# Contribution à la réduction des pertes d'informations dans l'industrie du bois

Jeremy Jover

▶ **To cite this version:**

Jeremy Jover. Contribution à la réduction des pertes d'informations dans l'industrie du bois. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Lorraine, 2013. Français. NNT : 2013LORR0239 . tel-01750533v2

**HAL Id: tel-01750533**

**https://theses.hal.science/tel-01750533v2**

Submitted on 22 Dec 2013

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

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

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

FACULTE DES SCIENCES & TECHNOLOGIES

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

**Ecole Doctorale :** IAEM Lorraine

**Département de Formation Doctorale :** Automatique

CRM² Cristallographie, Résonance Magnétique et Modélisations

CRAN CENTRE DE RECHERCHE EN AUTOMATIQUE DE NANCY

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 **Jérémy JOVER**

# CONTRIBUTION A LA REDUCTION DES PERTES D'INFORMATIONS DANS L'INDUSTRIE DU BOIS

***Utilisation de la Résonance Quadrupolaire Nucléaire pour l'identification de marqueurs chimiques et de la virtualisation du processus de production pour la détermination de nomenclatures divergentes.***

Soutenue publiquement le 13 décembre 2013

**Membres du jury :**

| | | |
|---|---|---|
| *Rapporteurs :* | Pr. Valérie Botta-Genoulaz | Professeur, INSA de Lyon, DISP |
| | Dr. Jean-Baptiste d'Espinose de Lacaillerie | Maître de Conférences (HDR), ESPCI, Laboratoire de physique Quantique |
| *Examinateurs :* | Pr. Daniel Canet | Professeur, Université de Lorraine, CRM2 (Directeur de thèse) |
| | Pr. Jonathan Gaudreault | Professeur, Université Laval (Canada), FORAC |
| | Pr. André Thomas | Professeur, Université de Lorraine, CRAN (Directeur de thèse) |
| | Dr. Vincent Bombardier | Maître de Conférences, Université de Lorraine, CRAN (Co-directeur de thèse) |

cnrs

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

***Cristallographie, Résonance Magnétique, Modélisation (CRM²- CNRS UMR 7565)***

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

*« Il faut rendre les choses aussi simples que possible mais pas plus » (A. Einstein)*

# Remerciements

…

# Avant-Propos

Il y a peu, au sein de notre laboratoire (le CRAN), un nouveau concept a été proposé posant comme hypothèse que la matière pourrait être intrinsèquement communicante. La première mise en œuvre de ce paradigme s'est faite grâce aux travaux de thèse de Sylvain Kubler traitant de la dissémination de l'information dans du textile. La présente thèse fait donc l'objet d'une deuxième action de recherche sur ce sujet de la « matière communicante » avec pour objectif de fonctionnaliser le matériau bois.

Donner à la matière des capacités de communication, de stockage ou simplement d'identification est dépendante de la nature du matériau. Ainsi les solutions envisagées dans la première thèse, cherchant à octroyer ces capacités à du textile, ne pouvaient pas être utilisées car elles mettaient en œuvre des technologies de type RFID. Il a donc été nécessaire de trouver des solutions différentes et donc de se rapprocher de domaines qui, de prime abord, sont « loin » du nôtre (automatique/productique). Pour ce faire, nous nous sommes tournés vers des méthodes relevant de la spectroscopie moléculaire. L'étude de ce domaine nous a donc mené à trouver des solutions, présentées dans cette thèse dans le chapitre deux. L'objectif étant de conserver l'information relative à l'origine de la matière. Par ailleurs, nous avons voulu compléter et exploiter cette première partie de notre recherche en contribuant à la résolution d'un problème bien connu des logisticiens, celui du mode de gestion des processus industriels divergents.

Cette thèse comprend donc deux parties bien distinctes et se rattachant à deux domaines scientifiques : la spectroscopie moléculaire et l'automatique/productique. Par le passé, ceux-ci n'ont pas souvent eu de liens directs. Nous montrerons que, une fois mis en relation, ils permettront, à terme, de répondre significativement aux intérêts des industriels et de la recherche. Il peut donc paraître osé de notre part d'avoir tenté de relever ce défi, mais il s'est finalement avéré que les résultats, quoique restant encore très spéculatifs, dépassent ce que nous avions imaginé atteindre et nous ouvrent des axes de recherches bien plus vastes que nous le pensions à l'origine de ce projet.

# SOMMAIRE

**Remerciements** ..... **v**

**Avant-Propos** ..... **vii**

**Sommaire** ..... **ix**

**Introduction** ..... **xv**

**Chapitre 1 : Les enjeux de la maîtrise de l'information dans l'industrie du bois** ..... **- 1 -**

**1.1 Chaîne logistique bois et informations utiles** ..... **- 3 -**

1.1.1 Sylviculture et exploitation forestière ..... - 4 -

1.1.2 Première transformation ..... - 9 -

1.1.3 Seconde transformation ..... - 18 -

1.1.4 Informations utiles dans la chaîne logistique du bois ..... - 19 -

**1.2 Pertes d'informations et la traçabilité dans l'industrie du bois** ..... **- 21 -**

1.2.1 Pertes d'informations et certifications de provenance. ..... - 21 -

1.2.2 La traçabilité et identification produits dans l'industrie du bois ..... - 24 -

1.2.3 Enjeux économiques sous-jacents ..... - 32 -

**1.3 Vers de nouveaux paradigmes.** ..... **- 35 -**

1.3.1 Introduction des paradigmes utilisés. ..... - 35 -

1.3.2 La matière communicante ..... - 36 -

1.3.3 Digitalisation du processus de transformation ..... - 40 -

**Chapitre 2 : Identification par Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN) de marqueurs chimiques introduits dans le bois.** ..... **- 45 -**

**2.1 Contexte d'utilisation de la Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN)** ... **- 47 -**

2.1.1 Justification de l'utilisation de la RQN ..... - 47 -

2.1.2 La Résonance Quadrupolaire Nucléaire ..... - 50 -

2.1.3 Produits, matériels et méthodes ..... - 56 -

**2.2 Etude de faisabilité du marquage dans la masse du bois** ..... **- 71 -**

2.2.1 Les premiers essais de marquage ..... - 72 -

2.2.2 Analyse de l'influence de différents facteurs relatifs aux échantillons. ..... - 73 -

2.2.3 Quantitativité RQN en relation avec le temps de mesure. ..... - 82 -

**2.3 Codage de l'information dans l'industrie du bois** ..... **- 86 -**

2.3.1 Les premiers essais de marquage et de codage de la matière ..... - 86 -

2.3.2 Le marquage dans la masse : limites et compléments ..... - 90 -

**2.4 Conclusions du chapitre** ..... **- 93 -**

**Chapitre 3 : Méthodologie de virtualisation de produits à nomenclature divergente - 95 -**

**3.1 Méthodes de prévision de la production ..... - 97 -**

3.1.1 Numérisation de la matière première ..... - 98 -

3.1.2 L'approche « billon » ..... - 102 -

3.1.3 L'approche « produit » ..... - 104 -

**3.2 Obtention des produits virtuels et caractérisation des singularités ..... - 105 -**

3.2.1 Virtualisation du processus de transformation (sciage) ..... - 105 -

3.2.2 Extraction des singularités du produit virtuel ..... - 111 -

3.2.3 Contexte d'évaluation de la qualité esthétique des Produits Virtuels. ..... - 114 -

**3.3 Calcul de l'impact des singularités sur le produit ..... - 119 -**

3.3.1 Expression des critères d'évaluation ..... - 119 -

3.3.2 Méthodologie pour l'estimation de l'impact. ..... - 121 -

3.3.3 Mise en œuvre de la méthodologie et interprétations des résultats. ..... - 124 -

**3.4 Mesure de la qualité virtuelle des produits. ..... - 128 -**

3.4.1 Critère évaluant le nombre de nœuds ..... - 128 -

3.4.2 Opérateurs de fusion retenus ..... - 128 -

3.4.3 Evaluation du comportement des opérateurs de fusion sur un cas réel. ..... - 130 -

3.4.4 Transposition de la qualité esthétique dans le vocabulaire de l'expert ..... - 134 -

**3.5 Génération de la nomenclature divergente et vérification post processus . - 136 -**

3.5.1 Génération de la nomenclature divergente des produits. ..... - 136 -

3.5.2 Détermination de la qualité esthétique optimale à attribuer. ..... - 139 -

3.5.3 Vérification de la nomenclature virtuelle après le processus de débit. ..... - 143 -

**3.6 À propos de la validation ..... - 144 -**

**3.7 Conclusions du chapitre ..... - 147 -**

**Conclusions générales et perspectives ..... - 149 -**

**Annexes ..... - 155 -**

**A. Processus de transformation du bois ..... - 156 -**

**B. Le logiciel de traitement des signaux RQN ..... - 157 -**

**C. Logiciel de sciage virtuel ..... - 164 -**

**D. Formulaires : Les Indices de Shapley et de Murofushi ..... - 169 -**

**E. Capacités représentées sous la forme de Möbius ..... - 169 -**

**F. Résultat de l'intégrale de Choquet pour la singularité fondue mais de taille importante. ..... - 170 -**

**G. Evaluation du nombre de nœuds pour la qualité. ..... - 171 -**

**H. Cas d'école pour la détermination des qualités optimales ..... - 172 -**

**Bibliographie ..... - 175 -**

**Autres références ..... - 189 -**

**Liste des publications ..... - 191 -**

**Liste des figures ..... - 193 -**

**Liste des tableaux ..... - 199 -**

# Abréviations

| | | |
|---|---|---|
| ADN | : | *Acide Désoxyribonucléique* |
| APICS | : | *American Production and Inventory Control Society* |
| CAB | : | *Code à Barres* |
| CDV | : | *Cycle De Vie* |
| CFAO | : | *Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur* |
| CNDB | : | *Comité National pour le Développement du Bois* |
| CT | : | *Computed Tomography (Tomographie)* |
| CW | : | *Continuous Wave (onde continue)* |
| DT | : | *Dead Time (Temps mort)* |
| ERP | : | *Entreprise Resource Planning* |
| FCBA | : | *Forêt- Cellulose- Bois- Ameublement* |
| FFT | : | *Fast Fourier Transform (transformée de Fourier Rapide)* |
| fid | : | *Free Induction Decay* |
| FSC | : | *Forest Stuart ship Council* |
| HMT | : | *Hexa Méthylène Tétramine* |
| IFN | : | *Inventaire Forestier National* |
| Ikey | : | *The Indisputable Key* |
| IoT | : | *Internet of Things* |
| LB | : | *Line Broadening* |
| LP | : | *Linear Programming* |
| LS | : | *Left Shift (décalage à droite)* |
| LW | : | *Line Width (Largeur à mi-hauteur)* |
| IRM | : | *Imagerie par Résonance Magnétique* |
| MVB | : | *Masse Volumique Basale* |
| $NaNO_2$ | : | *Formule du nitrite de sodium* |
| NIAM | : | *Nijssen Information Analysis Method* |
| NLLS | : | *Non Linear Least Square (les moindres carrés non linéaires)* |
| OWA | : | *Ordered Weight Average (moyenne pondérée ordonnée)* |
| PDP | : | *Programme Directeur de Production* |
| PEFC | : | *Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes* |
| PSF | : | *Point de Saturation des Fibres* |
| PV | : | *Produit Virtuel* |
| RF | : | *Radiofréquence* |
| RFID | : | *Radio Frequency Identification* |
| RMN | : | *Résonance Magnétique Nucléaire* |
| RPE | : | *Résonance Paramagnétique Electronique* |
| RQN | : | *Résonance Quadrupolaire Nucléaire* |
| RX | : | *Rayons-X* |
| SADT | : | *Structured Analysis and Design Technique* |
| S/N | : | *Signal to Noise Ratio (Rapport signal sur bruit)* |
| SysML | : | *Systems Modeling Language* |
| UML | : | *Unified Modeling Language* |
| UV | : | *Ultra-Violet* |
| VM | : | *Virtual Manufacturing* |

