2.1.2 réduit le domaine de l'étude avec un second état de l'art sur les méthodes de modélisation de la connaissance afin de justifier le choix de la méthode présentée dans la section 2.1.3.

### 2.1.1 Définition de la connaissance experte

Le terme « connaissance » se rapporte à un concept qu'il faut définir ou, à défaut, tenter de cerner. Ce terme est apparu dans la littérature dans les années 1940 avec les premières réflexions sur ce domaine [Hayek F., 1945]. Après une période de stagnation, la conscience générale réalise que la « connaissance » est omniprésente quel que soit le domaine d'activité et que la maîtrise de celle-ci est un atout majeur [Davenport T., 1998]. De fait, une littérature abondante définit la « connaissance » selon différents concepts sous-jacents en fonction du cas d'étude, des objectifs ou des cas applicatifs [von Krogh G., 1997 ; Davenport T., 1998 ; Erden Z., 2008 ; Soullignac V., 2009]. Ainsi, nous n'essayons pas ici de définir une nouvelle vision de la connaissance car, comme le dit [Baumard P., 2002] : « Rien n'est plus ardu que de définir un objet dont le statut ontologique [le caractère objectif de son existence indépendamment de ceux qui la détiennent] est déjà une source inépuisable de conflits ». Notre approche de la connaissance est similaire à celle de Nonaka I. [Nonaka I., 2000] qui l'introduit par deux visions conceptuelles : la vision conceptuelle statique et dynamique.

Dans la **vision conceptuelle statique**, il est nécessaire de voir la connaissance comme figée, prise à un instant  $t$  dans un contexte donné. Cette vision requiert la différenciation de quatre termes : la donnée, l'information, la connaissance et la sagesse. Une manière courante de définir ces différents termes est la pyramide DIKW (Data-Information-Knowledge-

---

Wisdom, traduit par Donnée-Information-Connaissance-Sagesse) comme le montre la Figure 2-1 issue de [Hey J., 2004]. Dans cette pyramide, la **donnée** est un élément brut, l'**information** ajoute une signification à la donnée, c'est la sémantique, la **connaissance** ajoute un contexte à l'information, et finalement, la **sagesse** apporte la situation spatio-temporelle d'utilisation de la connaissance (quand utiliser la connaissance).

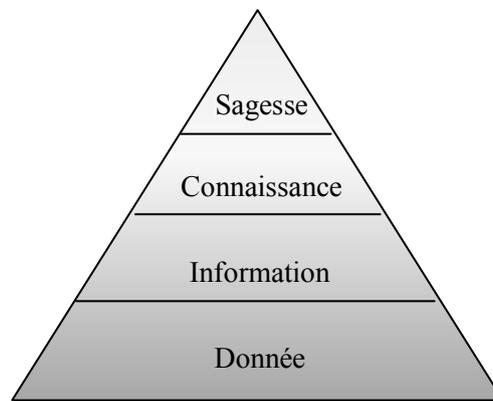


Figure 2-1 : Pyramide DIKW selon [Hey J., 2004]

La Figure 2-2 proposée par [Grundstein M., 2002] propose également de distinguer la donnée, l'information et la connaissance à travers la communication entre deux acteurs : la connaissance est une donnée interprétée par un acteur ; l'information est une connaissance fournie par un acteur 1 à un acteur 2 et, qui devient une donnée que l'acteur 2 doit s'approprier. Il apparaît que, si la transmission de la connaissance de l'acteur 1 vers l'acteur 2 est mauvaise, alors la connaissance de l'acteur 2 est altérée. Aussi, si le schéma d'interprétation de l'acteur 1 est différent de celui de l'acteur 2, alors la connaissance sera différente. Ceci introduit la notion de « commensurabilité ».

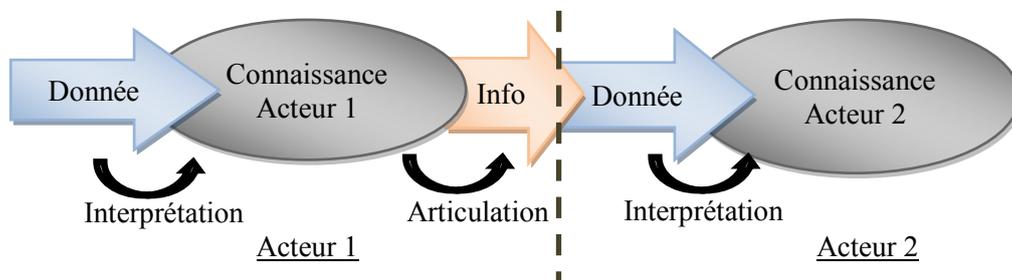
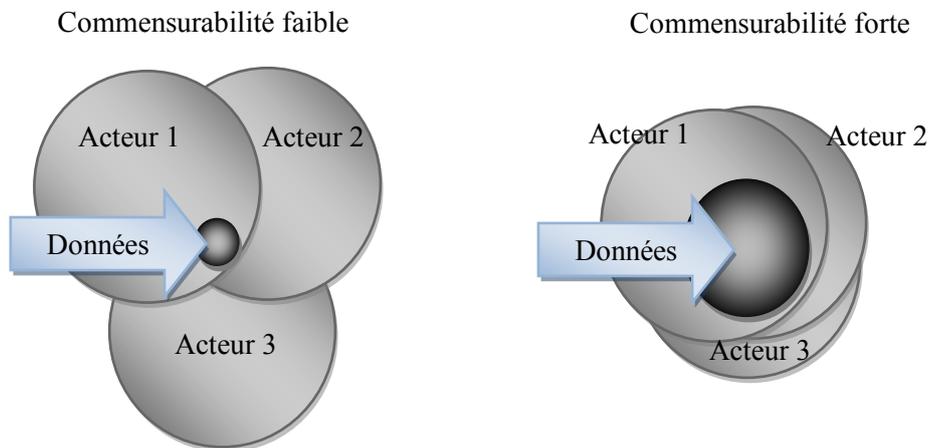


Figure 2-2 : Définition des termes "Donnée", "Information" et "Connaissance" selon [Grundstein M., 2002]

La connaissance d'un groupe d'acteurs est fortement influencée par la commensurabilité des schémas interprétatifs. Comme le schématise la Figure 2-3, si elle est faible, les données prennent un sens différent pour les acteurs, dans le cas contraire, les données prennent le même sens pour devenir une connaissance commune identique.

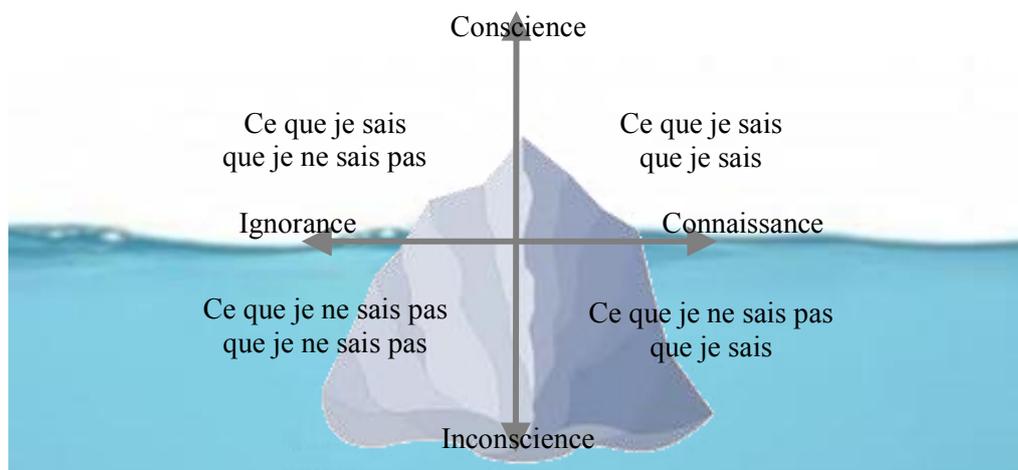


**Figure 2-3 : Commensurabilité des schémas interprétatifs**

En plus de cette approche, la vision statique de la connaissance doit aussi être abordée d'un point de vue sémantique. Reprenant les propos de [Grunstein M., 2002], « *La classification des connaissances de Michael Polanyi part du fait que nous pouvons connaître plus que nous pouvons dire* » « we can know more than we can tell » [Polanyi M., 1966]. *Il classe la connaissance humaine en deux catégories : les connaissances explicites se réfèrent à la connaissance qui peut être exprimée sous forme de mots, de dessins, d'autres moyens « articulés » notamment les métaphores ; les connaissances tacites sont les connaissances qui sont difficilement exprimables quelle que soit la forme du langage ».*

En 1996, Maurel-Entzmann F. propose de diviser la connaissance en trois catégories [Maurel-Entzmann F., 1996]. Leurs différences résident dans le fait qu'elles soient connues/inconnues, ou explicitées/non explicitées. La première catégorie définie concerne les connaissances connues et explicites, regroupant toutes les informations techniques et scientifiques mises à la disposition de tous. La deuxième concerne les connaissances connues et non explicitées, pouvant être dissociées en deux types : les connaissances implicites ou inconscientes et, les connaissances incertaines ou incomplètes. Le premier type est associé à des mécanismes qui sont devenus des habitudes pour le détenteur de la connaissance. La littérature parle de connaissances informelles. Pour le second type, le détenteur de la

connaissance peut se tromper car il est persuadé de la véracité de sa connaissance. La troisième catégorie concerne les connaissances encore inconnues dont la découverte est liée à diverses recherches ou divers essais. Dans une vision similaire, Vinck D. caractérise la connaissance grâce à une métaphore extrêmement parlante : un iceberg [Vinck D., 1997]. Cet iceberg est divisé en quatre selon deux axes : l'axe horizontal de l'ignorance/connaissance et celui vertical de l'inconscience /conscience. Comme le montre la Figure 2-4, la partie immergée de l'iceberg représente les connaissances inconscientes (ou tacites) détenues par l'Homme. Ainsi, l'image de Vinck D. suggère que ces connaissances tacites représentent une grande partie de la connaissance alors que Maurel-Entzmann F. la voyait comme un sous-groupe de sa deuxième catégorie. Dans son état de l'art, Soulignac V. évalue que la connaissance d'une entreprise s'exprime à 30% de manière explicite et à 70% de manière tacite. Il est donc possible de donner une importance relative différente à chaque catégorie en fonction des cas, mais en tout état de cause, notre vision de la connaissance est elle aussi partitionnée en quatre catégories comme D. Vinck ou F. Maurel-Entzmann.

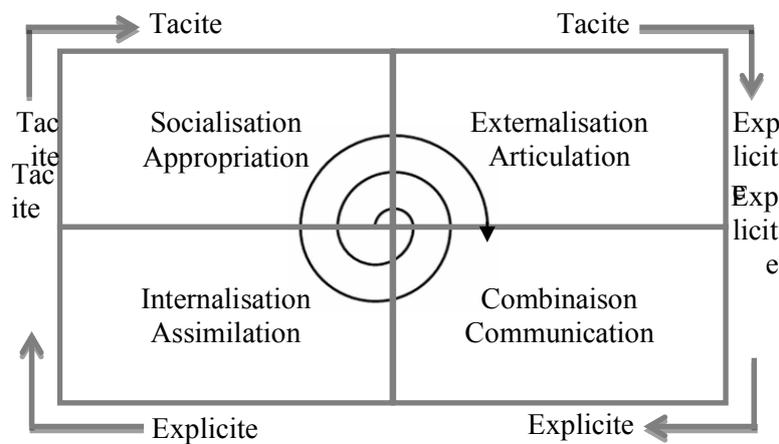


**Figure 2-4 : Iceberg de Vinck D. [Vinck D., 1997]**

En 2001, Bennett R. démontre que les connaissances tacites sont utilisées dans les plus hautes instances de décisions des entreprises [Bennett R., 2001]. L'auteur démontre que les décisions prises par les comités d'entreprise sont fondées sur la connivence et la densité de connaissance implicite partagées par les décideurs. Le terme de « partage » ici employé montre qu'une autre partition de la connaissance est possible : celui de la connaissance individuelle et de la connaissance collective. Dans ce cas, la connaissance est soit détenue par

une personne, soit par un groupe de personnes. Reprenant un exemple courant, la connaissance individuelle devient une connaissance commune lors d'un échange dans une réunion. La connaissance commune ainsi créée n'est pas strictement la connaissance individuelle initiale car le passage de l'une à l'autre se fait de manière dynamique avec tous les acteurs : ce fait est exprimée dans la **vision conceptuelle dynamique** de la connaissance. Cette vision explore les mécanismes de passage entre les connaissances tacites, explicites, individuelles ou collectives.

Nonaka I. est un des premiers auteurs à définir les théories et les concepts de la connaissance. Le modèle SECI (Socialisation – Externalisation – Combinaison – Internalisation) est un modèle de référence repris dans beaucoup d'études. Il est présenté Figure 2-5 et nomme l'ensemble des mécanismes de passage entre les connaissances tacites, explicites, individuelles ou collectives [Nonaka I., 2000]. Notons que la complexité de ce modèle ne réside pas dans la sémantique des termes, mais dans l'alternance des mécanismes en fonction des situations.



**Figure 2-5 : Modèle SECI proposé par [Nonaka I., 2000]**

Le concept japonais de *ba* est aussi utilisé par Nonaka I. pour justifier toutes les questions liées aux sensations de l'Homme influant sur le partage de la connaissance. Fayard P. [Fayard P., 2002] définit les tenants et les aboutissants de ce concept. Nous proposons ici d'en citer les principales notions :

- « Le ba [est un idéogramme qui] peut être assimilé à **un milieu** où les personnes (potentiel) qui s'y (moteur) investissent éprouvent une évolution qualitative. [...] une succession d'événements dont le flux est sans fin. »
- « Nonaka Ikujiro définit le ba comme un espace partagé de relations en émergence. **Cet espace peut être physique** (le bureau ou des lieux de travail dispersés), **mental** (expériences partagées, idées, idéaux) ou toute combinaison des deux. Pour lui, ce qui différencie le ba des interactions humaines ordinaires est le concept de création de connaissance. Le ba fournit **une plate-forme**, qui, dans une perspective transcendante, intègre toute l'information requise [...] le ba est **un contexte porteur de sens**. »
- « Reprenant en cela les quatre phases du modèle SECI de Nonaka, il est possible de considérer les effets du ba dans ses différentes particularités : son émergence, la socialisation qu'il opère, l'interaction systématique qu'il permet et enfin son effet comme agent d'intériorisation de connaissance. Le ba comporte une forte composante tacite lorsque se **partagent les émotions, les expériences, les sentiments et les images mentales**. Il fournit un **contexte pour la socialisation, un espace existentiel** dans le sens où il représente le lieu où l'individu transcende ses limites au moyen d'une expérience physique à même de provoquer l'implication de l'ensemble de ses capacités ».

La vision dynamique de la connaissance est souvent étudiée dans des cas appliqués aux entreprises. On constate que les recherches prennent plusieurs directions dans ce domaine. [Peyrelong M-F., 2002] fait une analyse de la situation des entreprises face aux problématiques de la connaissance. L'auteur constate que les entreprises modernes sont de plus en plus multi-localisées, i.e., l'entreprise se situe sur plusieurs positions géographiques pour des raisons stratégiques. « Etant donné que l'activité de travail est en grande partie fondée sur les échanges d'information, ou de connaissances », l'auteur montre que cette multi-localité pose des problèmes de partage de l'information car les employés sont, de fait, de moins en moins en coprésence. Cette séparation affaiblit autant le système d'information collectif qu'individuel. L'individu doit donc collaborer et œuvrer pour une connaissance collective commune. Dans son commentaire, W. Starbuck appuie ce fait en justifiant que la connaissance de l'homme est principalement le fruit d'une construction sociale [Starbuck W., 2009].

En 1997, [von Krogh G., 1997] définissait un « Activiste de la connaissance » au sein de l'entreprise comme un département ou une personne en charge de capitaliser la création de connaissance, de connecter les initiatives de création de connaissance et de vendre des prévisions. En effet, il est important de distinguer l'activiste et le cogniticien en charge des tâches liées à l'émergence de nouvelles connaissances au sein des différents secteurs de l'entreprise. [Frederiks P., 2006] définit quant à lui les rôles des participants. Il distingue les cogniticiens (analystes du système) et les experts du domaine. Les experts du domaine doivent concrétiser la connaissance alors que les cogniticiens doivent la rendre abstraite.

G. von Krogh décrit quatre stratégies afin de capitaliser et d'utiliser la connaissance au sein de l'entreprise [von Krogh G., 2001]. Ces stratégies sont basées sur l'observation des pratiques de management de la connaissance plaçant ainsi le manager au centre de celles-ci. Ces stratégies sont toutes basées sur la proactivité des managers, le but étant de tirer bénéfice de la connaissance le plus rapidement possible car elle a un coût élevé que seul le gain en efficience peut justifier. En 2010, Anand G. se concentre sur les pratiques des managers pour extraire et intégrer la connaissance des membres d'une équipe pour atteindre les objectifs [Anand G., 2010]. Il crée une échelle des « pratiques de création de connaissance » en intégrant les événements extérieurs, la taille de l'équipe, le temps du projet, etc. L'auteur évalue que la variation possible du résultat due aux paramètres non intégrés représente 25%.

En 2007, [Baumard P., 2007] déconstruit une vérité industrielle : le partage de connaissance entre entreprises concurrentes (ou « coopétition ») ne mène pas nécessairement à la double contrainte ou au paradoxe. Le concept de coopétition présenté repose sur une logique d'avantage concurrentiel basé elle-même sur la capacité à créer des asymétries de connaissance où coopération et concurrence sont simultanées et, sur la créativité dans les processus de détection ou de création de ruptures stratégiques. L'auteur déplore qu'un tel concept nécessite une révolution culturelle des dirigeants.

Le modèle KnoVA (**K**nowledge **V**alorization and **A**cquisition) est quant à lui un modèle permettant de quantifier la connaissance [Serrafero P., 2002]. La connaissance est ainsi quantifiée selon quatre axiomes qui sont la connaissance elle-même, la certitude, la compétence et l'intelligence. Ce modèle est une proposition théorique basée sur la systémique, la théorie quantique et la génétique et met en avant l'élément de connaissance non-fissible : le cogniton, qui est mesuré en Knowledge digIT (KIT). Un tel modèle permet selon l'auteur de formaliser les objets cognitifs et de mesurer la masse cognitive pour mieux appréhender un retour sur investissement de l'innovation ou la valeur du patrimoine de

connaissance d'une entreprise. L'étude de [Erden Z., 2008] décrit un modèle d'évaluation de la connaissance tacite d'un groupe. L'auteur justifie l'intérêt d'étudier cette connaissance de groupe comme suit : la connaissance est la source de compétitivité la plus importante pour une entreprise ; de fait, la création de connaissance devient le fer de lance de l'innovation ; et finalement, l'innovation est le produit de la connaissance (en majorité tacite) de plusieurs personnes. La connaissance tacite d'un groupe n'est pas l'agrégation des connaissances tacites individuelles. L'auteur propose ainsi un modèle d'évaluation basé sur le modèle SECI mais aussi sur les concepts de « phronesis » d'Aristote [Aristote, 1999 ; Nonaka I., 2007], sur les théories d'improvisation organisationnelle [Crossan M., 1998] et sur l'esthétique organisationnelle [Baumgarten A., 1950].

La connaissance peut ainsi être appréhendée selon plusieurs approches. Les études sur la connaissance peuvent être divisées en deux disciplines : l'ingénierie de la connaissance et le management de la connaissance. L'ingénierie de la connaissance se réfère à toutes les techniques liées au traitement et l'exploitation des données afin d'en extraire une connaissance. Le management de la connaissance regroupe toutes les techniques permettant de diffuser, structurer et maintenir la connaissance au sein d'une entité. Cette discipline est souvent associée aux problématiques de capitalisation des connaissances. Shu-hsien Liao [Liao S., 2003] décompose la connaissance selon sept utilisations liées aux deux disciplines : la structuration de la connaissance, l'information et la communication technologique, les bases de données, qui se réfèrent principalement au management de la connaissance ; puis l'exploitation de données, les systèmes basés sur la connaissance, l'intelligence artificielle et la modélisation, qui se réfèrent plutôt à l'ingénierie de la connaissance. L'auteur précise que chacune de ces utilisations n'est pas indépendante. Ainsi, l'une s'appuie ou peut s'appuyer sur les six autres.

Notre objectif est de concevoir le système de tri Qualité billon sur la base des connaissances expertes. Notre approche n'est donc pas de faire vivre une connaissance au sein de l'entreprise, mais bien de capitaliser les connaissances à un instant donné sur les processus, les méthodes et les consignes de production. Pour cela, nous devons acquérir, puis structurer, la connaissance afin de la contrôler, de l'homogénéiser, puis de la valider. Sachant désormais que la connaissance experte peut avoir plusieurs formes (tacite ou explicite, consciente ou inconsciente, individuelle ou collective), nous avons choisi d'utiliser la modélisation de

---

connaissance pour parvenir à notre objectif. Cependant, il faut choisir une méthode de modélisation adaptée.

### 2.1.2 Modélisation de la connaissance experte

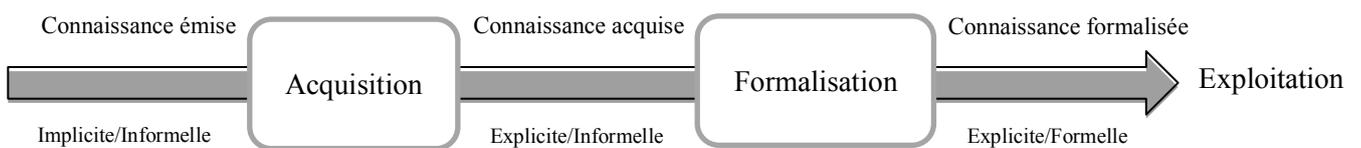
Une riche bibliographie existe sous le terme de « modélisation de connaissances ». Il convient donc de définir, comme pour la connaissance, le périmètre que nous donnons à ce domaine. Dans une première définition, la modélisation vise à représenter une partie du monde réel de manière structurée et formelle. Le modèle est le résultat de la modélisation. Il existe plusieurs types de modèles en fonction du domaine d'étude comme par exemple, le modèle mathématique, le modèle 3D d'une pièce, le modèle de processus ou encore le modèle économique. Dans notre cas, nous cherchons à établir un **modèle de connaissance**. Dans la littérature, les modèles de connaissances sont souvent associés à des modèles dits « ontologiques ». En ingénierie de la connaissance, une ontologie est définie comme une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée [Gruber T., 1993]. Une ontologie encode une vue partielle du monde réel, en accord avec un domaine donné. Elle est composée d'un ensemble de concepts, de leurs définitions et de leurs relations qui peuvent être utilisés pour décrire et raisonner dans le domaine [Hudelot C., 2008]. Cependant, la représentation de connaissance par des ontologies comporte des risques que Brewster C. expose à travers les cinq fonctions de la représentation d'ontologie [Brewster C., 2007] :

- L'ontologie est un remplacement. La « fidélité » parfaite de sa représentation est impossible, et cette imperfection amène de l'erreur ;
- L'ontologie est constituée d'un ensemble d'engagement ontologique, i.e., le contenu de la représentation donne une certaine perspective du monde réel ;
- L'ontologie est une théorie fragmentaire du raisonnement intelligent. Chaque type de problème nécessite un type de pensée, de raisonnement et de représentation approprié ;
- L'ontologie est un moyen pour l'efficacité calculatoire, car la vitesse est une contrainte pour la capacité de raisonnement, et ;
- L'ontologie est un moyen d'expression pour l'homme pour communiquer avec la machine.

Ainsi, certaines connaissances peuvent être représentées par des ontologies et d'autres non. Il y a toujours un compromis à faire entre l'expressivité et l'utilité dans une ontologie sinon celle-ci devient trop complexe et inutilisable. Une connaissance est en évolution

constante (dynamique) ainsi la rigidité de l'ontologie pose des difficultés pour maintenir la connaissance à jour. Malgré tout, à un instant  $t$  donné, l'ontologie permet d'éviter les ambiguïtés et les redondances afin d'organiser et contextualiser les informations. Nos travaux se placent dans ce contexte temporel figé et cherchent ainsi à mettre en avant des **modèles ontologiques de connaissance**.

Pour obtenir un modèle de connaissance et l'exploiter, Blaise décompose la méthode générale à travers trois processus comme le montre la Figure 2-6 [Blaise J-C., 2003] : « l'acquisition » permettant le passage d'une connaissance implicite informelle (tacite) à une connaissance explicite informelle, la « formalisation » amenant à une connaissance explicite formelle et « l'exploitation » permettant de spécifier un modèle propre au cas d'étude. La connaissance implicite informelle définie par Blaise J-C. est associée aux cotés droits « Connaissance » de l'iceberg présenté par Vinck D. (Figure 2-4), i.e., ce que les experts « savent qu'ils savent » et ce qu'ils « ne savent pas qu'ils savent ». Ces trois processus sont réalisés de manière successive. Des méthodes permettent de réaliser un de ces trois processus de manière indépendante, mais il existe aussi de véritables méthodologies guidant le cognitif pas à pas afin de réaliser les trois étapes. Ces méthodologies ajoutent ou renomment des étapes, mais la logique des trois processus est respectée. On propose ici de présenter des méthodes indépendantes autant que des méthodologies. Notons qu'une méthode indépendante peut aussi être utilisée dans le cadre d'une méthodologie.



**Figure 2-6: Processus généraux de la modélisation selon [Blaise J.C., 2003]**

### **Méthodes d'acquisition de la connaissance**

Dans son analyse, Payne P. considère la conduite de l'acquisition de connaissance comme une tâche complexe qui demande une mobilisation totale et entière des ressources [Payne P., 2007]. Ainsi, le choix des méthodes d'acquisition est crucial. Les sources de

connaissance peuvent prendre plusieurs formes telles qu'un texte, une base de données, ou le domaine d'expertise d'un homme. En entreprise, c'est le domaine d'expertise qui est le plus couramment acquis. L'utilisation du domaine d'expertise de l'Homme comme une connaissance présuppose que l'homme sélectionné, dit « expert », ait une connaissance suffisante du domaine, ait un intérêt à participer au processus d'acquisition, soit représentatif de l'expert « typique » du domaine et qu'il introduise un minimum de biais dans l'étude pendant sa participation. Un Homme combinant ces quatre aspects peut être difficile à trouver, ainsi, l'acquisition se fait généralement sur la base de plusieurs experts ce qui minimise les erreurs individuelles. De plus, l'intégration de plusieurs experts dans le projet contribue à la qualité de l'acquisition par la synergie de groupe. La connaissance ainsi collectée est bien plus que la somme des connaissances individuelles. L'utilisation de plusieurs experts peut malgré tout conduire à des problèmes de fusion de connaissance mais le risque pris est bien inférieur au bénéfice obtenu. Nous présentons ainsi plusieurs méthodes dites « multi-experts ».

[Payne P., 2007] classe les méthodes d'acquisition en trois catégories comme le montre la Figure 2-7 :

- *l'extraction d'élément de connaissance*, qui regroupe tous les techniques d'extraction des éléments atomiques d'information ou de connaissance ;
- *l'extraction de relation*, qui englobe toutes les techniques d'extraction des relations qu'il existe entre les éléments atomiques ;
- *l'extraction combinée*, qui permet d'extraire les éléments atomiques et leurs relations en même temps.

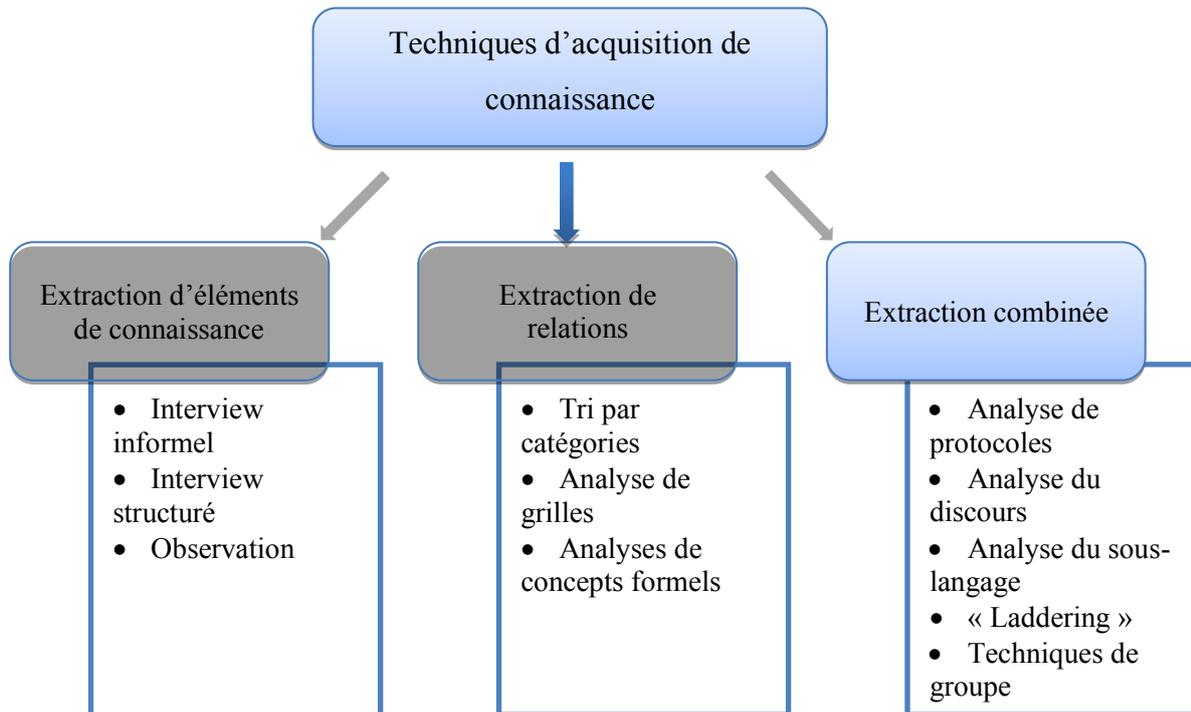


Figure 2-7 : Taxonomie de l'acquisition de connaissance selon [Payne P., 2007]

La première catégorie est composée des **techniques d'interview et d'observation**. Les interviews peuvent être informelles (une discussion avec l'expert) ou structurées (avec la préparation d'une série de questions ou d'un questionnaire). Les *interviews* peuvent être une source d'erreur car la connaissance de l'expert est implicite pour celui-ci, i.e., lorsqu'il l'exprime, les termes qu'il emploie sont ambigus ou font référence à une connaissance non connue de tous. La transmission de l'information se fait principalement avec le langage naturel, bien que des explications gestuelles puissent être utilisées lors de l'interview. Ce langage est quasi-parfait entre les humains selon [Schmidt G., 1998 ; Andrade J., 2006], mais il montre ses limites dans certaines situations [Frederiks P., 2006]. Plusieurs sources peuvent ainsi fausser la connaissance émise :

- la nature même du langage qui, selon [Walker D.H., 1998], peut être ambigu en fonction de la complexité ou de la spécificité des domaines d'expertises ;
- l'utilisation de moyens détournés pour exprimer sa connaissance tels que des synonymes, des concepts voisins, des niveaux intermédiaires d'abstraction, qui mène à une approximation de la connaissance.

Les *observations directes* permettent d'extraire des connaissances tacites des experts. Le cognicien devient alors le garant de l'explicitation de cette connaissance qui est

inconsciente pour l'expert. Les informations collectées par l'observateur sont riches et concrètes mais celles-ci peuvent souffrir d'un manque de contextualisation lors du relevé. En effet, l'utilisation de cette méthode dans une entreprise manufacturière peut être perturbée par la cadence de production, le manque de communication avec l'expert à cause du bruit ou encore la rapidité des faits et des gestes de l'expert.

La seconde catégorie est composée du tri par catégories, de l'analyse de grilles de données et de l'analyse de concepts formels. Le *tri par catégories* vise à regrouper les informations par critère (texte, image, etc.) [Rugg G., 1997]. Un même groupe a une même relation. Puis il est possible de catégoriser encore ce groupe, et ainsi de suite. Ces méthodes de tri sont idéales pour la découverte de relation entre éléments de connaissance, mais peu efficaces pour déterminer les unités atomiques d'information ou de connaissance. L'*analyse de grilles* est basée sur la théorie dans laquelle l'Homme donne du sens aux « informations » du monde à travers la création de catégories. La technique est de créer une table où les éléments de connaissance sont sur les colonnes et les lignes correspondent à une distinction de l'élément. Le cogniticien doit alors compléter les cases vides par le degré de relation entre un élément et une de ces distinctions. L'*analyse de concepts formels* est souvent utilisée dans le développement et la fusion d'ontologies [Cimiano P., 2004]. Ces techniques ont pour but de mettre en avant des « regroupements naturels » d'éléments ou d'attributs. Pour cela, il faut tout d'abord extraire les « concepts formels » puis visualiser et explorer les « treillis formels » résultants. Les treillis représentent les relations entre éléments. L'exploration de ces treillis peut être longue et fastidieuse ainsi il existe plusieurs outils pour une exploration informatisée.

La troisième catégorie regroupe l'analyse de protocoles, l'analyse du discours, l'analyse du sous-langage, le « Laddering » et les techniques de groupe. L'*analyse de protocoles et du discours* sont très proches. Ces deux techniques visent à extraire une connaissance d'un individu au moment où il résout un problème ou lorsque qu'il effectue une tâche. L'individu doit « penser à voix haute » afin que le cogniticien puisse enregistrer le discours. Il pourra ensuite analyser et interpréter le raisonnement de l'expert et en extraire la connaissance et ses relations. L'*analyse du sous-langage* est l'analyse automatisée ou non (très longue dans ce cas) de textes spécifique à un domaine [Oh A., 2002]. Cette analyse extrait un ensemble de caractéristiques critiques comme la sémantique, la cooccurrence des contraintes, les omissions d'informations spécifiques au contexte, l'utilisation de la terminologie et du vocabulaire. Des formats et des règles sont ensuite élaborés avec ces caractéristiques. Le « *Laddering* » est une

---

technique de questions structurées issue de l'analyse de grilles permettant une hiérarchisation des concepts [Corbridge C., 1994]. Cette technique permet de structurer les éléments de connaissance et d'en extraire les relations, mais elle n'est que peu, voire pas du tout, adaptée pour comparer ou agréger plusieurs résultats du même type. Les *techniques de groupe* sont relativement bien connues du grand public, il s'agit des techniques de brainstorming, de conciliation, de groupe d'étude, etc. Toutes ces techniques visent à extraire une connaissance basée sur un consensus de plusieurs experts. Une telle connaissance est plus fidèle que celle extraite d'un seul expert.

Suite à l'utilisation d'une ou plusieurs de ces techniques, le cogniticien dispose d'une connaissance formelle mais « non formalisée », i.e., la connaissance n'est pas exprimée selon un formalisme standardisé compréhensible par tous les acteurs du projet. Le cogniticien doit donc appliquer une méthode de formalisation de la connaissance

### Méthodes de formalisation de la connaissance

Le but de la formalisation est de transformer la connaissance explicite informelle en connaissance explicite formelle. Selon [Duribeux-Cocquebert M., 2000], trois approches peuvent être utilisées pour modéliser la connaissance de manière structurée : l'approche ascendante, l'approche descendante et l'approche mixte (Figure 2-8).

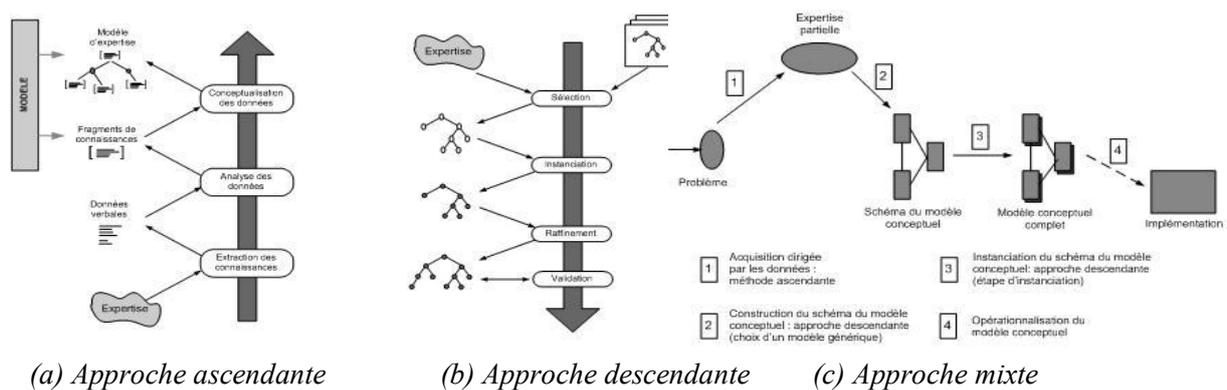


Figure 2-8 : Approche ascendante (a), approche descendantes (b) et approche mixte (c) selon [Duribeux-Cocquebert M., 2000]

Ces trois approches s'utilisent et se matérialisent différemment en fonction de la connaissance à formaliser, mais également en fonction des connaissances que possède le

cogniticien. L'*approche ascendante* implique que le cogniticien doit recueillir le maximum d'informations sans guider ou influencer l'expert du domaine propriétaire de la connaissance. Le modèle est alors construit pas à pas par raffinement successif d'information (va et vient entre l'acquisition et la modélisation); l'abstraction des connaissances permet de faire émerger les concepts du domaine et les relations entre les concepts. L'*approche descendante* focalise le cogniticien sur la définition du modèle final afin de filtrer les connaissances acquises et de guider efficacement le processus d'acquisition ; elle nécessite que le cogniticien ait des connaissances acquises préalablement sur le système expertisé. L'*approche mixte* combine la méthode ascendante puis la méthode descendante dans une même formalisation.

Plusieurs formalismes basés sur le langage naturel sont référencés dans la littérature. On les nomme communément des « langages ». Nous citons de manière non exhaustive quelques langages capables de formaliser une ontologie. Le formalisme *Conceptual Graphs (CG)* a une approche « contraintes » distinguant les contraintes existentielles (positives ou négatives) et les contraintes descriptives [Dibie-Barthélemy J., 2006 ; Sowa J., 1976]. De plus, ce support robuste sépare distinctement la terminologie (ontologie) de la connaissance et des faits (assertions). Le formalisme *Object Conceptual Prototyping Language (OCPL)* a une approche objet permettant de représenter des logiques modale, déontique (obligation/permission), dynamique ou temporaire [James A.E., 2000 ; Dignum F., 1987]. OCPL permet une structuration des objets et de la connaissance. Il dispose de beaucoup de liens avec d'autres langages. Des langages spécifiques à un domaine sont aussi créés tel que *PROforma* [Sutton D., 2009 ; Fox J., 1996] ou *Textual Variability Language (TVL)* [Classen A., 2011] afin de formaliser la sémantique, de lever les ambiguïtés et de donner au cogniticien un langage avec une syntaxe riche dans son domaine en particulier. *Entity Relation (ER ou ERModel)* est un des premiers langages créé. Les entités sont représentées par des rectangles et les relations par des losanges. L'application, non triviale, de contraintes pour le rendre plus riche le rend aussi beaucoup plus complexe [Gemino A., 2005 ; Hartmann S., 2009 ; Chen P., 1976]. Il permet de formaliser des ontologies, mais le cogniticien qui l'emploie doit toujours faire un compromis entre la complexité et la simplicité pour que le modèle puisse à la fois avoir du contenant et qu'il puisse être compris par les autres acteurs. Le formalisme *Ontology Web Language (OWL)* est un formalisme utilisé pour structurer les informations issues du web. Il est utilisé dans des applications nécessitant des traitements sur le contenu des informations formalisées [McGuinness D., 2004]. L'utilisation du formalisme OWL est

particulièrement bien adaptée lorsqu'il y a une grande quantité d'informations à structurer. Le formalisme *Unified Modeling Language (UML)* est le plus connu et est orienté « objet ». Il est principalement utilisé en génie logiciel, mais sa standardisation l'a exporté vers beaucoup d'autres domaines. Il nécessite cependant un temps de prise en main par le cogniticien pour qu'il puisse le manipuler judicieusement. Finalement, *Object-Role Modeling (ORM)* est orienté « objet » et se veut être un outil puissant pour la formalisation de modèle conceptuel des systèmes d'information [Halpin T., 2006 ; Troyer (De) O., 1996]. Pour preuve de sa simplicité de prise en main, ORM sert de support aux premières études détaillant les procédures de modélisation pour les non-initiés [ter Hofstede A.H.M., 1998].

Ces formalismes sont supportés par des outils informatiques permettant, pour les plus simples, de réaliser les modèles informatiquement et, pour les plus complexes, d'exploiter automatiquement les modèles obtenus afin d'extraire certaines caractéristiques, règles ou autres. L'état de l'art de [Kim J., 2007] présente ces outils. Nous en citons quelques-uns de manière non exhaustive : PROTEGE, SALT, EXPECT, PROTOS, TAQL, SLICK.

### **Méthodologies de modélisation de la connaissance**

Des méthodologies sont mises au point afin de répondre à un maximum de cas applicatifs et proposent au cogniticien plusieurs étapes afin d'atteindre son objectif. Certaines suggèrent de plus des outils adaptés permettant de réaliser les actions. Les méthodologies sont souvent développées afin de répondre aux besoins industriels. Les méthodologies suivantes, appelées « méthodes » par abus de langage, peuvent répondre à nos attentes. La méthode *GAMETH* (Global Analysis Methodology) permet d'identifier les connaissances cruciales d'une organisation grâce à une approche processus [Grundstein M., 2003]. Le résultat est une cartographie des processus de l'organisation. La méthode *CommonKADS* (Common Knowledge Acquisition and Design Support) est couramment utilisée car il s'agit uniquement d'une démarche pour obtenir les modèles de représentation selon différents points de vue (il n'y a pas de formalisme associé) [Sánchez-Pi N., 2012 ; Sutton D., 2009 ; Schreiber G., 1994]. *MIKE* (Model-based and Incremental Knowledge Engineering), *VITAL*, *MOKA* (Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications) et *KNOMAD* (Knowledge Nurture for Optimal Multidisciplinary Analysis and Design) s'inspirent de *CommonKADS*. L'objectif de *MIKE* est de modéliser les processus d'acquisition de connaissance afin d'obtenir un cycle de vie structuré rendant la réutilisation de connaissance plus aisée [Freiberg M., 2012 ; Angele J., 1992]. *VITAL* est bien moins

utilisée, mais elle permet de structurer la connaissance durant la phase de conception d'un système [Motta E., 1996 ; Domingue J., 1993]. *MOKA* permet l'accès à des niveaux de connaissance plus élevés car la méthode est moins concrète [Skarka W., 2007 ; Oldham K., 1998]. Elle est supportée par le formalisme ICARE (Illustration, Contrainte, Activité, Règle et Entité) pour ces modèles informels, et par MML (Moka Modeling Language) \_une extension d'UML\_ pour ces modèles formels. A l'inverse, la méthode *KNOMAD* veut rendre *MOKA* plus concrète et détaille une méthodologie intégrant la multidisciplinarité des experts détenant la connaissance [Curran R., 2010]. La méthode *MASK* (Methodology for Analysing and Structuring Knowledge) est une extension de la méthode plus connue *MKSM* (Methodology for Knowledge System Management) [Barthelme F., 1998] et permet d'obtenir des fiches descriptives (résultat informels), six modèles de représentation de la connaissance et un modèle synthétique représentant six points de vue (résultats formels) [Matta N., 2009 ; Benmahamed D., 2005]. *KAMET II* est développée sur l'outil *PROTEGE* et donne un modèle du cycle de vie fournissant un cadre graphique afin de maîtriser les processus d'acquisition de connaissance et aussi de faciliter l'organisation des connaissances provenant de plusieurs sources [Cairo O., 2012]. Cette méthode est aussi un outil pour le manager qui identifie les risques si les objectifs ne sont pas atteints et, un outil pour le contrôle qualité également. *CBR* (Case Based Reasoning) [Liao Z., 2012 ; Xu L., 1995] et *RBR* (Rule Based Reasoning) [Metchitov A., 1995] sont similaires. *CBR* se base sur des cas réels afin de définir le comportement particulier d'un système alors que *RBR* veut établir les règles générales du comportement d'un système.