# INTRODUCTION

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la réduction des pertes d'informations dans les processus divergents, et en particulier, celui de l'industrie du bois. La gestion de la production et la traçabilité des produits dans ce type de processus ont toujours induit d'importantes contraintes. Deux raisons principales en sont à l'origine: des pertes importantes d'informations tout au long de ces chaînes logistiques et la difficulté, voir l'impossibilité, de prévoir la production au plus juste avant transformation de la matière première. L'industrie du bois n'échappe pas à ces difficultés, entre l'étape d'exploitation des arbres en forêt et celle de la production de sciages. D'une part, l'origine du matériau devient une donnée quasi obligatoire (le fait est que les exploitations illégales du bois augmentent et que l'intérêt mondial pour sauvegarder cette ressource naturelle, trop souvent considérée comme inépuisable, explose). D'autre part, la réduction des « gaspillages industriels», communément présentée aujourd'hui sous le nom de *Lean Manufacturing*, s'introduit peu à peu dans les mentalités des acteurs de cette chaîne logistique. Ainsi, les industries de premières transformations, telles que les scieries, s'attachent à optimiser au mieux leur matière première, mais aussi, à produire des sciages au plus proche des besoins clients afin de limiter leurs stocks. Cependant, force est de constater qu'il est actuellement difficile pour ces entreprises de fonctionner autrement qu'en « production sur stock » en impliquant donc forcément un volume important.

La mise en place de systèmes visant à améliorer ces deux points que sont la traçabilité du matériau et la réduction des gaspillages ne peut se faire sans une connaissance précise et complète du processus de production et sans la capitalisation (ou la sauvegarde) des informations. Le premier chapitre de cette thèse a donc pour objectif d'étudier la chaîne logistique bois afin d'en extraire, à chaque étape du processus, les informations utiles à sa bonne réalisation. Il est important de mettre en avant l'impact de chaque opération de transformation du matériau, ainsi que la globalité du processus, afin de comprendre les manques et les enjeux. En parallèle de cette étude, nous analysons d'une part les solutions déjà préconisées pour améliorer la traçabilité dans le but d'en comprendre le principe de fonctionnement et les limites ; et d'autre part, les gains potentiels en apportant une ou plusieurs solutions viables permettant de réduire les pertes d'informations. Nous mettons donc en évidence deux problèmes majeurs. Tout d'abord, les solutions de traçabilité proposées dans la littérature ne permettent pas de conserver les informations relatives à l'origine du matériau tout au long de son cycle de vie et aucun des systèmes existants ne permet de prévoir

automatiquement la production d'une scierie, lui imposant donc de réaliser une production sur stock.

Ce premier chapitre nous amène donc deux questions qui trouveront une réponse dans les deux chapitres suivants à savoir :

- Comment lier les informations relatives à l'origine de la matière à celle-ci de telle sorte que ce lien soit pérenne?
- Comment améliorer la connaissance *a priori* des produits qui seront fabriqués dans un arbre, avant même que ce dernier ne soit scié, afin de générer, par anticipation, la nomenclature des produits fabriqués?

Au vu de la bibliographie sur les systèmes de traçabilité déjà existants, il a fallu proposer de nouvelles solutions en s'inspirant de paradigmes novateurs.

Pour lier les informations originelles au matériau bois, l'utilisation du paradigme de « matière communicante » est apparue comme une solution pertinente. La solution proposée repose sur le fait que si l'on est capable d'attacher à la matière d'un arbre, dans son intégralité, une marque qui lui soit propre, alors nous serions capables de connaître, tout au long de son cycle de vie, les informations le concernant. Nous proposons donc une approche par marquage chimique du bois et l'utilisation d'une méthode de spectroscopie peu connue mais qui a fait ses preuves, la Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN), pour identifier ce marquage. La proposition faite ici, d'utiliser la RQN, présente un réel défi scientifique car cette méthode est très peu sensible et de nombreuses contraintes sont à prendre en compte pour parvenir à l'identification du marquage. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de montrer la faisabilité de l'identification d'un produit chimique imprégné et recristallisé (condition *sine qua non*) dans un échantillon de bois et dans un deuxième temps, de prouver qu'il est possible de marquer le bois dans la masse avec un assemblage de plusieurs produits chimiques. Cette tâche est l'objectif du Chapitre 2.

Pour améliorer la connaissance *a priori* des débits qui seront issus d'un arbre, nous nous sommes tournés vers le paradigme de *Virtual Manufacturing* dont l'objectif est d'approcher et prévoir une réalité industrielle au travers de la virtualisation de différents éléments du processus. Dans notre cas, le concept sous-jacent consiste à réaliser les mêmes opérations de débit que dans le « monde réel » sur une représentation numérique et fidèle de la matière première : c'est ce que nous nommons le « sciage virtuel ». De cette étape, nous pouvons obtenir une représentation virtuelle exploitable du produit fini permettant de le caractériser. Si la caractérisation est pertinente alors il est possible d'établir la nomenclature des produits

sciés. L'enjeu étant d'obtenir une nomenclature aussi précise que juste sur la base d'une représentation nécessairement incomplète. Il nous a donc fallu déployer des stratégies et des méthodes prenant en compte cette imperfection de l'information pour arriver à caractériser aussi bien que possible les futurs produits finis. Le concept et la méthodologie proposée sont exposés dans le chapitre 3.

Nous concluons cette thèse en exposant un bilan des concepts proposés et des travaux réalisés dont une partie est à inclure dans les travaux du laboratoire relatifs au paradigme de « matière communicante » et le second dans le projet de *Virtual Manufacturing* (ou d'ingénierie numérique). Nous proposons enfin des perspectives vers de potentiels axes de recherches permettant d'asseoir nos travaux.

# CHAPITRE 1 :

# LES ENJEUX DE LA MAITRISE DE L'INFORMATION DANS L'INDUSTRIE DU BOIS

**1.1 Chaîne logistique bois et informations utiles ..... - 3 -**
1.1.1 Sylviculture et exploitation forestière..... - 4 -
1.1.2 Première transformation ..... - 9 -
1.1.3 Seconde transformation ..... - 18 -
1.1.4 Informations utiles dans la chaîne logistique du bois..... - 19 -
**1.2 Pertes d'informations et la traçabilité dans l'industrie du bois ..... - 21 -**
1.2.1 Pertes d'informations et certifications de provenance..... - 21 -
1.2.2 La traçabilité et identification produits dans l'industrie du bois ..... - 24 -
1.2.3 Enjeux économiques sous-jacents ..... - 32 -
**1.3 Vers de nouveaux paradigmes..... - 35 -**
1.3.1 Introduction des paradigmes utilisés. ..... - 35 -
1.3.2 La matière communicante ..... - 36 -
1.3.3 Digitalisation du processus de transformation..... - 40 -

Le bois est un matériau naturel qui traverse les siècles et qui présente des atouts indéniables sur le plan énergétique, écologique et économique. Le bois inspire l'innovation dans tous les secteurs et s'avère sans conteste l'une des ressources les plus importantes de la planète, une ressource quasi infinie et la plus riche de traditions. La production de bois a longtemps été et demeure encore comme le principal objectif de la gestion des forêts. Les attentes et les moyens déployés pour cette production/gestion ont fortement évolué avec le temps, complexifiant bien souvent les processus industriels. Ce premier chapitre offre un aperçu de cette complexité grandissante qui mêle différents aspects tels que l'hétérogénéité du bois, le climat, le lieu de pousse, etc. Chaque morceau de bois se veut unique, avec des caractéristiques bien distinctes, rendant d'autant plus complexe la gestion relative à leurs informations (informations incertaines, incomplètes, imprécises). Cette complexité se répercute et s'amplifie tout au long du cycle de vie du bois face aux différents acteurs (scieurs, architectes, utilisateurs,...).

En ce sens, la traçabilité des bois est devenue essentielle, voire obligatoire (p. ex. face au respect de certaines lois) pour une gestion efficace de leur cycle de vie, tant d'un point de vue économique qu'écologique. Bien que des solutions existent pour assurer cette traçabilité, elles ne sont pas totalement efficaces, et ce, particulièrement dans le secteur du bois. Pour pallier ce manque d'efficacité, deux visions/paradigmes complémentaires sont présentés dans ce chapitre, à savoir une solution de marquage intrinsèque au matériau bois (marquage dans la

masse) et une méthode d'anticipation des sciages dans les processus divergents (sciage virtuel). Dans le premier cas, la matière est marquée dans sa globalité et peut être reconnue quelque soit la taille du morceau concerné (arbre, planche ou copeau). Dans le deuxième cas, il est possible de connaitre par avance les produits qui seront faits dans un arbre avant même que ce dernier ne soit scié en planche.

La section 1.1 présente les différents métiers de l'industrie du bois ainsi que les processus de transformation auxquels ils appartiennent. La section 1.2 examine ces différents processus et identifie les instants clés où des pertes d'informations (partielles ou totales) se produisent. Les techniques de traçabilité mises en œuvre pour réduire, voire supprimer ces pertes sont également étudiées. Enfin, la section 1.3 présente les deux paradigmes mentionnés précédemment, dont la combinaison vise à améliorer la traçabilité du bois comparativement aux techniques traditionnelles.