Malgré les efforts de vulgarisation des auteurs, l'application des méthodologies présentées précédemment s'avère souvent obscure et complexe pour un non initié. De plus, on note que ces méthodes sont :

- souvent spécifiques au domaine initial du développement et nécessitent des outils dérivés pour être compatible à un autre domaine ;
- demandent l'utilisation d'un formalisme dont la lisibilité n'est pas aisée et dont la prise en main n'est pas naturelle (approches CG et OCPL) ;
- sont associées à un outil de transcription du modèle en langage trop complexe et peu efficace.

De fait, nous nous sommes tourné vers une autre méthodologie de modélisation : **NIAM-ORM (Natural langage Information Analysis Method – Object Role Modeling)**.

---

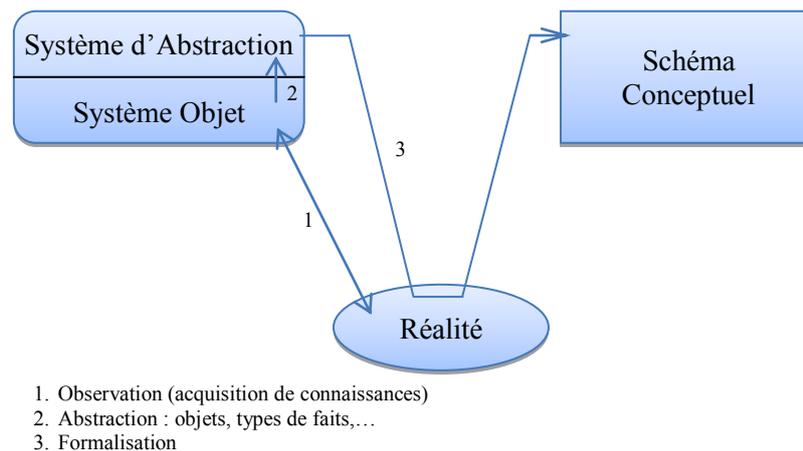
### 2.1.3 Méthode NIAM-ORM

NIAM peut être vue à la fois comme un langage et comme une méthodologie de modélisation conceptuelle [La-Ongsri S., 2008]. C'est sous ce dernier aspect que nous l'abordons. Le langage ORM se veut être une simplification de NIAM. De ces deux langages, ORM est celui le plus exploité par la communauté et donc implémenté informatiquement. Ainsi, la méthode NIAM-ORM tire son nom de la méthodologie NIAM associée au formalisme simplifié ORM. Cette méthode n'est pas une méthode de création de connaissance à proprement parler comme dans le domaine de l'Intelligence Artificielle, mais une méthode d'explicitation de la connaissance, c'est-à-dire qu'à l'usage, la simplicité de son formalisme clarifie (aux yeux du cogniticien) la connaissance modélisée. Cette méthode (ou méthodologie) a pour objectif premier l'analyse des connaissances relatives à un domaine délimité (appelé Univers de Discours ou Univers d'Intérêt). Pour ce faire, elle utilise un langage de description du monde réel en termes d'objets qui jouent des rôles. Bien que les objets manipulés par ORM aient la même nature que ceux manipulés dans les diagrammes de classes UML et bien qu'il existe des équivalences entre le formalisme ORM et celui de UML [Halpin T., 1999] (voir Annexe 3), le principal intérêt de ORM réside dans sa capacité à exprimer l'information sous forme de relations simples. Cela se traduit par une verbalisation de l'Univers de Discours en fragments de connaissances élémentaires [Halpin T., 2006]. Cette expressivité reconnue est aussi complétée par sa simplicité de formalisation à l'aide de notations graphiques compréhensibles pour un non-expert.

De manière générale, la méthode NIAM-ORM distingue l'Univers d'Intérêt à travers deux systèmes :

- le *système objet* dans lequel les objets existent, partie de la réalité observable pour laquelle on veut collecter de l'information ;
- et le *système d'abstraction* comprenant l'ensemble des règles décrivant le comportement des objets, partie abstraite de l'agencement de la réalité résultante d'un processus mental de généralisation.

La Figure 2-9 représente la démarche de construction du modèle conceptuel, reflet de la réalité, à partir des relations existantes entre les concepts de système objet et de système d'abstraction.



**Figure 2-9 : Démarche de construction du modèle conceptuel au travers des concepts de Système Objet et de Système d'Abstraction selon [Blaise J-C., 2003]**

La démarche de modélisation de la méthode NIAM-ORM s'appuie sur trois axiomes permettant de s'assurer de la qualité du modèle obtenu [Blaise J-C., 2003]. Ces trois axiomes concernent :

- l'équivalence sémantique entre l'énoncé d'un fait en langage naturel et un ensemble de phrases élémentaires ;
- l'expression d'une phrase élémentaire met en évidence des idées et des ponts de dénomination ;
- la détermination de tous les états possibles et de toutes les transitions permises dans la base de données.

La phrase élémentaire est une phrase qui ne peut être décomposée en phrases plus courtes sans perte de sémantique. Elle représente un fait et un seul, et sa structure est agencée selon une logique < sujet > < verbe > < complément >. La décomposition de l'énoncé d'un fait en de telles structures permet de minimiser l'ambiguïté et les raccourcis inhérents à l'utilisation du langage naturel et, permet une première structuration de la connaissance émise avant qu'elle ne soit formalisée.

Les *idées* et les *ponts de dénomination* représentent respectivement les liens entre les objets abstraits ainsi que les liens entre les objets abstraits et les objets qu'ils représentent dans le monde réel. Les objets abstraits sont des Types d'Objets NON Lexicaux (NOLOT) et les objets du monde réel sont des Types d'Objets Lexicaux (LOT). En considérant la phrase

« *Paul étudie le droit* », il est possible de reformuler la phrase de manière à éviter toute ambiguïté. Dans ce cas, la phrase devient : « La *Personne* désignée par le *Nom* ‘Paul’ étudie la *Matière* désignée par le *Nom de matière* ‘droit’ ». Les objets ‘Paul’ et ‘droit’ sont les objets du monde réel (LOT) et les objets *Personne* et *Matière* sont les objets abstraits (NOLOT). La phrase « Une *Personne* étudie une *Matière* » élaborée à partir de la phrase précédente, en faisant abstraction des valeurs des objets, représente une *idée*. Chaque idée est porteuse de l’information contenue dans le modèle conceptuel. En reprenant la phrase de départ reformulée, deux phrases sont présentes : « une *Personne* est désignée par un *Nom* » et « une *Matière* est désignée par un *Nom de matière* ». Ces deux phrases représentent des ponts de dénomination et ne portent aucune information. Elles servent juste à représenter la partie réelle de l’Univers d’Intérêt dans la base de données finale.

Enfin, l’ajout de contraintes sur les objets composant une idée doit être effectuée afin de s’assurer de la cohérence entre la connaissance modélisée et les faits observés. Les contraintes applicables comprennent, entre autres, les contraintes de totalité et les contraintes d’unicité (applicables sur les objets eux-mêmes), les contraintes d’exclusion, d’inclusion et de totalité (applicables entre les idées).

En pratique, la méthode de modélisation NIAM-ORM s’articule autour de quatre points comme le montre la Figure 2-10 : l’acquisition des connaissances (à partir d’un énoncé en langage naturel), la modélisation des connaissances (sous forme d’un schéma conceptuel), la validation du modèle (par rapport aux connaissances émises), et la validation des connaissances formalisées (grâce à une transposition du modèle en langage naturel binaire [Attigbe C., 1996]).

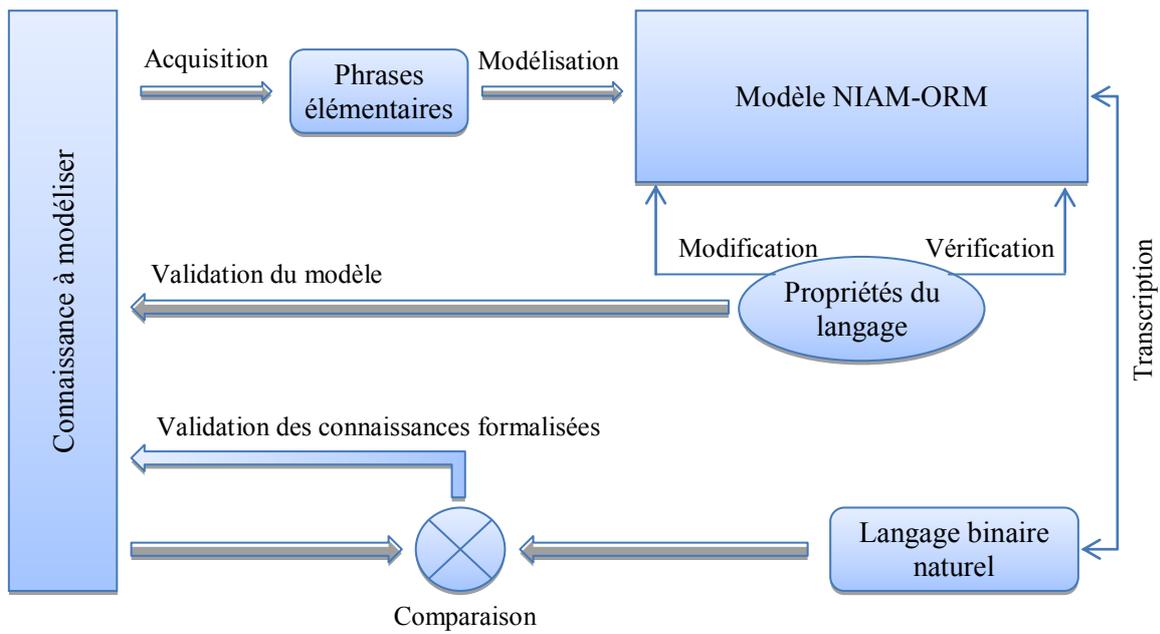


Figure 2-10 : Organisation et structure de la méthodologie NIAM-ORM selon [Blaise J-C., 2003]

La Figure 2-11 illustre les bases du formalisme ORM à l'aide d'un exemple tiré du domaine de notre étude. La Figure 2-11(a) présente le formalisme des objets NOLOT, LOT, les contraintes d'unicité, de totalité et un aperçu de la transcription du modèle en langage naturel binaire. La Figure 2-11(b) présente la notation LOT/NOLOT. Cette notation représente une bijection entre le NOLOT et le LOT.



notre partenaire industriel ainsi que celles issues de la communauté Bois. Cette démarche a déjà été appliquée par [Bombardier V., 2007] afin de modéliser la connaissance métier définissant les singularités des produits finis et le lien avec les caractéristiques « vision » qui permettent de les reconnaître. La mise en correspondance de ces deux modèles ontologiques a permis de lier l'expertise sur un système de vision et celle sur le bois. Selon cette même approche, nous visons la mise en relation du modèle « Qualité Billon » et du modèle « Qualité Sciage » afin d'obtenir les liens entre ces deux qualités. Pour cela, la première initiative est de créer les deux modèles ontologiques des qualités.

## 2.2 Création des modèles ontologiques des qualités Billon et Sciage

Les modèles ontologiques reflètent les connaissances émises par les experts des domaines concernés. Chaque modèle représente de manière formelle ces connaissances et contribue à capitaliser le savoir-faire de l'entreprise et ainsi, permet de construire un modèle générique (ontologique) à partir de modèles spécifiques liés à chaque concept de l'Univers d'Intérêt considéré.

Cette section décrit l'application de la méthode NIAM-ORM dans notre cas d'étude. L'objectif est d'établir les modèles ontologiques de connaissances « Qualité Billon » et « Qualité Sciage » qui sont exploités pour déterminer le modèle fonctionnel du système de tri. B. Almecija a ici le rôle du cogniticien présenté auparavant et, est l'initiateur/manager de toutes les actions mises en place dans la scierie Siat-Braun. La section 2.2.1 décrit les processus mis en œuvre afin d'acquérir la connaissance détenue par l'entreprise puis la section 2.2.2 explique sa formalisation pour simplifier l'analyse de celle-ci. La section 2.2.3 décrit le processus de validation des modèles ontologiques.

### 2.2.1 Acquisition des connaissances « Qualité » dans l'entreprise

Une *approche cognitivienne mixte* (ascendante puis descendante) a été utilisée afin d'extraire la connaissance de la scierie Siat-Braun. La Figure 2-12 représente les différentes étapes de la phase d'acquisition de connaissance.

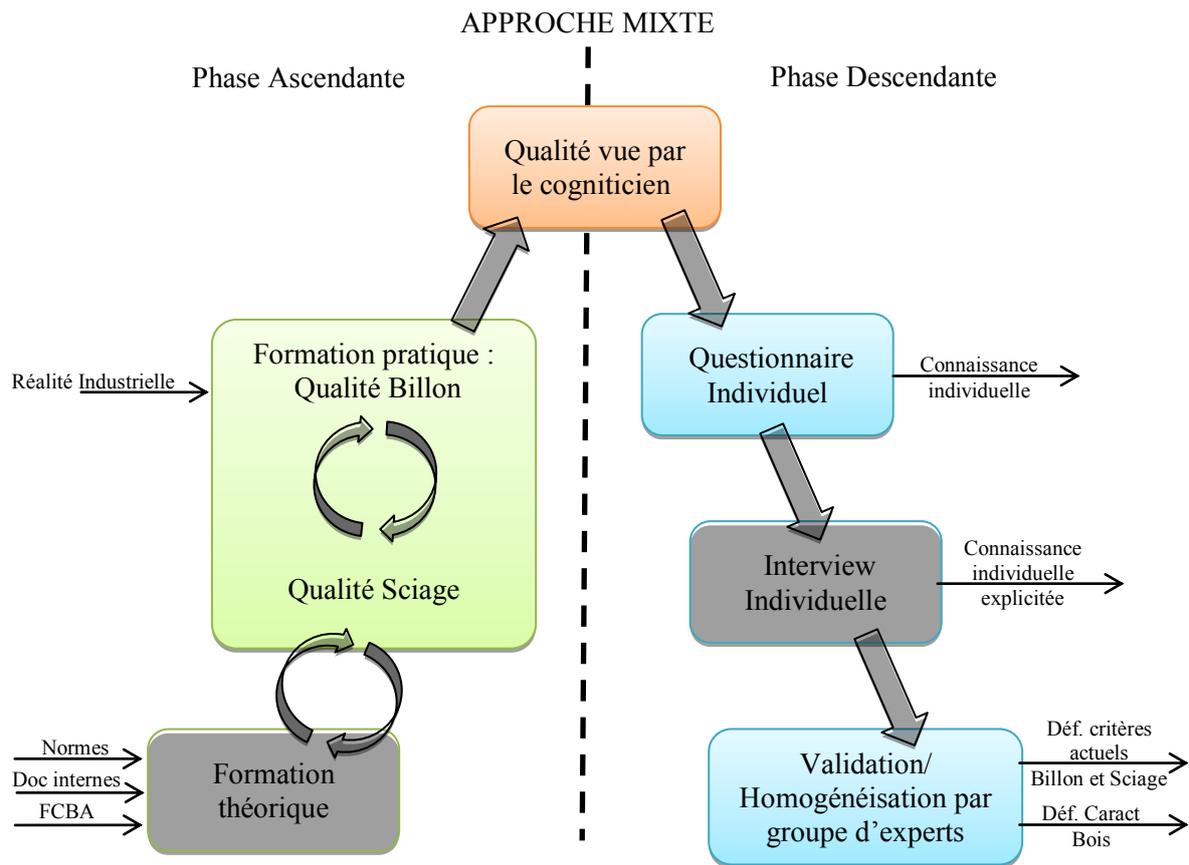


Figure 2-12 : Approche mixte d'acquisition de la connaissance implémentée dans notre étude

L'approche **ascendante** est matérialisée par des formations pratiques et théoriques du cogniticien (modélisateur) dans les domaines de l'expertise. Concernant la pratique, le cogniticien est ainsi intégré aux équipes de production réalisant le classement des bois. Cette formation de deux mois est faite à tous les niveaux où une décision qualitative est prise : sur les bois ronds, à l'achat en forêt et aux parcs à grumes avant tronçonnage et tri, et sur les bois sciés, avant leur mise en colis pour l'expédition. Cette formation s'appuie donc sur l'expérience des experts qui entourent le cogniticien mais aussi sur les documents de formation et de mise à jour des compétences.

L'entreprise dispose de différents documents permettant aux responsables de sensibiliser un nouvel arrivant ou de mettre à jour les compétences d'un employé sur son poste de travail. Le parc à grumes dispose d'une table de classement des bois ronds issue des connaissances et de l'expertise de l'entreprise. Les principales singularités et altérations des bois ronds sont mentionnées. Des documents formatifs sur la reconnaissance des essences (de

bois) sont aussi présents car le classement est différent en fonction de l'essence. Les postes Qualité de la ligne de sciage sont soumis à une certification et une réglementation car la classe d'emploi fixée sur les produits directement vendus fait foi aux yeux des clients de l'entreprise. Les documents sont un dictionnaire imagé définissant les singularités ou altérations du bois scié et, une table de classement d'aspect des bois sciés issues des normes NF EN 1611-1 et NF B 52-001.

La formation théorique interne met en relation le classement des bois et les autres services de l'entreprise. Celle-ci permet de comprendre les consignes qui sont données au service de production. On cite, par exemple, les méthodes d'achats, les ventes et la stratégie commerciale. Les formations pratiques et théoriques internes sont renforcées par une formation théorique externe dispensée par un organisme certifié : le FCBA (Forêt Cellulose Bois Ameublement). Cette formation certificative est basée sur les documents normatifs européens et leur mise en application en situation réelle. Cette formation d'une journée vise à aider l'industriel à appliquer au mieux la norme. En effet, la norme propose un classement visuel basé sur des mesures de singularités que les experts n'ont pas le temps de faire aux cadences de production imposées. Ainsi, la norme doit être adaptée aux différents cas industriels par le biais de ces formations certificatives.

Suite à cette approche ascendante, le cogniticien est en mesure de spécifier la qualité des bois selon ses observations directes et sa compréhension des différentes formations. Ces formations permettent au cogniticien de s'imprégner des domaines et de pouvoir communiquer plus aisément avec les experts métier.

La phase **descendante** s'exprime par la création d'un questionnaire soumis aux experts puis complété lors de leur interview (voir Figure 2-13). Les réponses obtenues dans ce questionnaire représentent une première formalisation de la connaissance experte. Les annotations, les abréviations ou les termes utilisés font que cette connaissance n'est encore exploitable que par le cogniticien qui était présent lors de l'interview. Bien que cette connaissance ne doivent pas encore être remise en question, il est à noter que certains questionnaires sont remplis par le cogniticien car l'expert interviewé ne parle pas ou mal la langue française et/ou ne sais pas écrire.

Attributs	Qualité									
	OA		Ch1		CI		Ch2		Ch3	
Noeuds noirs	X	Aucun	X	< pt sur 2 faces dia. < 15 mm sauf si grp sur tt l	X	< pt sur 2 faces dia. < 20 mm sauf si grp sur tt l	X	dia. < 1/2 l		
Noeuds sains	X	Aucun	X	dia. < 1/3 de l	X	dia. < 1/2 de l				
Entre-écorce	X	Aucune	X	Aucune	X	larg < 1/2 de l sur 1 face	X	pas traversante		

**Figure 2-13 : Partie d'un questionnaire et des réponses fournies par un expert qualité Sciage**

Le cogniticien est ensuite en charge de fusionner l'ensemble des réponses obtenues dans les questionnaires ainsi que les éléments des différentes normes. Les réponses identiques sont agrégées afin d'avoir une seule réponse commune et les réponses similaires ou contradictoires sont remis en questions par un groupe d'experts « leader » constitué du directeur de production et du responsable du secteur (ligne de sciage ou parc à grumes en fonction des documents analysés). A l'issue de cette rencontre, le cogniticien obtient deux expertises différentes : l'une sur la qualité des billons et l'autre sur la qualité des sciages. Celle sur la qualité des billons vise à exprimer la qualité dite « Billon » en fonction des caractéristiques physiques de l'enveloppe des billons. Le comportement et l'impact des caractéristiques analysées sont extrapolés de manière empirique à l'intérieur de la matière. L'expertise sur les bois sciés exprime la qualité dite « Sciage » en fonction de caractéristiques visibles sur les 4 faces du produit. Les caractéristiques analysées par les experts sont des indicateurs de la résistance mécanique des bois que recherche principalement le client. Dans les autres cas, le client recherche un aspect esthétique qui est uniquement spécifié par des critères visuels. De ces deux expertises, le cogniticien extrait l'ensemble des caractéristiques nécessaires à l'évaluation de la qualité des bois sciés et celui nécessaire à l'évaluation de la qualité des bois ronds. Ces caractéristiques du bois serviront de base aux « critères de décision » pour le classement qualité final, il est donc nécessaire de les définir plus en détail.

Des interviews individuelles ont été menées avec les membres du groupe d'expert « leader » ainsi que les autres experts de l'entreprise (bureau méthodes, président directeur générale) afin de définir les caractéristiques du bois à travers leur aspect et leur impact sur la classe d'emploi. L'ensemble des experts interviewés ont des compétences sur le matériau Bois lui-même et permettent d'obtenir des connaissances sur l'anatomie du bois, les liens entre les caractéristiques.

La phase d'acquisition est donc menée à travers une approche mixte en utilisant des formations pratiques et théoriques dans un premier temps puis des techniques d'observations directes, d'interviews structurées ou informelles dans un second temps. Le but est d'obtenir une connaissance individuelle explicite de la qualité des bois ronds ou des sciages. Ensuite, des techniques de groupes sont utilisées afin de combiner toutes les connaissances individuelles pour en faire une connaissance collective explicite. Cependant, l'explicitation de cette connaissance est encore peu structurée. Selon la méthode NIAM-ORM, la prochaine étape est celle de la formalisation afin d'obtenir les modèles ontologiques des qualités « Sciage » ou « Billon ».

### 2.2.2 Formalisation des modèles ontologiques

La formalisation des connaissances suivant la méthode NIAM-ORM est décomposée en plusieurs étapes. La première étape est la décomposition de la connaissance extraite en phrases élémentaires « profondes », puis vient leur formalisation selon le langage ORM et finalement l'ajout de contraintes pour enrichir le modèle. On propose ici d'expliquer ces trois étapes à travers un exemple simple.

#### **Décomposition en phrases élémentaires « profondes »**

Lors des interviews, les experts de la qualité « Billon » ou « Sciage » décrivent chaque qualité du bois. Par exemple, l'un d'entre eux décrit la qualité Q2 du billon comme suit :

*« Dans la qualité Q2, les billons issus de la grume ne doivent avoir aucune présence de défauts sévères tels que la pourriture, les baïonnettes, les bosses de gui. Les nœuds noirs dont le diamètre est supérieur à 25mm sont refusés dans cette qualité si la grume à un diamètre supérieure à 35 cm au niveau du nœud considéré. [...] ».*

Ces définitions utilisent des termes ambigus, le cognicien doit alors apporter la connaissance qu'il a acquise pour interpréter les propos des experts. D'après la méthode NIAM-ORM et le cognicien qui l'utilise, la traduction de la définition en phrases élémentaires peut être :

*Les billons sont tronçonnés dans la grume.*

*Un billon a une qualité.*

*La qualité Q2 ne tolère pas de présence de pourriture.*

*La qualité Q2 ne tolère pas de bosse de gui.*

*La qualité Q2 ne tolère pas de présence de baïonnettes.*

*La baïonnette est une irrégularité de l'enveloppe.*

*Un défaut sévère est quantifié par sa présence*

*Une grume contient des nœuds noirs.*

*Un nœud noir a un diamètre.*

*Le diamètre du nœud noir est associé à une valeur.*

*La valeur du diamètre du nœud noir 25 mm conditionne l'appartenance d'un billon à une qualité Q2.*

*La grume a un diamètre.*

*La valeur du diamètre de la grume 35 cm conditionne l'appartenance d'un billon à une qualité Q2.*

Ces phrases sont ensuite traduites dans leur forme « la plus profonde », quelques-unes sont données en exemple :

*La qualité Q2 ne tolère pas de présence de pourriture devient*

⇒ *La qualité du billon « Q2 » ne tolère pas la présence de la caractéristique du bois « Pourriture »*

*Un nœud noir a un diamètre*

⇒ *Une caractéristique du bois « Nœud Noir » est quantifié par un mesurande « Diamètre du Nœud Noir »*

*La valeur du diamètre du nœud noir 25 mm conditionne l'appartenance d'un billon à une qualité Q2*

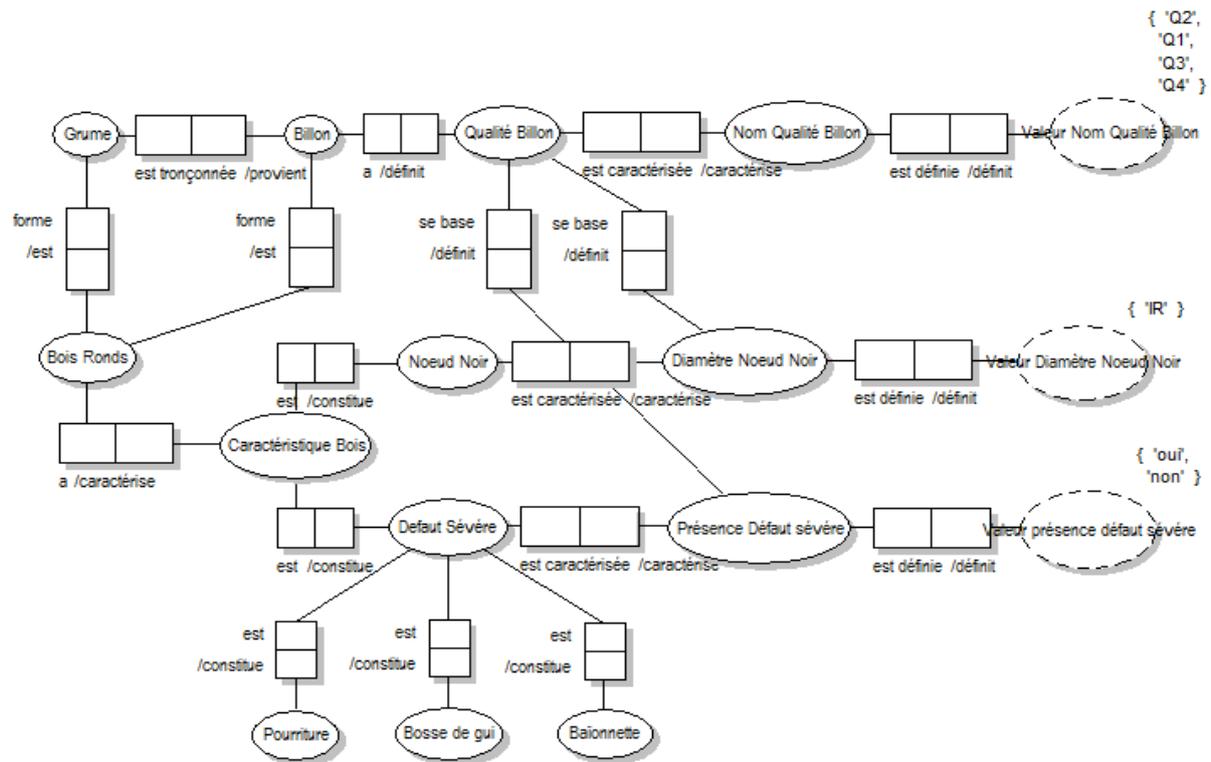
⇒ *La valeur « 25mm » associé au mesurande « Diamètre du Nœud Noir » de la caractéristique du bois « Nœud Noir » conditionne l'appartenance à la qualité du billon « Q2 » dans l'état « Billon »*

### **Formalisation avec le langage ORM**

Grâce la décomposition en phrases élémentaires « profondes », le cogniticien distingue les idées et les ponts de dénomination. Les phrases élémentaires, illustrant les faits de la réalité, sont traduites avec le formalisme ORM. On appelle ces modèles des modèles de

---

« faits ». En exemple, la partie de la définition de la qualité Q2 donnée ci-avant est illustrée dans la Figure 2-14 suivante :



**Figure 2-14 : Formalisation d'un modèle de « faits » avec ORM**

Le cogniticien obtient plusieurs modèles de faits. Il extrait uniquement les idées de chaque modèle de faits pour obtenir le modèle générique en les combinant. Le cogniticien peut alors s'interroger, ou questionner les experts du domaine pour fixer les contraintes entre les objets. Par exemple sur la Figure 2-15 :

Question ❶ sur la totalité de l'ensemble Caractéristique du Bois : « Est-ce que chaque Caractéristique du Bois est un Nœud Noir ? ». Réponse : Non.

Question ❷ sur l'unicité de l'ensemble Caractéristique du Bois : « Une Caractéristique du Bois est un et un seul Nœud Noir ou un ou plusieurs Nœud Noir ? ». Réponse : Un ou plusieurs.

Question ❸ sur la totalité de l'ensemble Nœud Noir : « Est-ce que chaque Nœud Noir est une Caractéristique du Bois ? ». Réponse : Oui.

Question ❹ sur l'unicité de l'ensemble Nœud Noir : « Un Nœud Noir est une et une seule Caractéristique du Bois ou une ou plusieurs Caractéristique du Bois ? ». Réponse : Une et une seule.

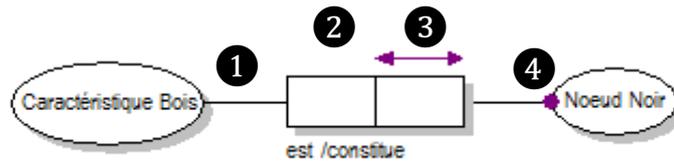


Figure 2-15 : Formalisation des contraintes d'unicité et de totalité

Un autre type de contrainte est celle de l'exclusivité qui peut se traduire par un « soit ». L'exemple donné dans la Figure 2-16 se traduit par : « Une Caractéristique du Bois est soit un Nœud Noir soit un Défaut Sévère ». Sous-entendu, un Nœud Noir ne peut pas être un Défaut Sévère.

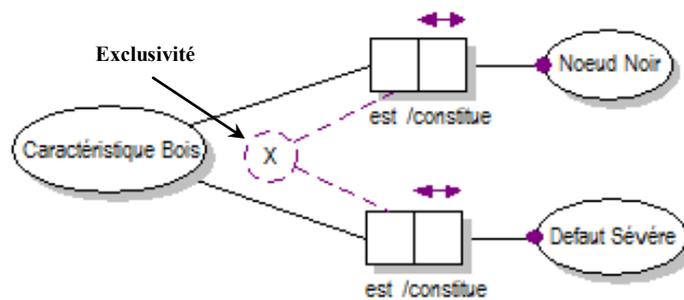


Figure 2-16: Formalisation de la contrainte d'exclusivité

Le modèle générique, de l'exemple, issu de plusieurs définitions des qualités Billons puis de leur formalisation est présenté dans la Figure 2-17. Les modèles génériques complets obtenus font apparaître beaucoup plus d'objets et de relations entre eux et sont présentés à l'Annexe 4.

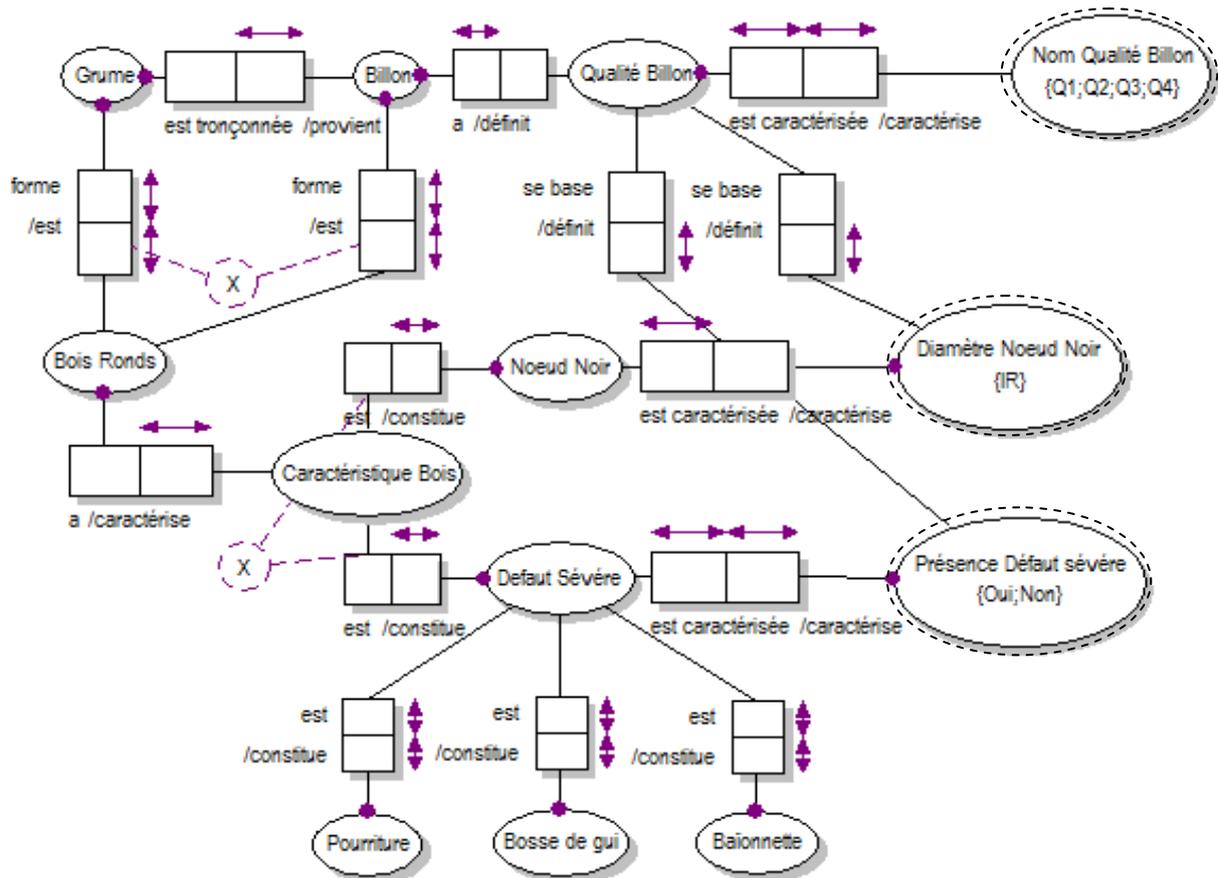


Figure 2-17 : Modèle générique complété par l'ajout des contraintes

Ces modèles génériques obtenus à l'issu de la modélisation par NIAM-ORM correspondent de fait aux modèles ontologiques de la qualité « Sciage » et de la qualité « Billon » puisqu'ils définissent les termes, les liens et les approches des acteurs de l'entreprise face à ces qualités. Ces modèles sont établis par le cognicien sur la base de la connaissance des experts mais qui est interprétée par le cognicien dans les cas ambigus. Il est donc nécessaire de valider d'une part la syntaxe du modèle et, de l'autre, la connaissance formalisée dans ces modèles. La section suivante décrit les méthodes développées pour ces validations.

### 2.2.3 Vérification et validation des modèles ontologiques

La vérification syntaxique de ces modèles est réalisée lors de la construction des modèles par l'intermédiaire de l'outil Visiomodeler™ [VISIOMODELER]. En effet, l'utilisation de cet outil pour construire puis améliorer les modèles ne permet pas d'utilisation erronée du formalisme ORM. Les modèles construits sont donc syntaxiquement corrects. Il est à noter que l'outil Visiomodeler™ ne permet pas la représentation des objets LOT/NOLOT. De fait, ces objets apparaissent dans le modèle dans leur représentation non simplifiée.

La validation des connaissances formalisées est faite en deux étapes. L'outil Visiomodeler™ permet de transcrire toutes les propriétés des objets ainsi que les relations et contraintes qui existent entre eux en langage naturel binaire. La transcription des modèles génère une liste de phrases binaires. Pour exemple, la partie du modèle présenté dans la Figure 2-17 est transcrit par les phrases binaires de la Figure 2-18. Notons que l'outil Visiomodeler™ est un outil développé par Microsoft© et que l'ensemble de ces outils fonctionnent avec le langage naturel anglais. Cela ne gêne en rien les experts qui valident des modèles.

Grume is an entity object type  
Grume can be identified by the constraint:  
Each Billon provient at most one Grume.

Billon is an entity object type  
Billon can be identified by the constraint:  
Each Bois Ronds est at most one Billon.

Qualité Billon is an entity object type  
Qualité Billon can be identified by the constraint:  
Each Diamètre Noeud Noir définit at most one Qualité Billon.

Nom Qualité Billon is an entity object type  
Nom Qualité Billon can be identified by the constraint:  
Each Qualité Billon est caractérisée at most one Nom Qualité Billon

Grume est tronçonnée Billon / Billon provient Grume  
Billon a Qualité Billon / Qualité Billon définit Billon

**Figure 2-18 : Transcription du modèle en phrases binaires**

Pour l'ensemble du modèle, l'analyse de ces phrases binaires est fastidieuse et nécessite du temps (on dénombre plus de 500 phrases). Ainsi, le cognaticien est le premier à vérifier, puis valider, l'ensemble de ces phrases sur la base des connaissances qu'il a acquises lors de ces différentes formations.

Une seconde validation est faite avec les experts de l'entreprise. Le groupe d'expert « Leader » est sollicité cependant, la réalité industrielle pose des difficultés car cette tâche de validation nécessite que les experts soient mobilisés pendant plusieurs heures d'affilées. Le groupe d'experts ne peut en aucun cas s'absenter autant de temps car ils sont aussi acteurs de la production dans l'entreprise et doivent gérer le quotidien. Cette validation est donc faite en plusieurs fois et peut être impactée par les différents moments choisis et surtout par le temps écoulé entre ces instants.

Les experts valident ainsi la connaissance formalisée dans ces modèles ontologiques qui deviennent une base de référence pour le cognicien. Il peut alors les exploiter pour intégrer la connaissance dans le système de tri Qualité. La connaissance experte de l'entreprise est intégrée par l'intermédiaire d'un modèle appelé le **modèle fonctionnel du système**.

## 2.3 Etablissement du modèle fonctionnel du système

Le modèle fonctionnel du système élaboré est le modèle regroupant toutes les fonctions que doit contenir le système de tri afin de répondre aux besoins de l'entreprise. L'objectif idéal est de faire coïncider parfaitement la qualité Billon faite au parc à grumes avec la qualité Sciage faite sur la ligne afin d'éliminer tous les déclassements ou sur-classements des produits (produits attendus sur la ligne de sciage avec une autre qualité que la qualité réellement vendue). Evidemment, un tel objectif n'est pas atteignable, et l'objectif réel est donc de réduire au maximum le taux de déclassement ou de sur-classement dû aux écarts entre les deux qualités.

Il faut donc tout d'abord établir les liens existants et les liens manquants entre les deux qualités (section 2.3.1). Cette première étape permet d'obtenir un modèle fonctionnel idéal qui doit ensuite tenir compte des contraintes techniques liées au système de vision choisi par la scierie Siat-Braun (section 2.3.2). Finalement, des solutions sont apportées à une partie des contraintes par la connaissance de la matière Bois (section 2.3.3). A l'issue de ces trois étapes, on obtient un Modèle Fonctionnel Enrichi prenant en compte l'environnement dans lequel le système de tri Qualité est amené à évoluer.

### 2.3.1 Extraction du modèle fonctionnel idéal

L'acquisition des connaissances des experts ainsi que l'analyse des processus de transformation de notre partenaire industriel montre que la qualité Sciage et la qualité Billon sont fortement liées. On distingue dans notre analyse plusieurs relations entre les caractéristiques définissant chacune des qualités. Ces caractéristiques sont représentées par les objets du formalisme ORM utilisés dans les deux modèles ontologiques.

La mise en relation des modèles est faite manuellement par le cogniticien, i.e., aucun outil informatique n'est utilisé pour extraire les informations cherchées. Le résultat de cette analyse est donc très dépendant du cogniticien. Dans notre étude, le cogniticien distingue trois types de liens entre les deux qualités : **les liens directs**, **les liens indirects** et **les liens manquants**.

On se propose d'expliquer les différents liens par un exemple donné par la Figure 2-19 qui est un extrait des deux modèles ontologiques.

#### *Lien direct (Point 1 de la Figure 2-19)*

L'« Essence » est évaluée par l'objet « Nom Essence » dans la qualité Billon et de la même manière dans la qualité Sciage. L'objet « Nom Essence » est le même concept, il n'est pas différent entre les deux qualités. Ce lien est considéré comme **direct**.

#### *Lien indirect (Point 2 de la Figure 2-19)*

Les deux qualités sont liées l'une à l'autre par des relations géométriques (Point 2a) ou anatomiques (Point 2b). Par exemple, l'objet « Diamètre apparent » du « Nœud Noir » sur le sciage est lié géométriquement à l'objet « Diamètre » du « Nœud Noir » du billon. Cette relation géométrique s'explique par le fait que les produits finis sont débités dans le billon selon un schéma de sciage. Ainsi, dès qu'une caractéristique, comme le nœud du bois, a une forme et un comportement connu, il est possible de créer un lien entre sa mesure dans le sciage et sa mesure dans le billon. Le **lien indirect géométrique** est fiable malgré le fait que le développement naturel des nœuds eux-mêmes soit propre aux conditions de croissance de l'arbre.

Pour expliquer une relation anatomique, nous introduisons deux objets qui sont l'« Entre-écorce » et la « Branche Ramicorne ». Le savoir-faire de l'expert Billon met en avant que la présence d'une branche ramicorne est souvent, mais pas toujours, accompagnée

de création d'entre-écorce. Ainsi, l'objet « Présence » de l'« Entre-écorce » évalué sur un sciage est quelques fois lié anatomiquement à l'objet « Présence » de la « Branche ramicorne » du billon. L'estimation de la présence d'entre-écorce est incertaine pour l'expert qui utilise la qualité Billon car il ne peut se référer qu'à la présence de branche ramicorne. Le **lien indirect anatomique** est peu fiable et dépend de la caractéristique du bois analysée.