## 1.1 Chaîne logistique bois et informations utiles

Trois métiers composent principalement cette industrie comme illustré sur la figure 1 :

- La sylviculture et l'exploitation forestière : en charge de la gestion et de l'entretien des forêts (p. ex. prises de décisions quant aux arbres à abattre),
- Les industries de première transformation : en charge de la transformation des arbres/grumes en billons (tronçons de grume) puis en produits semi-finis (p. ex. planches). Les principaux acteurs sont les scieries, parqueteries, etc.
- Les industries de seconde transformation : en charge de la transformation des produits semi finis en produits finis (p. ex. charpentes, caisses d'emballage, meubles).

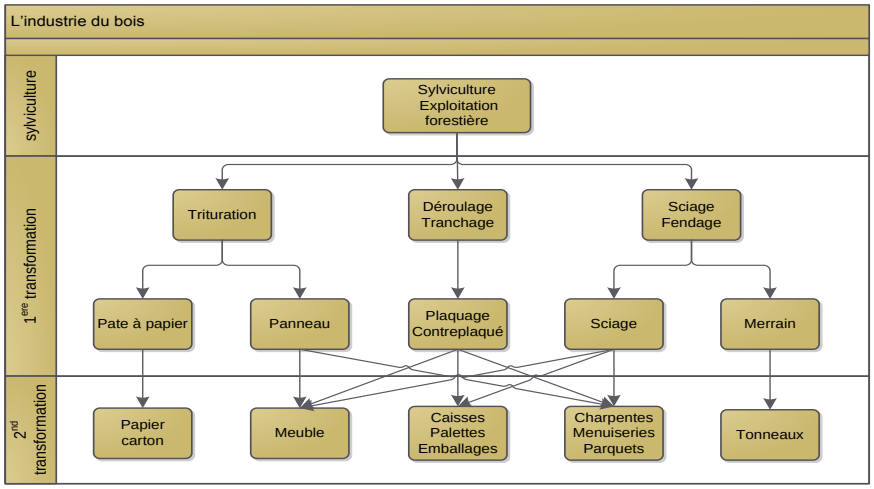



*Figure 1 : La filière bois (Source : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche)*

Afin de mieux comprendre les pertes d'informations dans l'industrie du bois, nous présentons ces métiers ainsi que les processus de production qui y sont rattachés et l'influence de leur gestion dans la suite du processus.

### 1.1.1 Sylviculture et exploitation forestière

Ces deux premiers métiers ont pour objectif de produire des arbres pour la première transformation en gérant leur croissance, leur entretien et leur abattage. Ils sont la base de l'industrie du bois.

**Sylviculture**

La sylviculture est définie par [Schutz, 1990] comme:

> *« L'art d'appliquer des techniques fondées sur des bases scientifiques biologiques dans le dessein de contrôler le développement naturel des forêts et de guider leur évolution dans la direction voulue, au bon moment et de façon rationnelle et finalement d'en conserver les forces productrices naturelles. »*

Cette définition accentue le fait que la sylviculture vise à entretenir (élagage, abattage, gestion des parcelles, ..) et favoriser le développement des parcelles de forêts afin de produire les arbres attendus par la première transformation, tout en assurant leur conservation et leur régénération. La forme et la taille des arbres produits ont un impact considérable sur le volume et la qualité de la production des entreprises de première transformation. En effet, la répartition des sciages dans une grume telle qu'illustrée dans la figure 2 nous montre que les bois de plus forte valeur (p. ex. bois de menuiserie) sont situés dans la partie basse de l'arbre (moins de singularités, plus gros diamètre), alors que les pièces de plus faible valeur (p. ex. traverses) se situent dans la partie haute (sur-bille). Il est donc nécessaire pour les sylviculteurs de produire des arbres dont les troncs soient les plus droits possible afin de faciliter l'optimisation des grumes et de réduire les pertes matières.

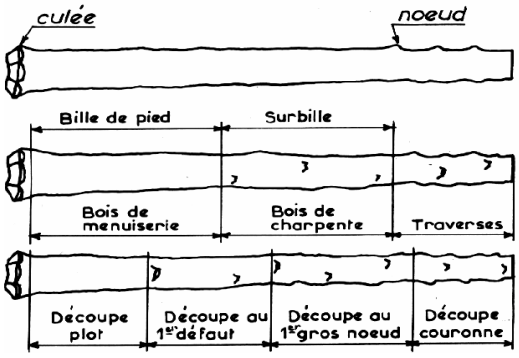



*Figure 2 : Optimisation du tronçonnage des grumes*

La production de ces arbres est un processus long car la durée de pousse est au minimum de 30 à 50 ans pour les essences françaises. Avec de tels délais, les parcelles doivent être entretenues et valorisées afin d'obtenir des arbres dont le potentiel de vente[1] est maximum. Le processus est également complexe car beaucoup de facteurs influent sur la structure finale de l'arbre : le régime de forêt (futaie, taillis sous futaie, taillis) [Bastien, 1998], la géographie du lieu de pousse [Bastien, 1998], le climat [Pichler & Oberhuber, 2003] [Lo & al, 2010]. La figure 3 donne l'exemple de l'impact du vent sur la croissance d'un arbre, on constate qu'effectivement sa morphologie est modifiée.

*Figure 3 : Impact du vent sur un pin*

Le processus de production des arbres est initialement peu complexe: on débute avec une parcelle nue sur laquelle des arbres sont plantés. Suivant cette parcelle, un type de régime y est attribué (futaie, taillis sous futaie, taillis,…). Chaque année, la parcelle est entretenue (p. ex. opérations d'élagage, abattage des arbres gênants ou morts) pour obtenir une croissance efficiente des arbres. Lorsque l'arbre atteint des dimensions acceptables pour la première transformation, il est alors marqué pour l'abattage. La parcelle est ensuite mise en vente et une société d'exploitation forestière sera en charge d'abattre les arbres marqués. La vente est la dernière action de la sylviculture.

C'est la gestion dans le temps qui complexifie le processus puisqu'il faut entretenir la forêt de telle sorte qu'elle produise des arbres en accord avec les besoins des acteurs de la chaîne logistique, sachant de plus, que chaque action a un impact sur les caractéristiques de l'arbre. Des recherches montrent que l'on peut établir un lien entre la pousse de l'arbre et sa future structure [Bastien, 2005]. Des modèles mathématiques ainsi que des simulateurs sont utilisés pour déterminer *a priori* les caractéristiques des bois [Houllier & al, 1995]. Beaucoup de singularités apparaissent durant la croissance des arbres, en voici quelques exemples:

[1] Par potentiel de vente nous entendons des produits proches de besoins clients.

- les nœuds proviennent de la pousse des branches sur l'arbre. L'élagage des arbres a pour but de limiter leur taille afin que, une fois la grume débitée, le nœud soit le plus petit et le plus sain possible,
- les poches de résines sont créées par l'arbre en réaction à toutes sortes d'attaques (humaine, animale, entomologique ou végétale). Ces poches se créent pour endiguer l'attaque et la perte de sève. Elles ont la même fonction que la coagulation chez l'être humain.
- le bois de réaction est une réponse lorsque l'arbre pousse dans une pente. La partie du tronc qui est en amont (ou en aval pour les gymnospermes[2]) aura des caractéristiques mécaniques et physiques qui seront différentes de celles du bois sain. Ce bois est appelé bois de tension (ou de compression). Dans une certaine proportion, il peut devenir un défaut important pour l'utilisateur final [Jourez, 1997].

Ainsi, le rôle de la sylviculture est de faire en sorte que, quel que soit le relief, le climat, la faune, la flore, les caractéristiques des arbres soient celles attendues par les acteurs concernés de la première transformation. Les sylviculteurs utilisent généralement la dendrométrie afin d'évaluer ces caractéristiques. La dendrométrie est l'étude des arbres et/ou des peuplements par la prise de mesures de différentes caractéristiques quantifiables. Sur la base de ces données et de différents calculs (p. ex. moyenne, écart-type sur ces valeurs), il est possible d'avoir une estimation de l'état de la forêt, des volumes de bois utilisables en biomasse ou en bois d'œuvre [Sajdak & Velazquez-Marti, 2012], etc. Les valeurs importantes relevées sont :

- sur l'arbre: la taille, l'aire basale (diamètre à 1.30m), la taille du houppier, la hauteur de la première branche morte, l'âge, la forme de l'arbre, le volume estimé, le taux de qualité [Reid & al, 2001],
- sur la parcelle : le taux de couverture, le type de peuplement, la topographie du terrain, le type d'essences [IFN, 2012].

Ces deux listes ne sont pas exhaustives mais l'essentiel est de s'apercevoir qu'il est possible de qualifier et quantifier les arbres et les parcelles de manière à obtenir un « diagnostic » complet du potentiel de production. L'Inventaire Forestier National (IFN) a pour but d'établir ces diagnostics sur des parcelles de forêt pour connaitre les ressources et disponibilités forestières. Cet inventaire peut servir à établir le type de production qu'il est

[2] Définition Larousse : Plante à graines (spermaphyte), dont les ovules, puis les graines, sont portés sur des écailles plus ou moins ouvertes et non dans un fruit clos. (Les *gymnospermes* constituent un sous-embranchement, presque uniquement formé, de nos jours, par les conifères : pins, cyprès, genévriers, etc.)

possible de réaliser dans une parcelle et donc, théoriquement, d'orienter cette parcelle vers une entreprise particulière pour la première transformation.

Pour la sylviculture, beaucoup d'informations peuvent donc être extraites une fois cet inventaire réalisé. Nous proposons un modèle qui les met en relation avec le processus de production de la sylviculture, permettant ainsi de visualiser à quels instants ces informations ont été extraites et à quels moments elles sont utilisées dans l'industrie du bois (cf. figure 4). Ces informations sont utiles dans la suite du processus de transformation pour améliorer l'utilisation de la matière première et connaître, en tout point du cycle de vie du bois, quelle est son origine.