111

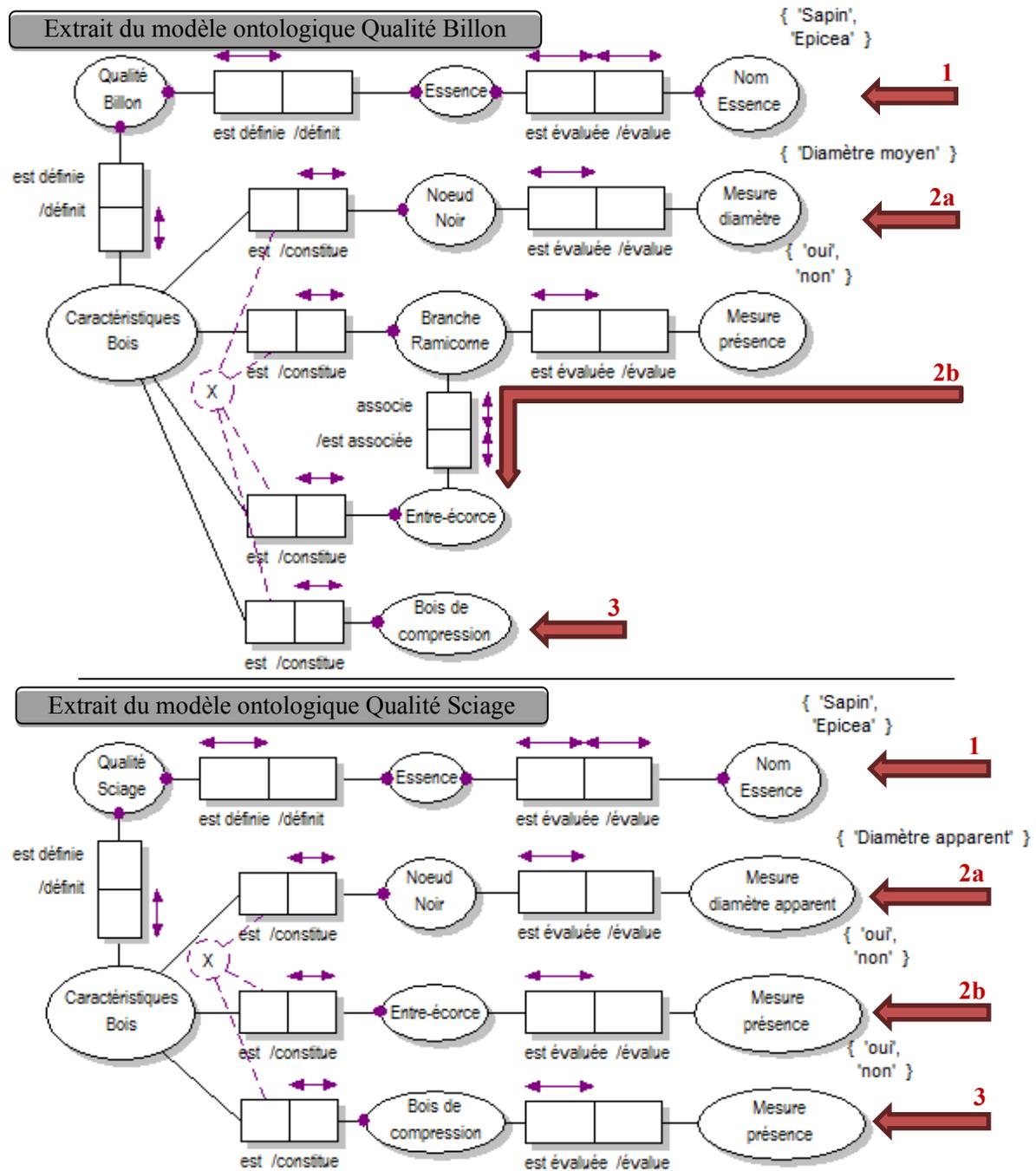


Figure 2-19 : Explication des liens directs, indirects et manquants entre la qualité Billon et la qualité Sciage

Lien manquant (point 3 de la Figure 2-19)

L'objet « Mesure de Présence » du « Bois de compression » sur le sciage n'a pas de lien avec le même objet de la qualité Billon. En effet, le bois de compression est évalué sur le sciage mais pas sur le billon (car il est peu visible). C'est ce que le cogniticien nomme un **lien manquant**.

La mise en relation des deux modèles ontologiques complets nous a permis d'extraire **un lien direct, vingt liens indirects et dix-sept liens manquants**. Les liens manquants constituent le modèle dit « génétique ». Le système de tri ROB doit intégrer ce modèle génétique afin que la Qualité Billon qu'il définit soit plus riche que celle définie auparavant pour les anciens parcs. Le modèle fonctionnel idéal du système de tri est ainsi l'agrégation du modèle ontologique de la qualité Billon (ce que l'entreprise fait déjà) et du modèle génétique (ce qui manque pour avoir un système parfait) comme le montre la Figure 2-20.

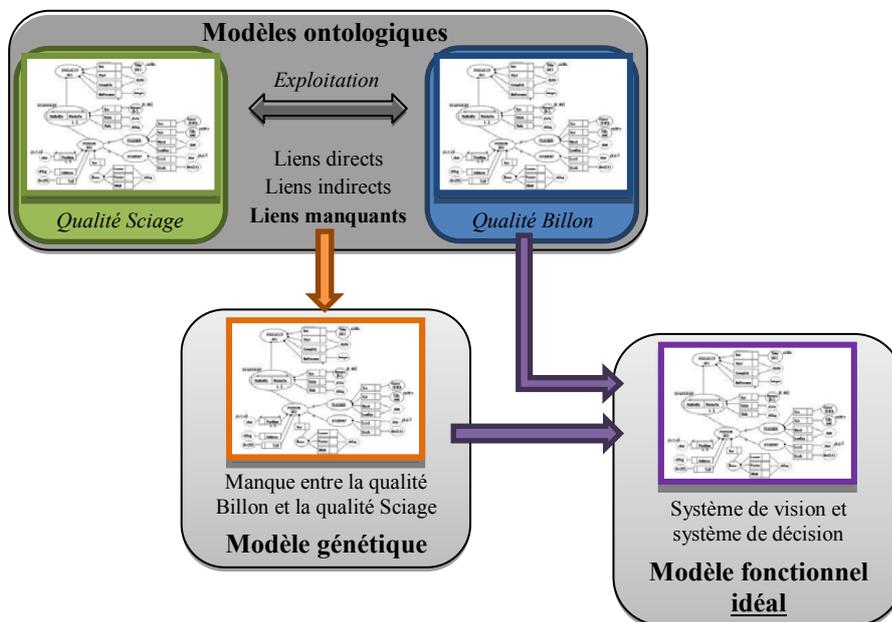


Figure 2-20 : Modèle fonctionnel idéal du système de tri Qualité billon

Le modèle fonctionnel idéal représente les besoins de la scierie mais il ne tient pas compte de la réalité technique de ces besoins. L'intégrateur du système de tri doit apporter ses connaissances pour évaluer la faisabilité de ce modèle idéal.

### 2.3.2 Agrégation du modèle de connaissance de l'intégrateur

Le modèle fonctionnel idéal est l'initiateur d'un débat constructif entre l'intégrateur et la scierie. Elle formule des besoins auxquels l'intégrateur doit répondre mais il arrive que les compétences ou les limites technologiques de l'intégrateur ne puissent pas satisfaire le client. Par exemple, il n'est pas possible de détecter, identifier ou mesurer précisément toutes les caractéristiques du bois même avec les systèmes les plus performants disponibles actuellement. Les temps calculatoires des algorithmes de reconnaissance peuvent également s'avérer incompatibles avec une implémentation « temps réel » industrielle.

Il est donc nécessaire de mettre en avant les faiblesses futures du système afin de les intégrer dans le modèle fonctionnel. L'objectif étant de les contourner ou de les surmonter dès la conception du système.

L'identification des faiblesses d'un système nécessite une totale transparence et une totale confiance entre le client et le fournisseur. Cette tâche n'est pas aisée car elle implique d'une part, que le fournisseur reconnaisse une faiblesse dans son système et de l'autre, que le client soit prêt à fournir sa connaissance pour améliorer le système qui sera par la suite potentiellement revendu à d'autres concurrents. Cette relation de confiance se construit durant le projet de conception et se fonde sur le concept de « *ba* » exposé dans la section 2.1.1, ou sur celui de la confiance mutuelle présentée dans [Koskinen K., 2003].

Pour ne traiter que des mêmes exemples précédents, il apparaît que le lien direct établi pour l'objet « Nom de l'essence » n'est plus réalisable car les algorithmes de reconnaissance de l'essence de l'intégrateur n'ont pas encore atteint des performances suffisantes. Dans un autre exemple, le lien manquant demandé par la scierie entre l'objet « Bois de compression » sur le sciage et celui sur le billon n'est pas directement réalisable car le système ne sait pas identifier cette caractéristique du bois.

Evidemment, pour des raisons de confidentialité, le modélisateur n'a pas accès à toutes les connaissances de l'intégrateur. Cependant, il est possible de modéliser les difficultés que rencontrent l'intégrateur et leur impact sur le fonctionnement du système de tri. Cette faible modélisation des connaissances de l'intégrateur est débattue dans la section « Conclusion et perspectives ».

Comme le montre la Figure 2-21, le modèle fonctionnel intègre les contraintes réelles de l'intégrateur pour devenir un modèle fonctionnel intermédiaire éloigné des besoins initiaux de la scierie. Il s'agit désormais d'apporter un maximum de solutions à ces contraintes. La connaissance de la matière Bois est l'une d'elles.

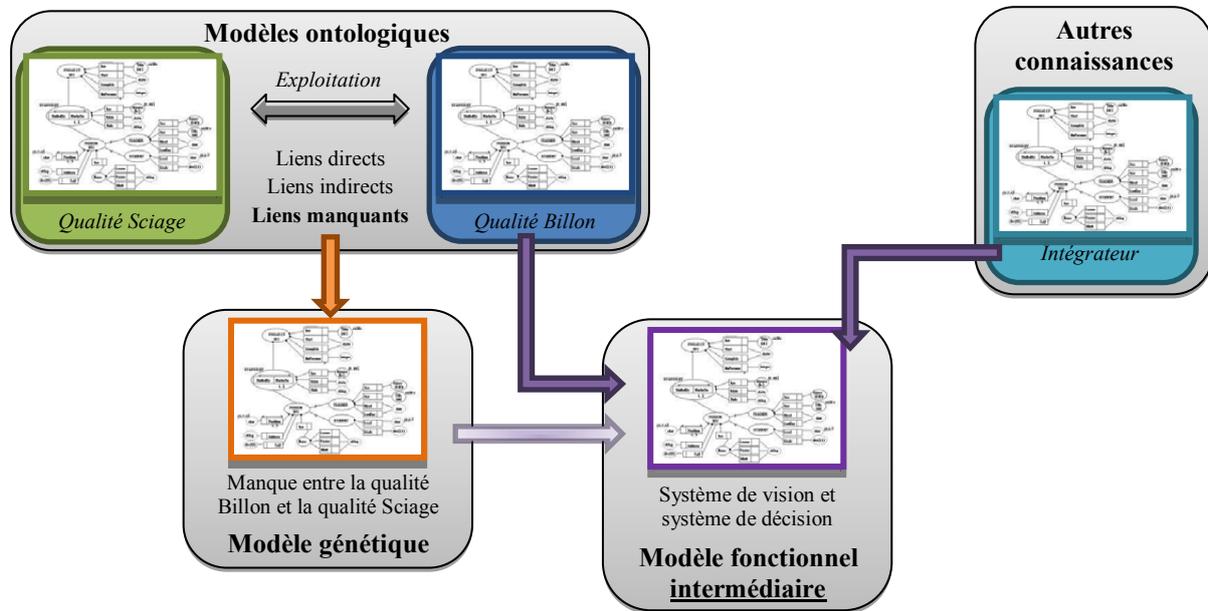


Figure 2-21 : Modèle fonctionnel intermédiaire du système de tri Qualité billon

### 2.3.3 Intégration du modèle de connaissance de la matière Bois

Dans le but d'enrichir le modèle fonctionnel en surmontant les contraintes de l'intégrateur, nous proposons d'utiliser une connaissance partiellement exploitée par les experts de l'entreprise : celle de la **matière Bois**.

Le modèle de connaissance de la matière Bois est basé sur une synthèse bibliographique du domaine et sur les connaissances d'autres experts de l'entreprise. L'objectif est de faire apparaître des liens indirects « anatomiques » mesurable par le système pour « renforcer » un lien existant ou accéder à un nouvel objet du modèle fonctionnel. La Figure 2-22 montre un extrait du modèle de connaissance de la matière Bois que nous avons élaboré (le modèle complet est présenté en Annexe 5). Les exemples qu'il contient permettent de justifier l'apport d'un tel modèle dans le modèle fonctionnel.

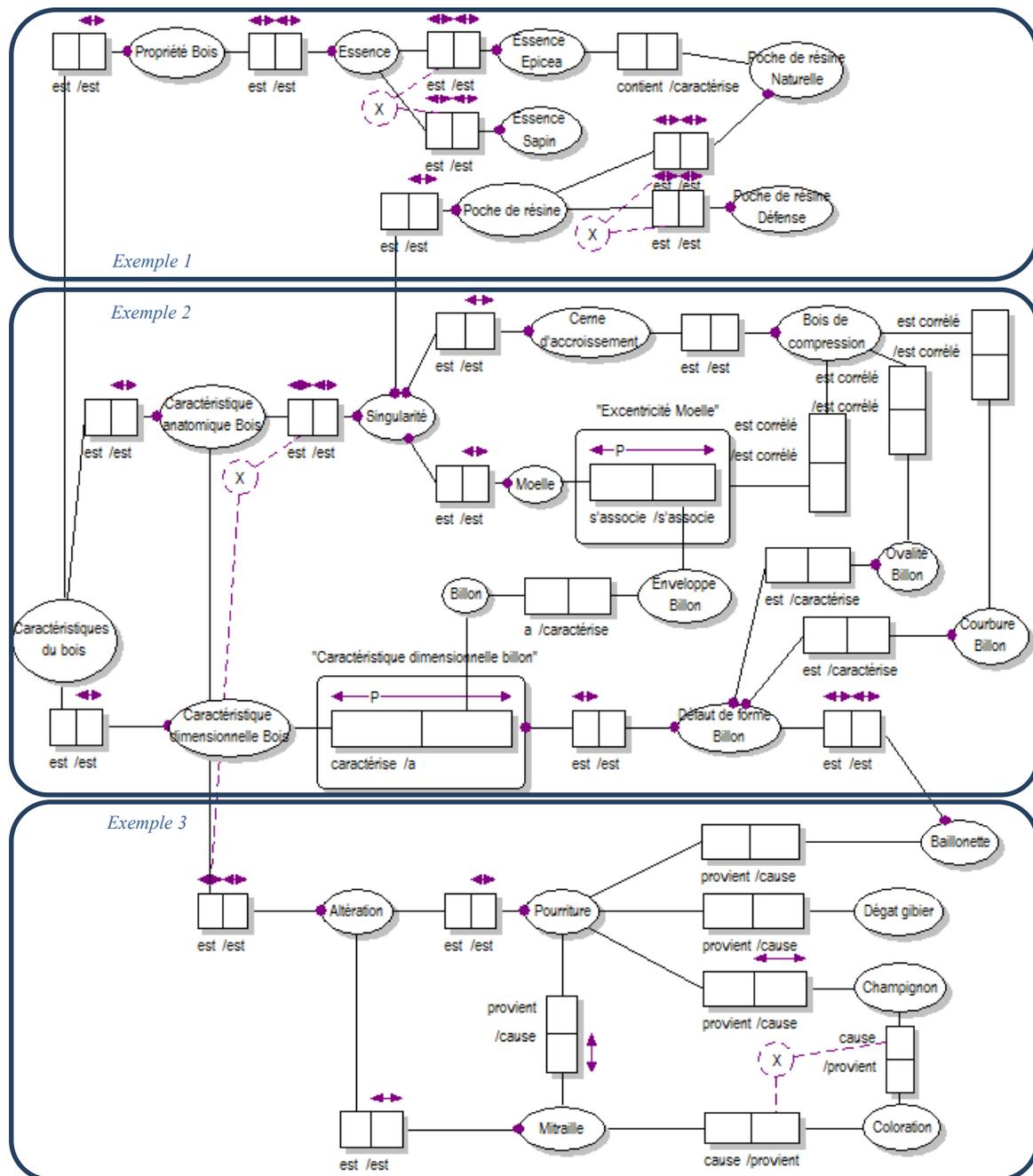


Figure 2-22 : Extrait du modèle de connaissance de la matière Bois

L'extrait du modèle de connaissance de la matière Bois montre qu'il est possible d'améliorer la précision du système en ajoutant un lien indirect pour la reconnaissance de l'essence (*Exemple 1*). Ce lien est établi par les experts de la matière et représente le fait que la forte présence de petites poches de résine est un excellent indicateur pour reconnaître l'essence d'Epicea.

Un autre exemple (*Exemple 2*) concerne la détection du bois de compression que le système de vision ne permet pas d'identifier avec certitude. Or, selon l'étude de Warensjö M. [Warensjö M., 2002] ou celle de Krause C. [Krause C., 2008], le bois de compression est lié anatomiquement à des déformations mesurables de la grume telles que la courbure, l'ellipticité du bois rond et l'excentricité de la moelle. Ainsi, la mesure de ces critères et leur combinaison devraient permettre d'évaluer la présence de bois de compression par trois liens indirects.

Un dernier exemple (*Exemple 3*) concerne la pourriture qui peut être due à plusieurs causes comme, entre-autres, une blessure de gibier ou la casse de la cime lors de vents violents. Ces causes sont visibles par une simple analyse de l'enveloppe : la blessure crée un bourrelet alors que la casse crée une baïonnette. La détection de ces défauts de forme renseigne sur la présence potentielle de pourriture à l'intérieur du bois.

Au final, l'intégration du modèle de la matière Bois dans le modèle fonctionnel intermédiaire nous a permis de **transformer trois liens indirects en liens directs, onze liens manquants en liens indirects puis de renforcer douze liens indirects**. Le système possède encore six liens manquants. Néanmoins, selon l'intégrateur, la précision et la robustesse du système sont améliorées par l'intégration de ces nouvelles connaissances sur la matière.

Comme le montre la Figure 2-23, le Modèle Fonctionnel Enrichi (MFE) est la combinaison du modèle ontologique Qualité Billon, du modèle génétique, du modèle Intégrateur et du modèle Matière Bois. Dans la suite du mémoire, on distingue la « Qualité Billon Opérateur », qui est la Qualité Billon directement issue des modèles ontologiques et définie à partir des connaissances des opérateurs de production, de la « Qualité Billon Enrichie », qui est celle qui intègre toutes les performances *a priori* des capteurs implantés sur le parc à grumes ROB ainsi que les autres connaissances modélisées dans le MFE.

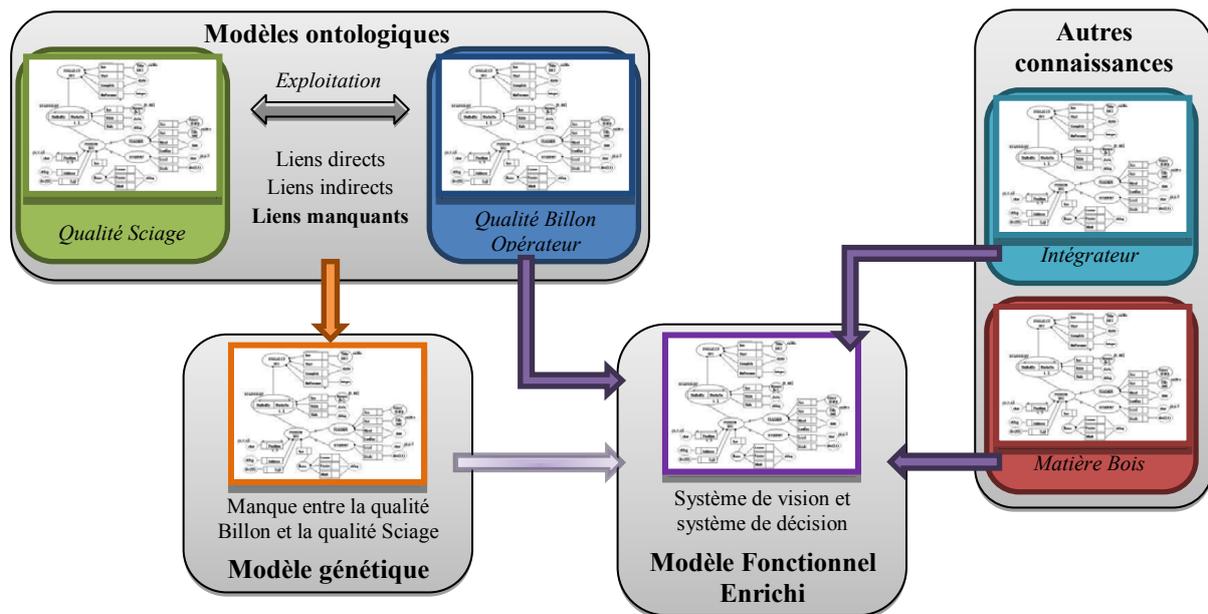


Figure 2-23 : Modèle Fonctionnel Enrichi (MFE) du système de tri

Le MFE est une représentation du système de tri basé sur différents modèles de connaissance. Ce modèle fonctionnel est utilisé dans la section 3 pour la réalisation et le paramétrage initial du système de tri Qualité. Il est régulièrement mis à jour lors de l'ajustement du paramétrage du système en phase d'exploitation.

# CHAPITRE 3 : PARAMETRAGE DU SYSTEME DE TRI QUALITE BILLON PAR INTEGRATION DE CONNAISSANCES

---

3.1	EXPLOITATION DU MODELE FONCTIONNEL ENRICHI POUR LA CONCEPTION DU SYSTEME TRI .....	97
3.1.1	<i>Extraction des critères caractérisant la qualité .....</i>	98
3.1.1	<i>Spécification des classes de Qualité Billon Enrichie du système de tri.....</i>	101
3.1.2	<i>Détermination des liens entre les classes E/S/L/E et les classes Opérateur .....</i>	103
3.2	PARAMETRAGE INITIAL DU SYSTEME DE TRI QUALITE BILLON .....	105
3.2.1	<i>Sélection des critères pertinents pour le Tri Qualité Billon.....</i>	105
3.2.2	<i>Evaluation des seuils par simulation .....</i>	110
3.2.3	<i>Détermination des seuils à partir d'études bibliographiques .....</i>	115
3.3	VALIDATION DU PARAMETRAGE EN PHASE D'EXPLOITATION .....	120
3.3.1	<i>Validation des critères par retour d'expérience sur le système. ....</i>	121
3.3.2	<i>Validation des seuils par le résultat sur la matière .....</i>	126
3.3.3	<i>Validation du paramétrage par analyse de données .....</i>	132

---



### 3 Paramétrage du système de Tri Qualité Billon par intégration de connaissances

La section précédente nous a permis de représenter et d'organiser les connaissances nécessaires au projet à travers le Modèle Fonctionnel Enrichi (MFE). Nous proposons dans cette section de décrire leur contribution dans la conception et le paramétrage du système de tri Qualité.

Le paramétrage du système de tri se déroule en deux phases : l'intégration des connaissances obtenues durant la phase de conception puis, l'analyse des résultats obtenus dans la phase d'exploitation, qui, de plus, vient enrichir les modèles. La Figure 3-1 schématise ce processus d'intégration. Durant la première phase, l'intégration a deux objectifs successifs. Le premier est de concevoir un système d'observation permettant à la scierie Siat-Braun de spécifier ses propres classes de qualité. Le second est d'obtenir un paramétrage initial du système **avant sa mise en service** sur le site de production. L'objectif de la seconde phase est d'utiliser les résultats réels afin de corriger et d'améliorer le paramétrage initial.

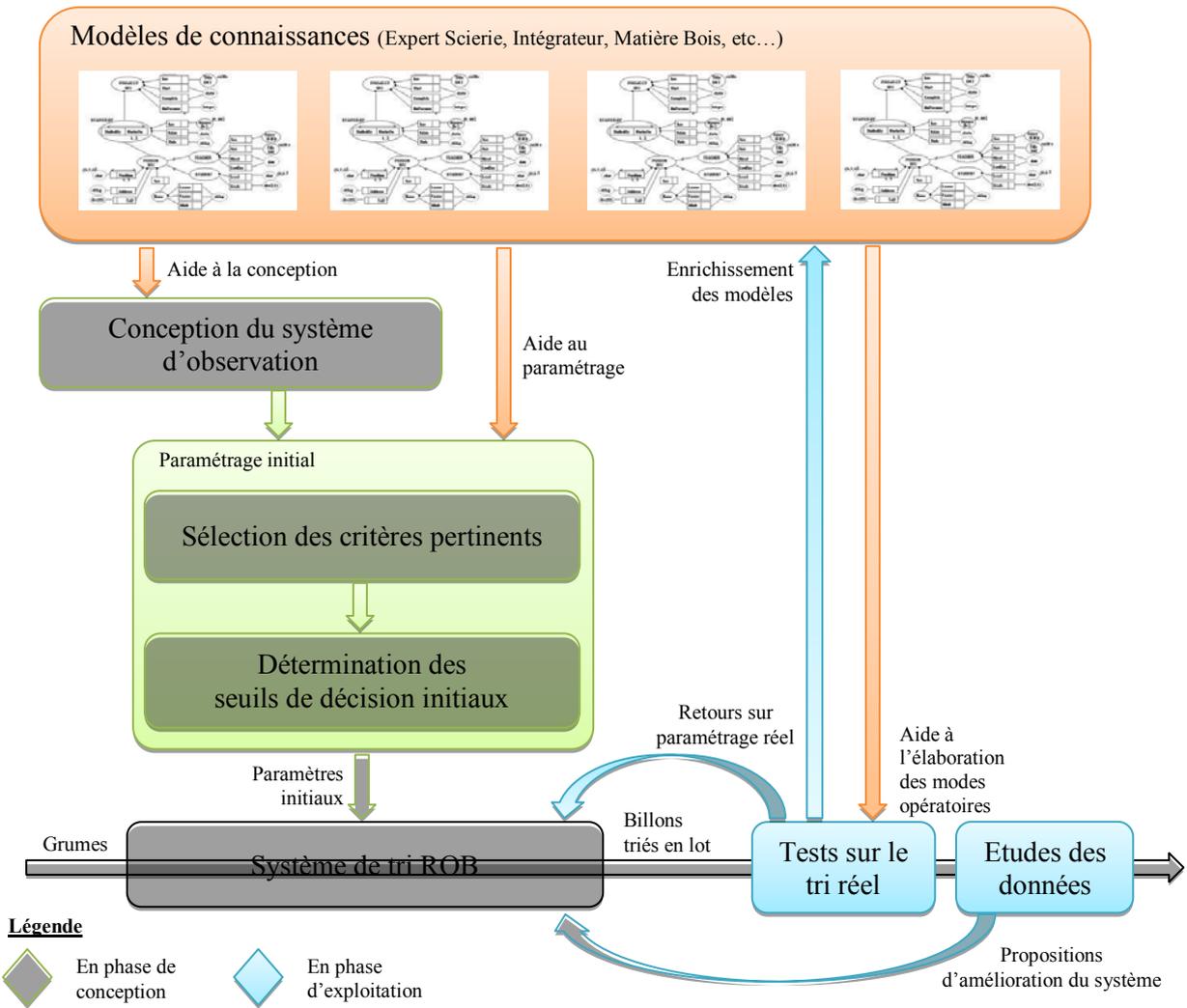


Figure 3-1 : Processus d'intégration des connaissances

Ainsi, la section 3.1 décrit les moyens mis en œuvre afin d'intégrer les connaissances modélisées dans la conception puis la section 3.2 détaille la mise en œuvre du paramétrage initial du système de tri. La section 3.3 expose les méthodes déployées pour tester le paramétrage après la mise en fonction du système. Cette section présente également les retours d'expérience sur le système fonctionnel à partir des premiers résultats du système de tri.

### 3.1 Exploitation du Modèle Fonctionnel Enrichi pour la conception du système de tri

Durant la phase de conception, les connaissances modélisées concernent les qualités Billon et Sciage de l'entreprise, les connaissances sur la matière Bois et la connaissance *a priori* du système de tri. On les utilise tout d'abord pour concevoir le système d'observation du système de tri.

Ce système réalise deux tâches principales : la transformation du flux matière en flux d'information et le traitement des informations afin de piloter les actions nécessaires au tri des billons. Pour mieux appréhender le processus de conception de ce système et le rôle des acteurs, nous choisissons de diviser le système en deux éléments effectuant chacun une de ces deux tâches principales. Ces deux éléments sont le système de vision constitué principalement d'un tomographe à rayons X (section 1.2) et le système de valorisation.

Le processus de conception de ce système est schématisé dans la Figure 3-2. Sur cette figure, les étapes de production agissant sur le flux matière apparaissent en vert, les étapes agissant sur le flux d'information en orange et les éléments nécessaires à la conception et au paramétrage apparaissent en bleu. La connaissance Métier de la scierie est utilisée pour déterminer les critères à mesurer sur les bois ronds. Ces critères sont ensuite transmis à l'intégrateur qui les traduit dans son domaine d'expertise afin de fournir des mesures de ces critères par le biais du système de vision. Cette phase de traduction est propre à l'intégrateur (cœur de métier), la scierie n'a pas accès aux méthodes déployées, mais le développement se fait par itérations successives par la validation des mesures sur site. Les mesures obtenues grâce au système de vision sont ensuite transmises au système de valorisation. Le système de valorisation est développé par le même intégrateur, mais son paramétrage est à la charge de la scierie. L'intégrateur joue alors le rôle de conseiller pour le paramétrage. Le système de valorisation propose une solution de tronçonnage de la grume en billons qui doit ensuite être validée par l'opérateur du poste de tronçonnage avant que la grume ne soit finalement tronçonnée physiquement puis que les billons soient triés dans différents boxes.

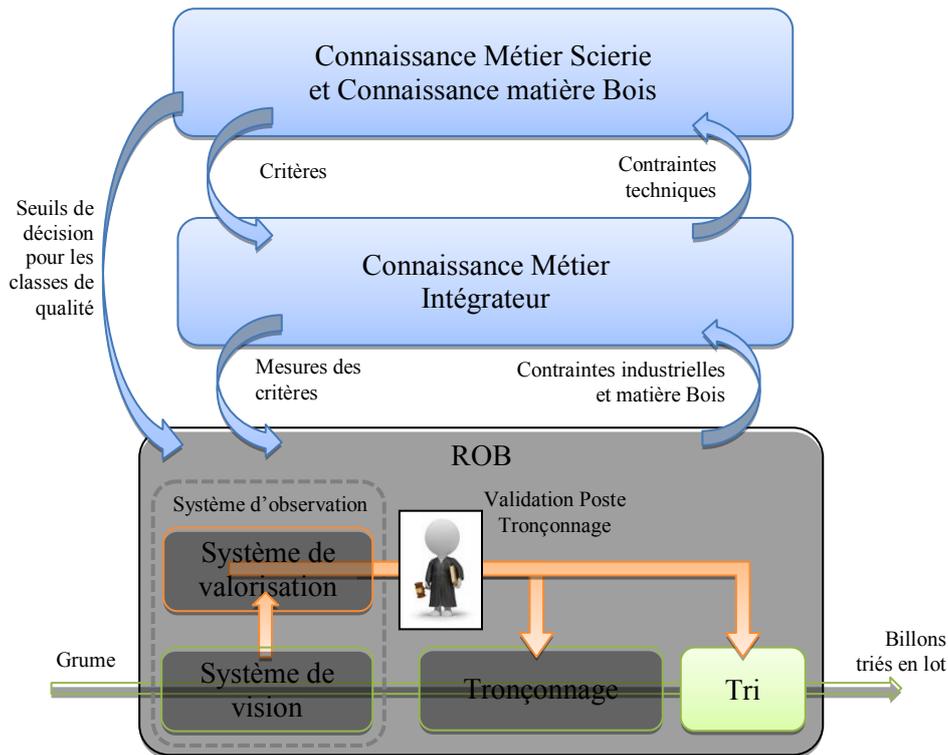


Figure 3-2 : Principe de conception du système d'observation

L'intégration de la connaissance pour la conception du système d'observation s'exprime tout d'abord par la détermination des critères qu'il est nécessaire d'analyser puis de mesurer **par le système de vision** (section 3.1.1). Ensuite, le modèle Qualité Billon est instancié (spécifier) afin de présenter les classes de qualité définies grâce au système de valorisation (section 3.1.2). Les liens mis en place afin de corrélérer les classes de qualité définies par le système automatisé avec celles définies par l'opérateur (lorsque le système n'est pas opérationnel) sont ensuite présentés dans la section 3.1.3.

### 3.1.1 Extraction des critères caractérisant la qualité

Lors de l'établissement du MFE, l'analyse des modèles par le cognicien a permis d'établir les critères caractérisant les différentes classes de qualité Billon et Sciage vendues aux clients. Le résultat de cette analyse est synthétisé dans la Table 3-1 qui spécifie les critères définis pour les qualités Sciage, Billon Opérateur et Billon Enrichie issue du MFE.

On représente dans cette table :

- en vert, les liens directs (même critères) entre la qualité Sciage et la qualité Billon concernée,

- en blanc, les liens indirects géométriques ou anatomiques (critères concernant la même caractéristique ou lié anatomiquement à la même caractéristique),
- en orange, les liens manquants vers la qualité Billon concernée (critères non mesurés par la Qualité Billon),
- et en bleu, des liens inexistantes vers la qualité Sciage (critères non mesurés Qualité Sciage).

Selon l'expérience de l'intégrateur et l'étude bibliographique de la section 1.4, les capteurs implantés sur l'installation ROB sont *a priori* capables de détecter, d'identifier et de quantifier tous les critères nécessaires à l'obtention des classes de Qualité Billon Enrichie. Certains traitements nécessaires à l'obtention de ces critères sont déjà mis au point par l'intégrateur, mais la plupart nécessitent encore des développements car leurs performances (détection, identification ou précision de la mesure) ne sont pas encore satisfaisantes. Le cas échéant, la liste des critères peut être remise en question en fonction de leur faisabilité d'obtention ou de leur pertinence, au regard du tri réel des billons. L'apport de la modélisation de connaissance ne concerne ici que le domaine des exigences « clients » et n'apporte en aucun cas des réponses à la conception technique du système d'observation, qui, elle, relève des compétences et des connaissances de l'intégrateur. Néanmoins, il doit bien évidemment intégrer les souhaits de la scierie spécifiés par les modèles de connaissances.

Table 3-1 : Critères issus des modèles de connaissances

Caractéristiques du bois	Qualités issues des modèles ontologiques		
	Sciage	Billon Opérateur	Billon Enrichie
Nœud noir	Diamètre apparent max	Diamètre max estimé visible	Diamètre max mesuré Diamètre moy max mesuré
	Rapport max diamètre apparent / largeur pièce	Diamètre max estimé visible	Diamètre max mesuré Diamètre moy max mesuré
	Rapport max diamètre apparent / épaisseur pièce	Diamètre max estimé visible	Diamètre max mesuré Diamètre moy max mesuré
	Nbr max apparent sur 1 mètre Traversant	Nombre max estimé	Nombre max mesuré sur 1 mètre Diamètre min mesuré du cylindre défini par la longueur saine des nœuds
	Adhérence du nœud		Identification comme Nœud Noir = Non adhérence
Nœud sain	Rapport max diamètre apparent / largeur pièce	Diamètre max estimé visible	Diamètre max mesuré Diamètre moy max mesuré
	Rapport max diamètre apparent du groupe de nœuds/ largeur pièce		Diamètre groupe max mesuré
Entre écorce	Nombre apparent max	Présence estimée branche ramicorne	Nombre max mesuré Angle d'insertion max d'un nœud sain Angle d'insertion max d'un nœud noir
	Rapport max largeur apparente / largeur pièce		Volume max mesuré
	Rapport max épaisseur apparente / ép pièce Traversant		Volume max mesuré
Trace de mitraille	Présence sur 1 face	Présence esti. Coloration + Délect. mesurée	Détection mesurée
Trace de gui	Taille moyenne max des trous apparents		
	Surface apparente max	Présence estimée bosse de gui	Surface max mesurée
Pourriture	Présence apparente	Présence estimée coloration	Surface max mesurée Densité min de l'aubier frais
Echauffure	Traversante		
	Rapport max largeur apparente / larg pièce		
	Rapport max longueur apparente /lg pièce		
Fentes/fissures	Longueur max apparente		Surface max mesurée d'une fente
Flaches	Epaisseur max	Diamètre max Billon mesuré min	Epaisseur max sur produit du schéma Courbure max sciage
	Largeur max	Diamètre max Billon mesuré min	Largeur max sur produit du schéma Courbure max sciage
	Longueur max	Diamètre max Billon mesuré min	Longueur max sur produit du schéma Courbure max sciage
Coloration bleue	Rapport surface apparente / surf face pièce	Présence estimée	Présence estimée
Fil du bois	Inclinaison max apparente / à la rive		
Piqures / Bois Scolyté	Présence	Présence estimée sciure	Présence estimée sciure Densité min de l'aubier frais
	Nbr max de trous apparents	Présence estimée sciure	Présence estimée sciure
Manque matière	Rapport max surface / surface pièce	Diamètre max Billon mesuré min	Epaisseur flache max sur produit Largeur flache max sur produit Longueur flache max sur produit
Poche de résine	Nombre max apparent / mètre	Attribution de l'essence	Nombre max mesuré de poche / mètre
	Surface apparente max		Nombre max mesuré de poche / mètre
Résistance		Décroissance max estimée	Décroissance max mesurée MOE MOR en flexion Largeur de cerne min mesurée Densité min de l'aubier à 12% Densité min du duramen à 12% Distance min interverticillaire Distance moy min interverticillaire
Ronce	Présence		Surface max mesurée
	Gravité max estimée		Gravité max mesurée
Bois de compression	Présence	Courbure max estimé Ovalité max estimée	Courbure max mesurée Ovalité max mesurée
			Excentricité max mesurée de la moelle
Bois net de nœud	Présence bois net de nœud apparent	Estimation caract visibles enveloppe	Surface de bois de nœud min mesurée
Essence	Attribution estimée essence	Attribution estimée essence	Attribution mesurée essence

### 3.1.2 Spécification des classes de Qualité Billon du système de tri

L'objectif de cette section est de déterminer les différentes classes de Qualité Billon que le système de tri doit permettre d'obtenir. Ces classes dépendent de la valorisation de la grume en billons selon le plan de vente de la scierie.

Le **système de valorisation** est schématisé par la Figure 3-3. Il se décompose en sept étapes et utilise une base de données (BD) paramétrée par la scierie. Cette BD lie les différents schémas de sciage réalisés par la scierie avec leurs longueurs, leurs essences, leurs caractéristiques dimensionnelles et qualitatives propres (les critères de qualités). La première étape consiste à évaluer toutes les combinaisons d'**Essences/Longueurs** possibles (E/L) dans la grume au regard des longueurs de billons existantes dans la BD. Ensuite, une première itération teste toutes les combinaisons trouvées une à une. Dans cette boucle, la deuxième étape extrait de la BD tous les **Schémas de sciages** ayant l'**Essence/Longueur** requises (E/S/L) pour chacun des billons de la combinaison de longueur. Ensuite, une seconde itération analyse chaque combinaison E/S/L de billon une à une afin d'obtenir la meilleure valorisation de chacun des billons de la combinaison de longueur. Dans cette seconde boucle se trouvent les troisièmes, quatrièmes et cinquièmes étapes. La troisième étape sélectionne tous les schémas ayant des caractéristiques qualitatives compatibles, liées à l'**Emploi** du produit fini (voir section 1.3), (E/S/L/E) et la quatrième, tous ceux ayant des caractéristiques dimensionnelles compatibles. La cinquième étape calcule la meilleure valorisation E/S/L/E pour chaque billon de la combinaison de longueur en se basant sur le rendement matière de la combinaison E/S/L/E, le « prix » paramétré pour les produits contenus dans la E/S/L/E et une « priorité » paramétrée quotidiennement représentant les besoins de production. L'ensemble des billons de la combinaison de longueurs est ainsi valorisé. La sixième étape permet d'obtenir une valeur associée à la combinaison de longueurs analysée par addition des valeurs obtenues sur chaque billon. Toutes les combinaisons de longueurs sont valorisées une à une de la même manière. La septième étape sélectionne la meilleure valorisation de la grume par comparaison des valeurs obtenues pour chaque combinaison de longueurs.

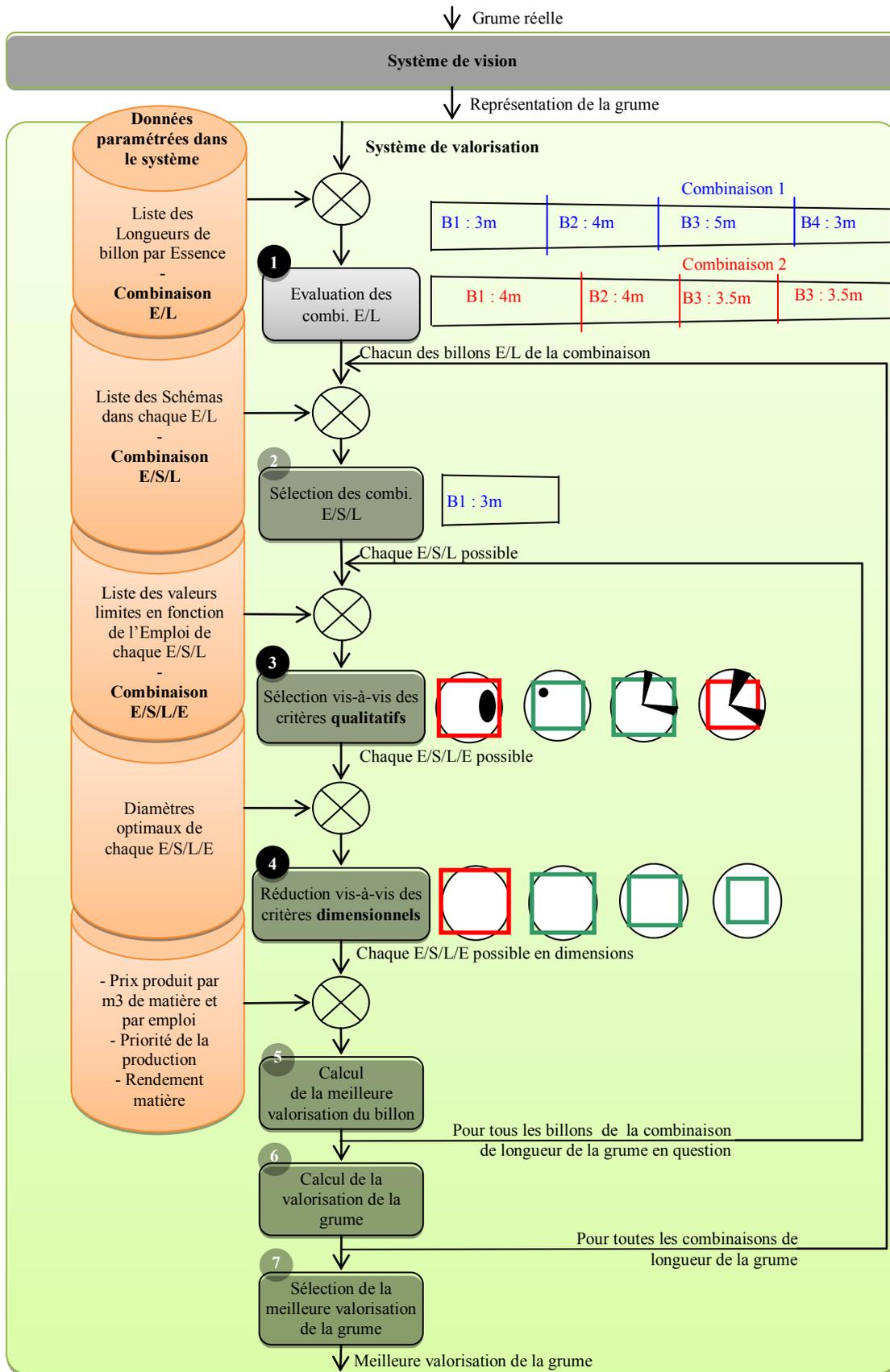


Figure 3-3 : Processus de valorisation

Les classes de sorties des étapes de réduction ou de sélection (Etapes 2 à 4) sont définies en intention par les seuils qui les séparent les unes des autres. La méthode mise en œuvre est un **classificateur à seuils** [Andreu J.P., 2003].

La description du processus de valorisation montre que le système d'observation utilise la combinaison E/S/L/E comme classe de qualité. Ces classes de Qualité Billon Enrichie sont appelées « **classe E/S/L/E** ». Les seuils sont associés aux classes E/S/L/E via le paramétrage du système de tri.

Le système de valorisation fournit une solution qui propose un tronçonnage de la grume en billons puis attribue un box de tri pour chaque billon tronçonné. L'opérateur de tronçonnage reste le décideur final. Si la solution proposée n'est pas pertinente selon lui à cause, par exemple, d'une défaillance du système de vision ou d'une erreur de paramétrage, alors il peut relancer le processus de valorisation en modifiant les données d'entrée. L'opérateur peut ainsi définir une autre classe de qualité basée sur des considérations visuelles, il s'agit des classes de la Qualité Billon Opérateur que l'on nomme « **Classes Opérateur** ». Le système de valorisation doit ainsi être capable d'utiliser aussi bien ces classes Opérateur que les classes E/S/L/E gérées par le système d'observation.