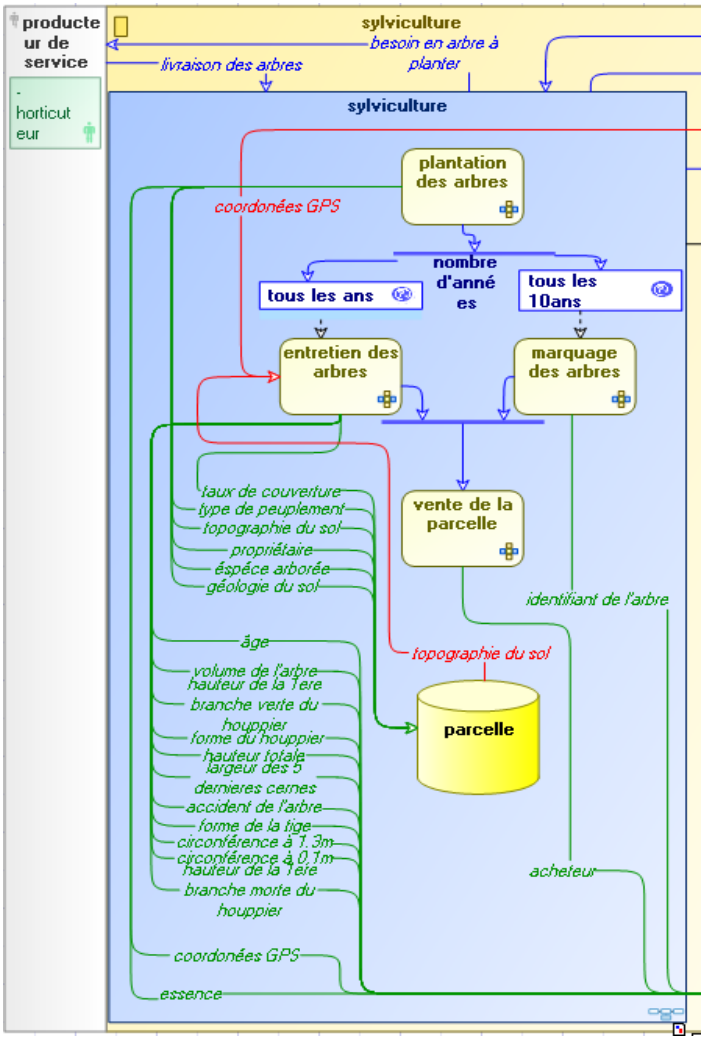



*Figure 4 : Processus métier de la sylviculture mis en relation avec les informations capitalisables dans ce métier*

### Exploitation forestière

Une fois la parcelle vendue à une entreprise de la première transformation, c'est à l'exploitant forestier d'abattre les arbres et de les acheminer jusqu'à l'entreprise. Cinq étapes

composent ce processus. Tout d'abord, les arbres marqués par les sylviculteurs sont abattus. Les techniques d'abattage ont beaucoup évolué au cours des dernières décennies. A titre d'exemple, aujourd'hui, les abatteuses mécaniques sont employées dans l'exploitation forestière de résineux du fait des diamètres peu importants et sensiblement constants des arbres. Cette mécanisation permet d'abattre de plus gros volumes de bois et d'améliorer la sécurité des opérateurs (p. ex. protégés des chutes d'arbres). Toutefois, de telles abatteuses se révèlent peu utiles dans des terrains escarpés. Par conséquent, l'abattage manuel reste encore d'actualité, p. ex. pour des feuillus de gros diamètres qui possèdent un houppier important. Suivant le type d'abattage employé, des défauts peuvent apparaitre sur les grumes (fentes, impacts, trace de mécanisation,…). Une fois l'arbre abattu, il est ébranché et tronçonné en grume. Parfois, pour des raisons pratiques ou économiques (transport, terrain,…), les grumes sont re-tronçonnées sur place en billons ; opération qui est généralement réalisée dans les scieries. Finalement, les grumes ou billons sont débardés et stockés sur une aire en bord de route, avant d'être acheminés vers la première transformation. Au travers de ces diverses étapes, des informations sont requises pour réaliser les différentes opérations, et d'autres sont extraites à des fins de gestion du cycle de vie des bois.

Beaucoup d'informations sont extraites au moment de l'abattage et correspondent, en grande partie, aux informations extraites lors des relevés dendrométriques. Cependant, ces informations qui caractérisent plus les grumes que les arbres sont, d'une part, utiles aux exploitants forestiers (p. ex. pour des raisons de limite de poids lors du transport), et d'autre part, aux scieurs car elles caractérisent chaque grume ou billon, lui permettant ainsi de vérifier s'ils correspondent bien à ses exigences. Le processus métier de l'exploitant forestier, ainsi que les informations nécessaires et extraites (relatives à ce métier) sont décrits dans la figure 5.

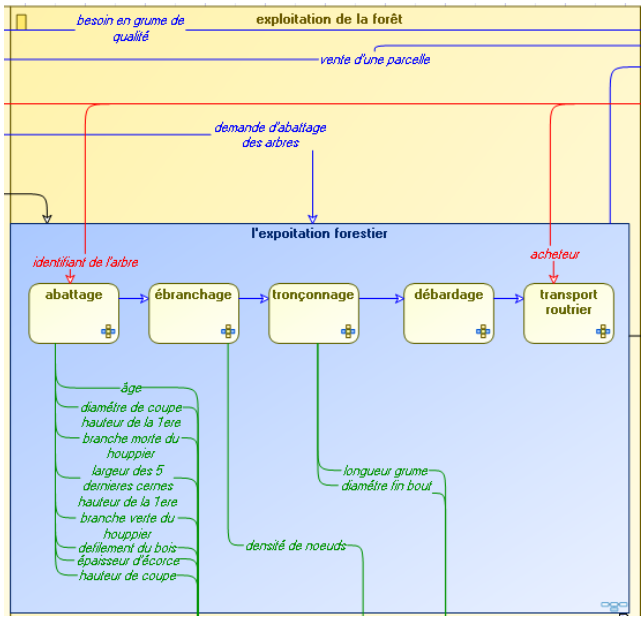



*Figure 5 : Processus métier de l'exploitation forestière mise en relation avec les informations capitalisables dans ce métier*

Ces deux métiers ont donc un rôle important dans la chaîne logistique car ils doivent produire des arbres au plus proche des besoins de la première transformation malgré les contraintes environnementales, géographiques et intrinsèques à l'arbre. Bon nombre des informations extraites et utilisées dans ces métiers sont relatives à l'arbre et à son origine.

### 1.1.2 Première transformation

Ce métier qui s'occupe de transformer les grumes en produits « semi finis » se compose de trois types d'entreprises : les entreprises de trituration, de déroulage/tranchage et de sciage. La trituration consiste à broyer le bois pour en obtenir des copeaux, des plaquettes ou de la pâte à papier. Ces entreprises sont structurées selon des processus continus. Les entreprises de tranchage/déroulage produisent des « feuilles » de bois. Enfin les entreprises de débit scient les grumes pour obtenir des produits de sections parallélépipédiques (sciages) servant d'éléments de structure (charpente, palette) et/ou de *design* (meuble, bardage,…).

Dans cet ouvrage de thèse, seul le dernier processus (sciage) est considéré. Les méthodes développées dans ce travail pour l'identification se basent sur la biométrie, et en particulier sur l'aspect esthétique des produits semi finis.

Cette section présente donc le processus de transformation du bois afin d'identifier les informations nécessaires pour chaque opération. Ensuite, ce qui est couramment nommé « qualité du bois », est décrit afin de mettre en avant les difficultés inhérentes à cette

caractéristique du produit fini. Enfin, les processus divergents sont analysés afin d'en rechercher les problèmes existants.

**Processus de production des scieries**

Trois grandes étapes composent le processus de débit du bois, à savoir :

- l'étape d'optimisation de la découpe de la grume permettant d'obtenir le meilleur rendement matière tout en répondant à la demande,
- l'étape de débit des grumes en respectant le plan de débit. Cette étape donne lieu à des produits semi-finis,
- l'étape de traitement des produits semi-finis pour leur conférer, par exemple, des propriétés de résistance aux attaques extérieures.

Les différentes tâches de ce processus sont détaillées dans la figure 7, en considérant un cadre idéal (pas de contrainte financière). Pour chaque étape, nous identifions les informations requises en entrée des opérations, ainsi que celles pouvant être extraites en sortie des opérations. Cette étude se base sur les travaux de [Martin, 1993] dont le processus de transformation du bois en scierie a été modélisé sur la base de la méthode SADT.

Les grumes sont acheminées de la forêt à la scierie pour y être entreposées (stock de matière première). A ce point de la chaîne logistique, les informations extraites en forêt sont généralement transférées au scieur afin qu'il ait connaissance de l'origine des grumes, ainsi que de leurs caractéristiques. Dans certains cas, c'est à cette étape que les grumes sont écorcées afin d'avoir une estimation du volume de bois réellement utilisable. Cette estimation se base sur l'opération de cubage qui a deux finalités : mesurer les caractéristiques des grumes et contribuer à optimiser leur débit. La mesure des caractéristiques permet de confronter les valeurs à celles fournies par la sylviculture, mais également d'avoir des données fiables pour l'étape d'optimisation des découpes. Les valeurs sont obtenues à l'aide de deux types de capteurs :

- capteur à vision externe : il permet d'identifier la forme et le volume externe des grumes. Cette technologie est de plus en plus mise en œuvre dans les scieries car l'optimisation dépend principalement des informations afférentes à l'enveloppe des grumes, sans oublier que ce type d'information entre dans l'estimation des prix d'achat de la matière première,
- capteur à vision interne : il permet d'obtenir une vision interne de la grume (singularités, cernes, ...). Le tomographe à rayon X est l'un des plus utilisés dans cette catégorie de scanner (la section 3.1. présente plus en détail cette technologie).

Toutefois, cette technologie est nettement moins utilisée car l'investissement initial est considérable et bien souvent non supportable par les entreprises[3].

L'ensemble de ces systèmes fournit un flux abondant d'informations (géométrie de la grume, singularités présentent dans le bois, etc.). Aujourd'hui, l'optimisation est encore souvent basée sur l'expertise de l'opérateur qui, à partir des informations observables en surface de la grume, décide quels sont les plans de débit les plus appropriés pour satisfaire les besoins clients. L'arrivée récente des systèmes de vision interne améliore considérablement la caractérisation des grumes [Hodges & al., 1990]. Les caractéristiques internes (p. ex. singularités, couleurs, défauts) jouent également un rôle prépondérant dans l'optimisation, non plus manuelle mais automatique, de découpe. Toutefois notons que certains défauts n'apparaissent que dans les étapes avales de la chaîne logistique (p. ex. les fentes ou les traces d'outils).

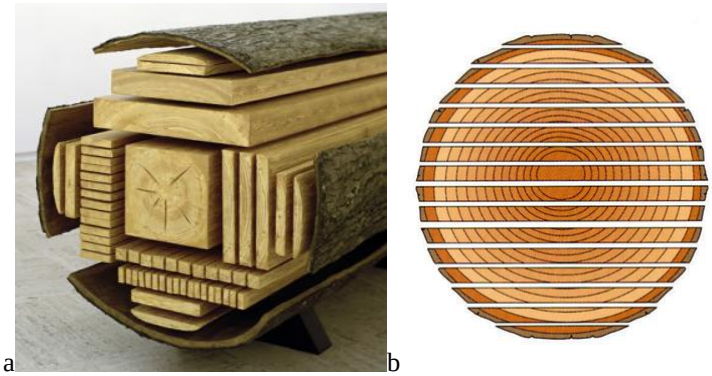
Une fois le plan de débit défini, les grumes sont tronçonnées en billons de longueurs standards (souvent multiples de 0,5 m), lesquels sont triés suivant leur longueur, diamètre fin bout, plan de débit, essence et qualité. Le nombre de classes est par conséquent important si toutes ces caractéristiques sont prises en compte. Les scieurs réalisent donc des classements plus simples, regroupant des lots de billons dont certaines caractéristiques sont similaires. La qualité du billon s'exprime comme le potentiel d'un billon pour produire une certaine classe de produits. Par exemple, un billon qui ne possède aucun nœud apparent, ni de singularités, se voit attribuer une qualité excellente car il a le potentiel de produire des pièces de très bonnes qualités. Ainsi le scieur est capable d'estimer sa production en fonction des classes de billons. Cette donnée est importante dans la suite du processus car il faut être en mesure d'identifier les billons à scier pour assurer les commandes en temps et en heure.