### 3.1.3 Détermination des liens entre les classes E/S/L/E et les classes Opérateur

Le modèle ontologique de la Qualité Billon Opérateur décrit quatre classes Opérateur Q1, Q2, Q3 et Q4 respectivement incluses les unes dans les autres (Q1 étant la plus haute classe de qualité). Le graphique de la Figure 3-4 montre ces inclusions à titre d'exemple dans le plan défini par les critères « courbure maximale » et « diamètre maximal du nœud noir ».

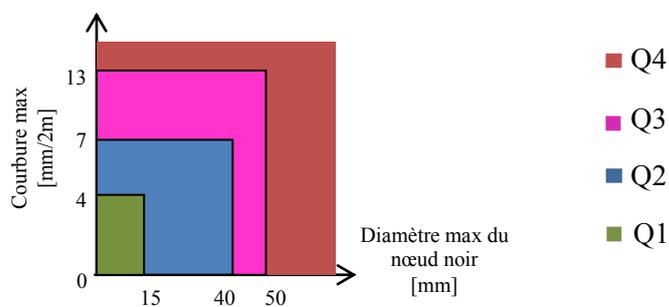


Figure 3-4 : Inclusions des classes Opérateurs

Lorsque l'opérateur évalue la classe de qualité des bois, le système de valorisation doit être capable de faire correspondre les classes E/S/L/E avec les classes Opérateur. Etant donné la forte combinatoire E/S/L/E, le nombre de classes possibles se dénombre en milliers. Il apparaît donc nécessaire de grouper pertinemment les classes E/S/L/E puis de lier les classes Opérateurs à des groupes de classes E/S/L/E. Pour cela, nous exploitons le modèle de connaissance de la Qualité Sciage. Cette opération améliore l'interprétabilité du système et donc son paramétrage.

Le modèle ontologique de la Qualité Sciage montre que les produits finis destinés à un même emploi sont définis par des caractéristiques du bois similaires. Ainsi, des **groupes d'Emploi** sont créés pour regrouper les classes E/S/L/E. Le modèle de connaissance met en avant neuf emplois qui sont la charpente traditionnelle, la charpente industrielle, la charpente choisie, les planches de choix, la gamme Nord, les bois OA/OB, les bois d'ossature, l'emballage/coffrage et le bois abouté. Chaque classe E/S/L/E trouve donc sa place dans un des neuf emplois du produit fini. La Table 3-2 lie ces différents groupes de classes aux classes Opérateur. Notons que le groupe « OAOB », rendu possible par les mesures des caractéristiques internes (via le tomographe à rayons X), n'a aucun équivalent en classification Opérateur, i.e., cet emploi ne peut être évalué que par le système d'observation.

**Table 3-2 : Liens entre les groupes de classes E/S/L/E et les classes Opérateur**

Groupes de Classes E/S/L/E	Classes Opérateur
OA/OB	-
Charpente Industrielle	
Charpente Choisie	Q1
Planche de Choix	
Gamme Nord	
Charpente Traditionnelle	
Ossature	Q2
Bois aboutés	
Charpente Traditionnelle	Q3
Emballage/coffrage	Q4

Les seuils utilisés par le système de valorisation sont fixés pour chaque classe E/S/L/E, qui est elle-même liée à une classe Opérateur via son groupe d'Emploi. Le système de

---

valorisation est donc en mesure d'utiliser la Qualité Billon Enrichie comme la Qualité Billon Opérateur.

## 3.2 Paramétrage initial du système de Tri Qualité Billon

L'analyse des modèles de connaissances par le cogniticien a permis de guider l'intégrateur dans la conception du système d'observation. En effet, l'extraction des critères *a priori* que le système de vision doit mesurer est permise par l'étude du MFE. Ce modèle permet également de définir les classes E/S/L/E dans le système de valorisation en relation avec la Qualité Billon Enrichie. Le modèle ontologique de la qualité Sciage mène les experts à la réunion de plusieurs classes E/S/L/E dans un même groupe simplifiant alors l'interprétation du système de valorisation et permettant désormais son paramétrage initial.

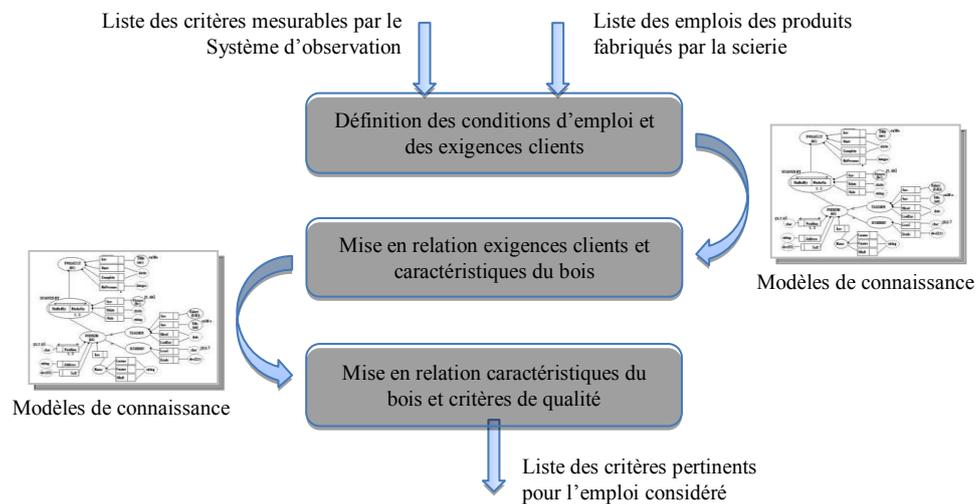
Suite à la réalisation du système d'observation par l'intégrateur, il est à la charge des experts de la scierie de le paramétrer. Le paramétrage initial, qui permet à la scierie de réduire le temps de mise en service du système de tri, est détaillé dans cette section. Elle concerne le paramétrage permettant la valorisation qualitative de la grume qui est abordé dans la Figure 3-3 à l'étape 3.

Les classes E/S/L/E sont définies par des seuils de décision que la section suivante a pour objectif de définir. Comme dans l'étude de [Cavalin P., 2006], la première étape (section 3.2.1) vise à sélectionner les critères pertinents pour chaque groupe d'Emploi parmi la liste des trente-quatre critères mesurables. Ensuite, les seuils de décision doivent être déterminés pour chaque critère sélectionné de chaque classe E/S/L/E. Pour cela, des simulations réalisées sur un modèle de billon « Standard » (section 3.2.2) sont exploitées tout comme des informations collectées dans la littérature ou auprès d'experts d'autres domaines (section 3.2.3).

### 3.2.1 Sélection des critères pertinents pour le Tri Qualité Billon

La sélection des critères nécessite une analyse et une compréhension des produits finis mais aussi du processus de fabrication. L'analyse des produits vendus par la scierie montre que leur utilisation est diversifiée et que les exigences clients ne sont pas les mêmes en fonction de l'utilisation qu'ils en font.

Comme le schématise la Figure 3-5, la première étape de la sélection est de définir en détail les conditions d'emploi du produit et donc, les exigences clients. La seconde étape lie les exigences aux caractéristiques du produit (formalisées dans le modèle de la matière Bois), puis, la dernière étape lie ces caractéristiques aux critères de qualité.



**Figure 3-5 : Démarche de sélection des critères a priori pertinents**

On propose ici d'appliquer la méthodologie de sélection des critères pertinents à l'emploi « planches de choix » à titre d'exemple.

### **Définition des conditions d'emploi et des exigences clients**

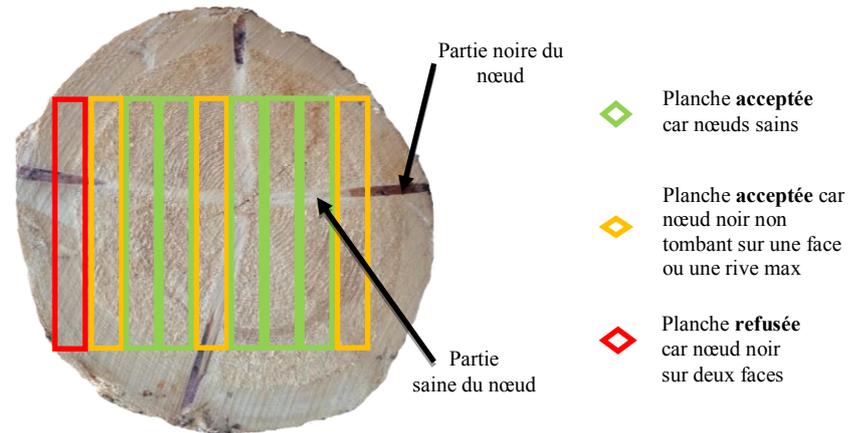
Les planches de choix sont des produits spécifiques à un usage et/ou à une région. La scierie produit trois types de planches de choix : la planche de rive, la planche Lorraine et la planche à maçon.

La planche de rive est placée à l'extérieur d'un bâtiment sous les dernières lignes de tuiles. Elle est donc soumise aux intempéries et a en outre une vocation esthétique. Cette planche est séchée, rabotée et moulurée avant d'être vendue. D'un point de vue esthétique, elle doit être homogène et sans aucune déformation. Les planches Lorraine et les planches à maçon ne sont pas rabotées, mais ont des vocations similaires et répondent ainsi aux mêmes exigences.

### Relation entre exigences clients et caractéristiques du bois

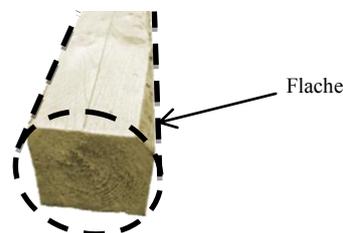
Les caractéristiques du bois analysées affectent le produit esthétiquement ou mécaniquement. On présente celles de notre exemple :

- Le **gui** laisse des séquelles inesthétiques sur le bois telles que des trous dans la matière ou un fil du bois perturbé. Le bois est cassant au niveau du fil perturbé.
- L'**entre-écorce** est un résidu d'écorce inclus dans la matière (au fur et à mesure des années) suite à une blessure ou à une branche ramicorne. Elle a plusieurs tailles, différentes formes et elle rend la planche inesthétique, voire cassante. En considérant la faible épaisseur d'une planche de choix, il y a peu de chance que l'entre-écorce ne soit que d'un seul côté de la planche.
- La **pourriture** n'est pas autorisée sur les planches de choix car elle l'affaiblit mécaniquement.
- Les insectes de la famille des **scolytes** se nourrissent du cambium de l'arbre (son tissu de croissance) et participent à sa mort. Une fois mort, l'arbre s'assèche sur pied. Il est ensuite attaqué par d'autres insectes et champignons, puis perd ses propriétés structurelles et esthétiques.
- Les **nœuds** peuvent avoir deux états dans le bois : sains et adhérents, ou noirs et non adhérents (on néglige la partie de faible longueur où le nœud peut être sain mais non adhérent). Lorsque le nœud est sain, les fibres du tronc sont liées à celles du nœud. Lorsqu'il est noir, le tronc continue de croître alors que le nœud pas, i.e., les fibres du tronc et les fibres du nœud ne sont plus liées. Lorsque les planches sèchent, le bois sain se rétracte légèrement se « décollant » ainsi de la partie noire du nœud et risquant de se détacher de la planche (nœud tombant). Le nœud noir peut être aussi inesthétique, ainsi il faut l'éviter sur au moins une face (largeur) et une rive (épaisseur) de la planche. De plus, le nœud (noir ou sain) représente une zone de faiblesse dans la planche. Lorsqu'il est de grande taille, il peut être à l'origine des déformations du produit lors du séchage ou de zone cassante dans la planche. La Figure 3-6 schématise les planches acceptées et refusées dans un schéma de sciage en fonction des nœuds noirs.



*Figure 3-6 : Planches de rive acceptées ou refusées en fonction des noeuds noirs*

- Le **flache** est le fruit de l'obtention d'un avivé (pavé droit) dans un bois rond (cylindre) sachant que ce bois rond a un diamètre légèrement plus petit que celui du cercle inscrit de l'avivé pour des questions de rendement matière. Le flache est une arête ronde de l'avivé comme le montre la Figure 3-7. La planche de rive est rabotée dans une autre transformation après le sciage du bois rond, ainsi la seule condition sur le flache est qu'il n'y en ait plus trace sur le produit fini raboté.



*Figure 3-7 : Flache résultant du sciage d'un avivé dans un bois rond*

- Le **bois de compression** est un bois fabriqué par l'arbre pour se redresser quand sa position par rapport à la verticale est modifiée par des facteurs environnementaux : vent, sol meuble, etc... Ce bois plus dense, appelé pour les résineux « bois de compression », se comporte différemment au séchage. Il en résulte des déformations du produit. La formation du bois de compression est souvent associée à la formation d'un tronc ovale et à un décentrage de moelle. Le redressement de l'arbre se traduit aussi souvent par une courbure du tronc.

- Les **fentes** du bois qui sont déjà présentes dans le bois avant séchage risquent de s'agrandir durant le séchage et de rendre la planche inexploitable pour les usinages suivants.
- Les **poches de résine** ont peu d'impact sur la structure, mais sont problématiques lorsque la planche est peinte ou vernie. Les poches de résine sont autorisées, mais leur nombre et leurs dimensions doivent être contrôlés.

**Relation entre caractéristiques du bois et critères de qualité**

Les critères caractérisant les planches de choix sont sélectionnés parmi les trente-quatre critères de la Table 3-1 qui explicitent la définition de la qualité et sont présentés dans la Table 3-3. On constate que le nombre de critères nécessaires à la spécification du groupe d'Emploi « Planches de choix » représente seulement 50% du nombre total (17 sur 34).

**Table 3-3 : Critères pertinents du groupe d'emploi « Planches de choix »**

Caractéristiques du Bois	Critères de qualité Billon pour l'emploi « Planche de rive »
Nœud sain	Diamètre max mesuré Diamètre min du cylindre de longueur saine Diamètre inter-verticillaire min mesurée
Entre écorce	Nombre max mesuré Angle d'insertion max d'un nœud sain
Trace de mitraille	Détection mesurée
Trace de gui	Surface max mesurée
Pourriture	Surface max mesurée Densité min de l'aubier frais
Fentes/fissures traversantes	Surface max mesurée d'une fente (traversante ou non)
Flaches	Epaisseur max sur produit du schéma Largeur max sur produit du schéma
Poche de résine	Nombre max mesuré de poche supérieure à un volume / mètre
Piqures / Bois scolyté	Densité min de l'aubier frais
Bois de compression	Courbure max mesurée Ovalité max mesurée Excentricité max mesurée de la moelle

La méthode de réduction des critères est appliquée sur les huit autres groupes d'Emploi et permet une réduction du nombre de critères dont le résultat est détaillé dans la Table 3-4.

**Table 3-4 : Résultats de la méthode réduction des critères**

Groupe d'Emploi	Nombre de critères nécessaires
OAOB	12
Planche de Choix	17
Charpente Choisie	15
Charpente Industrielle	19
Gamme Nord	19
Bois d'Ossature	19
Charpente Traditionnelle	14
Bois Aboutés	19
Emballage-Coffrage	6

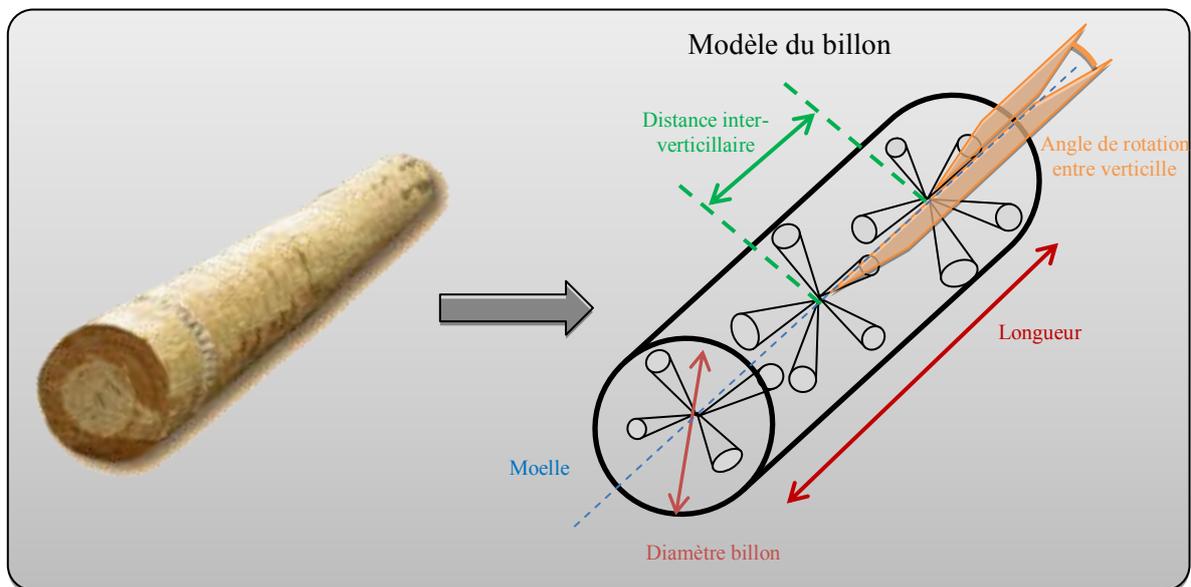
La réunion des classes E/S/L/E en groupe d'Emploi, puis la sélection des critères, facilite l'interprétation du système de valorisation par les experts : toutes les classes E/S/L/E d'un même groupe sont caractérisées par les mêmes critères. Le paramétrage initial doit désormais être complété par la détermination des seuils de chaque critère sélectionné pour chaque classe E/S/L/E.

### 3.2.2 Evaluation des seuils par simulation

Nous avons créé un outil de simulation pour l'analyse des critères de qualité ayant un lien indirect géométrique (voir section 2.3). L'outil permet donc de mettre en relation le seuil qu'il faut fixer pour une classe E/S/L/E d'un billon au regard de la valeur limite fixée sur le produit fini (exigence client) qui en est issu. Nous nous focalisons sur les critères concernant les diamètres de nœud car il s'agit, selon les experts, des critères essentiels de la Qualité Billon Enrichie.

Cette simulation se décompose en plusieurs étapes. La première consiste à modéliser un billon « Standard » avec ses nœuds, la seconde attribue un schéma de sciage à ce billon puis calcule l'impact des nœuds sur chacun des produits du schéma. Cet impact est ensuite comparé aux exigences clients dans la troisième étape. La simulation aboutit à un taux de déclassement, i.e., un taux de produits refusés par le client car non conformes, qui sert de référence.

Le modèle des billons pour la simulation est basé sur les connaissances des experts de la matière. Le billon est modélisé par un cylindre droit de **diamètre et de longueur fixés** comme le montre les Figure 3-8 et Figure 3-9. La **moelle** est confondue avec l'axe de ce cylindre. Les nœuds du billon sont représentés par des cônes dont l'origine est la moelle et, la longueur totale est le rayon du cylindre. Le **diamètre du nœud billon** est le diamètre du cône mesuré à la périphérie du cylindre. Ce diamètre est le même pour tous les nœuds du billon. Le nœud peut avoir une partie morte et une partie saine complémentaire définie par une **longueur saine** partant de la moelle et de longueur inférieure ou égale au rayon du billon. Un verticille, ou couronne de nœuds, est l'association de plusieurs nœuds ayant le même point d'origine sur la moelle. Les nœuds d'un même verticille sont espacés d'un **angle** aléatoire (selon une loi normale) ou fixé. La **distance inter-verticillaire** est la distance entre deux verticilles, cette distance peut être différente entre chaque verticille d'un même billon. Les verticilles sont deux à deux décalés d'un **angle de rotation** aléatoire (selon une loi normale) ou fixé. L'ensemble de ces valeurs à définir sont les paramètres du modèle du Billon Standard.



*Figure 3-8 : Modèle d'un billon par l'outil de simulation*

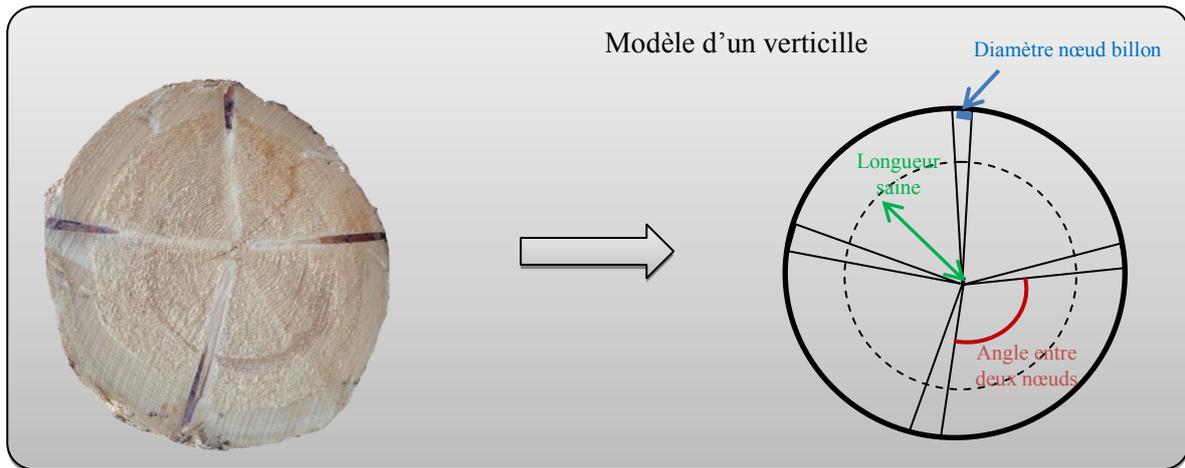


Figure 3-9 : Modèle d'un verticille par l'outil de simulation

Pour définir les produits finis qui sont réalisés dans ce billon, on applique un schéma de sciage comme le montre la Figure 3-10. Cela permet d'extraire par calcul le diamètre apparent du nœud sur le produit en fonction de sa position dans le schéma de sciage, du diamètre du nœud billon mesuré à la périphérie, du diamètre du billon et de l'angle entre le nœud et les faces du produit analysé.

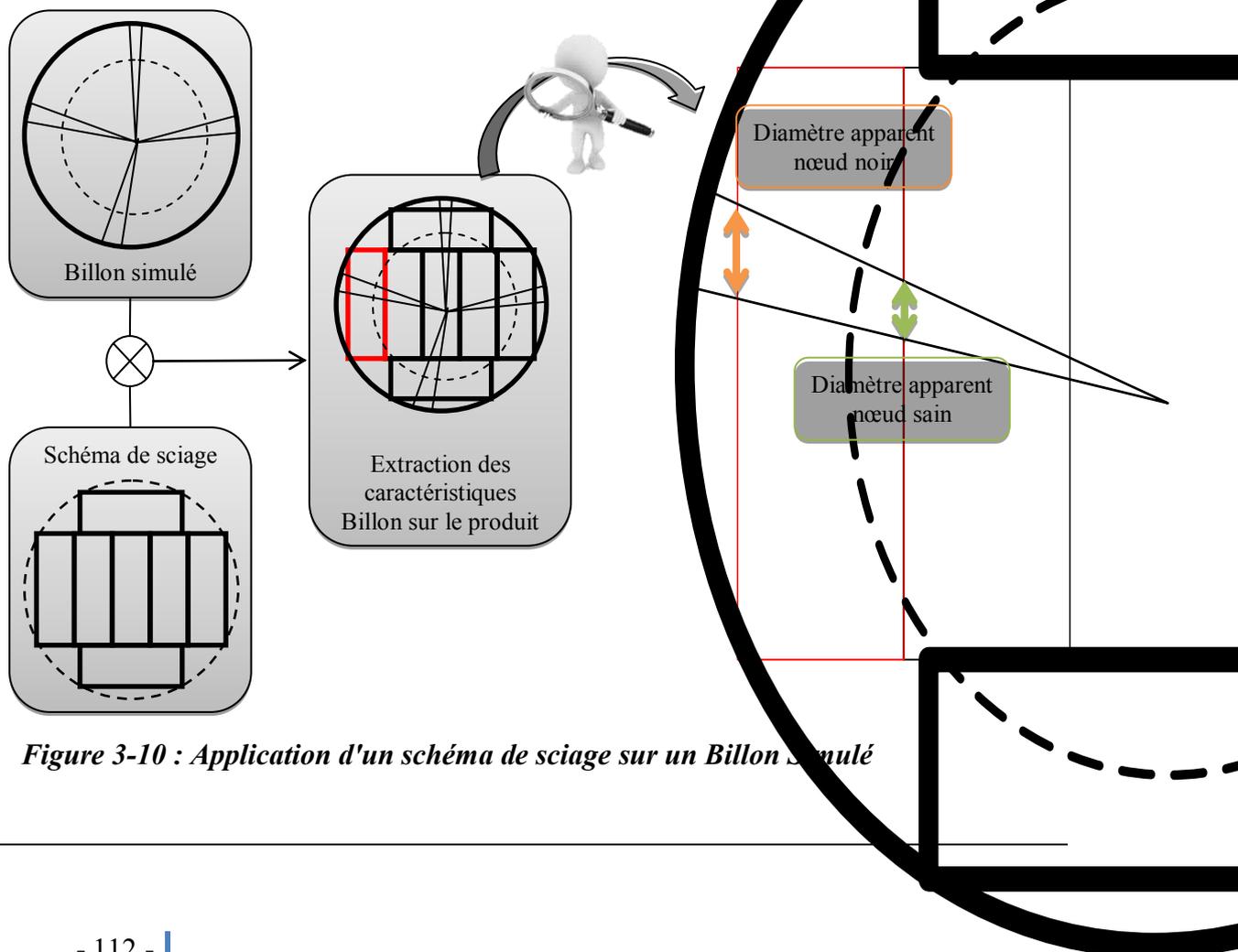


Figure 3-10 : Application d'un schéma de sciage sur un Billon simulé

Pour tester la conformité d'un produit dans la simulation, une règle est instaurée : « Si au moins un diamètre apparent relevé sur le produit est plus grand que son exigence client associées alors le produit est non conforme ». On applique quatre types d'exigences pour cette simulation qui concernent le diamètre maximal apparent

- du nœud noir sur la rive (épaisseur du produit),
- du nœud noir sur la face (largeur du produit),
- du nœud sain sur la rive,
- du nœud sain sur la face.

Les valeurs associées à ces quatre exigences sont obtenues par un relevé terrain effectué sur les colis prêts à l'expédition qui respectent de fait les exigences clients. Afin d'éviter le décerclage des colis, et par soucis de temps, l'analyse n'est faite que sur les parties externes d'un ou deux colis par produit fini. Une base de données de ces quatre diamètres maximaux par produit est constituée.

Comme le montre la Figure 3-11 pour le schéma « 75x225 7x » de « 4 » mètres en « Epicéa » pour un emploi « Charpente Traditionnelle » (classe E/S/L/E), le test est effectué pour 360 positions angulaires du schéma de sciage dans le billon. De toutes ces positions, on extrait un indice de déclassement  $I_x$  par la formule (Eq 2) pour un diamètre de nœud billon  $x$  donné. Cette formule prend en compte le nombre de positions angulaires relatif  $P_i$  où  $i$  pièces sont non conformes, et la proportion du nombre de pièces non conforme.

$$I_x = \sum_{i=0}^{nbr \text{ Max pièces non conformes}} P_i * \frac{i}{nbr \text{ Max pièces non conformes}} \quad (Eq 2)$$

On reproduit cette opération plusieurs fois en incrémentant le diamètre de nœud Billon de deux millimètres. L'ensemble des valeurs obtenues est représenté par le graphique. L'analyse graphique permet aux experts de définir, par exemple, qu'un taux de déclassement théorique de 10% ou 40% des produits finis est obtenu avec un seuil du diamètre maximal du nœud fixé, respectivement, à 35 millimètres ou 66 millimètres.

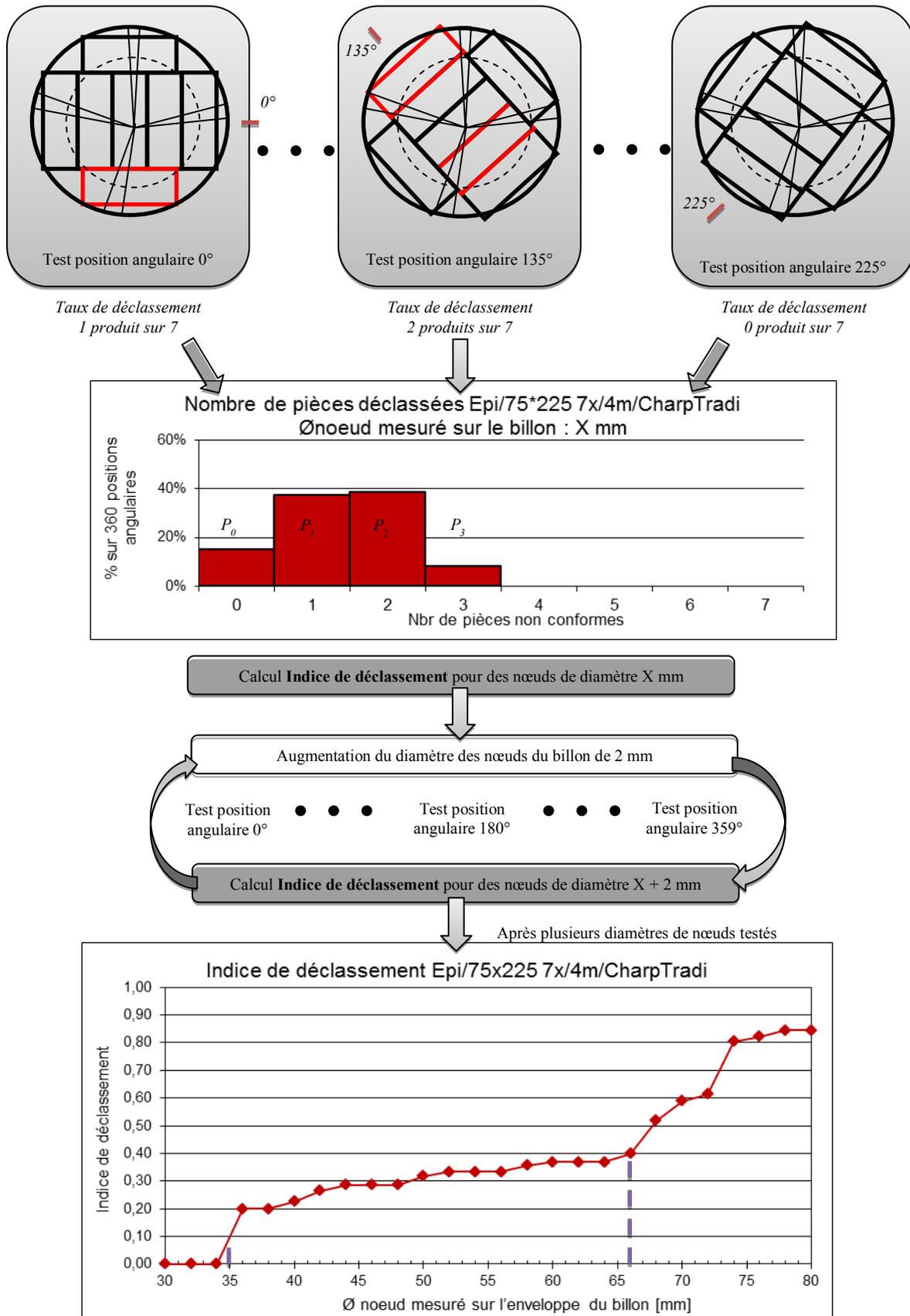
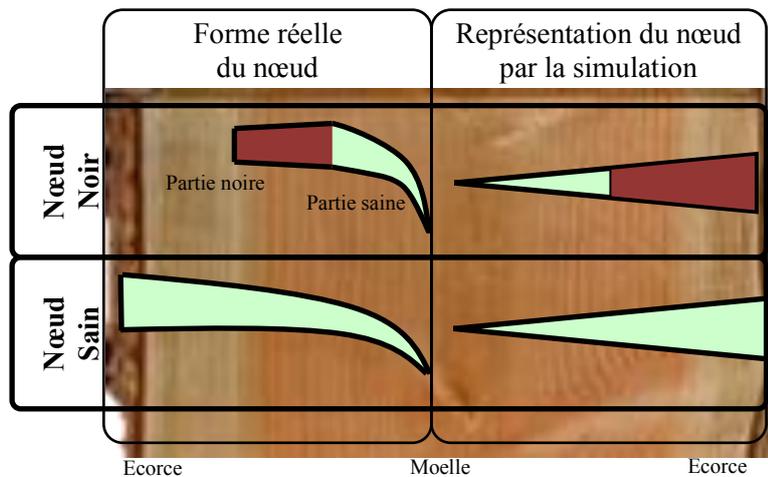


Figure 3-11 : Obtention du graphique de l'indice de déclassement

Néanmoins, cette simulation comporte plusieurs limites. L'approximation principale tient dans la forme et la longueur du nœud considéré comme un cône formant un angle de 90° avec la moelle et allant toujours jusqu'à l'écorce (Figure 3-12). Les autres approximations concernent la forme du billon (un cylindre), la position de la moelle (parfaitement au milieu du cylindre), la longueur saine (la même pour tout le verticille), le diamètre du nœud billon (identique pour tous les nœuds), le point de mesure du diamètre maximal du nœud billon (au niveau de l'écorce), la position du schéma dans le billon (toujours parfaitement centré).



**Figure 3-12 : Représentation des nœuds dans la simulation créée sous Excel©**

En tenant compte des approximations de la simulation, mais également du fait que le relevé terrain est imparfait, les experts sont capables de fixer un seuil initial du diamètre de nœud billon (noir et sain) maximal toléré pour chaque classe E/S/L/E au regard du graphique de l'indice de déclassement. Pour reprendre notre exemple, le seuil initial fixé par les experts est de 45 millimètres dans l'objectif d'atteindre un taux de 5% de déclassement. L'ensemble des résultats sont présentés à l'Annexe 6.

### 3.2.3 Détermination des seuils à partir d'études bibliographiques

Dans cette section, les seuils initiaux définissant les classes E/S/L/E sont fixés en se basant sur la littérature, sur les avis des experts et sur les contraintes techniques du système ROB. On se propose de décrire l'apport de la recherche bibliographique et des experts à travers des exemples concrets.

**Prise en compte de contraintes techniques : exemples de la courbure du billon et du flache**

Les caractéristiques techniques du système de production induisent la détermination des seuils initiaux définissant la courbure autorisée du billon et du flache sur les produits finis. Concernant le premier, la ligne de sciage de l'entreprise peut scier courbe afin de maximiser le rendement matière. Cependant, la courbure du billon doit être limitée d'un point de vue technique et mécanique. Les données techniques de la ligne Canter portant sur la courbure des sciages, présentées Table 3-5, sont alors augmentées d'un coefficient 5 (coefficient estimé par les experts) pour déterminer les seuils initiaux de courbure du billon des classes E/S/L/E au regard de l'épaisseur des produits finis du schéma de sciage.

**Table 3-5 : Seuils associés au critère « courbure max Billon » en fonction de l'épaisseur du produit fini et des données techniques**

Épaisseur produit [mm]	Données techniques	
	Courbure max Sciage [mm/2m]	Courbure max Billon [mm/2m]
25	14	70
36	10	50
50	6	30
63	4	20
75	1.5	7.5

La présence de flache sur le produit fini est due en partie au placement du schéma de sciage dans le billon, mais également à la mise en position du billon à l'entrée de la première machine de coupe de la ligne de sciage. En effet, étant donné que la ligne peut scier des billons courbes, elle doit les positionner angulairement de manière à avoir la courbure maximale dans une position particulière. L'exploitation de la ligne de sciage montre que cette mise en position varie entre 0 et 5° en fonction de la vitesse d'avance et de la forme du schéma de sciage (plus un rectangle ou un carré). Des calculs sont alors réalisés pour estimer la quantité de flache présente résultante sur le produit fini.

Les conclusions de cette étude sont présentées dans la Table 3-6. Dans l'exemple du schéma 50\*150 2x, une erreur moyenne maximale de 5° sur un schéma de forme plutôt « rectangle » (rapport épaisseur/largeur grand) peut provoquer l'apparition d'un surplus de flache de l'ordre de 2 millimètres sur le produit à cause de la courbe ou de l'ellipticité du

billon. Les schémas ayant une forme « carré » sont moins influencés par l'erreur de mise en position angulaire.

**Table 3-6 : Résultats des calculs pour les seuils du flache**

Schéma de sciage	Diamètre schéma [mm]	Rapport Ep/larg schéma	Ecart max [°]	Erreur sur le produit [mm]	Exigences client flache Ep-Larg [mm]	Seuils initiaux flache Ep-Larg [mm]
38*122 3X	170	1	5	1	5-5	4-4
50*150 2X	180	0.70	5	2	5-5	3-3
63*175 3X	253	1.12	5	2	10-10	8-8
63*175 4X	304	1.51	5	4	10-10	6-6
75*225 3X	320	1.04	5	3	15-15	12-12
75*225 4X	374	1.39	5	5	15-15	10-10

Les seuils initiaux du flache sont fixés pour chaque classe E/S/L/E au regard des exigences clients et de l'erreur calculée sur le produit fini pour une erreur angulaire maximale.

**Prise en compte des études bibliographiques existantes : exemples des branches ramicornes et du bois de compression**

Il existe plusieurs études dans le domaine du bois ayant visé la classification des bois en fonction de leurs caractéristiques. L'objectif du brevet américain de Carlson W.C. est de sélectionner des résineux au regard des caractéristiques externes [Carlson W., 2007]. Ainsi, il estime qu'une branche est considérée comme ramicorne dès lors que son angle d'insertion (entre la moelle et l'axe principal de la branche) est inférieur à 30°. La valeur de 30° est alors utilisée comme seuil initial pour toutes les classes E/S/L/E nécessitant la détection des branches ramicornes.

Dans le projet européen « Compression Wood » sur le bois de compression [Compression Wood, 2005] est proposée une estimation de la gravité du bois de compression. Ces travaux ont permis de mettre en avant que, pour l'Epicéa, le bois de compression est fortement corrélé à l'excentricité et à l'ovalité (ou ellipticité). Deux évaluations du bois de compression sont faites : le bois de compression sévère sur les sections de la grume et le bois de compression total dans la grume. Les résultats montrent une corrélation des deux critères avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,19 avec le bois de compression sévère et de 0,33 avec le bois de compression total.

L'évaluation utilisée dans cette étude est faite en laboratoire par des experts. On se propose donc de la compléter en quantifiant plus précisément le taux de bois de compression grâce à un relevé sur le terrain.

Un lot de 18 billons est sélectionné visuellement lorsque l'on constate la présence d'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : présence visible de bois de compression, forte excentricité de la moelle et/ou forte ellipticité du billon. Le taux de bois de compression est évalué empiriquement en cinq groupes sur la section gros bout (0%, 10%, 20%, 30% et 40%) alors que l'ellipticité et l'excentricité sont mesurées avec un mètre ruban sur la section gros bout. L'ellipticité est le ratio entre le diamètre maximal (au dénominateur) et son diamètre à 90 degrés, et l'excentricité est celui entre la plus petite distance moelle/écorce et le demi-diamètre mesuré sur la même droite. Le graphique de la Figure 3-13 montre les résultats.

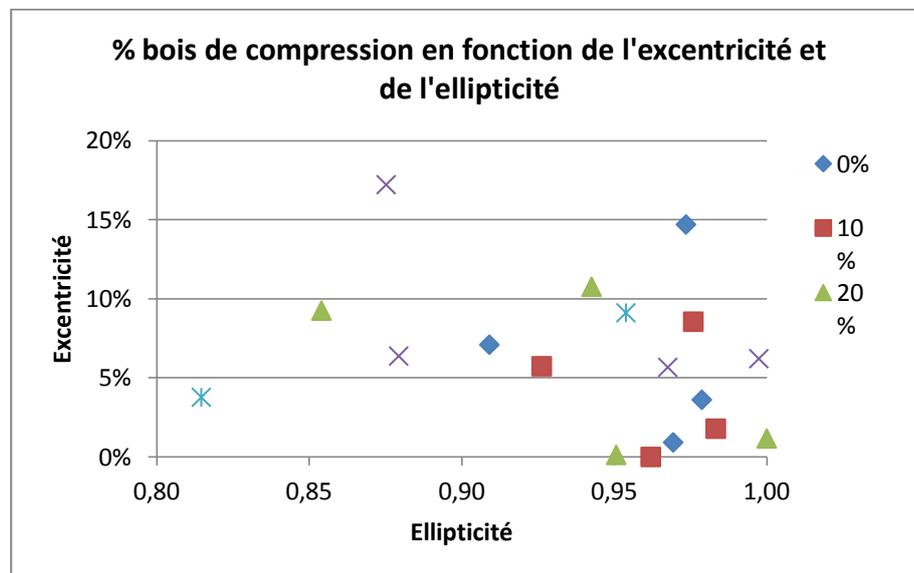
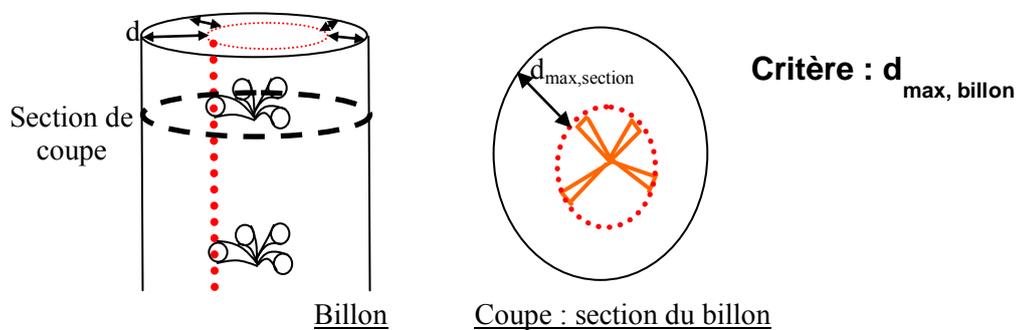


Figure 3-13 : Relevé terrain du taux de bois de compression en fonction de l'excentricité et de l'ellipticité

La répartition des échantillons dans le plan ellipticité/excentricité laisse apparaître une disparité des groupes de "bois de compression". La présence de bois de compression sévère semble caractérisée par une ellipticité inférieure à 0,90. Le groupe 0% est lui dispersé. Bien que le faible nombre d'échantillons ne permette pas une conclusion définitive, quantifier, voire simplement détecter, le bois de compression avec ces deux critères ne semble pas aisé. C'est pourquoi nous choisissons de ne pas fixer de seuils pour ces critères en attendant de mettre en service le système et d'obtenir plus de résultats.

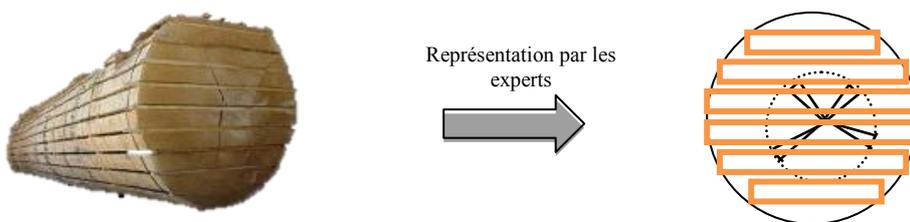
**Prise en compte de l'expertise : Exemple du bois net de nœud**

Selon les experts de la matière Bois, le bois net de nœud se trouve principalement dans la partie basse de l'arbre car les nœuds présents sont morts (et les branches élaguées) depuis plusieurs années et ont été recouverts au cours de la croissance de l'arbre comme le schématise la Figure 3-14. Ce type de bois caractérise les classes E/S/L/E du groupe d'Emploi OA/OB. Les experts proposent un critère basé sur le calcul de la distance maximale entre le cylindre contenant l'ensemble des nœuds du billon et l'enveloppe du billon. La Figure 3-14 explique ce calcul sur une section du billon. Ce calcul est ensuite réalisé pour toutes les sections du billon contenant des nœuds. Les résultats obtenus sur chaque section sont ensuite fusionnés pour obtenir une unique mesure de la distance sur le billon.