Vient ensuite le sciage de tête. Dans cette étape, les billons sont sciés dans le sens de la longueur (délignage) suivant le plan de débit. Le scieur de tête a besoin de connaitre, d'une part, les besoins du client, et d'autre part, les stocks de billons suivant leur classe. Sur la base de ces informations, il sélectionne le lot de billons à scier afin d'avoir l'adéquation entre les attentes des clients et le potentiel de production des billons. On parle de potentiel de production car l'estimation faite durant l'étape d'optimisation est bien souvent différente. Pour une scierie sans système de vision interne, le taux d'erreur commis par l'opérateur est compris entre 15 et 20% de la production. Le sciage de tête a généralement des cadences de

[3] Des détecteurs de métaux sont parfois utilisés pour détecter la mitraille dans les grumes qui, dans certaines régions, peut s'avérer importante (périodes de guerre ou de chasse).

production inférieures à la production globale (il s'agit d'un « goulot ») et doit donc être chargé, en toute logique, à 100%.

Deux types de systèmes de production existent dans les scieries. Lorsqu'elles produisent des sciages qui ont une forte diversité, une forte valeur ajoutée et que la demande est très variable (p. ex. une pièce de forte section et de grande longueur), les scieurs utilisent des lignes qui permettent une flexibilité de la production mais dont les cadences sont faibles car il est nécessaire de manipuler la grume entre chaque passe (p. ex. des scies à ruban) [FCBA, 2001]. Notons que dans ce cas, les schémas de sciage comportent une grande variété de pièces comme le montre la figure 6a. Ce type de production est communément appelé « ligne ruban ».



a b

*Figure 6: Exemple de plans de coupe (schémas de sciage)*
*a) un schéma de sciage réalisable avec une ligne ruban*
*b) un schéma de sciage réalisable en canter (sciage en plot)*

Lorsque la production s'oriente vers des sciages standards, les scieries utilisent des lignes offrant une productivité plus importante mais une flexibilité plus faible, appelées « lignes canter » [FCBA, 2001]. Pour améliorer les cadences, les machines scient chaque grume en une seule passe suivant un plan de débit simple (p. ex. les produits sont tous parallèles entre eux) comme le montre la Figure 6(b). Sur ce type de lignes utilisant souvent des machines multi-lames, les réglages sont bien plus longs et imposent donc des tailles de lots importantes. Ce mode de production nécessite d'avoir une matière première homogène. Les scies circulaires sont beaucoup utilisées car les vitesses d'usinage sont, comparativement aux scies à ruban, bien plus élevées. Cependant quel que soit le mode de fonctionnement, l'essence est un paramètre important car elle impacte le réglage de la vitesse de coupe: plus l'essence est « dure », plus la vitesse de coupe doit être réduite. Des défauts non prévisibles comme des fentes, des traces d'usinage (traces d'outil, chauffe, contre fil) peuvent survenir selon la capacité de l'entreprise à réaliser des produits de qualité.

Les produits subissent ensuite des traitements par imprégnation de produits chimiques afin d'améliorer leur résistance aux attaques biologiques. Deux classements sont à prendre en compte. D'une part, la classe d'emploi qui permet d'identifier les types d'utilisation du bois en fonction, par exemple, du lieu (intérieur/extérieur) ou de l'exposition à l'eau[4], et d'autre part, les essences qui possèdent naturellement une classe de résistance aux attaques biologiques. Il est dès lors nécessaire de trouver un accord entre la classe d'utilisation et la classe de résistance naturelle. Ainsi, un bois sans résistance naturelle ne sera pas utilisé sans traitement dans un contexte où l'humidité est fortement présente et où le risque d'attaques biologiques est important.

La dernière opération est le séchage. Le bois subit un séchage progressif afin qu'il perde une grande partie de l'eau qui le compose. Suivant ses dimensions, son essence, son humidité initiale/finale, etc., un plan de séchage lui est attribué afin d'éviter toute dégradation du bois (p. ex. une montée trop rapide en température peut engendrer des fentes importantes), tout en répondant aux exigences définies concernant le taux d'humidité visé. Bien que les scieries scandinaves et allemandes aient compris l'intérêt de cette étape depuis longtemps, il a fallu du temps pour qu'elle s'impose dans les scieries françaises. Un rapport FIBRA[5] relatant une enquête sur la question du séchage du bois dans la région Rhône-Alpes auprès des scieurs, montre que cette opération n'est pas mise en œuvre principalement pour trois raisons : i) les scieurs n'ont pas la demande, ii) l'investissement dans le matériel est trop important et iii) le rapport entre le coût du séchage et le prix de vente du produit n'est pas rentable pour eux. Pourtant le séchage offre deux principaux avantages : le premier est que le bois sec est plus léger, facilitant ainsi son transport et réduisant les coûts, et le second est que le client reçoit un produit qu'il pourra transformer sans délai avec des variations dimensionnelles proches de celles rencontrées sur le lieu de pose.

Au final, les produits sont stockés par type (longueur, section, qualité). Le stock est d'une importance cruciale pour le scieur puisqu'il permet de livrer les produits désirés dans des délais courts (production sur stock). Une forte quantité de stock, alliée à une mauvaise gestion et connaissance de celui-ci, créent une immobilisation et des pertes importantes pour une scierie. En sortie de scierie, les informations fournies aux clients correspondent aux caractéristiques des produits (dimensions, origines, etc.). Dans l'idéal, le scieur doit être en mesure de fournir la provenance (parcelle exacte de pousse) des pièces de bois afin de savoir

[4] Il faut savoir que les attaques biologiques se développent plus facilement dans des conditions où l'humidité du bois est importante.

[5] Interprofession de la région Rhône-Alpes

si elles proviennent d'une forêt gérée durablement ou, par exemple, d'un abattage illégal. Or, ces informations sont disponibles en début du processus mais souvent difficiles à conserver au fil des opérations. Nous décrivons l'ensemble de ce processus ainsi que les informations entrantes et sortantes pour chaque opération dans la figure 7. On constate que la quantité d'informations extraites est grande et est relative à la morphologie des grumes ou des produits.

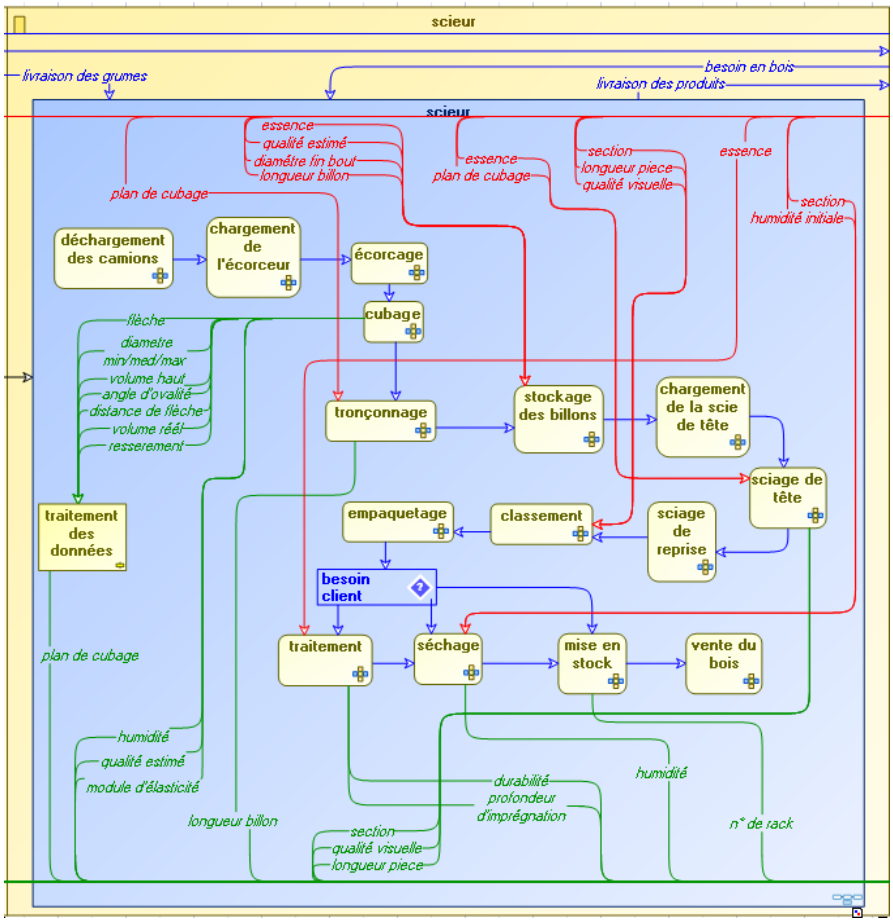



*Figure 7: Processus métier des scieries mis en relation avec les informations capitalisables*

### Qualité du bois

La qualité est une donnée importante pour le scieur et le client. Elle estime soit la classe de résistance mécanique, soit la classe esthétique d'un produit. Comme il a été mentionné auparavant, la qualité est définie suivant différents critères observables sur le produit (singularités, coloration, déformations,…). Pour expliquer d'où provient la notion de « qualité » du bois, intéressons-nous d'abord à l'apparition des singularités.

Le bois est un matériau vivant qui doit constamment s'adapter à son environnement. Bien que les sylviculteurs soient en charge de produire des arbres de bonne qualité (gestion du terrain, etc.), un arbre *agit* en grande partie seul. Il s'alimente en sève élaborée qui résulte de

la transformation de la sève brute (eau + minéraux) par la photosynthèse [Trouy-Triboulot & Triboulot, 2012]. Plus un arbre a de feuilles et de lumière, plus il grandit facilement. En conséquence, un arbre isolé a tendance à produire beaucoup de branches (donc beaucoup de feuilles) sur toute la hauteur du tronc afin d'avoir un maximum de surface exposée à la lumière. De plus, un tel arbre pousse essentiellement en largeur afin de supporter la charge et la taille des branches. A l'opposé, un arbre dans une forêt dense pousse essentiellement en hauteur pour rechercher la lumière et présente des branches dans la partie haute de son tronc. La présence de nœuds (attestant de la présence d'une branche) sur ces deux types d'arbres est par conséquent différente : dans un cas, ils sont gros sur l'ensemble du tronc (arbre isolé), alors que dans l'autre cas ils sont petits et dans la partie haute de l'arbre.