**Figure 3-14 : Critère a priori de détermination du bois net de nœud**

Etant donné que les billons destinés à l'Emploi OAOB sont débités selon un schéma dit « Plot » (présenté Figure 3-15), la distance mesurée est ensuite corrélée au nombre de plateaux (planches) qu'il est possible d'obtenir dans des billons de différents diamètres. Les seuils initiaux sont la distance minimale nécessaire à l'obtention de ces plateaux et sont donnés dans la Table 3-7.



**Figure 3-15 : Schéma de sciage dit « en plot »**

**Table 3-7 : Seuils a priori associés au critère "Bois net de nœud"**

Diamètre billon [mm]	Distance minimale de bois net de nœud [mm]	Diamètre billon [mm]	Distance minimale de bois net de nœud [mm]
300	80	460	80
320	80	480	80
340	80	500	80
360	80	520	80
380	80	540	90
400	80	560	100
420	80	580	110
440	80	600	120

Une fois le paramétrage initial du système de valorisation effectué, le système de Tri Qualité Billon peut être mis en service. Ce paramétrage initial est remis en question par les tests conduits en phase d'exploitation.

### 3.3 Validation du paramétrage en phase d'exploitation

La phase d'exploitation du système est critique dans ce projet car le système est une première mondiale et aucun des acteurs n'a d'expérience face à son comportement réel. En effet, les critères *a priori* ont tous été choisis sur la base de la modélisation de connaissance. Ainsi, il n'y a aucune certitude quant à leur pertinence au regard des performances réelles du système. L'objectif de cette section est de présenter les actions mises en place afin de tester les critères et les seuils définis dans le paramétrage initial puis de proposer des solutions permettant leur validation ou leur ajustement.

Lors de sa mise en service, le système d'observation mesure dix-neuf critères qui sont liés à des mesures sur l'enveloppe, que l'intégrateur maîtrise déjà, et aux mesures des caractéristiques jugées essentielles par la scierie. Il s'agit des « nœuds », des « fentes » et de la « densité ». La Table 3-8 présente ces dix-neuf critères ainsi que les classes E/S/L/E qu'ils caractérisent.

La section 3.3.1 présente les tests effectués et les résultats obtenus sur le critère de « Bois net de nœud » qui est le premier critère remis en question puis amélioré suite à l'obtention de données. Ensuite, la section 3.3.2 présente les actions mises en place pour

vérifier l'influence des seuils sur les classes de qualité des produits finis ou des billons avec, respectivement, l'exemple du « flache » et celui de la « densité moyenne de l'aubier frais ». La section 3.3.3 quant à elle présente les analyses de données faites dans le but d'améliorer le paramétrage.

**Table 3-8 : Premiers critères mesurés par le système d'observation**

N° du critère	Nom du critère	Abréviation du nom	Classes E/S/L/E caractérisées*									
			OA	GN	PC	CC	CI	BA	O	CT	EC	
1	Diamètre maximal des Nœuds Noirs	Ømax NN		X		X	X	X	X	X		
2	Diamètre moyen des Nœuds Noirs	Ømoy NN										
3	Nombre de Nœuds Noirs	Nbr NN		X		X		X	X			
4	Angle d'insertion des Nœuds Noirs	Ang NN										
5	Diamètre maximal des Nœuds Sains	Ømax NS		X	X	X	X	X	X	X		
6	Diamètre du cylindre contenant les Nœuds Sains	Ø CylNS			X							
7	Diamètre moyen des Nœuds Sains	Ømoy NS										
8	Nombre de Nœuds Sains	Nbr NS		X		X		X	X			
9	Angle d'insertion des Nœuds Sains	Ang NS		X	X	X		X	X	X		
10	Épaisseur du flache	Ep FL		X	X	X	X	X	X	X	X	X
11	Largeur du flache	Larg FL		X	X	X	X	X	X	X	X	X
12	Longueur du flache	Lg FL		X		X	X	X	X	X	X	X
13	Surface du cercle contenant des Fentes	Fent	X	X	X	X	X	X	X			
14	Densité moyenne de l'Aubier Frais	AubFrais	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
15	Excentricité de la moelle	Exc	X	X	X	X	X	X	X			
16	Ovalité/Ellipticité du billon	Ova	X	X	X	X	X	X	X			
17	Bois Net de Nœud	BNN	X									
18	Décroissance du billon	Decr										
19	Courbure du Billon	CourBill	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

\*OA = OA/OB ; GN = Gamme Nord ; PC = Planche de Choix ; CC = Charpente Choisie ; CI = Charpente Industrielle, BA = Bois Abouté ; O = Ossature ; CT = Charpente Traditionnelle ; EC = Emballage/Coffrage

### 3.3.1 Validation des critères par retour d'expérience sur le système.

L'objectif de cette section est de valider le critère suite à la mise en service du système de tri. Il est analysé au regard des caractéristiques qu'il permet de mesurer sur la matière approvisionnée, mais aussi au regard du tri Billon effectué. Dans les premiers instants de la mise en service, la priorité de la scierie est d'augmenter sa production de bois d'emploi OA/OB pour son unité « Raboterie » produisant des moulures et tasseaux.

**Validation du critère associé à la caractéristiques « Bois Net de Nœud (BNN) »**

La sélection des critères de la section 3.2.1 fait ressortir que le groupe d'Emploi OA/OB peut être caractérisé par douze critères dont seulement quatre sont mesurés par le système lors de la mise en fonctionnement : la « distance minimale de bois net de nœud » (DMBNN) (explicitée dans la section 3.2.3), la surface maximale de fente dans les sections du bois, la densité minimale de l'aubier pour détecter les bois secs ou scolytés et, le diamètre maximal des nœuds sains du billon. Nos efforts se sont tout d'abord portés sur le critère DMBNN car il est jugé primordial par les experts.

L'analyse des premières images fournies par le système d'observation montre que le critère DMBNN est peu pertinent pour caractériser les classes du groupe OA/OB, car basé sur une vision incomplète des caractéristiques d'une zone de Bois Net de Nœud (BNN). Ainsi, un dialogue, basé sur les images, s'est instauré entre les experts de la scierie et ceux du système de vision afin d'avoir une représentation correcte de la matière dans laquelle se trouve le BNN et d'être en mesure de définir un nouveau critère plus pertinent.

La Figure 3-16 représente un empilement de plusieurs sections du billon et vise à décrire en image la caractérisation de la zone de BNN. La modélisation de connaissance ayant servi à la création du critère *a priori* permettait déjà de savoir :

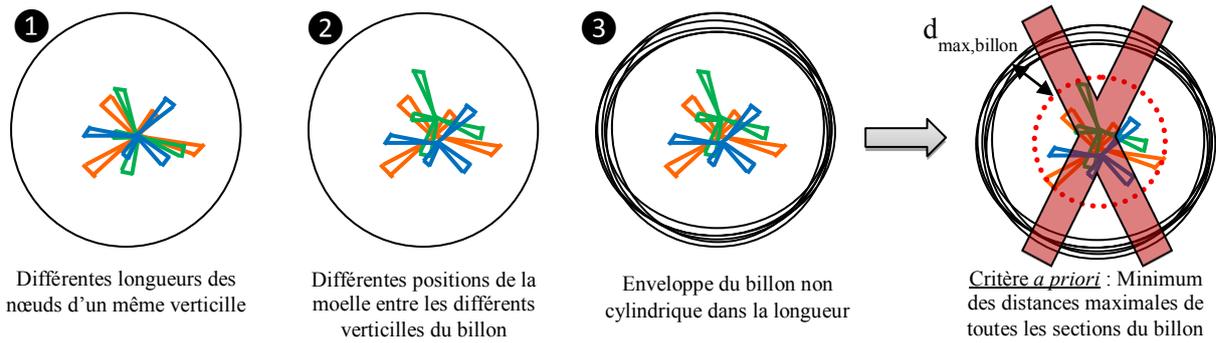
- que la longueur des nœuds d'un même verticille n'est pas toujours la même ❶,
- que la moelle n'est pas centrée sur le billon et n'est pas parfaitement verticale, i.e., que l'origine absolue des nœuds n'est pas la même d'un verticille à l'autre ❷
- et enfin que le billon n'est pas strictement cylindrique ❸.

De plus, les images représentatives des grumes approvisionnées mettent en avant :

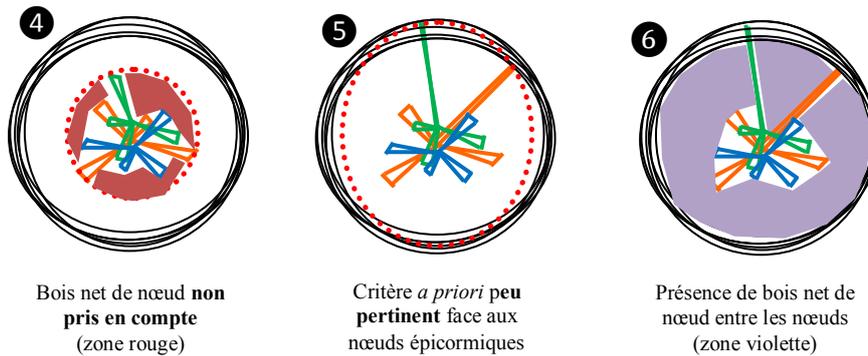
- que le critère proposé ne prend pas en compte un pourcentage non négligeable de bois net de nœud ❹
- puis finalement que les nœuds écorniques le rendent peu pertinent ❺.

Ces nœuds sont des nœuds sains de très petit diamètre (inférieur au centimètre) partant de la moelle allant jusqu'à l'écorce. Les experts constatent également sur les images qu'il y a une proportion de bois non négligeable qui se trouve entre les nœuds ❻.

Informations issues de la modélisation de connaissance



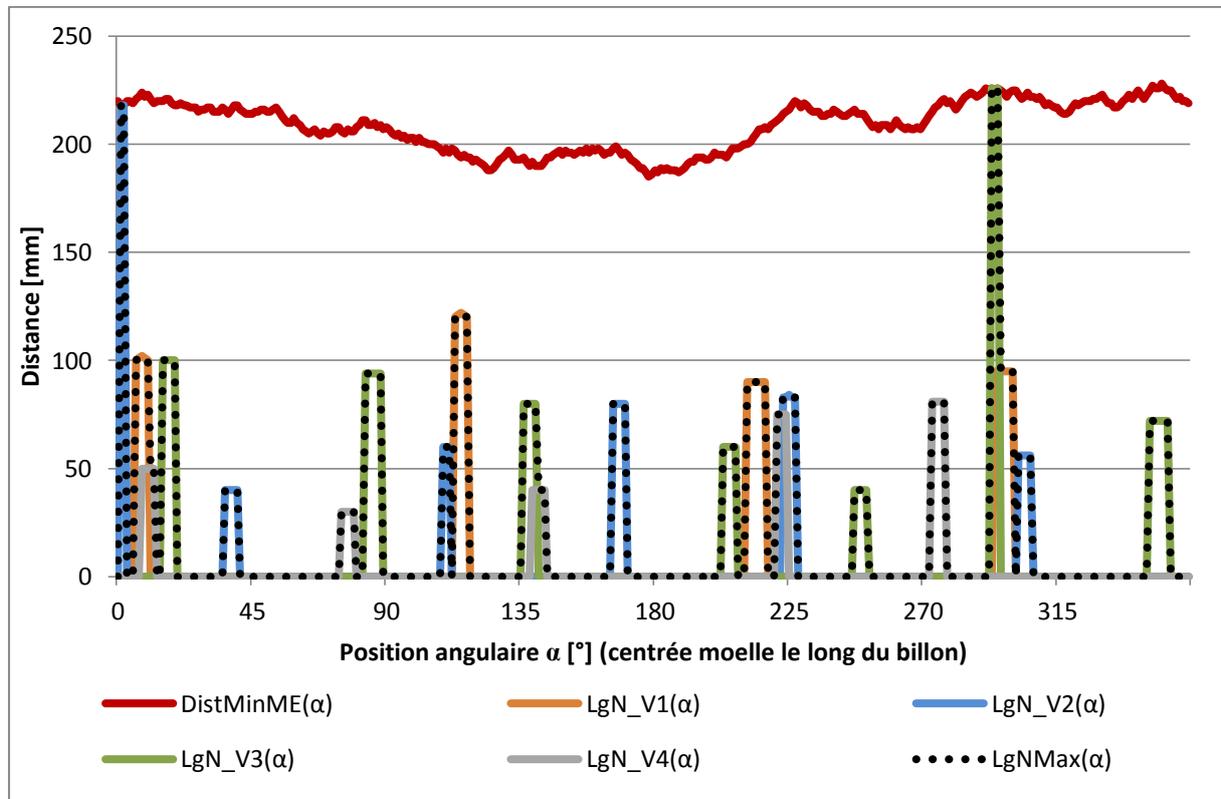
Informations issues de l'imagerie par rayons X



**Figure 3-16 : Obtention de la représentation d'un billon contenant du bois net de nœud**

Au regard de la représentation **6** prenant en compte toutes ces constatations, il apparaît qu'un critère calculant un ratio de BNN basé sur la position angulaire des nœuds de tous les verticilles, leur longueur et leur diamètre est plus pertinent que le critère DMBNN. La Figure 3-17 montre un exemple graphique permettant de calculer ce nouveau critère. En abscisse se trouve la position angulaire en degrés et centrée sur la moelle pour toutes les sections successives du billon. En ordonnée, une échelle de distance en millimètre ayant pour origine la moelle. On représente la distance minimale moelle/écorce pour la position angulaire considérée le long du billon ( $DistMinME(\alpha)$ ). Ensuite, les longueurs de nœuds (partant de la moelle jusqu'au bout du nœud) de chaque verticille présent dans le billon sont affichées ( $LgN\_V1(\alpha)$ ,  $LgN\_V2(\alpha)$ ,  $LgN\_V3(\alpha)$  et  $LgN\_V4(\alpha)$ ). Puis, la longueur de nœud maximale tous verticilles confondus ( $LgNMax(\alpha)$ ) est représentée (Longueur nœud\_tous verti). Le nouveau critère caractérisant le BNN est le Taux du Bois Net de Nœud (TBNN). Il se calcule selon la formule (Eq1).

$$TBNN = \frac{\int_0^{359} DistMinME(\alpha) - LgNMax(\alpha).d\alpha}{\int_0^{359} DistMinME(\alpha).d\alpha} \quad (Eq1)$$



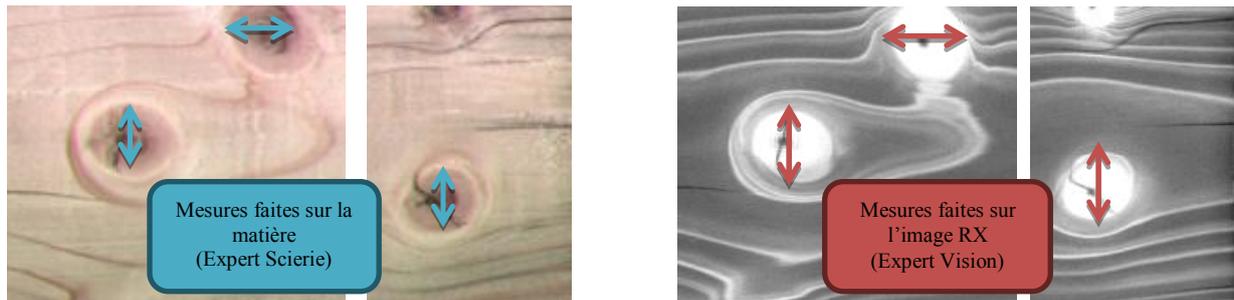
**Figure 3-17 : Graphique de calcul du critère de bois net de nœud**

Suite au développement, puis à la mise en place du nouveau critère, plusieurs campagnes d'analyse sont effectuées. Etant donné que le TBNN nécessite en entrée des données liées aux nœuds, les premières analyses visent à valider les mesures préalables que le critère utilise.

**Validation des mesures préalables utilisées par le critère TBNN**

Le TBNN est sensible aux performances de l'algorithme de détection des nœuds puis à celles des mesures de diamètre. L'intégrateur, comme dans [Longuetaud F., 2005], éprouve des difficultés pour la détection des nœuds dans l'aubier ainsi ses algorithmes sont encore en cours d'amélioration et donc non validé ici. Les analyses se focalisent sur les mesures faites sur le nœud.

Les premières constatations montrent que les valeurs de diamètre de nœud fournies par le système d'observation sont surestimées. Lors des échanges avec les experts, il apparaît que cette déviation provient d'une différence des méthodes de positionnement de la frontière « nœud/bois sain » entre les experts du système de vision sur des images RX et ceux de la scierie sur la matière réelle. En effet, comme le montre la Figure 3-18 sur des produits finis, l'expert de la scierie mesure un nœud en se basant sur sa couleur et la forme de ses cernes, alors qu'un expert vision n'a que la densité pour délimiter le nœud du bois sain.



**Figure 3-18 : Illustration de la différence d'expertise entre le domaine de la vision et celui de la scierie**

La densité du bois autour du nœud est très proche de celle du nœud ce qui rend la mesure du diamètre de nœud incertaine pour le système d'observation. Initialement, l'intégrateur avait défini la frontière « nœud/bois sain » au plus large de cette zone d'incertitude. Il modifie son algorithme pour définir la frontière au moins large afin que la mesure des nœuds soit cohérente avec celle faite par les experts de la scierie.

Pendant que l'intégrateur continue d'améliorer ses algorithmes, nous avons cherché à mettre en évidence la signification du critère TBNN, évalué par le système vis à vis du taux réel obtenu après sciage. Pour cela, les billons sont suivis de leur création sur le parc à grumes à leur débit en plateaux. L'influence de la méthode de détection des nœuds sur le TBNN est mise en avant par les résultats des campagnes d'essais présentés dans la Figure 3-19. Les premiers résultats datant du 22/07/2013 ne permettent pas de conclure que le critère TBNN est significatif ( $R^2$  de 0.08 avec un risque statistique supérieur à 10%). Une campagne de mesures récente datant du 26/09/2013, faite après que l'intégrateur ait modifié certains algorithmes, montrent en revanche que le TBNN est significatif puisque le coefficient de détermination  $R^2$  est égal à 0.34 avec un risque statistique inférieur à 2%. L'exploitation du

critère TBNN permet ainsi à la scierie de trier les billons d'Emploi OAOB avec de moins de perte.

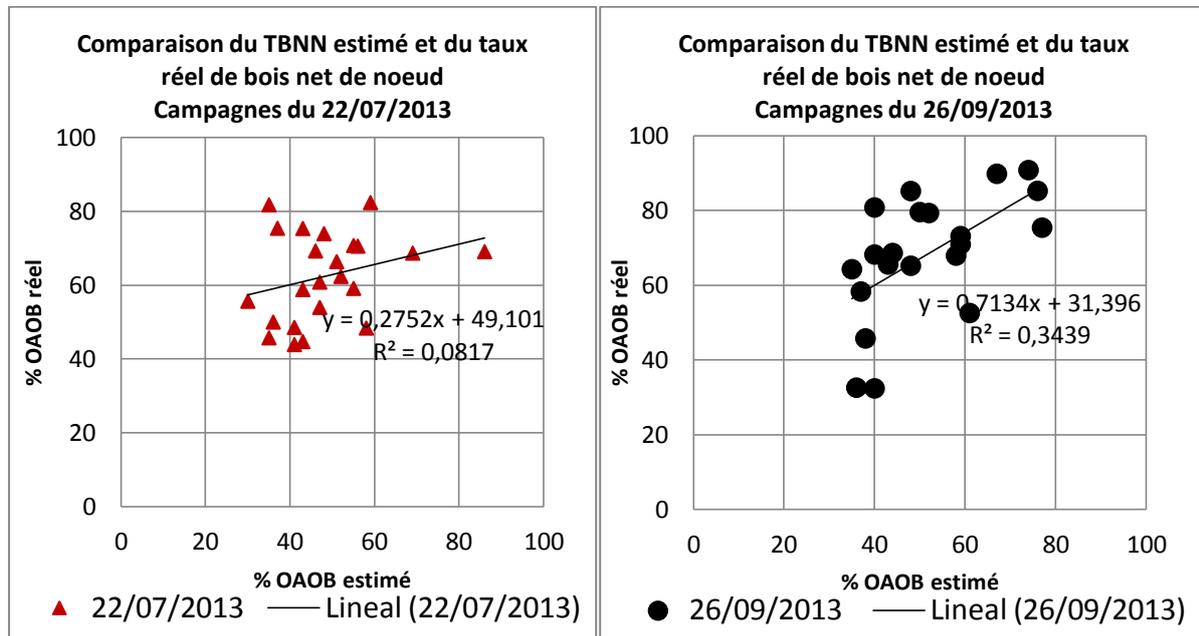


Figure 3-19 : Résultats du critère TBNN

Dans cette section, l'objectif a été de montrer en quoi la définition d'un critère et de sa méthode de mesure peut influencer le tri des billons. D'une part, le critère *a priori* caractérisant le BNN est le seul critère sur les dix-neuf mesurés dont la définition a été remise en question jusqu'à être redéfini totalement. De l'autre, les deux critères caractérisant le diamètre du nœud sain (diamètre maximal et diamètre moyen) ont vu leur méthode de calcul modifiée.

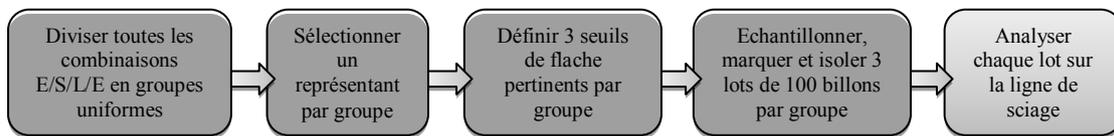
### 3.3.2 Validation des seuils par analyse de leur influence sur les Billons ou Sciages

L'objectif de cette section est de présenter les analyses faites sur les produits finis ou les billons qui permettent un ajustement du paramétrage afin de tendre vers un « optimal ». Les analyses faites sur le produit fini sont décrites avec les critères caractérisant le flache, celles faites sur le billon sont expliquées avec le critère caractérisant la densité moyenne de l'aubier frais.

**Analyse des produits finis : cas du flache**

Le flache se mesure sur le produit fini selon son épaisseur, sa largeur et sa longueur (voir Figure 3-7). L'évaluation du seuil de flache se déroule en deux phases. La première vise à analyser précisément les produits représentatifs de neuf groupes de classes E/S/L/E pertinents. L'objectif est de déterminer le comportement du système face aux modifications des seuils de flache mais aussi d'en comprendre les influences sur le produit fini. Cette phase est chronophage et s'applique donc à un nombre restreint de produits. La seconde phase propose, elle, des actions plus courtes en durée permettant d'analyser plus de produits finis (plusieurs classes E/S/L/E).

La première phase est réalisée selon le protocole schématisé dans la Figure 3-20. Ce protocole prévoit de tester trois lots de cent billons ayant des seuils de flache différents. Le temps d'échantillonnage d'un lot de cent billons varie de huit heures à quatre semaines en fonction de la classe E/S/L/E visée. Pour limiter les temps d'échantillonnage, la première étape de cette phase a pour objectif de diviser la totalité des classes E/S/L/E en plusieurs groupes puis de sélectionner une seule classe représentative par groupe.



**Figure 3-20 : Première phase d'analyse du seuil de flache**

Les groupes de classe E/S/L/E sont établis par les experts selon les caractéristiques suivantes :

- Le ratio épaisseur/largeur du schéma de sciage (est-ce un schéma plutôt carré ou plutôt rectangulaire ?), car cela a une influence sur la quantité de flache résultant d'une erreur de mise en position angulaire du billon sur la ligne Canter (voir section 3.2.3);
- Le diamètre du billon nécessaire à la réalisation du schéma, car il influence lui directement la mise en position angulaire du billon ;

- La multiplicité du schéma (le nombre de pièces issues d'un même billon), car seules les pièces extérieures peuvent avoir du flache ainsi, en proportion, il y a potentiellement plus de produits finis contenant du flache dans des schémas ayant une multiplicité faible ;
- Le type de produits finis obtenu, car ils ne répondent pas tous aux mêmes exigences clients (en termes de flache).

Ainsi, la totalité des classes E/S/L/E est divisée en onze groupes dont deux sont dédiés à l'emploi Emballage/Coffrage non analysé ici car les exigences clients en termes de flache sont peu discriminantes. Les neuf classes représentant les neuf groupes analysés sont celles qui sont les plus produites dans chacun des groupes car elles permettent de réduire les temps d'échantillonnage. Les experts se réunissent ensuite pour définir les seuils de flache pertinents à tester pour ces neuf classes.

Les trois échantillonnages de cent billons sont réalisés, marqués et isolés. Ensuite, les échantillons sont débités par la ligne de sciage et analysés durant la production au niveau de la chaîne de tri Qualité Sciages selon cinq informations :

- le Rendement Matière des Produits Principaux théorique (RMPPth) calculé par le rapport entre le volume billon entré et le volume de produit fini qui devrait en être issu ;
- le Rendement Matière des Produits Principaux réel (RMPPréel) calculé par le rapport entre le volume billon entré et le volume de produit fini réellement obtenu ;
- le pourcentage de déclassement des produits d'emploi Charpente Traditionnelle vers un emploi Coffrage/Emballage en nombre de produits pour des raisons telles que la présence de pourriture ou de nœud noir (sans aucun lien avec le flache) ;
- le pourcentage de purge totale en longueur cumulée de produits (Purge tot) pour des raisons telles que la présence de flache ou d'un défaut en bout de produit puis,
- les purges dues uniquement au flache (Purge flache) en pourcentage de la longueur cumulée de produits obtenue et, en pourcentage du nombre de produits.

Afin d'avoir des valeurs concrètes pour décrire l'analyse qui s'en suit, les résultats de l'analyse de la classe *Sapin-Epicéa/50\*150 2x/4 mètres/Charpente Traditionnelle* sont présentés dans la Table 3-9.

**Table 3-9 : Résultats d'analyse du flache obtenus dans la première phase**

Seuils de flache testés [ep-larg-lg]	RMPPth	RMPPreel	Coffrage [nbr]	Purge tot [long]	Purge flache [long]	Purge flache [nbr]
0-0-750	49,15%	47,60%	11,0%	2,78%	0,34%	2,70%
5-5-750	51,12%	50,13%	12,6%	1,75%	0,77%	6,19%
10-10-750	52,85%	50,69%	16,4%	4,08%	0,78%	4,95%

Analysant les résultats, nous constatons que le triplet de seuils (0-0-750) provoque un surdimensionnement des billons exprimé par le rendement matière théorique bas. En effet, sur un même schéma de sciage, plus le rendement matière théorique est bas, plus les billons sont de gros volume (gros diamètre) donc ils ont potentiellement moins de flache.

De plus, le rendement matière réel (caractérisant des purges) bas et le pourcentage de déclassement en emploi « Coffrage » élevé du triplet (0-0-750) montrent que les caractéristiques des billons d'entrées sont peu adaptées au schéma de sciage. La sélection se fait donc entre les triplets (5-5-750) et (10-10-750).

Pour ces deux triplets, le pourcentage de purges de flache en longueur est quasi-identique, mais le pourcentage de purges en nombre est très différent. Cela signifie qu'avec le triplet (10-10-750), moins de produits sont purgés, mais qu'ils sont purgés sur une plus grande longueur (le produit attendu est en 4 mètres, mais le produit réel est à 3 mètres). Ce triplet n'est pas judicieux car la moindre dérive peut avoir des conséquences financières importantes si elle n'est pas perçue à temps. Au vu de ces constatations, le triplet (5-5-750) est finalement choisi par défaut.

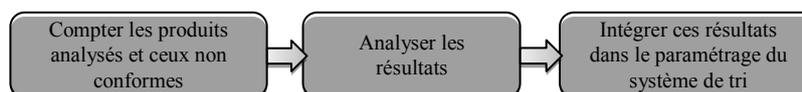
Suite à cette conclusion, les résultats sont extrapolés empiriquement à tout le groupe concerné en fonction de la taille des produits finis, du diamètre des billons nécessaire pour réaliser le schéma et des exigences clients sur les produits en particuliers. Cette extrapolation est donnée dans la Table 3-10.

**Table 3-10 : Extrapolation des résultats sur les seuils de flache au reste du groupe**

	Diamètre schéma [mm]	Schéma	Famille Emploi	Triplet flache [mm]
Groupe 3	229	32*160 5X	Charpente Tradi	5-5-750
	<b>243</b>	<b>32*175 5X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>5-5-750</b>
	452	75*300 4X + 38*300 1X	Charpente Tradi	10-10-750
	472	63*160 10X + 32*160 1X	Charpente Tradi	10-10-750

Ce type d'analyse étant chronophage, elle n'est faite que sur les cinq groupes les plus importants (sur les neuf initiaux) au regard du nombre de pièces produites.

La seconde phase permet une analyse de toutes les classes E/S/L/E en négligeant une partie des informations nécessaires à l'analyse complète et précise mais permet d'obtenir des résultats sur chaque combinaison en moins d'une dizaine de minutes. Elle s'organise en trois étapes schématisées dans la Figure 3-21. La première s'effectue sur la ligne de sciage. Elle vise à relever le nombre total de produits évalués et le nombre de produits purgés à cause du flache durant une campagne de production usuelle de la classe à analyser. De ces deux valeurs relevées, un taux de produits purgés peut être extrait puis soumis à l'avis des experts. Soit le taux est acceptable puis validé, soit il ne l'est pas et le seuil est modifié dans le paramétrage afin d'être de nouveau testé lors de la prochaine campagne.



**Figure 3-21 : Seconde phase d'analyse du seuil de flache**

Cette méthode de tests itératifs permet de converger plus rapidement vers les seuils de flache optimaux pour chaque classe E/S/L/E fabriquée. En comparaison à celui de la première phase, ce protocole ne permet pas d'expliquer entièrement les résultats obtenus sur le produit fini car il n'y a aucune information sur les billons en entrée du processus de transformation. Les résultats intermédiaires sur les neuf groupes sont présentés en Annexe 7 (phase d'amélioration encore en cours).

La validation des seuils par l'analyse de leurs effets sur le produit fini est la méthode la plus pertinente pour évaluer le paramétrage au regard des exigences clients. Cependant, cette

méthode nécessite un temps important pour tout tester et nécessite un aménagement de la production.

### **Analyse des billons : cas de la densité moyenne de l'aubier frais**

Le modèle de connaissances Qualité Billon a mis en évidence la densité moyenne de l'aubier frais (DMAF) comme indicateur pour l'identification des bois secs sur pied (bois scolytés). Ces bois secs doivent être triés dans le groupe d'Emploi « Emballage/Coffrage » par leur exclusion des autres classes. C'est un critère que l'entreprise n'utilisait pas auparavant, les seuils initiaux associés ont donc été fixés à partir d'études bibliographiques. Le cas de l'Épicéa est pris pour exemple. Le seuil *a priori* fixé par les experts est de 510 kg/m<sup>3</sup> quel que soit le schéma, la longueur ou l'emploi (sauf Emballage/Coffrage) de la classe.

Le protocole vise à analyser d'une part les données issues du scanner sur les billons que l'on sait scolytés, puis, de l'autre, celles sur les billons que l'on sait sains. Forts de leur expérience, les opérateurs de tronçonnage sont capables de repérer les bois secs à l'œil nu. Ainsi, le protocole prévoit l'enregistrement de la DMAF de tous les bois secs et sains afin de constituer deux lots de données. Le lot de bois secs est constitué de vingt échantillons et le seconde de cent échantillons.

L'analyse des mesures faites sur le lot des bois secs fait apparaître pour l'Épicéa une DMAF maximale légèrement inférieure à 550 kg/m<sup>3</sup>. Cette valeur est alors retenue pour le seuil. Néanmoins, l'analyse du lot des bois sains montrent que 3% des bois ont une DMAF inférieure à 550 kg/m<sup>3</sup> (faux-positifs). Les opérateurs doivent ainsi modifier la classe de qualité du bois rond pour le valoriser au mieux. Le temps de modification de la classe de 3% des bois est associé à une perte de productivité que les experts jugent acceptable. Ainsi, le seuil est ajusté à 550 kg/m<sup>3</sup> pour toutes les classes E/S/L/E de cette essence et d'emploi différent de l'Emballage/Coffrage.

En parallèle, l'analyse permet aussi de mettre en évidence que ces 3% des bois ronds sont à 96% des bois de diamètre supérieur à 500 millimètres (au gros bout). Ceci s'explique car les limites du système sont atteintes au-delà de cette valeur de diamètre. La conception

d'une source à rayons X industrielle plus puissante est un des verrous technologiques que l'intégrateur essaie actuellement de lever.

### 3.3.3 Validation du paramétrage par analyse de données

Dans l'étude *a priori*, la pertinence des critères a été établie à partir des connaissances modélisées au regard de l'emploi du produit fini qu'ils servent à définir. L'objectif de cette section est d'utiliser les premières données délivrées par le système d'observation pour appliquer des méthodes de « Data Mining ». Nous visons l'analyse de pertinence des critères pour éventuellement en réduire le nombre et ainsi, faciliter le paramétrage par l'amélioration de l'interprétabilité du système de valorisation.

#### **Constitution du lot de données**

Dans notre lot de données, chaque échantillon représente un billon dont le diamètre est compris entre 120 millimètres et 600 millimètres (diamètres des bois approvisionnés sur le parc à grumes). Un échantillon est donc constitué des dix-neuf critères mesurés par le système d'observation mais dont la classe de qualité est attribuée par l'opérateur (classe Opérateur). Comme les caractéristiques d'un billon sont dépendantes de la taille du billon, il est nécessaire de diviser les lots de données en groupe de billons dont le diamètre est similaire pour être en mesure d'analyser des données quantitatives comparables. Nous constituons ainsi six groupes de données représentant respectivement des billons ayant un diamètre entre 140 et 159 millimètres, entre 160 et 179, entre 180 et 199, entre 200 et 219, entre 220 et 239 et, entre 240 et 259. Les autres groupes de diamètres ne sont pas analysés car leur nombre d'échantillons n'est pas suffisant (inférieur à 3000 échantillons).

#### **Sélection des méthodes de réduction des critères**

On distingue principalement deux types de méthodes permettant de réduire le nombre de critères d'un système : les méthodes d'extraction et les méthodes de sélection [Masnan M.J., 2012]. Les méthodes d'extraction, comme l'Analyse en Composante Principale (ACP), transforment les critères initiaux en les combinant afin de les rendre plus pertinents et donc, conduit à une réduction du nombre de critères finaux. Les méthodes de sélection ne font

qu'exclure les critères les moins pertinents, ou à l'inverse, sélectionner les plus pertinents. Nous utilisons ici des méthodes de sélection car notre objectif n'est pas de remettre en cause la définition des critères.

Une méthode de sélection nécessite une stratégie de recherche des critères pertinents et une fonction Objectif pour évaluer ces critères. Dans notre cas d'étude, la fonction Objectif est le taux de bon classement dans une classe Opérateur, au regard des dix-neuf critères que le système d'observation mesure. Les stratégies de recherche sont diverses, [Ververidis D., 2008] les partitionne en trois catégories : les exhaustives, qui évaluent toutes les possibilités et donc, évaluent un nombre de sous-ensembles qui croissent exponentiellement avec la dimension de l'espace de recherche ; les séquentielles, qui ajoutent ou retirent des critères successivement mais qui ont tendance à être piégées dans des minima locaux puis ; les aléatoires, qui ajoutent de l'aléa dans leurs procédures pour échapper aux minima locaux.

Nous nous focalisons sur les algorithmes séquentiels car notre espace de recherche est composé de dix-neuf critères et n'est donc pas adapté, ni aux stratégies exhaustives (explosion combinatoire), ni aux stratégies aléatoires (performances détériorées) [Ververidis D., 2008]. Nous ne décrivons ici que les algorithmes séquentiels les plus courants selon [Pudil P., 1994]. Ils sont représentés dans la Figure 3-22. L'algorithme **SFS** (Sequential Forward Selection) démarre avec une liste de critères sélectionnés vide. Ensuite, il ajoute un à un, tout en gardant les précédents, le critère permettant le meilleur résultat pour la fonction Objectif.

L'algorithme **SBS** (Sequential Backward Selection) travaille à l'opposé de SFS. Il démarre avec une liste contenant tous les critères, puis il retire un à un, tout en excluant les précédents, le critère permettant la plus petite variation de la fonction Objectif.

**SFFS** (Sequential Floating Forward Selection) est une amélioration de SFS afin d'éviter de piéger l'algorithme dans des minima locaux. Après chaque ajout de critère, il retire de la liste (celle des critères déjà sélectionnés) les critères qui pénalisent la fonction Objectif. **SFBS** (Sequential Floating Backward Selection) est une amélioration de SBS et est duale à SFFS.

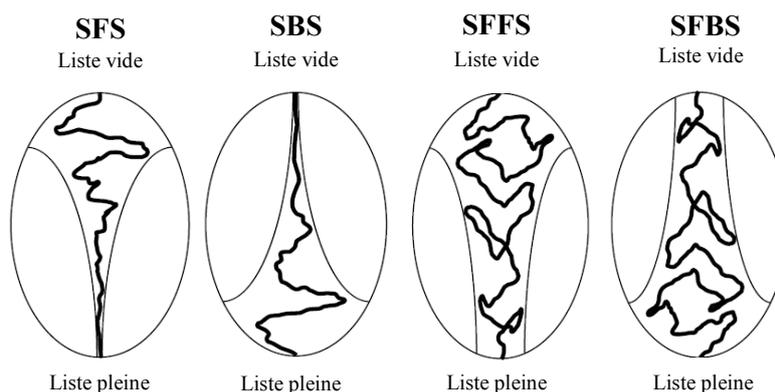


Figure 3-22 : Description graphique des algorithmes de sélection des critères

**Application des méthodes de réduction**

Nous proposons d’appliquer les méthodes SFFS et SFBS sur les six lots d’échantillons présentés auparavant. Les résultats obtenus avec les deux méthodes de sélection sont présentés dans la Table 3-11. L’ordre final de pertinence des critères est obtenu après plusieurs essais portant sur différents lots de données hebdomadaires. Chaque essai donnant un ordre de pertinence des critères, nous avons attribué une note croissante de 1 à 19 du plus pertinent au moins pertinent. Lors de la synthèse des essais, les critères sont ordonnés de façon croissante selon les sommes des notes attribuées à chaque critère lors des différents essais.

Table 3-11 : Résultats des méthodes de sélection des critères SFFS et SFBS

<b>SFFS</b>											
Diamètre 140/159		Diamètre 160/179		Diamètre 180/199		Diamètre 200/219		Diamètre 220/239		Diamètre 240/259	
N°	Nom	N°	Nom	N°	Nom	N°	Nom	N°	Nom	N°	Nom
1	Ømax NN	3	Nbr NN	1	Ømax NN	1	Ømax NN	1	Ømax NN	1	Ømax NN
2	Ømoy NN	11	AubFrais	2	Ømoy NN	2	Ømoy NN	2	Ømoy NN	2	Ømoy NN
4	Ang NN	1	Ømax NN	3	Nbr NN	3	Nbr NN	3	Nbr NN	3	Nbr NN
5	Ømax NS	6	Ø CylINS			4	Ang NN	6	Ø CylINS	4	Ang NN
6	Ø CylINS	2	Ømoy NN					4	Ang NN	6	Ø CylINS
								5	Ømax NS	8	Nbr NS

<b>SFBS</b>											
Diamètre 140/159		Diamètre 160/179		Diamètre 180/199		Diamètre 200/219		Diamètre 220/239		Diamètre 240/259	
N°	Nom										
19	CourBill										
16	Ova	18	Decr								
15	Exc	15	Exc	16	Ova	16	Ova	16	Ova	16	Ova
18	Decr	16	Ova	15	Exc	14	AubFrais	15	Exc	15	Exc
13	Fent	13	Fent	13	Fent	15	Exc	10	Fent	14	AubFrais
		14	AubFrais	11	AubFrais					13	Fent

La méthode SFFS sélectionne toujours trois critères (le 1, le 2 et le 3) quel que soit le diamètre des billons considéré. La méthode SFBS sélectionne, quant à elle, toujours quatre critères (le 15, le 16, le 18 et le 19). Ces deux résultats sont très différents alors qu'ils devraient être similaires selon [Pudil P., 1994]. Sachant que les méthodes SFFS et SFBS commencent toujours leurs itérations par le premier critère de la liste, on constate que les critères sélectionnés par SFFS sont les premiers de liste donc les premiers ajoutés, à l'inverse, les critères sélectionnés par SFBS sont les derniers donc les derniers retirés de la liste. Sachant de plus que l'ordre des critères est aléatoire dans cette liste, on peut en conclure que les variations de la fonction Objectif (dont les taux ne dépassent pas 25%) ne sont pas assez significatives lors des étapes successives des algorithmes et que cela affecte les résultats des méthodes SFFS et SFBS. Notons que le cas du critère N°17 qui est exclu des résultats s'explique car il est spécifiquement développé pour les classes E/S/L/E du groupe d'Emploi OAOB non analysées dans ce test (qualité Opérateur sans lien avec le groupe OAOB, voir Table 3-2). On s'attendait à ce que ce critère ne soit pas pertinent face aux classes Opérateur.

Ainsi, la réduction des critères par les méthodes SFFS et SFBS ne met en avant aucun critère plus pertinent qu'un autre. On peut également conclure au regard des taux de classification obtenus que les dix-neuf critères mesurés ne suffisent pas pour la classification des billons selon la Qualité Billon Opérateur.

Trois raisons permettent d'expliquer ces résultats. La première concerne les méthodes de sélection qui ne sont pas forcément adaptées au contexte applicatif. En effet, le nombre restreint d'échantillons, leur nombre inégal par classes, l'imprécision de certains critères, nécessiterait l'utilisation d'autres méthodes de sélection comme celle basée sur l'intégrale de Choquet [Schmitt E., 2007b]. La deuxième raison concerne le lot de données qui met en relation les données fournies par le système de vision et les classes Opérateur attribuées par

les opérateurs de tronçonnage sur des constatations visuelles. Ces classes sont en plus non disjointes et l'évaluation est rendue subjective par le facteur Humain (fatigue, lassitude, répétition de la tâche, etc.), les lots de données sont peut-être biaisés. La troisième piste concerne les performances du tomographe qui sont en cours de validation. En effet, les mesures faites par le tomographe n'ont été validées que pour les caractéristiques externes du billon (visibles sur l'enveloppe) et doivent encore être validées pour les caractéristiques internes de la matière, les mesures peuvent être partiellement erronées.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

---



## **Conclusion et perspectives**

Les principales contributions des travaux se décomposent en quatre points. Le premier est un état de l'art sur les systèmes d'observation dédiés au bois. Le second concerne la détermination des ontologies Qualité Billon et Qualité Sciage par la modélisation de connaissance Métiers, puis leur mise en relation. Le troisième est la détermination des critères pertinents pour le classement des billons. Le dernier est l'obtention d'un paramétrage initial pour la mise en service du système de tri Qualité.

L'état de l'art sur les systèmes d'observation dédiés au bois (bois ronds ou produits finis) permet de les positionner les uns par rapport aux autres, qu'ils soient à l'état de prototype de laboratoire ou déjà implémentés en industrie. Les verrous scientifiques de ces systèmes sont abordés. On constate que les systèmes de vision ne sont plus limités par la résolution des images qu'ils fournissent, mais plutôt par les algorithmes permettant de les traiter. Les temps de calcul nécessaires à la détection, l'identification et la mesure des caractéristiques du bois sont les principales difficultés. Nous avons proposé une synthèse sous forme de tableau aidant à la présélection rapide d'un système au regard des caractéristiques que l'on souhaite analyser et de ses performances.