Nous avons donné l'exemple des nœuds mais d'autres singularités apparaissent en réaction à des événements extérieurs. Nous définissons deux types de singularités : i) réaction du bois à des variations de l'environnement extérieur (p. ex. nœuds, des poches de résines, bois de compression, …), ii) traces résultantes d'une attaque d'un agent extérieur (p. ex. traces de gui, attaques d'insectes ou fongiques,…). Les singularités, bien que naturelles, sont des artéfacts dans le bois qui altèrent les caractéristiques tant visuelles que mécaniques du bois, générant ainsi des points de sensibilités.

[Bombardier & al, 2008] décrivent le bois comme un matériau « intrinsèquement » hétérogène et flou. Il est difficile, de par la gradualité entre le bois sain et les singularités, d'associer des valeurs précises à certaines caractéristiques du bois et des singularités (diamètre, circularité, etc.), comme le montre, par exemple, la figure 8a. Dans de telles conditions, la mesure ne peut être qu'une approximation. Cette graduation de valeurs intervient pour d'autres caractéristiques comme la densité ou la texture.

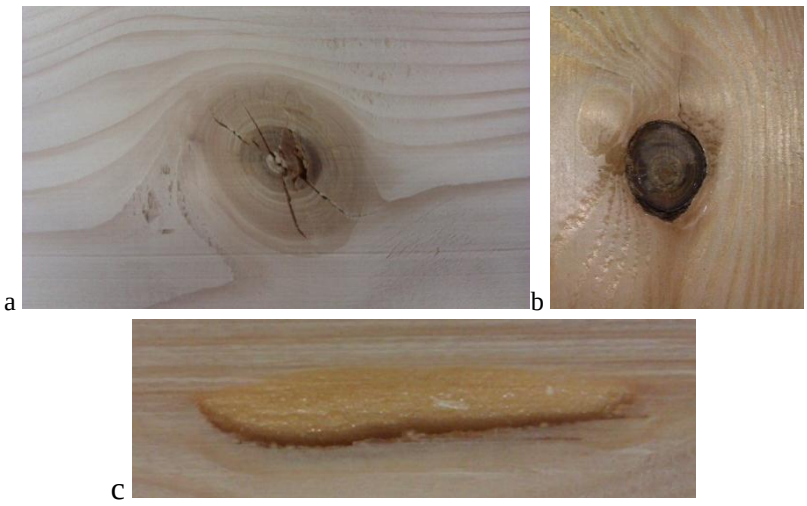



*Figure 8: Trois singularités : (a) nœud sain, (b) nœud noir et (c) poche de résine.*

Il existe deux types de classement des bois, appelés aussi « qualité »:

- le classement mécanique : il définit la classe de résistance mécanique d'un produit en donnant la valeur du module d'élasticité du bois. Il existe trois classes : ST1(C30[6]), ST2 (C24) et ST3(C18) auxquelles est attaché un type d'utilisation du bois, à savoir respectivement, charpente lamellé collé, charpente industrielle, charpente traditionnelle. La résistance des pièces est dépendante de la présence des singularités. Un nœud est une variation dans les caractéristiques du bois sain et donc un point de rupture potentiel. Le phénomène est encore plus important avec les autres singularités car, contrairement aux nœuds, celles-ci ne sont pas du bois et peuvent donc être assimilées à des espaces vides. En conséquence, la classe mécanique est définie en fonction des singularités : pour exprimer les choses simplement, plus il y en a, moins la résistance est importante.
- le classement d'aspect (que nous aurons tendance à appeler qualité visuelle) définit l'homogénéité visuelle d'un produit. Cette dernière est fonction des singularités présentes en surface du bois. D'un point de vue esthétique, une singularité rompt par sa couleur, sa forme, sa taille, sa texture et son contraste l'homogénéité du bois sain. Le classement d'aspect définit donc plusieurs classes qui permettent de savoir si le produit est très marqué par les singularités ou non.

Deux normes définissent respectivement le classement d'aspect et le classement mécanique sur les caractéristiques des singularités : les normes NF-EN 1611 [NF-EN 1611, 1999] et NF-B-52 001[NF-B 52001, 1998]. Ces deux normes définissent les limites de chaque caractéristique, pour chaque type de singularités, déterminant ainsi la classe d'appartenance du bois. Ces limites sont nettes et ne prennent pas en compte l'ensemble des caractéristiques des singularités existantes. Elles sont définies de manière à être facilement utilisables par l'humain (mesures simples basées sur des nombres comme la taille d'une singularité). Toutefois, comme nous l'avons souligné auparavant, il s'agit bien souvent d'informations imprécises et imparfaites, et non d'informations exactes. De plus, les normes ont été établies sur des produits de sections importantes[7] et sont donc très difficilement applicables pour des produits de faibles sections. En outre, les cadences des flux de produits (généralement très rapides dans les scieries) rendent l'opération de mesure exacte difficile pour l'œil humain,

[6] Le C donne le type de module mesuré (ici le module d'élasticité) et le 30 la valeur en MPa du module.

[7] En millimètre pour la norme NF B 52-001: 40*100, 50*150, 65*200. Pas de données pour la norme EN NF 1611 mais les scieurs sont d'accord pour dire que la norme n'est applicable que sur des sections de tailles moyennes, 50*50 au minimum.

ajoutant une nouvelle part d'incertitude et d'imprécision. En grande partie pour ces raisons, les normes sont jugées restrictives par les scieurs et tendent à devenir obsolètes. Le développement des techniques de vision (caméras couleurs, etc.) permettent toutefois d'automatiser le processus et d'effectuer des mesures plus précises de ces différents paramètres.

Pour finir sur la qualité du bois, cette donnée étant importante pour le client final, intimement liée aux caractéristiques de la matière première et inchangeable une fois le produit scié, il parait essentiel de pouvoir la prévoir avant que la matière première ne soit débitée. Or il est évident que sans une vision interne de la matière cette caractéristique est difficilement évaluable avec précision uniquement sur la base des caractéristiques extérieures de la grume (comme cela est fait actuellement).

**Processus divergents**

Les processus divergents sont définis comme une succession d'étapes qui, à partir d'une unité de matière première, créent plusieurs unités de produits finis [Cox & Blackstone, 2008]. Ces processus sont souvent présents dans les premières étapes des chaînes de transformation, au moment de l'extraction et du traitement de la matière première (pétrole, alimentaire, acier,…). Les entreprises de première transformation du bois possèdent ce type de processus : à partir d'une grume plusieurs produits finis sont sciés. Les processus divergents ont toujours posé des problèmes en gestion de production [Vollmann & al, 1997]. La méconnaissance de la matière première ne permet pas d'avoir une gestion de la production efficace [Francoo & Rutten, 1994]. Les tailles de lots sont souvent importantes (en lien avec les temps de réglage) et imposent donc une grande inertie et peu de réactivité [Flapper & al, 2002]. Du fait de la méconnaissance interne de la matière première, beaucoup de sous-produits sont créés, augmentant ainsi les stocks et rendant la gestion de production des processus divergents très incertaine et poussant à une stratégie de production sur stock. Les processus divergents sont donc souvent qualifiés de « boites noires » : seules les entrées et sorties sont connues. Dans les scieries, l'effet « boite noire » provient en grande partie du fait que les caractéristiques internes de la matière première sont incertaines, voire inconnues, complexifiant la production des scieries, mais conduisant également à l'incapacité à déterminer, avant la mise en production, la nomenclature des produits (nomenclature en « V »).

Pour répondre aux besoins des clients dans des délais courts, il serait donc nécessaire de la générer avant le sciage effectif et donc de produire par anticipation afin d'avoir les produits de qualité, en quantités convenables, au bon moment, tout en conservant un stock de sécurité

évitant toute rupture. En se basant sur leurs connaissances, les experts au poste d'optimisation estiment la production qui sera faite dans une grume. Dans [Buehlmann & Edward Thomas, 2002] les auteurs montrent dans leur recherche que l'erreur humaine dans le processus de caractérisation des produits en sortie de scierie a un impact non négligeable, estimant à 20% les produits qui sont sur ou sous classés en sortie de processus. Il en ressort que 72% des décisions prises par les opérateurs sont erronées. Ce sont donc ces erreurs qui participent à l'effet « boite noire » et obligent les scieurs à produire en « *make to stock* ».

### 1.1.3 Seconde transformation

C'est la dernière transformation du bois avant le client final. Les entreprises de ce métier se chargent de transformer et d'assembler les produits semi-finis (sciages, plaquages,…) en produits finis (charpentes, meubles, palettes, …).

**Processus de production**

Toutes ces entreprises ont des processus convergents (c.-à-d. qu'à partir de plusieurs objets, ils produisent un produit fini – nomenclatures en « A »-). Ce type de processus est courant dans les industries car il est souvent nécessaire d'assembler des produits pour obtenir des biens de consommation. Dans l'industrie du bois, la diversité des entreprises, des produits et des besoins clients est telle que nous proposons un processus global qui est décrit dans la figure 9.

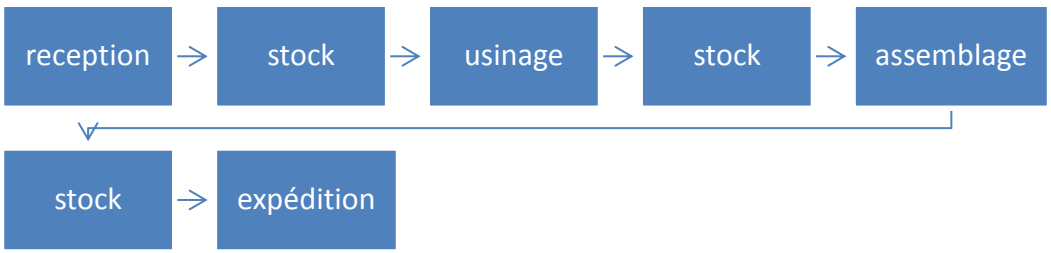



*Figure 9: Processus de production générique de la seconde transformation*

Dans cette partie de la chaîne logistique, les informations utiles à la transformation de la matière première sont morpho-dimensionnelles ou relatives aux caractéristiques de la matière et doivent intégrer les besoins des clients. Les informations qui ont pu être enregistrées préalablement (sylviculture et première transformation) sont transmises à la seconde transformation. Les informations dimensionnelles, qualitatives et de traçabilité sont transmises en premier car elles permettent de vérifier les commandes, mais encore une fois, il est souvent complexe de les garder pertinentes et disponibles tout au long du processus à cause de leur nombre et de la dissociation des flux physiques et informationnels. Les

différentes pièces de matières premières sont ensuite usinées, ce qui modifie inéluctablement leurs caractéristiques dimensionnelles et qualitatives. Ces pièces sont alors assemblées et subissent de nouvelles opérations jusqu'à l'obtention du produit final.