La capitalisation et la structuration des connaissances Métiers par la méthode NIAM-ORM a conduit à la définition de deux ontologies : la Qualité Sciage et la Qualité Billon. L'analyse et la mise en relation des deux modèles ontologiques ont permis de mettre en avant un modèle fonctionnel idéal du système de tri Qualité Billon. L'agrégation des connaissances de l'intégrateur du système de vision et de celles des experts de la matière Bois a ensuite permis d'élaborer un modèle fonctionnel enrichi (MFE) intégrant les contraintes techniques du système. L'extraction des liens entre la Qualité Billon et la Qualité Sciage en a fait

ressortir cinquante. Le système fonctionnel contient finalement quatre liens directs, quarante liens indirects et seulement six liens manquants entre les deux qualités.

L'analyse du MFE a permis de déterminer trente-quatre critères permettant de caractériser la Qualité Billon définie sur le parc à grumes. Ces critères sont utilisés pour spécifier les classes de qualité des billons en fonction de leur essence, du schéma de sciage, de leur longueur et de l'emploi du produit fini qu'ils permettront de réaliser. Une méthode basée sur les connaissances est élaborée permettant de réduire le nombre de critères de 55% en moyenne.

Des seuils de décision ont alors été appliqués sur les critères afin de déterminer les classes de qualité Billon pour la mise en service du système. Ces valeurs définissent le paramétrage initial et sont déterminées à l'aide de simulations de sciage, de recherches dans la littérature technique ou scientifique, ou encore, grâce à la mobilisation d'experts du domaine de la production.

Ces travaux ouvrent des perspectives à plusieurs niveaux. Tout d'abord, le système réel ne mesurant pas encore tous les critères de qualité, il sera nécessaire de poursuivre nos travaux de validation. Ils concernent la précision des mesures fournies par le tomographe, mais aussi la pertinence des critères et des seuils associés.

Ensuite, des perspectives concernant l'extension de la modélisation de connaissance à celles de l'intégrateur du système d'observation sont envisagées. Comme le montre [Mazaud C., 2006], la modélisation complète du système, du besoin client à sa réalisation technique, permet d'améliorer les performances globales du système et d'établir un lien entre la définition d'un critère métier du bois et la façon de le mesurer avec système d'observation.

Des perspectives portant sur l'analyse des critères de qualité et sur la méthode de classification sont aussi envisagées. En effet, les premières constatations sur le système de tri montrent que les temps de traitement des données sont proches des contraintes de temps du procédé. La réduction du nombre de critères peut diminuer ces temps de traitement. Nous envisageons donc de poursuivre nos travaux sur la sélection de paramètres pertinents en utilisant des méthodes plus adaptées au contexte comme la méthode FRIFS proposée par [Schmitt E., 2008]. Elle est basée sur l'intégrale de Choquet et s'applique parfaitement à des lots d'échantillons de petites tailles, non balancés, et prend en compte l'imprécision. En effet,

les données issues des capteurs présentent une relative imprécision de part les techniques utilisées et le caractère imprécis des critères qui sont mesurés (Figure 3-19). En outre, la définition des classes de qualité s'avère subjective voire incertaine, ces classes n'étant pas disjointes. Pour pallier ces inconvénients, il semble prometteur de s'orienter vers des méthodes de classification telles que les classificateurs à base de règles floues [Hühn J., 2009 ; Bombardier V., 2010 ; Alcalá-Fdez J., 2011], les Réseaux de Neurones Flous [Alavandar S., 2009] ou les Arbres de Décision Flous [Sugumara V., 2007 ; Feng Q., 2010].

Les premières analyses ont également montré qu'il existe une hiérarchisation potentielle des critères non exploitée par le système. Ainsi, l'utilisation de classificateurs hiérarchiques tels que les Arbres de Décision [Quinlan J.R., 1999] ou les Systèmes à base de Règles permettraient cette exploitation. De plus, l'interprétabilité du système de décision Qualité pourrait être améliorée par la réduction des critères, leur hiérarchisation et l'utilisation de méthodes basée sur des règles.

Des perspectives à plus long terme concernent l'utilisation du système d'observation à d'autres fins que le tri Qualité Billon. En effet, des travaux tels que [Rinnhofer A., 2003] ou [Jover J., 2013] sur le sciage virtuel montre que le tomographe à rayons X pourrait être utilisé pour définir une Qualité Sciage au niveau du parc à grume (sur un bois rond), et permettrait de réduire encore le taux de déclassement des produits finis. Nous pensons aussi à la traçabilité du bois le long de la filière avec les travaux de [Charpentier P., 2003] et [Chiorescu S., 2004]. Ces travaux montrent qu'il est possible d'identifier un billon par les caractéristiques internes qui le composent, et qui ne peuvent donc pas être perdues (comme pourrait l'être une puce RFID). Les scanners à rayons X se positionnent donc comme un outil adéquat pour détecter, identifier et mesurer ces caractéristiques internes.



## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---



## Références Bibliographiques

### A

---

Alavandar S., Nigam M.J., New hybrid adaptive neuro-fuzzy algorithms for manipulator control with uncertainties - Comparative study, *ISA Transactions*, Vol. 48, pp. 497-502, 2009

Alcalá-Fdez J., Alcalá R., Herrera F., A fuzzy association rule-based classification model for high-dimensional problems with genetic rule selection and lateral tuning, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 19, October, 2011

Almecija B., Bombardier V., Charpentier P., Modeling Quality knowledge to design log sorting system by X rays tomography, *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, pp. 1190-1195, 23-25 May, Bucarest, Roumanie, 2012

Almecija B., Bombardier V., Charpentier P., Economical interest of a X-rays vision system in a planing mill production chain, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 416, 2013

Anand G., Ward P., Takikonda M., Role of explicit and tacit knowledge in Six Sigma projects: An empirical examination of differential project success, *Journal of Operations Management*, Vol. 28, pp. 303-315, 2010

Andrade J., Ares J., García R., Pazos J., Rodríguez S., Silva A., Definition of a problem-sensitive conceptual modelling language: foundations and application to software engineering, *Information and Software Technology*, Vol. 48, pp. 517-531, 2006

Andreu J.P., Rinnhofer A., Modeling knot geometry in Norway Spruce from industrial CT images, *SCIA 2003, LNCS 2749*, pp. 786-791, 2003

Angele J., Fensel D., Landes D., Neubert S., Studer R., Model-Based and Incremental Knowledge Engineering: The MIKE Approach, *AIFIPP '92 Extended Papers*

from the IFIP TC12 Workshop on Artificial Intelligence from the Information, pp. 139-168, 1992

Arnerup F., Infrared imaging of Scots Pine cross sections: automatic heartwood size measurements, *Master of Science Thesis*, 7th May, 2002

Aristotle, *Nicomachean Ethics*, second edition, translated by Terence Irwin, Hackett Publishing Co., Indianapolis, IN, USA, 1999

Attiogbe C., Habrias H., Vailly A., Exercices de style, *Rapport n°139 de l'Institut de Recherche en Informatique de Nantes*, 1996

## B

---

Baradit E., Aedo R., Correa J., Knots detection in wood using microwaves, *Wood Science Technology*, Vol. 40, pp. 118-123, 2006

Barthelmé F., Ermine J-L., Rosenthal-Sabroux C., An architecture for knowledge evolution in organizations, *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, pp. 414-427, 1998

Baumard P., Starbuck W., La connaissance dans les organisations, *Encyclopédie des Ressources Humaines*, Paris: Economica, 2002

Baumard P., Les stratégies d'innovation des grandes firmes face à la coopération, *Revue française de gestion*, No. 7, pp. 135-145, 2007

Baumgarten A.G., *Aesthetica, Photostat*, Olms, Hildesheim 1986, 1950

Benmahamed D., Ermine J-L., Tchounikine P., From MASK knowledge management Methodology to learning activities described with IMS-LD, *WM 2005, LNAI 3782*, pp. 165-175, 2005

Bennett R., Anthony W., Understanding the role of intuition-tacit knowledge and analysis-explicit knowledge in bank deliberations, *Organizational Cognition: Computation and interpretation*, T.H. Lant & Z. Shapira (Eds.), London: Lawrence Erlbaum Publishers, pp. 185-209, 2001

Bhandarkar S.M., Faust T.D., Tang M., CATALOG : a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography, *Machine Vision and Applications*, Vol. 11, pp. 171-190, 1999

Bhandarkar S.M., Luo X., Daniels R., Tollner E.W., Detection of cracks in computer tomography images of logs, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 26, pp. 2282-2294, 2005

Bhandarkar S.M., Luo X., Daniels R., Tollner E.W., Automated planning and optimization of lumber production using machine vision and computed tomography, *Transactions of automation Science and Engineering*, Vol. 5, pp. 677-695, 2008

Blaise J.C., Lhoste P., Ciccotelli J., Formalization of normative knowledge for safe design by using NIAM/ORM, *Safety Science*, Vol. 41, pp. 241-261, 2003

Bombardier V., Mazaud C., Lhoste P., Vogrig R., Contribution of fuzzy reasoning method to knowledge integration in a defect recognition system, *Computers in Industry*, Vol. 58, pp. 355-366, 2007

Bombardier V., Schmitt E., Charpentier P., A fuzzy sensor for color matching vision system, *Measurement*, Vol. 42, pp. 189-201, 2009

Bombardier V., Schmitt E., Fuzzy rule classifier: capability for generalization in wood color recognition, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 23, pp. 978-988, 2010

Boukadida H., Longuetaud F., Colin F., Freyburger C., Constant T., Leban J.M., Mothe F., PithExtract : A robust algorithm for pith detection in computer tomography images of wood – Application to 125 logs from 17 tree species, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 85, pp. 90-98, 2012

Brännström M., Oja J., Grönlund A., Predicting board strength by X-ray scanning of logs: The impact of different measurement concepts, *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 22, pp. 60-70, 2007

Brewster C., O'Hara K., Knowledge representation with ontologies: Present challenges—Future possibilities, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 65, pp. 563-568, 2007

Buehlmann U., Thomas R.E., Impact of human error on lumber yield in rough mills, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 197-203, 2002

Buehlmann U., Lihra T., Rancourt V., Ait-Kadi D., « Detection capabilities of automated hardwood lumber defect-detection systems », *Forest Products Journal*, Vol. 57, pp. 51-57, 2007

## C

---

Cairó O., Guardati S., The KAMET II methodology: Knowledge acquisition, knowledge modeling and knowledge generation, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, pp. 8108-8114, 2012

Carlson W., Dean C.A., Grob J.A., Herold G.E., Wallich E., Method for selecting conifer trees, *United States Patent Application Publication*, January 25<sup>th</sup>, 2007

Casieri C., Senni L., Romagnoli M., Santamaria U., De Luca F., Determination of moisture fraction in wood by mobile NMR device, *Journal of Magnetic Resonance*, Vol. 171, pp. 364-372, 2004

Cavalin P., Oliveira L.S., Koerich, A.L., Britto Jr A.S., Wood defect detection using Grayscale images and an optimized feature set, *IECON 2006, 32<sup>nd</sup> Annual Conference on Industrial Electronics*, pp. 3408-3412, 2006

Charpentier P., Choffel D., The feasibility of intrinsic signature identification for the traceability of pieces of wood, *Forest Products Journal*, Vol. 53, pp. 40-46, 2003

Charpentier P., Chubinsky A., Bombardier V., Longuetaud F., Mothe F., Tambi A., Bakhshieva M., Study on wood species identification by using computed tomography, *Journal of the Forestry academy - Saint-Petersburg*, Vol. 202, pp. 158-167, 2013

Chang S.J., Olson J.R., Wang P.C., NMR imaging of internal features in wood, *Forest Products Journal*, Vol. 39, pp. 43-49, 1989

Chen P., The entity-relationship model—toward a unified view of data, *Transactions on Database Systems*, Vol. 1, pp. 9-36, 1976

Chiorescu S., Grönlund A., The fingerprint method : Using over-bark and under-bark log measurement data generated by three-dimensional log scanners in combination with radiofrequency identification tags to achieve traceability in the log yard at the sawmill, *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol. 19, pp. 374-383, 2004

---

Choi F.C., Li J., Samali B., Crews K., Application of modal-based damage-detection method to locate and evaluate damage in timber beams, *Japan Wood Research Society*, Vol. 53, pp. 394-400, 2007

Cimiano P., Hotho A., Stumme G., Tane J., Conceptual knowledge processing with formal concept analysis and ontologies, *Concept Lattices*, pp. 189-207, 2004

Classen A., Boucher Q., Heymans P., A text-based approach to feature modelling: Syntax and semantics of TVL, *Science of Computer Programming*, Vol.76, pp. 1130-1143, 2011

Clouard R., Renouf A., Revenu M., An ontology-based model for representing image processing application objectives, *Int Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 1181-1208, 2010

Compression Wood, QLK5-CT-2001-00177, Quality of Life and Management of Living Resources, Compression wood in Conifers – the Characterization of its Formation and its Relevant to Timber Quality, 1<sup>st</sup> June 2003- 31<sup>st</sup> May 2004, *Final Report*, pp. 331-337, April 2005

Corbridge C., Rugg G., Major N. P., Shadbolt N. R., Burton A. M., Laddering: technique and tool use in knowledge acquisition, *Knowledge Acquisition*, Vol. 6, pp. 315-341, 1994

Crossan M., Improvisation in action, *Organization Science*, Vol. 9, pp. 593-599, 1998

Curran R., Verhagen W., Tooren (van) M., Laan (van der) T., A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering: KNOMAD, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 7336-7350, 2010

## D

---

Davenport T.H., De Long D.W., Beers M.C., Successful Knowledge Management Projects, *Sloan management review*, Vol. 39, pp. 43-57, 1998

Décret n°2010-273, relatif à l'utilisation du bois dans certaines constructions, Texte 2 sur 118, *Journal Officiel de la république française*, 17 Mars 2010

Dibie-Barthélemy J., Haemmerlé O., Salvat E., A semantic validation of conceptual graphs, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 19, pp. 498-510, 2006

---

Dignum F., Kemme T., Kreuzen W., Weigand H., van de Riet R.P., Constraint modelling using a conceptual prototyping language, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 2, pp. 213-254, 1987

Domingue J., Motta E., Watt S., The emerging VITAL workbench, *Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*, Vol. 723, pp. 320-339, 1993

Duribeux-Cocquebert M., Houriez B., Application industrielle d'une approche mixte de modélisation des connaissances, *Ingénierie des Connaissances : évolutions récentes et nouveaux défis*, Editions Eyrolles, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, 632 p., Paris, 2000

Drake P.R., Packianather M.S., A decision tree of neural networks for classifying images of wood veneer, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, pp. 280-285, 1998

Dubois D., Prade H., On the use of aggregation operations in information fusion processes, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 142, pp. 143-161, 2004

Dyk (van) H., Lemaster R.L., An investigation of the use of active infrared thermography to detect localized surface anomalies in lumber, *Scanning*, Vol. 32, pp. 219-223, 2010

## E

---

Edlund J., Lindström H., Nilsson F., Reale M., Modulus of elasticity of Norway spruce saw logs vs. Structural lumber grade, *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol. 64, pp. 273-279, 2006

Entacher K., Planitzer D., Uhl A., Towards an automated generation of tree ring profiles from CT-images, *ISP 2007: Proceedings of the 5th international symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Art. 4383685, pp. 174-179, 2007a

Entacher K., Lenz C., Seidel M., Uhl A., Weiglmaier R., Applicability of motion estimation algorithms for an automatic detection of spiral grain in CT cross-section images of logs, *Lecture Note in Computer Science*, LNCS 4673, pp. 36-44, 2007b

Entacher K., Hegenbart S., Kerschbaumer J., Lenz C., Planitzer D., Seidel M., Uhl A., Weiglmaier R., Pith detection on CT-cross-section images of logs : an experimental comparison, *ISCCSP 2008*, Malta, 12-14 March, 2008

---

Erden Z., von Krogh G., Nonaka I., The quality of group tacit knowledge, *Journal of Strategic Information Systems*, Vol. 17, pp. 4-18, 2008

## F

---

Fayard P., Le concept de " Ba" dans la voie japonaise de la création du savoir, *Ambassade de France à Tokyo, Service pour la Science et la Technologie*, 2002

Feng Q., Miao D., Cheng Y., Hierarchical decision rules mining, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 2081–2091, 2010

Flood K., Danielsson P-E., Magnusson-Seger M., On 3D scanning, reconstruction, enhancement, and segmentation of logs, *SCIA 2003*, LNCS 2749, pp. 733-740, 2003

Fox J., Johns N., Rahmzadeh A., Thomson R., PROforma: A method and language for specifying clinical guidelines and protocols, "*Internet resource*", 1996

Frederiks P. J., Van der Weide T. P., Information modeling: the process and the required competencies of its participants, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 58, pp. 4-20, 2006

Freiberg M., Striffler A. Puppe F., Extensible Prototyping for pragmatic engineering of knowledge-based systems, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, pp. 10177-10190, 2012

Freyburger C., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J.M., Measuring wood density by means of X-rays computer tomography, *Annals of Forest Science*, Vol. 66, pp. 804-812, 2009

Funck J.W., Zhong Y., Butler D.A., Brunner C.C., Forrer J.B., Image segmentation algorithms applied to wood defect detection, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 157-179, 2003

## G

---

Gemino A., Wand Y., Complexity and clarity in conceptual modeling: comparison of mandatory and optional properties, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 55, pp. 301-326, 2005

---

Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing, *2nd Edition*, Prentice Hall, 2002

Giudiceandrea F., Stress grading lumber by a combination of vibration stress waves and X-ray scanning, *Proceeding of Scan Tech*, International Conference, Las Vegas, USA, 2005

Giudiceandrea F., Ursella E., Vicario E., A high speed CT scanner for the sawmill industry, *Proceedings of the 17th international symposium on nondestructive testing of wood*, Vol. 1, pp. 105-112, 2011

Grenelle : Loi Grenelle 1 article 34 alinéa 2 – circulaire du Premier ministre du 3 décembre 2008, *Mémento à l'usage des maires, ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement*, novembre 2010

Gruber T., Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing, *Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation*, Guarino N., Poli R. (Eds), Deventer, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993

Grundstein M., De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue, *1er colloque du groupe de travail GCC-GI*, 2002

Grundstein M., Rosenthal-Sabroux C., Pachulski A., Reinforcing decision aid by capitalizing on company's knowledge: Future prospects, *European Journal of Operational Research*, Vol. 145, pp. 256-272, 2003

## H

---

Hagman O., Multivariate prediction of wood surface features using an imaging spectrograph, *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol. 55, pp. 377-382, 1997

Halabe U.D., Gopalakrishnan B., Jadeja J., Advanced lumber manufacturing model for increasing yield in sawmills using GPR-based defect detection system, *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 649-661, 2011

Halpin T.A., Bloesch A., Data modeling in UML and ORM: A comparison, *Journal of Database Management*, Vol. 10, pp. 4-13, 1999

Halpin T.A., Object Role Modeling (ORM/NIAM), *Handbook on Architectures of Information Systems*, 2006

---

Hansson L., Lundgren N., Antti A.L., Hagman O., Microwaves penetration in wood using imaging sensor, *Measurement*, Vol. 38, pp. 15-20, 2005

Hartmann S., Link S., Trinh T., Constraint acquisition for Entity-Relationship models, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 68, pp. 1128-1155, 2009

Hayek F. A., The Use of Knowledge in Society, *The American Economic Review*, Vol. 35, pp. 519-530, 1945

Hey J., The data, information, knowledge, wisdom chain: the metaphorical link, *Intergovernmental Oceanographic Commission*, 2004

Hodges D.G., Anderson W.C., McMillin C.W., The economic potential of CT scanners for hardwood sawmills, *Forest Products Journal*, Vol. 40, pp. 65-69, 1990

Hofstede (ter) A.H.M., Proper H.A., How to formalize it? Formalization principles for information system development methods, *Information and Software Technology*, Vol. 40, pp. 519-540, 1998

Hu C., Afzal M.T., A wavelet analysis-based approach for damage localization in wood beams, *Journal of Wood Sciences*, Vol. 52, pp. 456-460, 2006

Hudelot C., Atif J., Bloch I., Fuzzy spatial relation ontology for image interpretation, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 159, pp. 1929-1951, 2008

Hühn J., Hüllermeier E., FURIA: an algorithm for unordered fuzzy rule induction, *Data Mining Knowledge Discovery*, Vol. 19, pp. 293–319, 2009

## I

---

INF, Inventaire Forestier National, réalisé par l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière, <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?rubrique71>, 2013

## J

---

Jabo S., Machine vision for wood defect detection and classification, *Master of Sciences Thesis*, Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology, Sweden, 2011

---

James A.E., Shipley S.D.E., The development of OCPL: Object Conceptual Prototyping Language, *Information and Software Technology*, Vol. 42, pp. 1045-1056, 2000

Jappinen A., Nylinder M., Automatic sorting of spruce saw logs by grade, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 55, pp. 301-305, 1997

Johansson J., Hagman O., Oja J., Predicting moisture content and density of Scots pine by microwave scanning of sawn timber, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 85-90, 2003

Jordan R., Feeney F., Nesbitt N., Evertsen J.A., Classification of wood species by neural network analysis of ultrasonic signals, *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 219-222, 1998

Jover J., Thomas A., Bombardier V., Marquage du bois dans la masse : Intérêts et perspectives, 9<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, Saint Sauveur, Canada, Octobre, 2011

Jover J., Almecija B., Bombardier B., Charpentier P., Thomas A., Product quality classification using X-ray tomography, *International conference IUFRO-Measurement methods and Modeling approaches for predicting desirable futures Wood properties (MeMoWood)*, Nancy, France, 01-04 Octobre, 2013

## K

---

Kabir M.F., Daud W.M., Khalid K., Sidek H.A., Dielectric and ultrasonic properties of rubber wood. Effect of moisture content, grain direction and frequency, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 56, pp. 223-227, 1998

Kabir M.F., Schmoldt D.L., Schafer M.E., Ultrasonic detection of knots, cross grain and bark pockets in wooden pallet parts, *Proceeding World Conference on Timber Engineering*, Whistler Resort, British Columbia, Canada, pp. 7.5.2-1-7.5.2-8, 2000

Katsevich A., An improved exact filtered backprojection algorithm for spiral computed tomography, *Advances in Applied Mathematics*, Vol. 32, pp. 681-697, 2004

Kim J., Gil Y., Incorporating tutoring principles into interactive knowledge acquisition, *International journal of human-computer studies*, Vol. 65, pp. 852-872, 2007

---

Kline D.E., Surak C., Araman P.A., Automated hardwood lumber grading utilizing a multiple sensor machine vision technology, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 139-155, 2003

Koskinen K.U., Pihlanto P., Vanharanta H., Tacit knowledge acquisition and sharing in a project work context, *International Journal of Project Management*, Vol. 21, pp. 281–290, 2003

Krause C., Plourde P-Y., Stem deformation in young plantations of black spruce and jack pine in the boreal forest of Quebec, Canada, *Forest Ecology and Management*, Vol. 255, pp. 2213-2224, 2008

Krogh G. (von), Nonaka I., Ichijo K., Develop knowledge activists!, *European Management Journal*, Vol. 15, pp. 475-483, 1997

Krogh G. (von), Nonaka I., Aben M., Making the most of your company's knowledge: A strategic framework, *Long Range Planning*, Vol. 34, pp. 421-439, 2001

## L

---

La-Ongsri S., Roddick J.F., Vries (de) D., Accommodating mesodata into conceptual modelling methodologies, *Information and Software Technology*, Vol. 50, pp. 424–435, 2008

Lee S.M., Abbott A.L., Schmoldt D.L., Surface shape analysis of rough lumber for wane detection, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 121-137, 2003

Le Moigne J.L., Modelisation of Complex Systems, *AF CET Systèmes, Ed. Dunod*, Paris, France, 1990

Liao S., Knowledge management technologies and applications- literature review from 1995 to 2002, *Expert Systems with Applications*, Vol. 25, pp. 155-164, 2003

Liao Z., Mao X., Hannam P., Zhao T., Adaptation methodology of CBR for environmental emergency preparedness system based on an Improved Genetic Algorithm, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, pp. 7029-7040, 2012

Lin C-J., Kao Y-C., Lin T-T., Tsai M-J., Wang S-Y., Lin L-D., Wang Y-N., Chan M-H., Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 62, pp. 434-441, 2008

---

Longuetaud F., Leban J-M., Mothe F., Kerrien E., Berger M-O., Automatic detection of pith on CT images of spruce logs, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 24, pp. 107-119, 2004

Longuetaud F., Saint-André L., Leban J-M., Automatic detection of annual growth units on *Picea abies* logs using optical and X-ray techniques, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 24, No.1, March, 2005

Longuetaud F., Mothe F., Leban J-M., Automatic detection of the heartwood/sapwood boundary within Norway spruce logs by means of CT images, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 58, pp. 100-111, 2007

Lundgren N., Brännström M., Hagman O., Oja J., Predicting the strength of Norway spruce by microwave scanning: a comparison with other scanning techniques, *Wood and Fiber Science*, Vol. 39, pp. 167-172, 2007

## M

---

Magnusson Seger M., Danielsson P-E., Scanning of logs with linear cone-beam tomography, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 45-62, 2003

Malamas E.N., Petrakis E.G.M., Zervakis M., Petit L., Legat J-D., A survey on industrial vision systems, applications and tools, *Image and Vision Computing*, Vol. 21, pp. 171-188, 2003

Masnan M.J., Mahat N.I., Zakaria A., Shakaff A.Y.M., Adom A.H., Sa'ad F.S.A., Enhancing Classification Performance of Multisensory Data through Extraction and Selection of Features, *Procedia Chemistry*, Vol. 6, pp. 132-140, 2012

Matta N., Castillo Navetty O., Learning from Profession Knowledge: Application on Knitting, *IEEE proceedings of the 5th International Conference on Signal-Image Technology and Internet based Systems*, Marakesh, November, 2009

Maunu S.L., NMR studies of wood and wood products, *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, Vol. 40, pp. 15-174, 2002

Maurel-Entzmann F., Capitalisation d'un savoir-faire industriel pour la réalisation d'un système d'aide à la décision à base de multi-agents, Application dans une chaîne agro-alimentaire d'une malterie: « Projet C. O. R. M. O. R. A. N. », thèse de doctorat, 1996

---

Mazaud C., Bombardier V., Lhoste P., Methodology of professional knowledge integration based on fuzzy linguistic rules, *Revue Sciences et Technologie de l'Automatique*, Vol. 3, 2006

McGuinness D.L., Van Harmelen F., OWL web ontology language overview, *W3C recommendation*, Vol. 10, N° 2004-03, pp. 10, 2004

Mechitov A., Moshkovich H., Olson D., Killingsworth B., Knowledge acquisition tool for case-based reasoning systems, *Expert Systems with Applications*, Vol. 9, pp. 201-212, 1995

Meder R., Franich R.A., Callaghan P.T., 11B magnetic resonance imaging and MAS spectroscopy of trimethylborate-treated radiata pine wood, *Solid State Nuclear Resonance*, Vol. 15, pp. 69-72, 1999

Mora C., Schimleck L., Yoon S.C., Thai C., Determination of basic density and moisture content of loblolly pine wood disks using a near infrared hyperspectral imaging system, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Vol. 39, pp.401-409, 2011

Motta E., Stutt A., Zdrahal Z., Solving VT in VITAL: a study in model construction and knowledge reuse, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 44, pp. 333-371, 1996

Muñoz X., Freixenet J., Cufí X., Martí J., Strategies for image segmentation combining region and boundary information, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 24, pp. 375-392, 2003

## N

---

Newman T.S., Jain A.K., A survey of automated visual inspection, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, pp. 231-262, 1995

Nicosia S., Pischedda D., Parrot J., Gérer en continu la production de sciages: LINSET relève le défi, *CTBA Info*, Vol. 93, pp. 35-39, 2002

Nonaka I., Toyama R., Konno N., SECI, Ba and Leadership: a unified model of dynamic knowledge creation, *Long Range Planning*, Vol. 33, pp. 5-34, 2000

Nonaka I., Toyama R., Strategic management as distributed practical wisdom (phronesis), *Industrial and Corporate Change*, Vol. 16, pp. 371-394, 2007

---

Norell K., Borgfors G., Estimation of pith position in untreated log ends in sawmill environments, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 63, pp. 155-167, 2008

Norell K., Automatic counting of annual rings on *Pinus Sylvestris* end faces in sawmill industry, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 75, pp. 231-237, 2011

Nyström J., Hagman O., Real-time spectral classification of compression wood in *Picea abies*, *Journal of Wood Science*, Vol. 45, pp. 30-37, 1999

Nyström J., Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 91-99, 2003

## O

---

Oh A.H., Rudnicky A.I., Stochastic natural language generation for spoken dialog systems, *Computer Speech & Language*, Vol. 16, pp. 387-407, 2002

Oh J.K., Shim K., Kim K-M., Lee J-J., Quantification of knots in dimension lumber using a single-pass X-ray radiation, *Journal of Wood Science*, Vol. 55, pp. 264-272, 2009

Ohman M., Plank grade indicators in radiograph images of Scots pine logs, *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol. 57, pp. 359-363, 1999

Oja J., Wallbäcks L., Grundberg S., Hägerdal E., Grönlund A., Automatic grading of Scots pine sawlogs using an industrial X-ray log scanner, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 63-75, 2003

Oldham K., MOKA: A Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications, *Changing the Ways We Work: Shaping the ICT-Solutions for the Next Century*, IOS Press (Eds), 1998

Ouis D., Vibrational and acoustical experiments on logs of spruce, *Wood Science and technology*, Vol. 33, pp. 151-184, 1999

## P

---

Packianather M.S., Drake P.R., Neural networks for classifying images of wood veneer, Part 2, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, pp. 424-433, 2000

---

Payne P., Mendonça E., Johnson S., Starren J., Conceptual knowledge acquisition in biomedicine: A methodological review, *Journal of Biomedical Informatics*, Vol. 40, pp. 582-602, 2007

Peyrelong M. F., Accart, J. P., Du système d'information personnel au système d'information collectif: réalités et mirages du partage de l'information en entreprise, *Proceedings of the 30th annual conference of the CAIS*, 30 May-01 June, 2002

Pfautsch S., Macfarlame C., Ebdon N., Meder R., Assessing sapwood depth and wood properties in Eucalyptus and Corymbia spp. Using visual methods and near infrared spectroscopy (NIR) , *Trees*, Vol. 26, pp. 963-974, 2012

Pischedda D., La traçabilité : une des clefs incontournables pour l'avenir, *CTBA Info*, Vol. 114, pp. 2-7, 2007

Polanyi M., The logic of tacit inference, *Philosophy*, Vol. 41, pp. 1-18, 1966

PrioriTerre, <http://www.prioriterre.org>

Pudil P., Novovičová J., Kittler J., Floating search methods in feature selection, *Pattern recognition Letters*, Vol. 15, pp. 1119-1125, 1994

## Q

---

Quinlan J.R., Simplifying decision trees, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 51, pp. 497-510, 1999

## R

---

Ramírez Alonso G.M., Chacón Murguía M.I., Clasificación de defectos en madera utilizando redes neurales artificiales, *Computación y Sistemas*, Vol. 9, pp. 17-27, 2005

Rinnhofer A., Petutschnigg A., Andreu J-P., Internal log scanning for optimizing breakdown, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 7-21, 2003

Riseman E., Arbib M., Computational techniques in the visual segmentation of static scenes, *Computer Graphics and Images Processing*, Vol. 6, pp. 221-276, 1977

Rodd M.G., Wu Q.M., Knowledge-based vision systems in real-time control, *Annual Review in Automatic Programming*, Vol. 15, pp. 13-18, 1989

---

Rugg G., McGeorge P., The sorting techniques: a tutorial paper on card sorts, picture sorts and item sorts, *Expert System*, Vol. 14, pp. 80–93, 1997

Ruz G.A., Estévez P.A., Perez C.A., A neurofuzzy color image segmentation method for wood surface defect detection, *Forest Products Society*, Vol. 55, pp. 52-58, 2005

## S

---

Sanchez-Pi N., Carbó J., Molina J., A knowledge-based system approach for a context-aware system, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 27, pp. 1-17, 2012

Sandberg K., Sterley M., Separating Norway spruce heartwood and sapwood in dried condition with near-infrared spectroscopy and multivariate data analysis, *European Journal of Forest Resources*, Vol. 128, pp. 475-481, 2009

Sarigul E., Abbott A.L., Schmoltd D.L., Progress in analysis of computed tomography images of hardwood logs for defect detection, *Proceedings of Scan Tech 2003 International Conference*, Seattle, Washington, USA, 2003

Schimleck J.R., Mora C., Daniels R.F., Estimation of the physical wood properties of green *Pinus taeda* radial samples by near infrared spectroscopy, *Revue canadienne de recherche forestière*, Vol. 33, pp. 2297-2305, 2003

Schmitt E., Contribution au Système d'Information d'un Produit "Bois" - Appariement automatique de pièces de bois selon des critères de couleur et de texture, *Thèse de doctorat*, Université Henry Poincaré, 2007a

Schmitt E., Rendek J., Bombardier V., Wendling L., A feature selection method based on Choquet Integral and Typicality Analysis, *Fuzzy Systems Conference, FUZZ-IEEE 2007, IEEE International*, pp. 1-6, 2007b

Schmitt E., Bombardier V., Wendling L., Improving fuzzy rule classifier by extracting suitable features from capacities with respect to the Choquet integral, *IEEE Transactions on Systems, Manufacturing and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 38, Num. 5, October, 2008

Schmidt G., Wetter T., Using natural language sources in model-based knowledge acquisition, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 26, pp. 327-356, 1998

---

Schreiber G., Wielinga B., de Hoog R., Akkermans H., Van de Velde W., CommonKADS: a comprehensive methodology for KBS development, *Expert*, Vol. 9, pp. 28-37, 1994

Serrafero P., Vers la mesure de la quantité de connaissance et de compétence industrielle: le modèle Knova, *1<sup>er</sup> colloque du Groupe de Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel*, Nantes, Décembre, 2002

Silvén O., Niskanen M., Kauppinen H., Wood inspection with non-supervised clustering, *Machine Vision and Applications*, Vol. 13, pp. 275-285, 2003

Silvennoinen R., Wahl P., Vidot J., Inspection of orientation of micro fibres in dried wood by a diffractive optical element, *Optics and lasers in Engineering*, Vol. 33, pp. 29-38, 2000

Skarka W., Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp. 677-690, 2007

Skatter S., Hçibç O.A., Gjerdrum P., Simulated yield in a sawmill using different measurement technologies, *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol. 56, pp. 267-274, 1998

Soullignac V., Chanet J.P., Paris J.L., Devise O., Gondran N., Knowledge management and innovative design : state of the art, *MITIP 2009*, 15-16 Octobre, Bergano, Italy, 2009

Sowa J., Conceptual Graphs for a Data Base Interface, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 20, pp. 336-357, 1976

Starbuck W. H., Unlearning what we knew and rediscovering what we could have known, *Scandinavian Journal of Management*, Vol. 25, pp. 240-242, 2009

Steele P.H., Cooper J.E., Estimating lumber strength with radio frequency scanning, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 77-83, 2003

Sugumaran V., Ramachandran K.I., Automatic rule learning using decision tree for fuzzy classifier in fault diagnosis of roller bearing, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 2237-2247, 2007

Sutton D., Patkar V., CommonKADS analysis and description of a knowledge based system for the assessment of breast cancer, *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 2411-2423, 2009

## T

Thawornwong S., Occena L.G., Schmoldt D.L., Lumber value differences from reduced CT spatial resolution and simulated log scanning, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, pp. 23-43, 2003

Thomas L, Thomas R.E., A graphical automated detection system to locate hardwood log surface defects using high-resolution three-dimensional laser scan data, *Proceeding of the 17th Central Hardwood Forest Conference*, pp. 92-101, 2011

Tong Q.J., Zhang S.Y., Thompson M., Evaluation of growth response, stand value and financial return for pre-commercially thinned jack pine stands in Northwestern Ontario, *Forest Ecology and Management*, Vol. 209, pp. 225-235, 2005

Troyer (De) O., A formalization of the Binary Object-Role Model based on logic, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 19, pp. 1-37, 1996

## V

Vaz C., Carvalho P., Duarte F., Dourado A., A vision-based system for automatic growing ring detection and measurement, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 46, pp. 347-354, 2004

Ververidis D., Kotropoulos C., Fast and accurate sequential floating forward feature selection with the Bayes classifier applied to speech emotion recognition, *Signal Processing*, Vol. 88, pp. 2956-2970, 2008

Vinck D., La connaissance, ses objets, et ses institutions, *Connaissances et savoir-faire en entreprise*, ISBN 2-86601-627-0, Hermès, 1997

Vun R.Y., Hoover K., Janowiak J., Bhardwaj M., Calibration of non-contact ultrasound as an online sensor for wood characterization: Effects of temperature, moisture, and scanning direction, *Applied Physics A*, Vol. 90, pp. 191-196, 2008

---

**W**

Walker D.H., Sinclair F.L., Acquiring qualitative knowledge about complex agroecosystems, Part 2: formal representation, *Agricultural Systems*, Vol. 56, pp. 365-386, 1998

Wang L., Li L., Qi W., Yang H., Pattern recognition and size determination of internal wood defects based on wavelet neural networks, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 69, pp. 142-148, 2009

Warensjo M., Compression wood in Scots pine and Norway spruce – Distribution in relation to external geometry and the impact on dimensional stability in sawn wood, *Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences*, Umea, 2003

Waterhouse J.F., The ultrasonic testing of paper and board – Principles and applications, *TAPPI Process and Product Quality Conference*, Atlanta, Georgia, USA, October 31-November 3, 1993

Wei Q., Chui Y.H., Leblon B., Identification of selected internal wood characteristics in computed tomography images of black spruce: a comparison study, *Journal of Wood Science*, Vol. 55, pp. 175-180, 2009

Wei Q., Leblon B., La Rocque A., On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 41, pp. 2120-2140, 2011

Woods G.S., Maskell D.L., Mahoney M.V., A high accuracy microwave ranging system for industrial applications, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 42, No. 4, August, 1993

Wyckhuyse A., Maldague X., A study of wood inspection by infrared thermography, Part 1: Wood pole inspection by infrared thermography, *Research on Nondestructive Evaluation*, Vol. 13, pp. 1-12, 2001

**X**

---

Xu L., Case Based Reasoning, *Potentials*, Vol. 13, pp. 10-13, 1995

---

## Y

Yu G., Kamarthi S.V., A cluster-based wavelet feature extraction method and its application, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 23, pp. 196-202, 2010

## Z

Zhu X., Shan Y., Li G., Huang A., Zhang Z., Prediction of wood property in Chinese Fir based on visible/near-infrared spectroscopy and least square-support vector machine *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 74, pp. 344-348, 2009

## **Références Techniques**

VISIOMODELER VisioModeler, version 3.1. *Visio Corporation*, 1998



## **ANNEXES**

---



## **Annexes**

### **Annexe 1 : Etat de l'art sur les méthodes de décision appliquées au domaine du bois**

L'étape de décision termine le processus d'un système de vision et doit fournir l'information recherchée en fonction de l'Objectif. Cette information est fournie directement à l'homme ou est utilisée par un autre processus automatisé tel qu'un module d'optimisation et de valorisation de la matière.

Dans les systèmes de vision, la décision fait souvent référence au domaine de la reconnaissance de formes (RdF), mais les méthodes employées conviennent pour d'autres objectifs. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette étape. Elles portent des noms différents en fonction de l'information qu'elles fournissent au final : méthodes de classification, de reconnaissance, de comparaison, d'identification, etc. [Newman T. S., 1995] propose une distinction des approches en trois catégories : la comparaison directe, la reconnaissance structurelle et la reconnaissance globale.

Dans l'approche par comparaison directe, les formes sont directement utilisées sous leur aspect naturel. La comparaison s'effectue à l'aide d'une mesure de ressemblance ou de dissemblance à partir de formes de référence (matching). Dans l'approche par reconnaissance structurelle, la reconnaissance n'est plus abordée comme un problème global porté sur des caractéristiques extraites des données, mais portée par la structure même des objets, c'est-à-dire l'enchaînement des primitives qui la constituent (les primitives expriment mathématiquement les formes des objets). Cette catégorie s'apparente à l'analyse syntaxique. Dans l'approche par reconnaissance globale, le traitement est basé sur le résultat d'une

transformation des objets initiaux dans un espace de représentation via un vecteur de caractéristiques. Cette approche est au cœur des recherches actuelles pour un produit « bois ».

L'approche par reconnaissance globale est matérialisée par plusieurs méthodes. Les méthodes basées sur les réseaux de neurones sont les plus répandues car elles sont simples et facilement adaptables à la plupart des cas applicatifs. C'est pourquoi, c'est une des premières méthodes appliquées au bois et qui a subi le plus d'améliorations au cours des années. [Drake P.R., 1998] propose un réseau de neurones à 11 entrées et 13 sorties pour trier des placages. La précision annoncée est de 88% avec un réseau simple. Cette même étude est ensuite améliorée par [Packianather M.S., 2000]. L'auteur propose une réduction du nombre d'entrées permettant un gain en temps de calcul de 30% et une augmentation du taux de reconnaissance (non chiffrée). [Sarigul E., 2003] propose un réseau de neurones dynamique. C'est-à-dire que l'algorithme est capable d'apprendre à tout instant. Le système d'apprentissage est aussi appelé « On-line » ou « Incrémental ». Ceci permet d'améliorer les performances du système en continu. [Ramírez Alonso G. M., 2005] implémente un réseau de neurones permettant de classer 7 dessins différents (forme) du nœud sur le sciage. L'auteur obtient un taux de bon classement supérieur à 80% alors qu'il évalue celui de l'opérateur/gradeur à 60% avec seulement 4 classes. Dernièrement, [Yu G., 2010] compare deux algorithmes issus de cette méthode : les MLP (MultiLayer Perceptron) et les PNN (Probabilistic Neural Network). Les résultats sont satisfaisants dans les deux cas allant de 68,8% à 100% pour les MLP et de 81,3% à 100% pour les PNN. Malgré toutes ces améliorations, les réseaux de neurones souffrent de gros handicaps. Premièrement, ils nécessitent un grand nombre d'échantillons d'apprentissage qu'il est souvent difficile à obtenir. Deuxièmement, il est impossible d'interpréter le mécanisme de décision (lien de cause à effet) ce qui complique la correction ou l'amélioration du système.

Les méthodes statistiques (ou paramétriques), étudiées jusqu'à présent dans d'autres applications et actuellement en vogue pour la reconnaissance de formes se développent sur le produit « bois ». [Cavalin P., 2006] compare un algorithme de type SVM (Support Vector Machine) et un de type Réseau de Neurones pour la détection de défauts sans identification. Dans ce cas et avec des critères pertinents, SVM donne de meilleurs résultats. L'étude démontre également que l'utilisation d'un surnombre de critères peut être défavorable. Il faut non seulement que les critères soient pertinents, mais également en nombre limité.

Néanmoins, ces méthodes restent également contraintes par le nombre d'échantillons nécessaires à la construction du modèle paramétrique. [Silvén O., 2003] va plus loin et propose un algorithme SOM (Self Organizing Map) non supervisé. Il est non supervisé car il n'a pas besoin de phase d'apprentissage. Selon l'auteur, la phase d'apprentissage d'un algorithme induit toujours une erreur inhérente à l'homme et à sa subjectivité. Cependant, cette méthode est peu industrialisée car elle est compliquée à implémenter.

Les méthodes intégrant la connaissance des experts du bois peuvent aussi s'affranchir des échantillons d'apprentissage. Ainsi, [Andreu J.P., 2003] utilise une décision par seuillage dans laquelle les seuils sont fixés par les experts de manière empirique. Les résultats obtenus sont jugés satisfaisants par l'auteur, mais sa méthode est employée seulement pour la détection des nœuds et les temps de calcul ne sont pas pris en compte.