Dans cette partie de la chaîne logistique, les informations à conserver correspondent à l'agrégation de toutes les informations collectées et générées durant le processus de transformation, ainsi que celles qui sont modifiées.

**Qualité des produits dans les entreprises de seconde transformation**

La qualité du produit peut se mesurer par sa capacité à satisfaire les exigences du client [Cox & Blackstone, 2008] [ISO 9000]. Il est donc du ressort de l'entreprise de seconde transformation de satisfaire ces exigences qui peuvent être déclinées en trois catégories :

- dimensionnelle : le produit final doit avoir les dimensions désirées par le client. L'entreprise doit choisir judicieusement sa matière première pour limiter les pertes de matière (rebus) et financières (acheter le juste nécessaire). Si l'on admet que cette opération est correctement effectuée par l'entreprise, il est du devoir du scieur de faire livrer les produits adéquats,
- mécanique : le produit doit résister à une charge spécifiée. La résistance dépend des caractéristiques internes du produit et, par conséquent, des pièces qui le constituent. Il est du devoir du scieur de fournir une matière première dont les caractéristiques mécaniques sont équivalentes ou supérieures aux exigences des clients,
- esthétique : le produit doit satisfaire les choix esthétiques du client. A titre d'exemple, un fabriquant de meuble souhaitera des produits sans aucune singularité, alors qu'un charpentier se souciera plus de la résistance mécanique que de l'esthétique. La tâche revient une nouvelle fois au scieur de produire des pièces adéquates.

Il peut être noté que les acteurs de la seconde transformation n'ont pas de réelles capacités d'action sur les caractéristiques mécaniques et esthétiques du bois. Le scieur est finalement le chainon le plus important de la chaîne logistique et, par conséquent, doit optimiser au mieux ses opérations. Ces constatations nous poussent à focaliser notre étude sur les deux premières parties de la chaîne logistique (c.-à-d. exploitation forestière et scieur) et de ne pas étudier les entreprises de seconde transformation.

### 1.1.4 Informations utiles dans la chaîne logistique du bois

La chaîne logistique du bois peut se représenter sous la forme d'un diamant : de l'arbre sur pied à la sortie de scierie, le processus est « divergent », alors que de la sortie de scierie au

client final le processus est « convergent » comme le montre la figure 10. La partie divergente présente beaucoup de contraintes du fait de l'effet boite noire dans les processus divergents dont nous avons parlé [Vollmann & al, 1997]. La partie convergente est, quant à elle, similaire à beaucoup de processus existants dans le domaine de la gestion de production et de traçabilité.

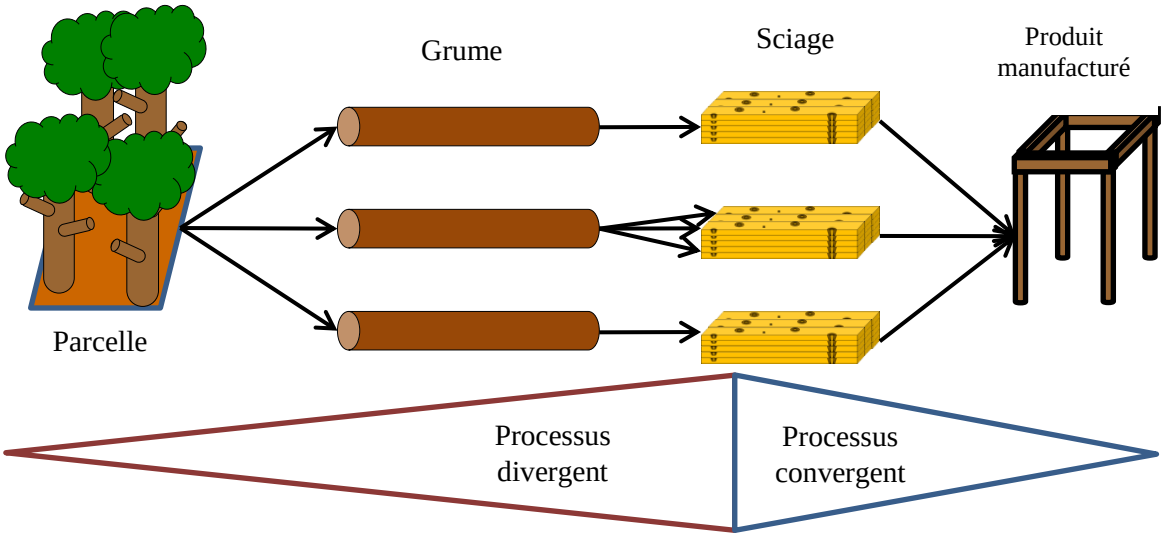



*Figure 10: Schématisation du processus de transformation du bois*

Afin d'avoir une idée globale des informations qui sont récupérées et utilisées dans la chaîne logistique bois, nous avons représenté dans l'annexe A l'ensemble du processus, les différentes informations qui en sont extraites et utilisées, en offrant ainsi une vision globale et complète. Deux grandes familles d'informations ressortent de cette étude:

- les informations « biométriques»: ce sont toutes les informations qu'il est possible de mesurer à partir du produit : dimensionnelles, mécaniques, physiques, chimiques, esthétiques. Il est intéressant de conserver de telles informations pour améliorer la gestion de la production et de les utiliser comme identifiant naturel,
- les informations « originelles » : ces informations renseignent sur la provenance et l'histoire du produit. Contrairement aux informations biométriques, elles ne sont pas mesurables et se perdent donc facilement tout au long du processus. Il est par conséquent très important de mettre en œuvre une stratégie de traçabilité efficace et adaptée.

Nous mettons particulièrement l'accent sur les pertes d'informations qui se produisent dans cette partie divergente du processus, le contexte dans lequel elles sont perdues, leurs importances et leurs particularités. Nous étudions ensuite les stratégies actuelles mises en place pour synchroniser au mieux le flux physique et le flux d'informations dans la chaîne de

transformation du bois, leurs points forts, points faibles, ce qui nous permet de décliner les problématiques scientifiques et techniques à adresser à l'avenir.

## 1.2 Pertes d'informations et la traçabilité dans l'industrie du bois

Maintenant que la chaîne logistique de l'industrie du bois est modélisée avec les informations utiles qui en sont extraites, il est possible de comprendre comment elles sont perdues, à quels instants et quelles sont les solutions déjà mises en œuvre pour les conserver. Dans cette partie, nous étudions donc les pertes d'informations et leur nature. Ensuite, les solutions d'identification sont étudiées afin de comprendre quelles en sont les limites. Afin d'appuyer cette étude, les enjeux existants relatifs à la conservation de l'information sont finalement étudiés.

### 1.2.1 Pertes d'informations et certifications de provenance.

Le projet « the Indisputable key » (www.indisputablekey.com) est un projet européen qui a cherché à améliorer la traçabilité dans la chaîne logistique du bois. La figure 11 issue de [Ginet & Golja, 2007] montre l'accumulation des informations avec et sans stratégie de traçabilité des produits. Cette figure montre pour chaque étape du processus qu'une grande partie des informations est collectée, mais qu'elle est immédiatement perdue à la sortie des étapes si aucune stratégie de traçabilité n'est mise en place.

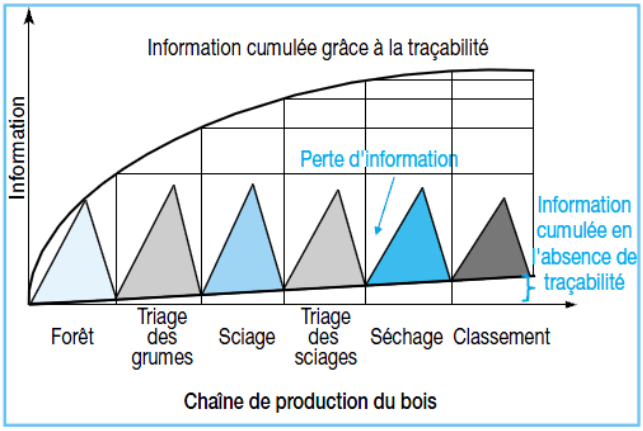



*Figure 11 : Informations cumulables pour un produit dans l'industrie du bois avec et sans traçabilité*

**Nature des informations**

Si nous faisons le parallèle entre la figure 11 et le schéma de l'annexe A, nous constatons que les pertes d'informations se situent au niveau des stocks (transports et stockages des grumes, stockages des billons, stockages des produits semi-finis). Les stocks sont des « fossés » pour le passage de l'information. Lorsqu'un produit entre en stock, il est

mélangé avec des produits de caractéristiques similaires. Si le produit n'est pas identifiable de manière individuelle, les informations spécifiques à ce produit seront dès lors perdues [Vollman, 1997]. L'étude de la courbe d'accumulation des informations dans la figure 11 obtenue en considérant une traçabilité totale, montre que l'étape de la forêt génère la majorité des informations (environ 60%). Ces informations sont relatives à l'origine de l'arbre (parcelle, exposition, événements subits,…) et, la perte de ce type d'informations est irréversible. Les cas d'application montrent malheureusement que ces informations sont rapidement perdues car le transport et le mélange des grumes en entrée des scieries, créent ce « fossé » et bloquent le passage de l'information. Au fur et à mesure du processus les informations se font de plus en plus rares comme l'illustre la courbe dans la figure 11 qui tend vers une valeur limite. Les données accumulées peuvent toutefois évoluer, bien que la courbe ne le fasse pas expressément ressortir. Cependant, ces informations étant d'ordre biométrique, cette perte n'est pas irréversible (des mesures peuvent être réalisées à tout instant).