Des méthodes cumulent les gains d'un système supervisé (sans que le nombre d'échantillons devienne une contrainte) et les gains de l'intégration de la connaissance experte (avec un système interprétable). [Mazaud C., 2006] et [Bombardier V., 2010] travaillent sur la classification couleur d'avivés en bois par l'intermédiaire de règles linguistiques floues. Les performances de la méthode floue sont évaluées comme équivalentes aux autres méthodes (classificateur Baysien, k-PPV, Fuzzy k-PPV, Réseaux de Neurones, Algorithme génétique, SVM). En revanche, elle présente l'avantage d'une très bonne généralisation à partir d'un faible lot d'échantillons d'apprentissage. L'interprétabilité du système (même par un non expert) et l'intégration de l'incertitude des experts grâce à la logique floue sont ses autres atouts. En 2008, cette même équipe propose de réduire le nombre de critères puis les dimensions du système de manière automatique grâce à un module nommé FRIFS (Fuzzy Rule Iterative Feature Selection) [Schmitt E., 2008]. Les performances sont améliorées avec cette réduction tout comme Cavalin P. le concluait avec les SVM en 2006 [Cavalin P., 2006].

On constate également un engouement pour les arbres de décision à partir des premières recherches de Quinlan J.R. dans les années 1990 et surtout suite aux simplifications et améliorations qu'il permet par son étude de 1999 [Quinlan J.R., 1999]. Cette méthode est interprétable par l'expert qui l'implémente et peut être combinée avec plusieurs autres méthodes, ce qui en fait son attrait. Par exemple, l'étude de [Drake P.R., 1998] présentée dans les paragraphes précédents propose une amélioration de son réseau de neurones simple par

l'introduction d'un arbre de décision dit « à réseau modulaire ». Cette amélioration augmente le taux de reconnaissance de 8%.

Finalement, chaque méthode nécessite d'être paramétrée pour fonctionner correctement. Le paramétrage pertinent de chaque méthode requiert un expert ayant une bonne connaissance de la méthode en question. De fait, les experts sont souvent spécialisés dans une ou deux méthodes, mais pas sur toutes les méthodes. Il est ainsi peu courant de trouver des études comparatives pertinentes d'une multitude de méthodes à la fois (comme [Funck J.W., 2003] l'a fait avec les méthodes de segmentation dédiées au bois). La liste des méthodes présentées n'est pas exhaustive, mais cible les méthodes dans lesquelles des progrès récents ont été fait pour un produit « bois ». De plus, la littérature citée se focalise uniquement sur la reconnaissance de singularités de ce produit.

L'apparition des systèmes multi-capteurs ouvre une nouvelle étape de traitement qui est intégrée à la prise de décision : la fusion ou l'agrégation. Son but est d'utiliser les données d'un capteur pour calibrer ou ajuster les données obtenues par les autres capteurs. [Kline D.E., 2003] explique les problèmes qu'il rencontre sur sa plateforme expérimentale dédiée au bois et, [Dubois D., 2004] positionne les problématiques liées à l'agrégation de données dans un contexte plus général. Cette étape n'est pas détaillée ici car elle sort du cadre de notre étude et est entièrement à la charge du fournisseur du système de vision et de son outil de gestion.

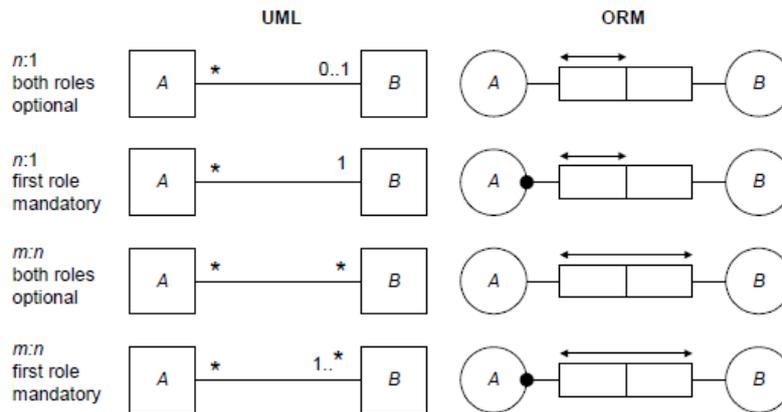
## Annexe 2 : Synthèse en fonction des caractéristiques à extraire sur un avivé

Caractéristique analysée	Type Capteur	Critères									Références	
		Coût	Industrialisé	Performances	Rapidité mesure	Sensib. envi travail	Sensib. état surface	Sensible bruit	Mise en place part.	Contact matière		Dangerosité
Epaisseur/ Larg./ Long.	Caméra + Laser	↓	++	++	+	X					↓	
	Caméra Couleur	↓	++	+	+	X					↓	
Défauts externes : Nœud, Trou, Flache, Fil du bois, Fente, Texture, Bois de compression	Caméra + Laser	↓	++	++	+	X	X		X		↓	Lee S.M./03 Nyström J./03
	Caméra Couleur	↓	++	++	+	X	X		X		↓	Hagman O./97 Nyström J./99 Bombardier V./07,10 Jabo S./11
Couleur du bois	Caméra Couleur	↓	++	++	+	X	X		X		↓	Bombardier V./07,10 Jabo S./11
Défauts internes sévères Nœud, Pourriture, Trou, Métal	Infrarouge	↓	+	+	+						↓	Dyk H./10
	Micro-ondes	↓	--	+	+			X			↓	Woods G.S./93 Baradit E./06
	Onde Radar	↓	+	+	+					X	↓	Halabe U.B./11
	Accéléromètre + Marteau	↓	-	+	+				X	X	↓	Hu C./06
	Ultrasons	↓	--	-	+					X	↓	Kabir M.F./00 Wang L./09
	RX 1d	↑	+	-	-						↑	Oh J.K./09
Défauts internes Entre-écorce, Fil du bois	RX 2d + Acc/ Marteau	↑	++	++	-					X	↑	Kline D.E./03 Buehlmann U./07
	Ultrasons	↓	--	-	+					X	↓	Kabir M.F./00
Propriétés : Humidité, Imprégnation, Densité	RX 2d + Acc/ Marteau	↑	++	++	-					X	↑	Kline D.E./03 Buehlmann U./07
	Micro-ondes	↓	--	+	+			X			↓	Woods G.S./93 Johansson J./03 Hansson L./05
	Ultrasons	↓	--	-	+					X	↓	Kabir M.F./98
Résistance	RMN	↓	--	++	-					proche	↓	Chang S.J./89 Casieri C./04 Meder R./99 Maunu S.L./02
	Micro-ondes	↓	--	+	+			X			↓	Lundgren N./07
	Radio-fréquence	↓	+	+	+						↓	Steele P.H./05
	Accéléromètre/ Marteau	↓	++	++	+					X	↓	Edlund J./06
	Ultrasons	↓	--	-	+					X	↓	Waterhouse J.F./93
RX 2d + Acc/ Marteau	↑	++	++	+					X	↑	Guidicandrea F./05	

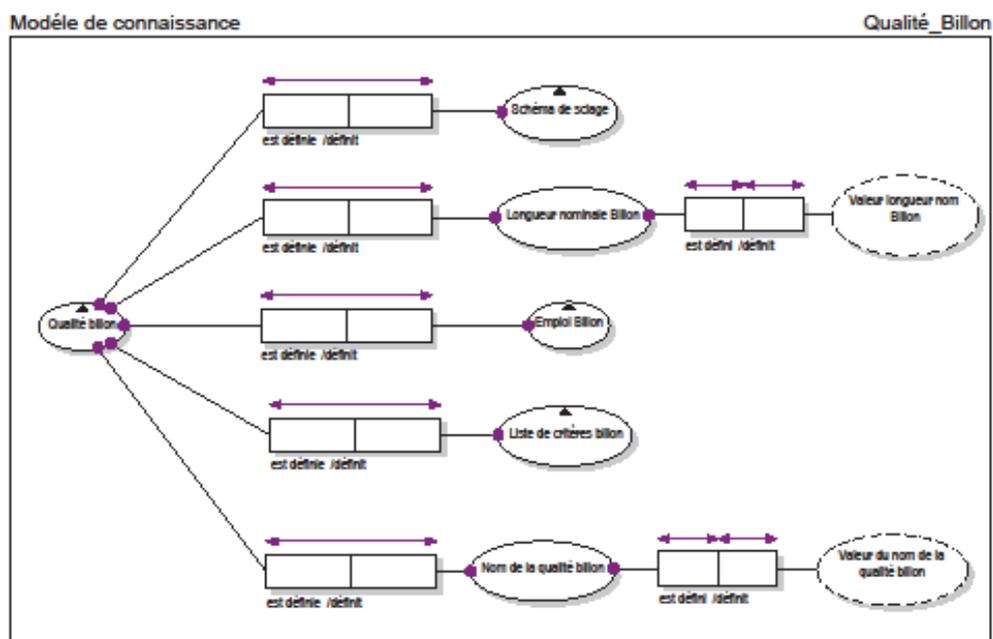
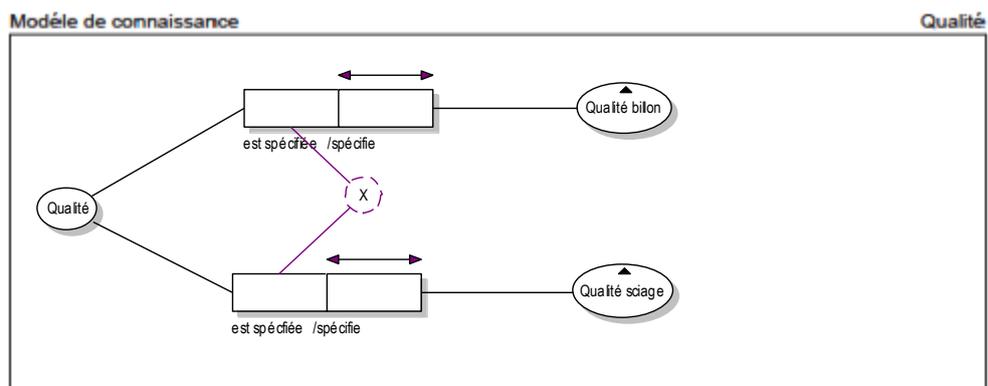
### Annexe 3 : Equivalence UML/ORM selon [Halpin T., 1999]

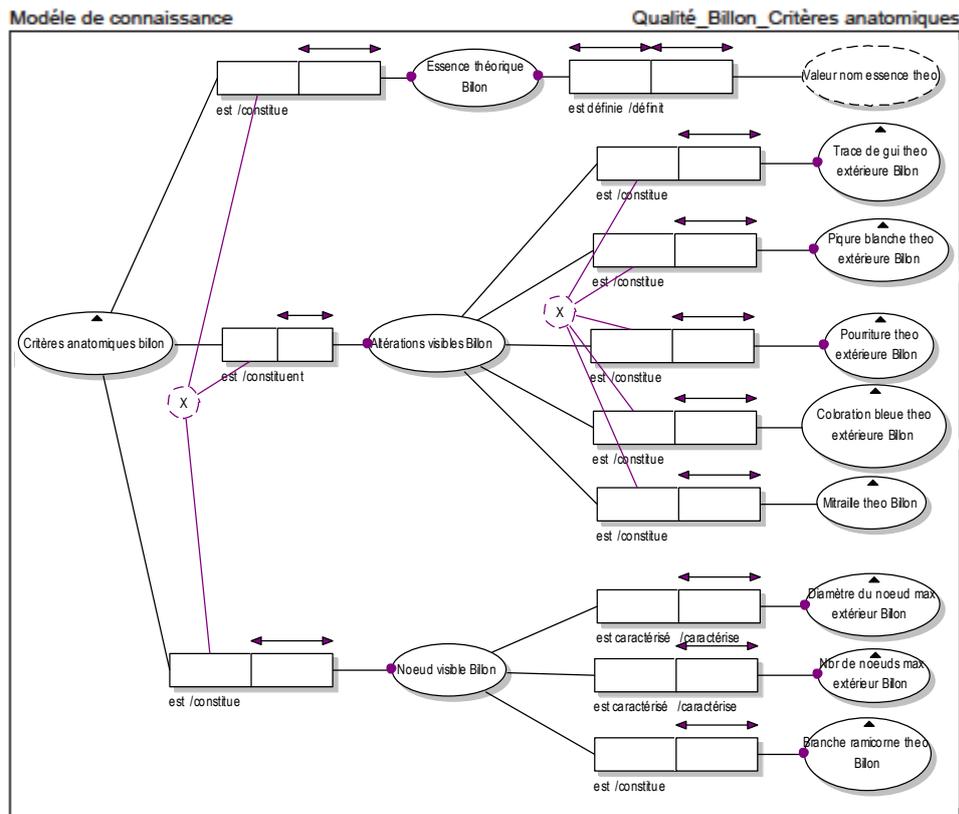
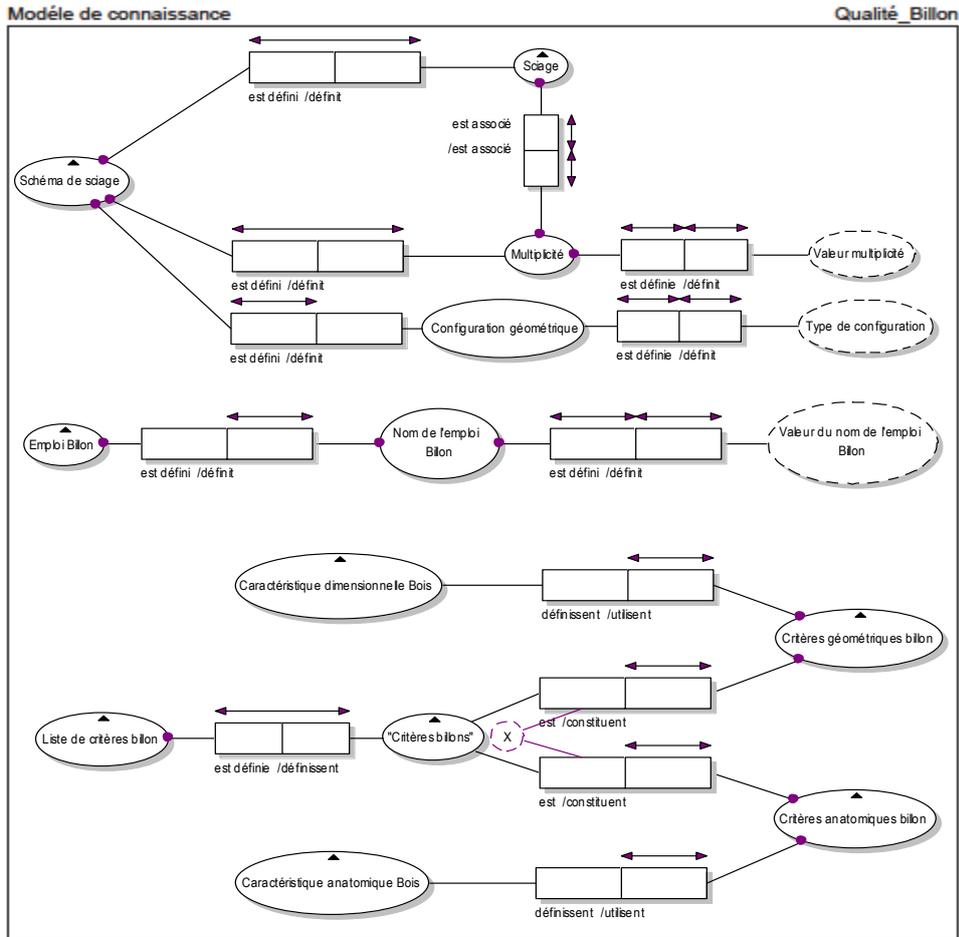
Data instances/structures		Constraints	
ORM	UML	ORM	UML
Entity	Object	Internal uniqueness	Multiplicity of ..1 §
Value	Data value	External uniqueness	— { use qualified assoc. § }
Object	Object or Data value	Simple mandatory role	Multiplicity of 1..
Entity type	Class	Disjunctive Mandatory role	—
Value type	Data type	Frequency: internal; external	Multiplicity §; —
Object type	Class or Data type	Value	Enumeration, and textual
— { use relationship type }	Attribute	Subset and Equality	Subset §
Unary relationship type	— { use Boolean attribute }	Exclusion	Or-constraint §
2+-ary relationship type	Association	Subtype link and definition	Subclass discriminator etc. §
2+-ary relationship instance	Link	Ring constraints	—
Nested object type	Association class	Join constraints	—
Co-reference	Qualified association §	Object cardinality	Class multiplicity
		— { use unique and mand. § }	Aggregation/composition
		—	Defaults/changeability
		Textual constraints	Textual constraints

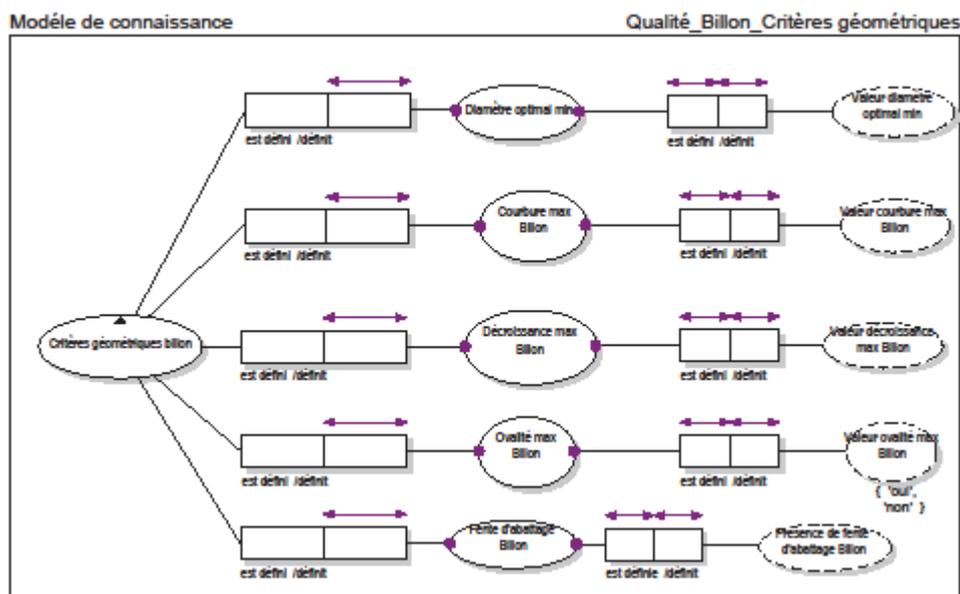
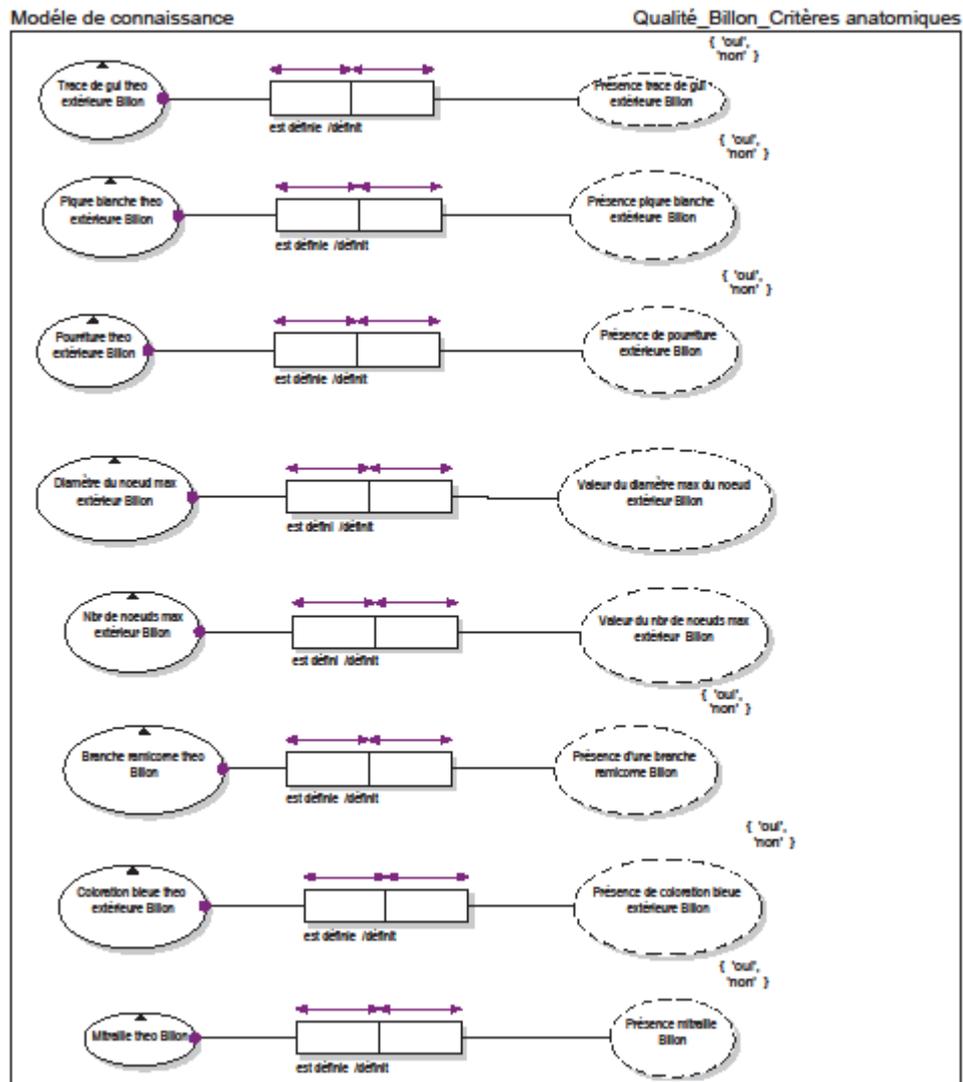
§ = incomplete coverage of corresponding concept

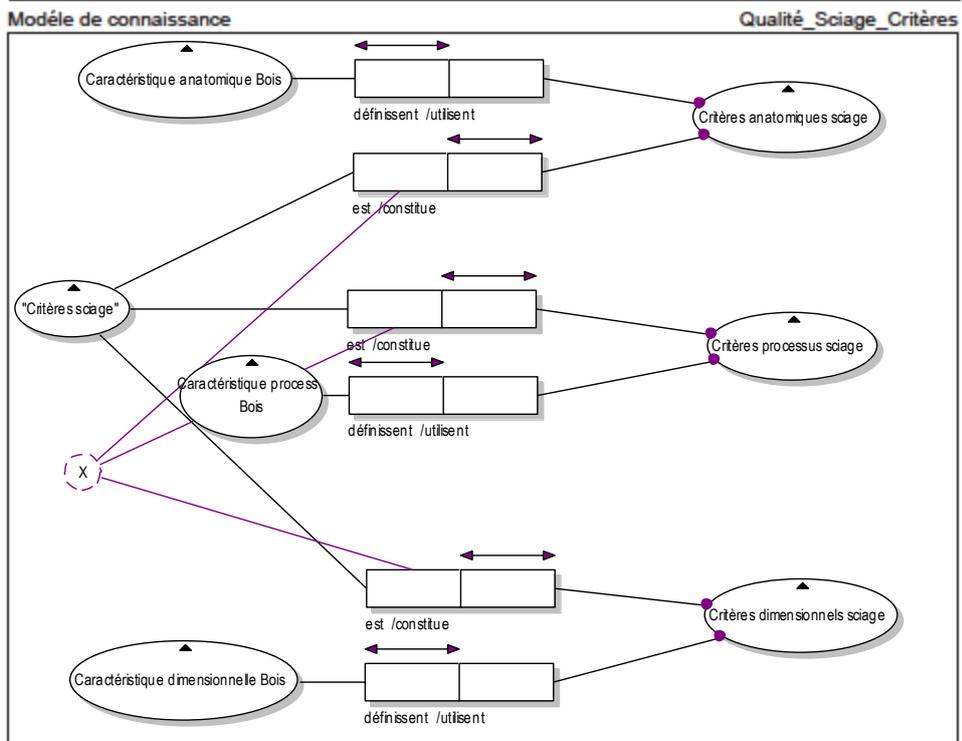
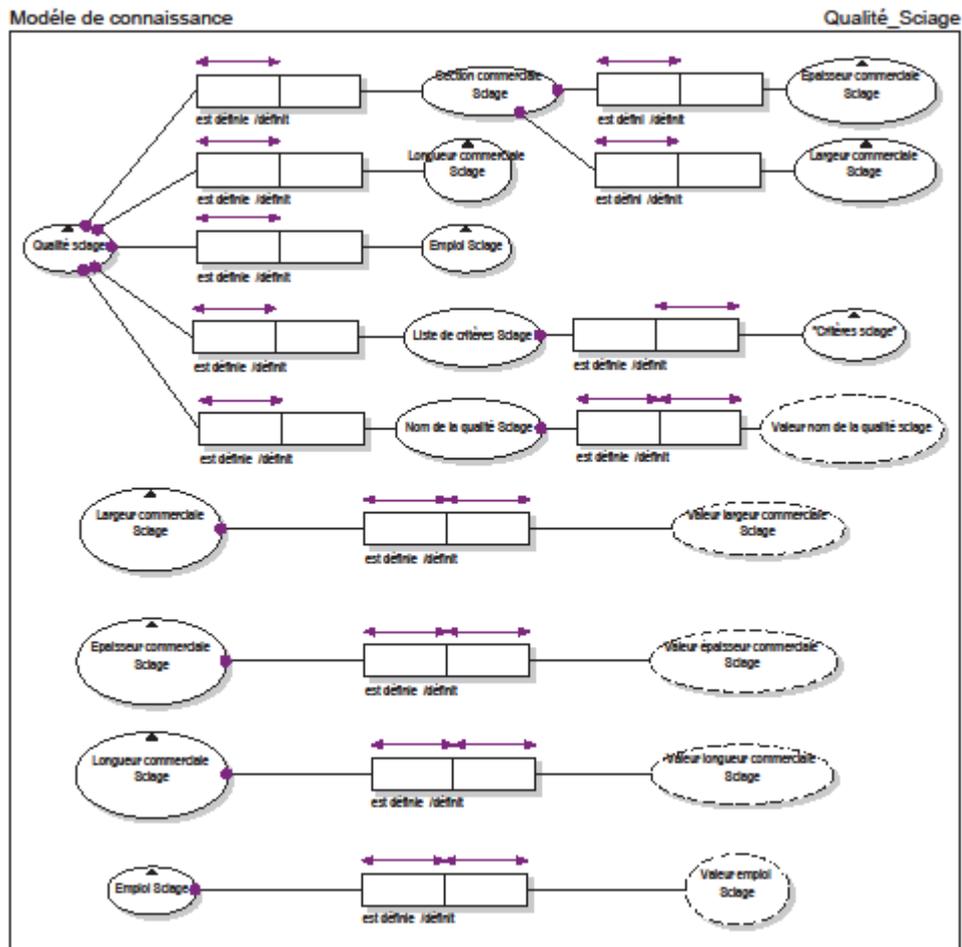


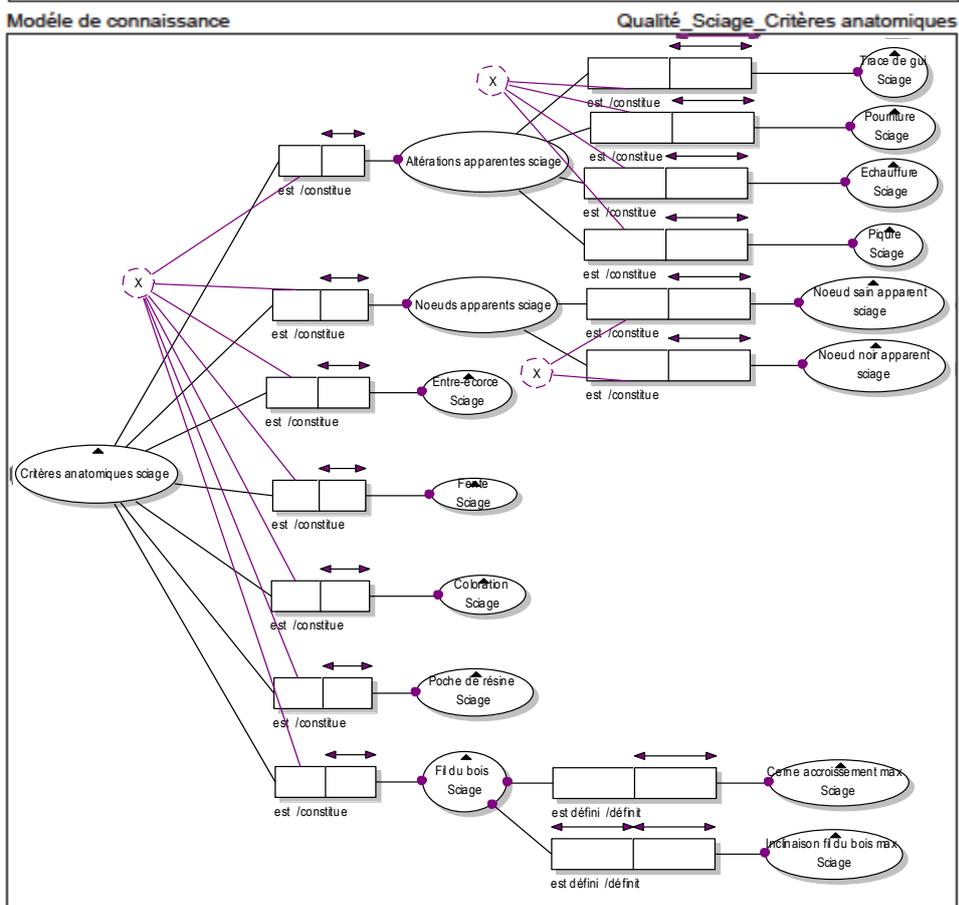
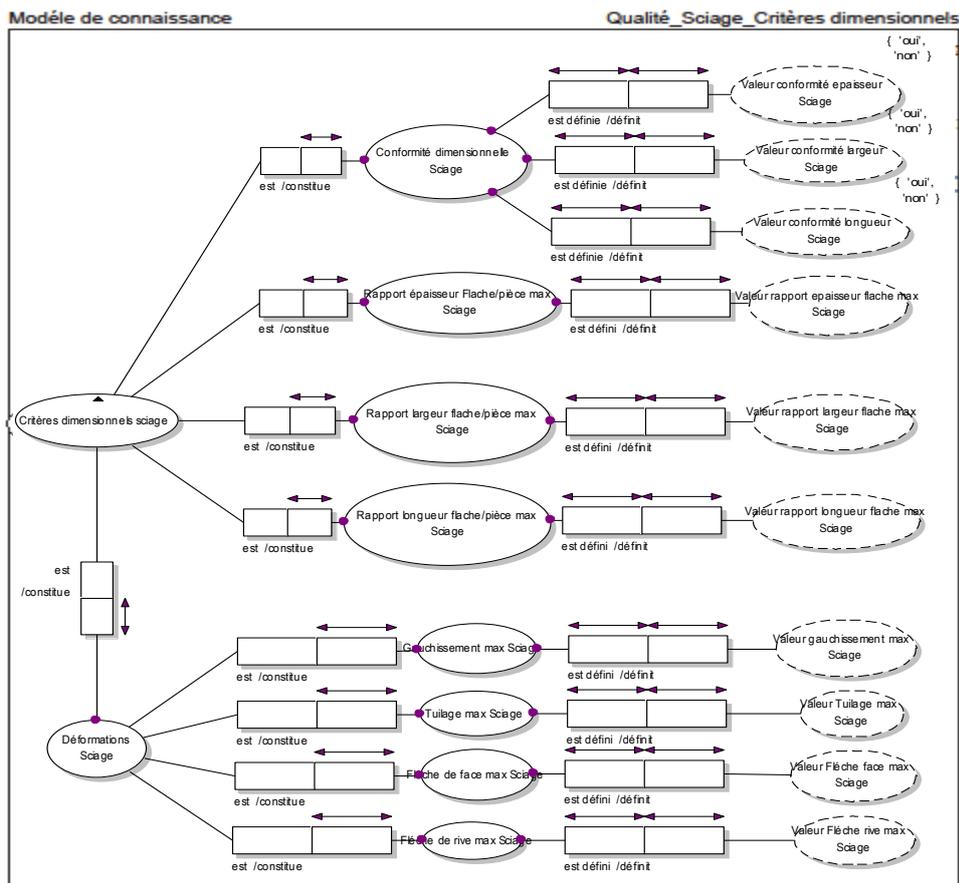
## Annexe 4 : Modèles ontologiques des qualités Sciage et Billon

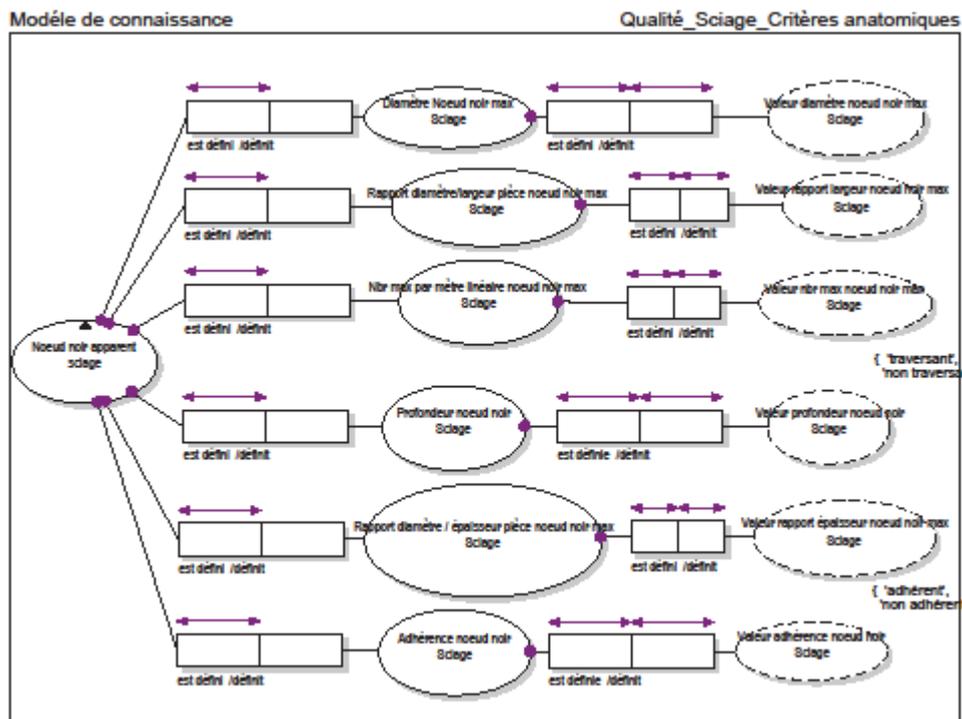
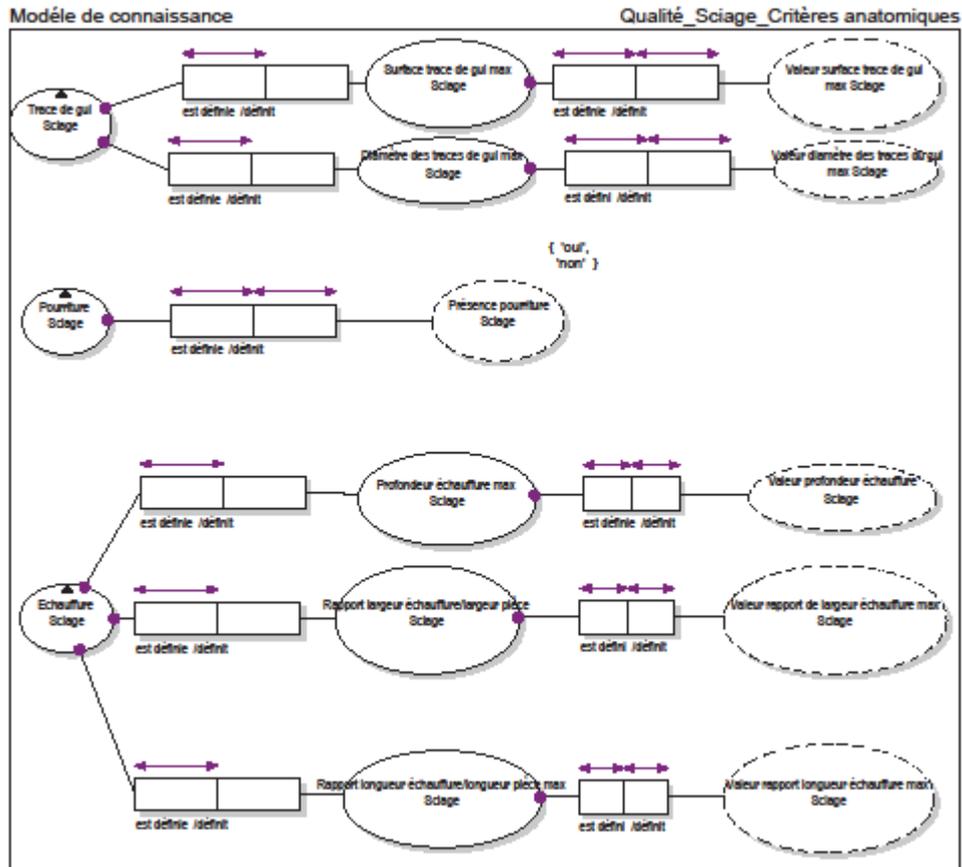


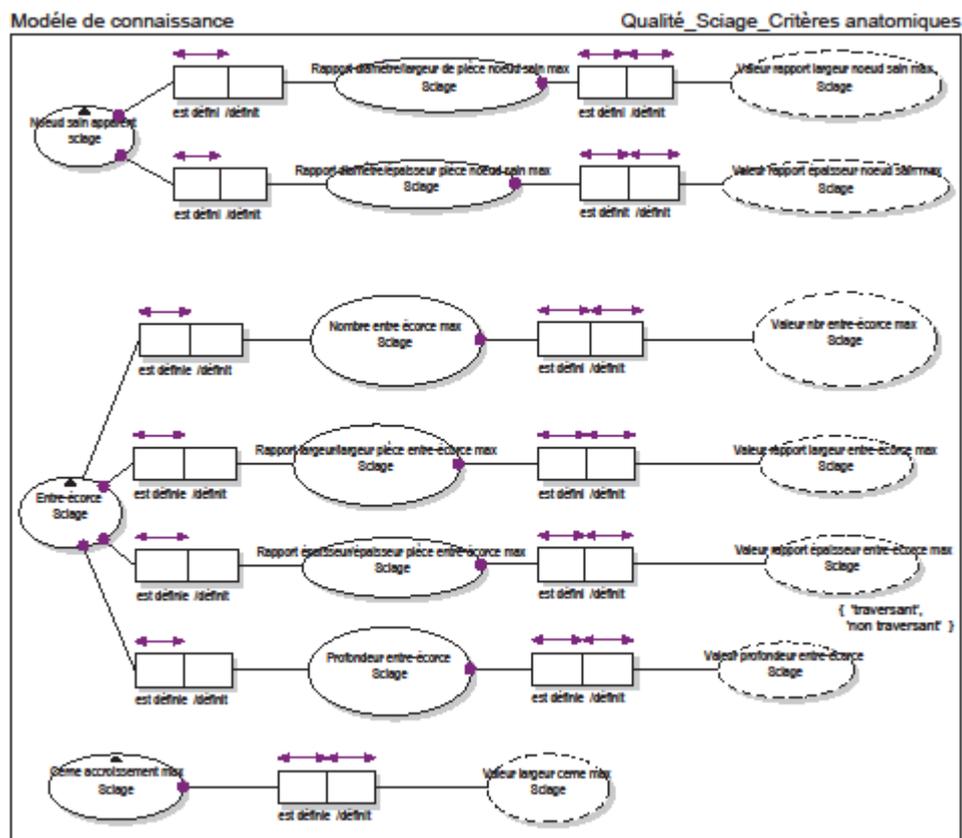


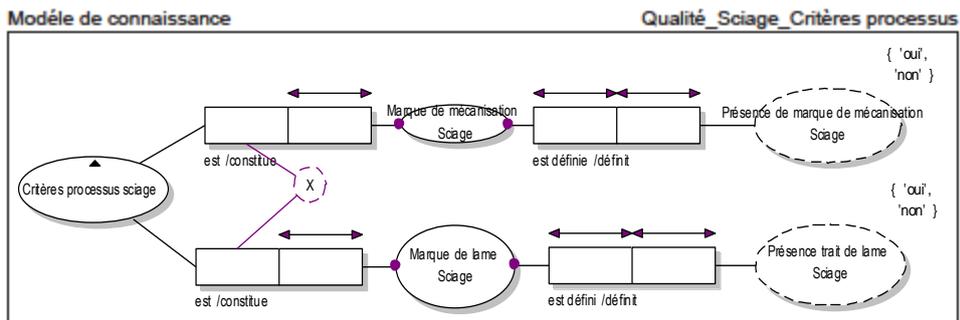
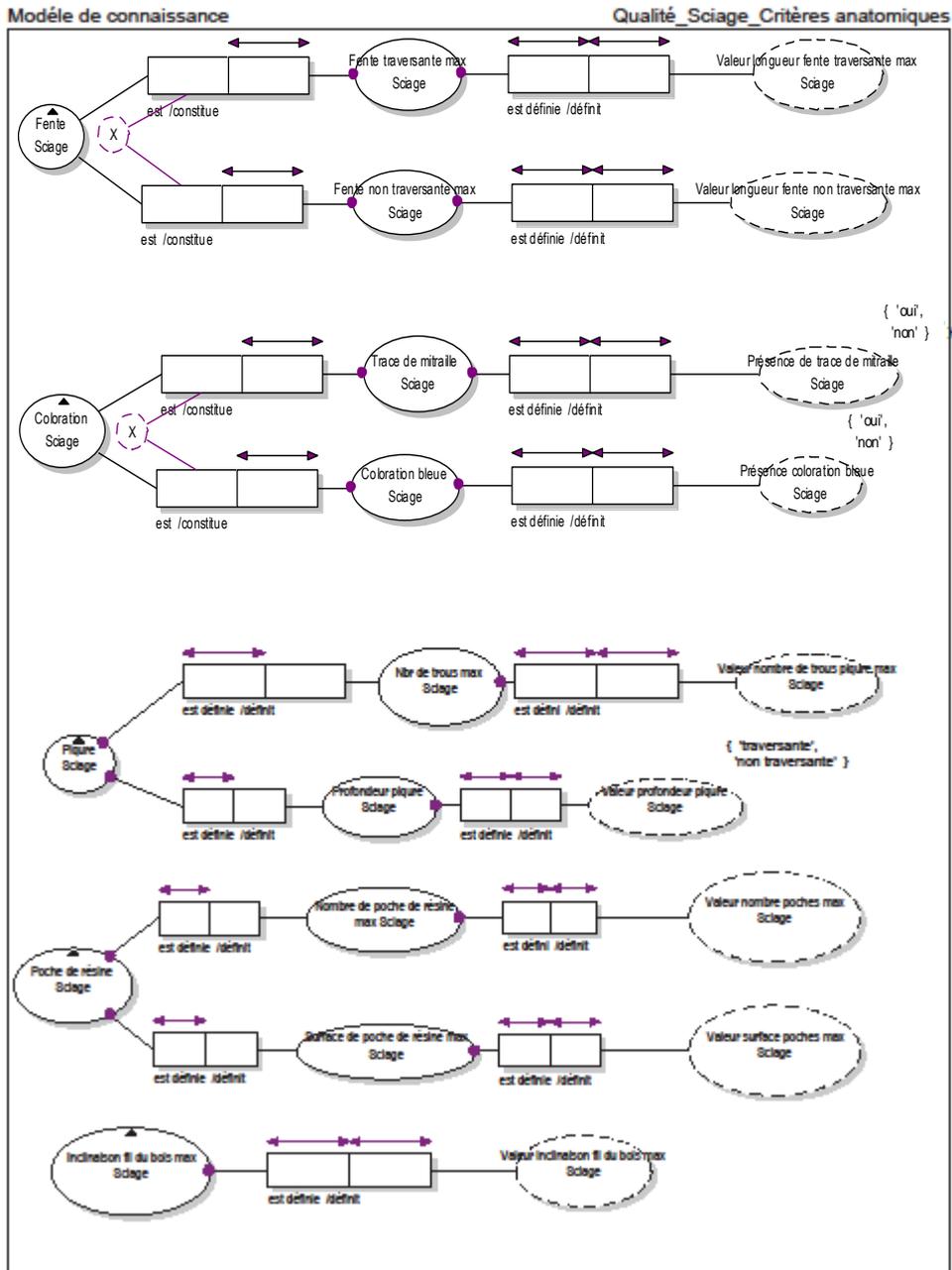




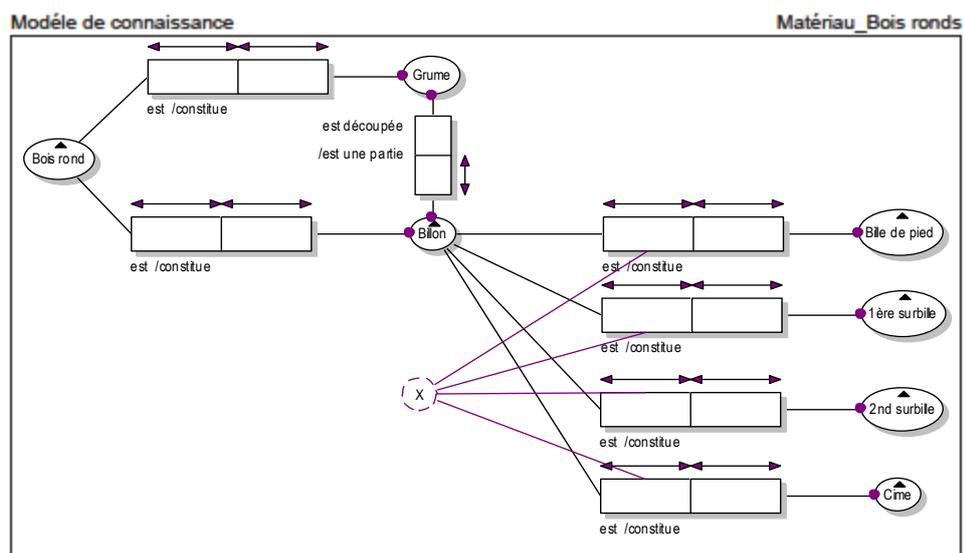
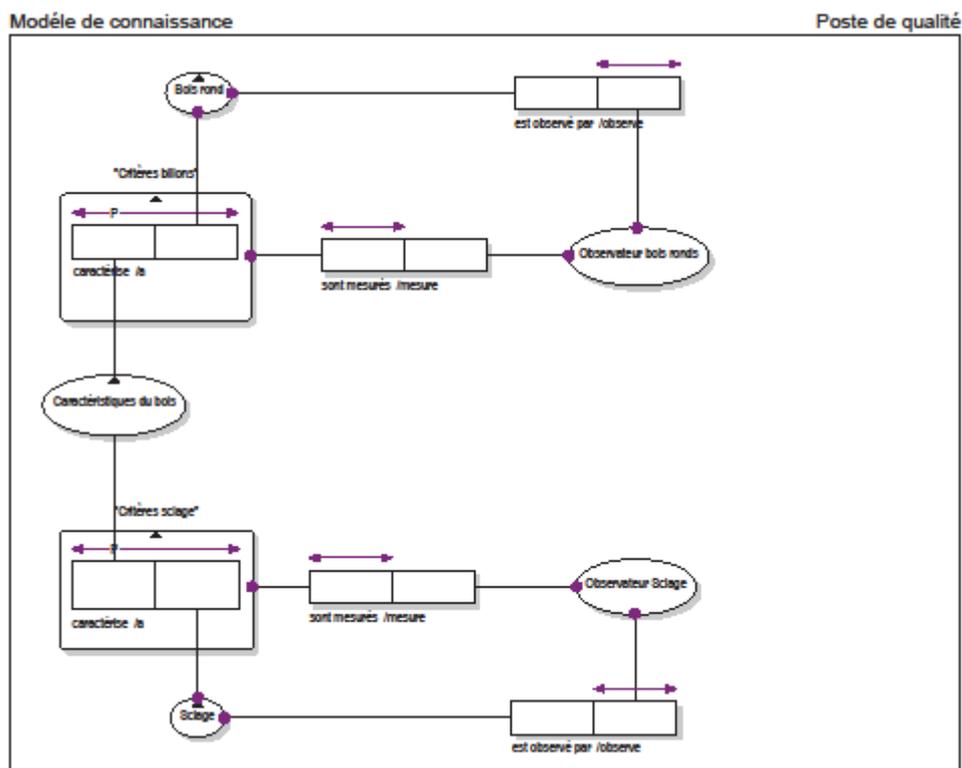


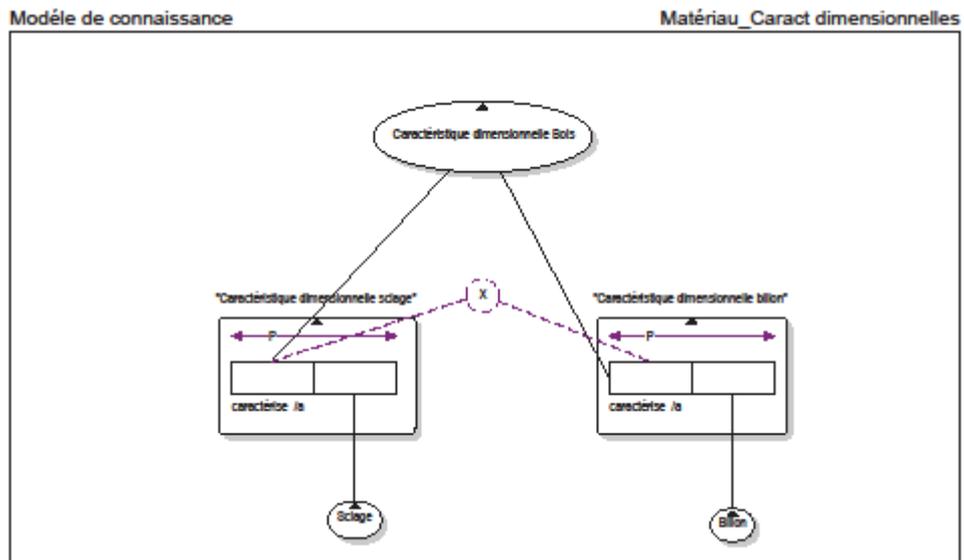
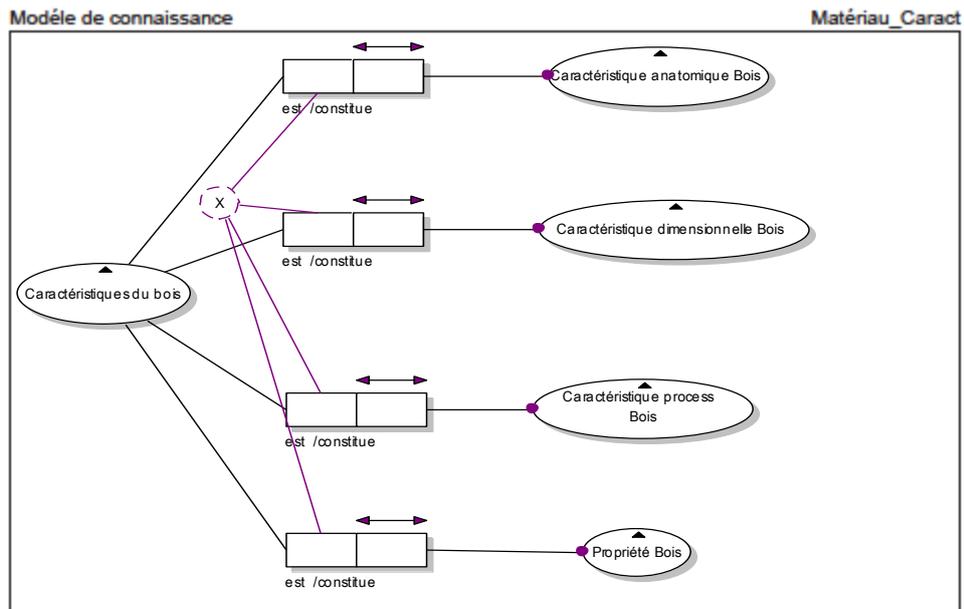


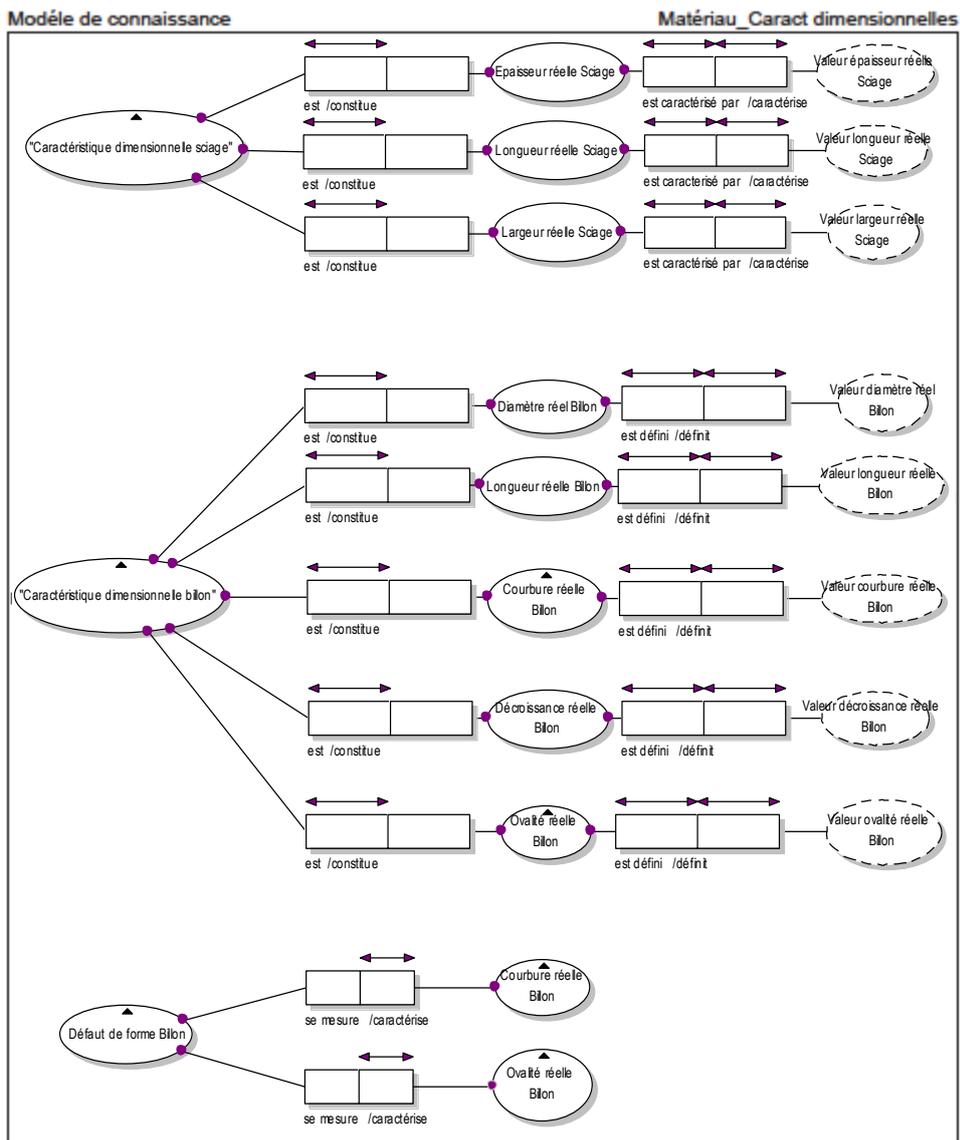


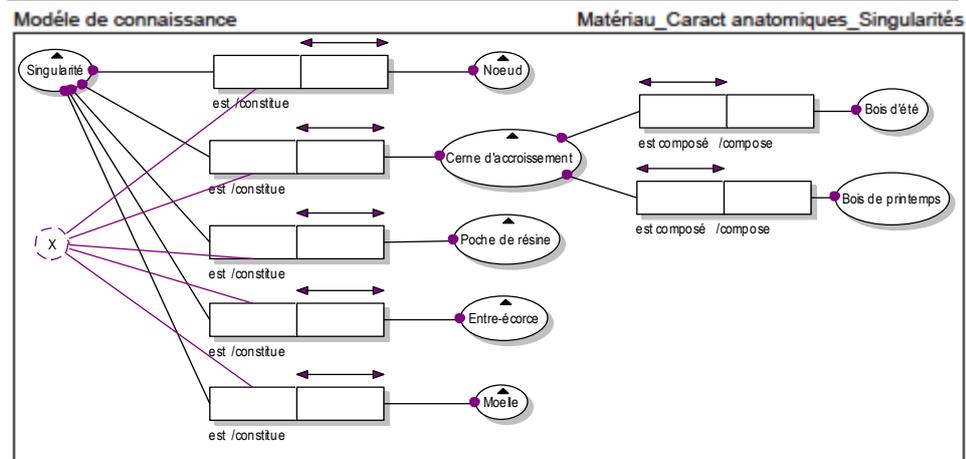
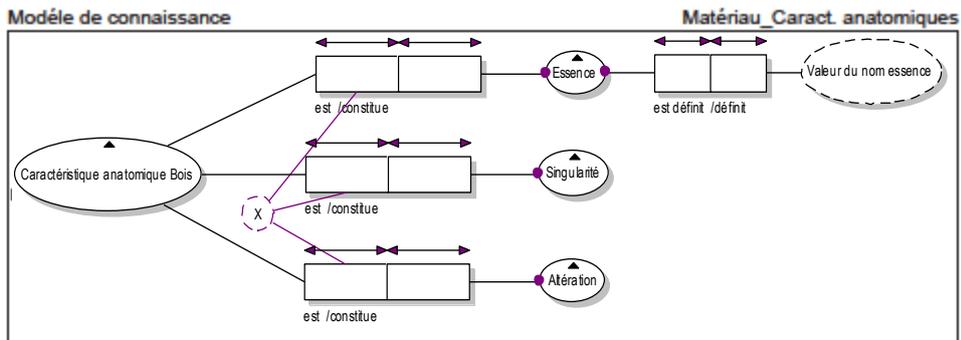
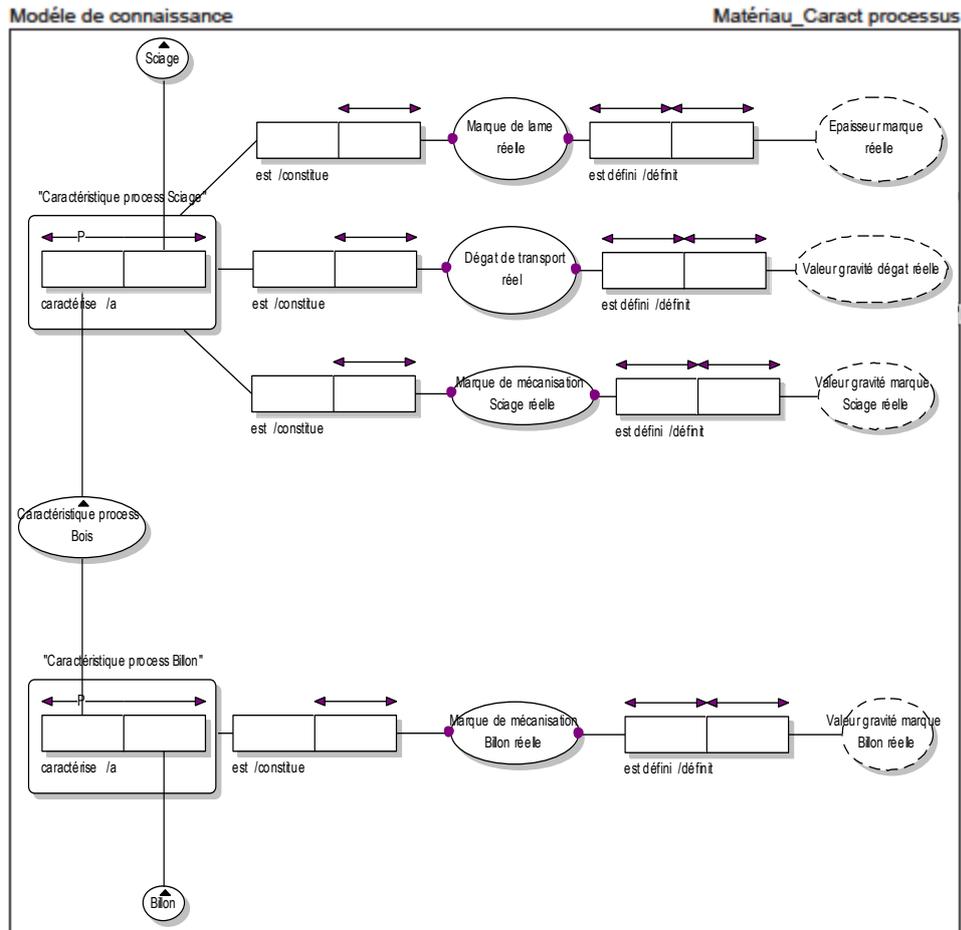


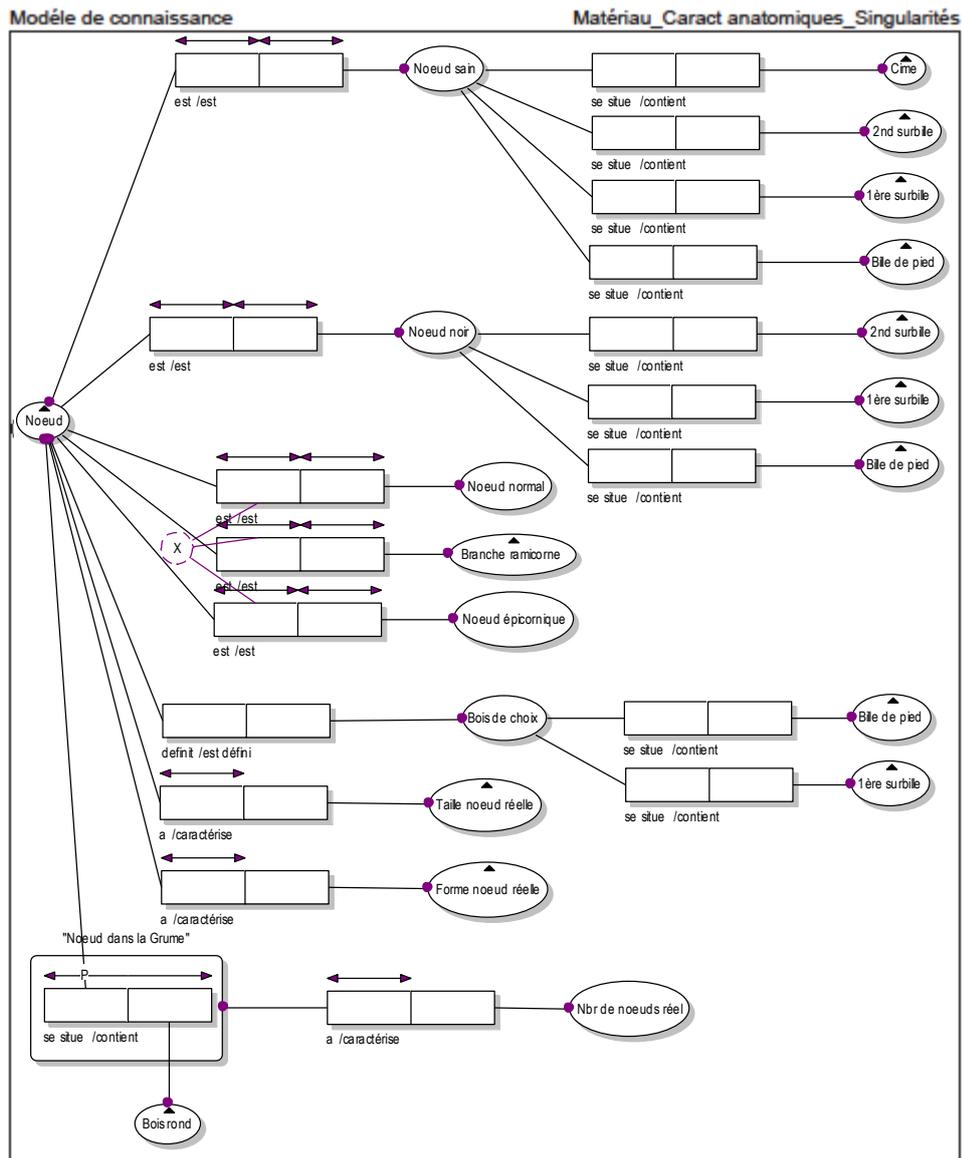
## Annexe 5 : Modèle de connaissance de la matière Bois

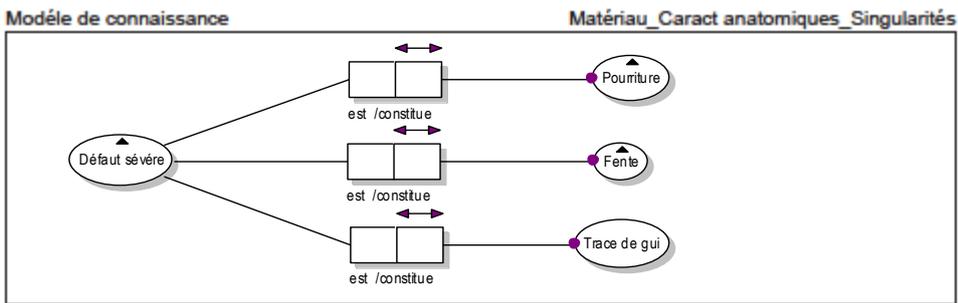
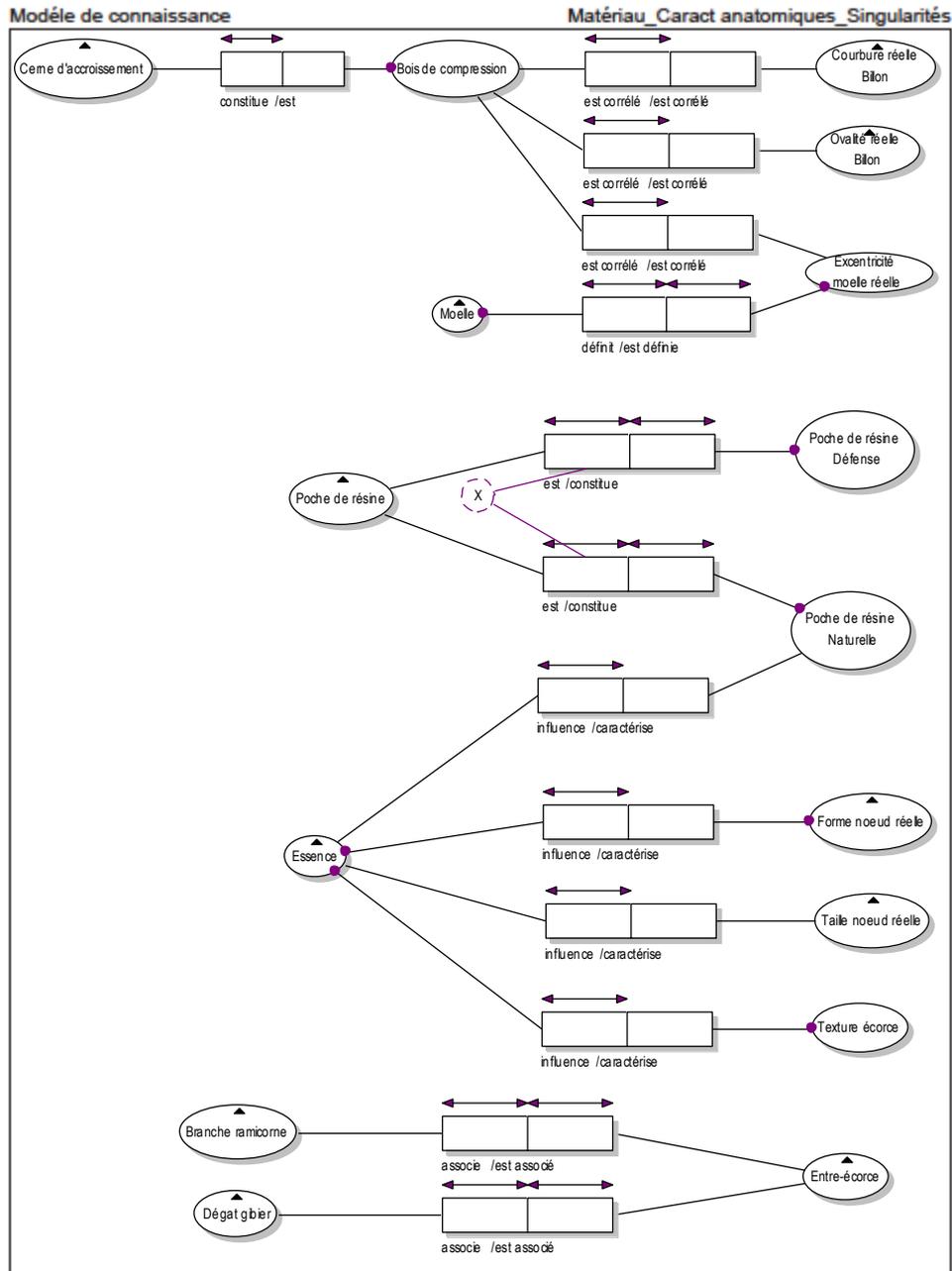


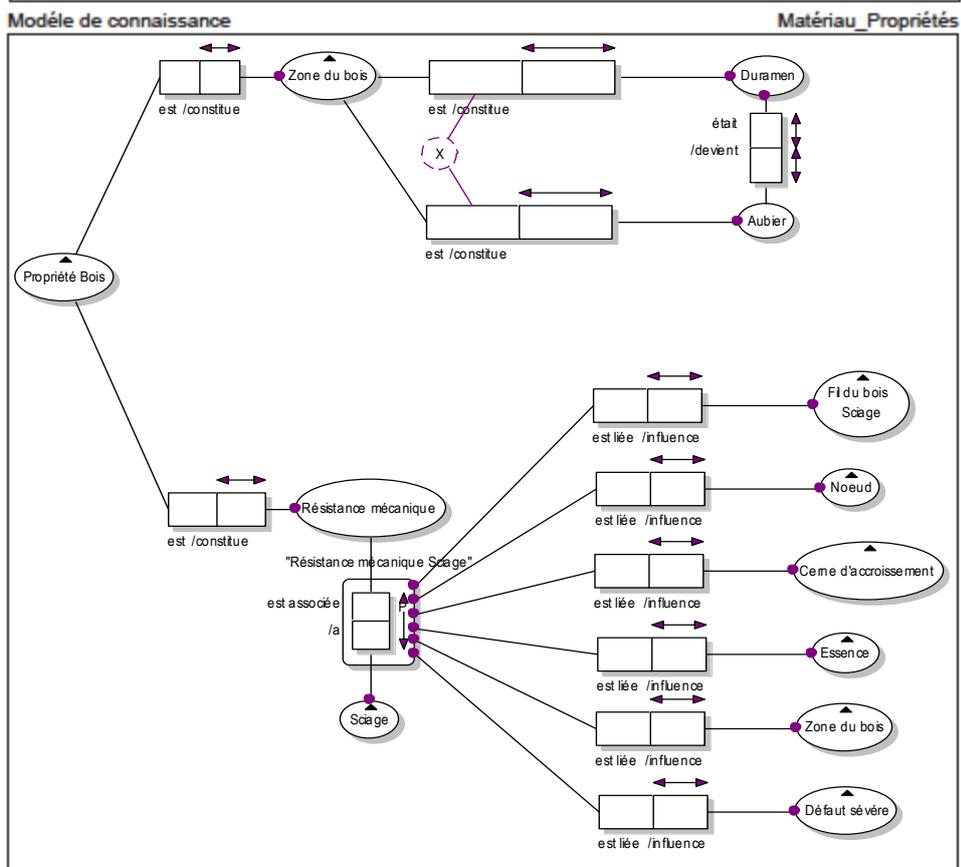
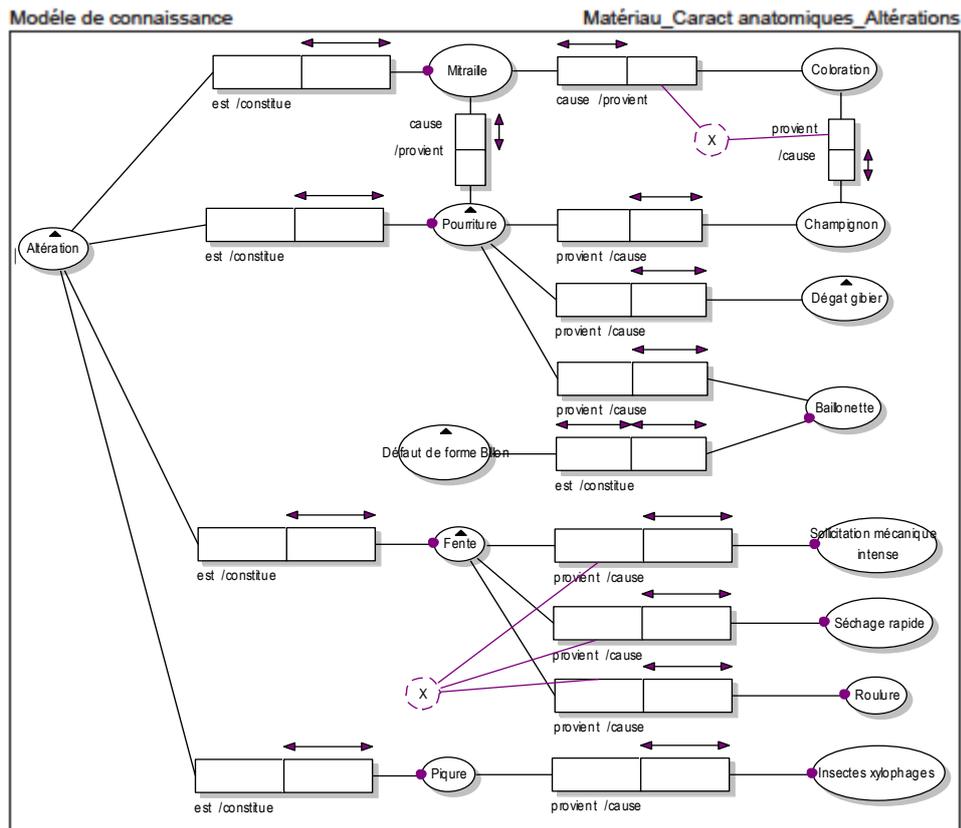












## Annexe 6 : Résultats d'évaluation des seuils de diamètre de nœuds

Essence	Emploi	Schéma	Longueur	Diamètre maximal du nœud noir	Diamètre maximal du nœud sain	
Sapin /Epicéa	Charpente	36*97 2X	3/3.5/4/4.5/5	20	30	
		Industrielle	36*97 3X	3/3.5/4/4.5/5	20	30
			36*97 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	30
			36*112 3X	3/3.5/4/4.5/5	20	30
			36*112 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	30
			36*122 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	34
			36*147 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	38
			36*172 4X	3/3.5/4/4.5/5	22	40
			36*197 4X	3/3.5/4/4.5/5	24	40
			36*197 5X	3/3.5/4/4.5/5	24	40
			36*222 5X	3/3.5/4/4.5/5	24	35
			36*222 6X	3/3.5/4/4.5/5	24	35
			36*247 6X	3/3.5/4/4.5/5	32	-
	Ossature		50*150 3X	3/3.5/4/4.5/5	25	30
			100*100 2XR	3/3.5/4/4.5/5	25	30
Planche de choix		24*100 5X	4	-	26	
		24*114 6X	4	-	30	
		24*143 6X	4	-	30	
		27*305 7X	4	-	40	
		27*305 8X	4	-	45	
		27*305 9X	4	-	45	
Charpente Traditionnelle		81*103 1X	3/3.5/4/4.5/5	7	15	
		103*103 1X	3/3.5/4/4.5/5	7	15	
		105*123 1X	3/3.5/4/4.5/5	7	15	
		39*82 2X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		31*82 3X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		31*102 3X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		31*122 3X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		31*122 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		25*160 5X	3/3.5/4/4.5/5	15	20	
		38*122 2X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		38*122 2X+	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		38*122 3X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		38*122 3X+	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		38*122 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	25	
		50*150 2X	3/3.5/4/4.5/5	30	40	
		50*150 1X+63	3/3.5/4/4.5/5	30	40	
		50*150 3X	3/3.5/4/4.5/5	30	40	
		50*150 2X+63	3/3.5/4/4.5/5	30	40	
	63*150 2X	3/3.5/4/4.5/5	30	40		
	63*150 3X	3/3.5/4/4.5/5	30	40		

---

32*160 5X	3/3.5/4/4.5/5	20	25
63*160 2X	3/3.5/4/4.5/5	35	45
63*160 3X	3/3.5/4/4.5/5	35	45
63*160 3X+	3/3.5/4/4.5/5	35	45
63*160 10XR	3/3.5/4/4.5/5	40	-
63*160 10X+R	3/3.5/4/4.5/5	40	-
63*160 12X	3/3.5/4/4.5/5	40	-
32*175 4X	3/3.5/4/4.5/5	20	25
32*175 5X	3/3.5/4/4.5/5	20	25
63*175 2X	3/3.5/4/4.5/5	30	40
63*175 2X+	3/3.5/4/4.5/5	35	45
63*175 3X	3/3.5/4/4.5/5	35	45
63*175 3X+	3/3.5/4/4.5/5	35	45
63*175 4X	3/3.5/4/4.5/5	45	50
75*194 2X+	3/3.5/4/4.5/5	30	40
75*194 3X	3/3.5/4/4.5/5	30	40
75*194 3X+	3/3.5/4/4.5/5	35	45
75*194 4X	3/3.5/4/4.5/5	35	45
75*194 7X	3/3.5/4/4.5/5	35	45
75*200 4X+	3/3.5/4/4.5/5	45	50
75*225 2X+	3/3.5/4/4.5/5	45	55
75*225 3X	3/3.5/4/4.5/5	45	55
75*225 3X+	3/3.5/4/4.5/5	45	55
75*225 4X	3/3.5/4/4.5/5	45	55
75*225 4X+	3/3.5/4/4.5/5	45	55
75*225 7X	3/3.5/4/4.5/5	45	55
100*100 2X+R	3/3.5/4/4.5/5	30	40
100*100 3X+	3/3.5/4/4.5/5	30	40
100*300 3X	3/3.5/4/4.5/5	45	55

## Annexe 7 : Résultats de détermination des seuils de flache

Groupe	Ø du schéma [mm]	Schéma	Famille Emploi	Triplet flache [mm]
Groupe 1	<b>170</b>	<b>38*122 3X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>2-2-750</b>
	198	63*150 2X	Charpente Tradi	4-4-750
	217	50*150 3X	Charpente Tradi	7-7-750
	223	50*150 2X + 63*150 1X	Charpente Tradi	7-7-750
	235	63*175 2X + 32*175 1X	Charpente Tradi	8-11-750
	245	63*160 3X	Charpente Tradi	7-7-750
	253	63*175 3X	Charpente Tradi	7-7-750
	266	75*194 2X + 38*194 1X	Charpente Tradi	7-7-750
	286	75*225 2X + 38*225 1X	Charpente Tradi	10-10-750
	294	75*194 3X	Charpente Tradi	10-10-750
	321	75*225 3X	Charpente Tradi	10-10-750
	343	75*225 3X + 38*225 1X	Charpente Tradi	10-10-750
	413	100*300 3X	Charpente Choisie	10-10-750
	Groupe 2	144	38*122 2X	Charpente Tradi
155		38*122 2X + 14*122 1X	Charpente Tradi	4-4-750
183		50*150 2X	Charpente Tradi	6-4-750
190		50*150 1X + 63*150 1X	Charpente Tradi	5-5-750
213		63*175 2X	Charpente Tradi	9-6-750
<b>243</b>		<b>63*150 3X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>4-4-750</b>
281		63*175 3X + 32*175 1X	Charpente Tradi	8-11-750
327		75*194 3X + 38*194 1X	Charpente Tradi	10-10-750
Groupe 3	229	32*160 5X	Charpente Tradi	5-5-750
	<b>243</b>	<b>32*175 5X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>5-5-750</b>
	452	75*300 4X + 38*300 1X	Charpente Tradi	10-10-750
	472	63*160 10X + 32*160 1X	Charpente Tradi	10-10-750
Groupe 4	200	38*122 4X	Charpente Tradi	4-4-750
	304	63*175 4X	Charpente Tradi	6-9-750
	359	75*194 4X	Charpente Tradi	10-10-750
	<b>374</b>	<b>75*225 4X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>9-13-750</b>
	392	75*200 4X + 36*200 1X	Charpente Tradi	10-10-750
	404	75*225 4X + 38*225 1X	Charpente Tradi	10-10-750
	424	75*194 5X	Charpente Tradi	10-10-750
	437	75*225 5X	Charpente Tradi	10-10-750

	<b>Ø du schéma [mm]</b>	<b>Schéma</b>	<b>Famille Emploi</b>	<b>Triplet flache [mm]</b>
Groupe 5	<b>281</b>	<b>100*200 2X</b>	<b>Charpente Choisie</b>	<b>7-7-750</b>
	381	100*250 3X	Charpente Choisie	7-7-750
	424	150*300 2X Ref	Charpente Choisie	7-13-750
Groupe 6	146	103*103 1X	Charpente Tradi	4-4-750
	<b>162</b>	<b>105*123 1X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>4-3-750</b>
	150	36*97 3X	Charpente Indus	5-5-750
Groupe 7	<b>131</b>	<b>81*103 1X</b>	<b>Charpente Tradi</b>	<b>4-4-750</b>
	123	36*97 2X	Charpente Indus	5-5-750
Groupe 8	198	36*122 4X	Charpente Indus	5-5-750
	213	36*147 4X	Charpente Indus	5-5-750
	232	36*172 4X	Charpente Indus	5-5-750
	<b>278</b>	<b>36*197 5X</b>	<b>Charpente Indus</b>	<b>5-5-750</b>
	296	36*222 5X	Charpente Indus	5-5-750
	324	36*222 6X	Charpente Indus	5-5-750
	344	36*247 6X	Charpente Indus	5-5-750
	167	24*100 5X	Planche Choix	5-5-750
	217	24*143 6X	Planche Choix	5-5-750
	244	25*175 6X	Planche Choix	5-5-750
	302	40*210 5X	Planche Choix	5-5-750
	341	25*250 8X	Planche Choix	5-5-750
	413	27*305 9X	Planche Choix	5-5-750
	Groupe 9	<b>182</b>	<b>36*97 4X</b>	<b>Charpente Indus</b>
191		36*112 4X	Charpente Indus	5-5-750
251		36*197 4X	Charpente Indus	5-5-750
198		24*114 6X	Planche Choix	5-5-750
262		25*200 6X	Planche Choix	5-5-750
373		27*305 7X	Planche Choix	5-5-750
392		27*305 8X	Planche Choix	5-5-750

Les groupes 10 et 11 sont dédiés aux classes E/S/L/E d'Emploi « Emballage/Coffrage » qui n'ont pas été analysés car les exigences clients sont peu discriminantes.





## Résumé

Ce travail de thèse se place dans le cadre d'une convention université/industrie de type CIFRE entre le CRAN et la scierie Siat-Braun. Le processus de transformation d'une scierie est divisé en deux parties. Tout d'abord, le parc à grumes tronçonne une grume en billons (bois ronds de longueur standard) qui sont triés en lots homogènes en dimensions et qualité. Ensuite, la ligne de sciage transforme ces billons en produits finis (sciages) également triés par dimensions et qualité. Le tri qualitatif des billons ayant une influence directe sur la qualité des produits finis vendus, les scieries visent à optimiser cette étape afin de réduire le taux de déclassement des produits finis. Dans cet objectif, la scierie Siat-Braun a investi dans un nouveau parc à grumes. Les travaux de cette thèse contribuent au développement et à la mise en œuvre de ce système dédié au tri Qualité des billons.

Le premier chapitre de ce mémoire positionne le projet dans la filière Bois puis explicite les contraintes et les besoins d'une scierie en termes de Qualité. Une étude bibliographique met en évidence les différents systèmes d'observation permettant la mesure des caractéristiques du bois dans le but de faire un classement qualité, aussi bien des billons que des produits finis. Le système d'observation choisi par notre partenaire industriel est ensuite présenté.

L'objectif de la seconde partie du mémoire est d'explicitier et de définir la Qualité Billons pour le nouveau système de tri. Cette notion de qualité étant détenue par les opérateurs de tri, nous avons proposé d'extraire, de formaliser et de modéliser cette connaissance en utilisant la méthode NIAM-ORM. Cette méthode a permis d'obtenir deux ontologies structurées : la Qualité Billon et la Qualité Sciage que nous avons exploitées dans le chapitre 3 afin de mettre en avant 50 liens entre les deux qualités généralement appréhendées séparément. Cette étude a également permis d'extraire 34 critères pertinents pour spécifier la Qualité Billon en 9 classes, au regard de la Qualité Sciage. De plus, l'exploitation des modèles de connaissance fournit un paramétrage initial pour la mise en service du système d'observation (critères d'entrée, classes de sortie, seuils de décision). Ce paramétrage est alors éprouvé lors des premières exploitations. Les premiers tests sur les produits finis et l'exploitation des données délivrées par le capteur nous servent à valider et à affiner le paramétrage pour améliorer le classement des billons en fonction de la qualité des produits finis obtenus.

Ces travaux de thèse ont donc permis de capitaliser la connaissance Experte des acteurs du projet puis d'obtenir une configuration initiale pertinente pour la première mise en service du système de tri. Les premières analyses ont permis d'améliorer le paramétrage du système de tri Qualité Billon. Dans un futur proche, nous envisageons d'approfondir l'analyse des données fournies par le système afin d'améliorer la sélection des critères pertinents.

## Mots Clés

Scierie, Bois Ronds, NIAM-ORM, Modélisation de connaissance, Tomographe à rayons X

## Abstract

This study takes place in the frame of a university/industry convention between the CRAN and Siat-Braun sawmill. Sawmill transformation process is divided in two parts. First, the log yard cuts down stem in logs (round timber with standard length) which are sorted out in homogeneous batches by dimensions and quality. Then, the sawing line transforms those logs in end products sorted out by dimensions and quality too. The qualitative sort out of log has a direct impact on sold product quality, so sawmills try to optimize this production step in order to reduce the product downgrading rate. In this goal, Siat-Braun sawmill invested in a new log yard. This study contributes to the development and the commissioning of this system dedicated to log Quality sort out.

The first chapter of this thesis places the project into wood industry then explicates sawmill constraints and needs in term of Quality. A literature review points out different observation systems allowing measurement of wood characteristics in order to make a product and log quality rankings. Observation system chosen by our industrial partner is then presented.

The objective of the second chapter is to clarify and defines Log Quality to the new log yard. This quality notion being held by the sorting operator, we suggested extract, formalize and model this knowledge using NIAM-ORM method. This method allowed obtaining two structured ontologies: the Log Quality and the Product Quality which we used in the chapter three in order to underlying 50 links between both qualities usually tackle separately. This study allowed also extracting 34 relevant criteria to specify Log Quality in 9 classes, regarding Product Quality. In addition, knowledge model analysis gives an initial set up to the first commissioning of the Observation system (input criteria, output classes, decision thresholds). This set up is so proven during system exploitation. The first tests on end products and data processing delivered by the sensor are used to validate and refine the set up to improve the log sort out regarding the obtained product quality.

So, this study allowed capitalizing Expert knowledge of the project actors and then, obtaining a relevant initial configuration of the sort system for the first use. First analysis allowed improving Log Quality sort out system set up. In a near future, we want to go deeper in analysis of data given by the system in order to improve relevant criteria selection.