L'éclatement de la nomenclature impacte considérablement la perte des informations dans l'industrie du bois, et en particulier les informations originelles. En effet, une grume est débitée en un certain nombre de produits dont il est nécessaire de capitaliser les informations biométriques ou originelle. Les informations relatives à l'origine de la grume doivent être transférées et liées au produit fini d'une manière ou d'une autre. Pour ce faire il est nécessaire de connaître l'éventuel lien de parenté entre les produits générés (et donc leur identité respective) au moment du transfert de l'information, ce qui n'est pas simple sans système de traçabilité. Une grume existe physiquement tant qu'elle n'est pas complètement sciée mais n'est plus identifiable après le premier trait de scie (du fait du manque d'information). A l'inverse, un produit existe physiquement dès le premier trait de scie mais n'est identifiable qu'à partir du moment où il est complétement usiné. Cette vision est représentée dans la figure 12 sous les noms d'existence et identification physique. L'identification simultanée n'est donc pas possible et le lien de parenté est « perdu ». Si l'on veut connaître l'identité des deux en même temps, soit il est nécessaire de conserver l'identité de la grume après le sciage (figure 12, identification pour le transfert des informations), soit il faut connaitre celle du produit avant sciage (figure 12, identification optimale). Cette deuxième solution est bien plus avantageuse car le lien est établi avant la disparition physique de la grume et peut donc être réalisé de manière sûre.

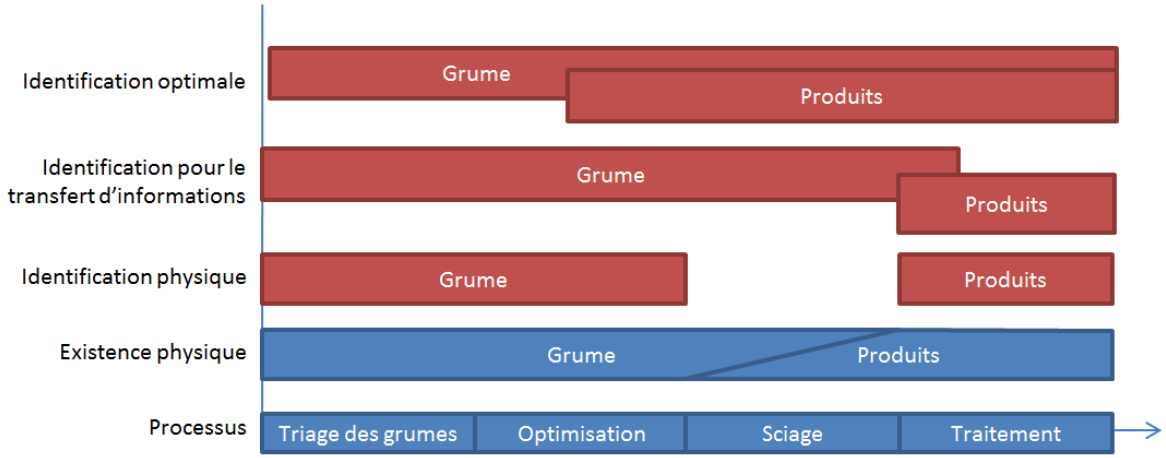



*Figure 12 : Mise en évidence des liens existant entre les produits physiques et leur identification. Chaque rectangle représente une existence (physique en bleu, informatique en rouge) d'un objet.*

Le défi lié à la conservation des informations relatives aux produits individuels nous amène à deux questions majeures :

- comment lier les informations originelles de la grume aux produits finis, de manière fiable et pérenne ?
- comment réaliser un recouvrement des identités avant la création du produit?

### Certifications PEFC et FSC

Dans l'industrie du bois, deux certifications majeures proposent des stratégies pour la conservation des informations originelles. Il s'agit des certifications PEFC (*Programme for the Endorsement of Forest Certification*) et FSC (*Forest Stewardship Council*)[8]. Elles étudient toutes deux la gestion durable des forêts et de la chaîne de transformation du bois. La mise en place de ces certifications nécessite des points de contrôle tout au long de la chaîne logistique afin de s'assurer de la qualité du produit et d'en conserver ses informations originelles, mais également celles concernant ce qu'il aura pu subir comme transformation dans le processus. Pour qu'un produit soit certifié, cela nécessite que l'ensemble de la chaîne de production le soit. Bien souvent, la complexité de la chaîne ne permet pas de connaitre précisément les informations originelles. Prenons l'exemple de la certification PEFC. Afin qu'une scierie soit certifiée, elle doit respecter un ensemble de règles dictées dans [PEFC, 2010], dont deux d'entre elles sont : i) les objets certifiés et non certifiés doivent être séparés, ii) si cela n'est pas le cas, l'entreprise peut réaliser des lots mais en garantissant au minimum 70% de produits certifiés. Ces deux règles montrent que la conservation des informations est

[8] PEFC concernait à l'origine les forêts européennes et nord-américaines et FSC le reste du monde.

primordiale pour permettre au scieur de certifier ses produits et, par conséquent, d'assurer une valeur ajoutée à ses produits. L'identification des produits lors des périodes de stockage et de transport est donc, en ce sens, primordiale. La prochaine section étudie les méthodes d'identification déjà déployées dans l'industrie du bois.

### 1.2.2 Traçabilité et identification produits dans l'industrie du bois

Beaucoup de solutions ont déjà été proposées pour suivre les grumes, les billons ou les produits. Après avoir défini la traçabilité, une bibliographie des différentes solutions existantes est présentée en séparant les méthodes de marquages et de celles dites « biométriques ».

**Définition.**

La traçabilité est définie par la norme ISO 8402 comme « *l'aptitude à retrouver l'historique, la mise en œuvre ou l'emplacement de ce qui est examiné* » et elle précise, dans un nota : « *dans le cas d'un produit, elle peut être liée à l'origine des matériaux et composants, l'historique de réalisation, la distribution et l'emplacement du produit après livraison* ». [ISO 8402]. La traçabilité est utile à plusieurs niveaux:

- La sureté : elle permet de connaitre l'origine des marchandises et d'éviter les produits d'origine inconnue.
- La qualité : elle permet de prouver la conformité des produits,
- Le juridique/éthique : elle est une forme de preuve utilisable dans un contexte de conflit (contestation ou autre),
- Le progrès/coût : elle est de plus en plus utilisée pour l'étude et l'amélioration des cycles de vie des produits, que ce soit du point de vue financier ou de celui de l'innovation [Botta-Genoulaz, 2005]

[Dupuy, 2004] rappelle qu'il existe différentes stratégies de traçabilité suivant l'utilisation désirée, comme il l'illustre au travers de la figure 13 dans l'industrie alimentaire (processus aussi divergent). Cette figure peut toutefois être rapportée à tout type d'industrie.

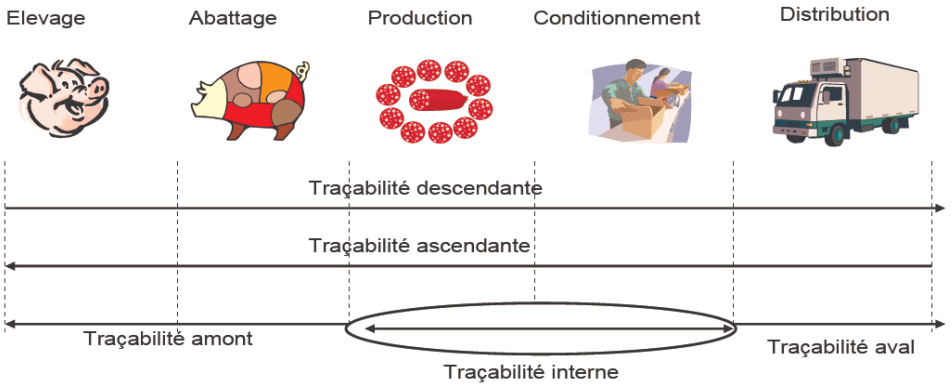



*Figure 13 : Les différents types de traçabilité [Dupuy, 2004]*

La traçabilité ascendante est la capacité, en tous points de la chaîne d'approvisionnement, de retrouver l'origine et les caractéristiques d'un produit à partir d'un ou plusieurs critères donnés. Elle sert notamment à trouver la cause d'un problème qualité [GENCOD, 2001]. La traçabilité descendante est la capacité, en tous points de la chaîne d'approvisionnement, de retrouver la localisation d'un produit à partir d'un ou plusieurs critères donnés. Elle sert notamment en cas de rappel et de retrait de produits [GENCOD, 2001]. L'industrie du bois a mis longtemps à introduire les concepts de gestion, d'amélioration de la production et de traçabilité. Maness a démontré tardivement l'intérêt des cartes de contrôle dans la gestion de la qualité des produits semi-finis [Maness, 1993]. Les mentalités ont évolué au fil du temps, et la traçabilité est devenue un aspect obligatoire, tant du point de vue juridique que pour la survie de cette industrie. Trois classes d'usages relatives à la traçabilité peuvent être définies au vu de la littérature :

- Dans [Dykstra & al, 2002], les auteurs expliquent que la traçabilité permettrait de réduire les exploitations illégales de bois. C'est le principal objectif visé par les certifications citées précédemment (PEFC et FSC).
- Dans [Ginet & Golja, 2007], les auteurs montrent que la traçabilité permet d'améliorer l'utilisation qui est faite du bois.
- Dans [Chiorescu & Grönlund, 2004], les auteurs prouvent que les zones « floues » du cycle de vie du bois, principalement causées par les pertes d'informations, peuvent être en partie évitées.

Ces dernières années ont vu naître de nombreux projets sur le thème de la traçabilité dans l'industrie du bois. Il y a tout d'abord eu le projet européen *Lineset* qui visait deux principaux aspects. Le premier est de «rationaliser l'exploitation des informations de production » [Nicosia, 2002], c'est-à-dire de mettre en place un système automatisé capable d'assurer la traçabilité de la forêt au client final. La principale difficulté rencontrée est la

multiplication des produits à identifier du fait de la nomenclature divergente. L'explosion du nombre de produits implique de trouver des solutions peu couteuses d'identification et de faire en sorte que chaque produit individuel soit identifié malgré les caractéristiques des opérations (cadences élevées,…). Le deuxième objectif est de « qualifier et concevoir des dispositifs de mesure et de traitement d'information adaptés ». Deux axes de recherche sont mis en avant : i) celui de concevoir un code porteur d'informations qui résiste aux conditions d'exploitations (gèle, boue, eau, manutention, …), ii) celui de transmettre les informations entre systèmes d'informations (p. ex. bases de données) tout au long du cycle de vie du bois. Le projet *Lineset* propose comme porteur d'informations l'utilisation des radiofréquences et en particulier les technologies RFID.

Nous avons déjà cité le projet « The Indisputable Key » (2007 – 2009) [Ikey, 2009], qui a intégré l'idée d'une traçabilité écologique. L'objectif était le « développement d'une méthodologie et de technologies associées pour améliorer l'utilisation du matériau bois, tout en minimisant les impacts environnementaux » [Pischeda, 2007]. Au final, ce projet a permis [Pischeda, 2007]:

- d'améliorer la prédiction des propriétés du bois par rapport à l'existant,
- d'appréhender les possibilités liées à l'utilisation de la RFID pour les transferts automatiques d'informations,
- de développer des marqueurs dont la capsule est biodégradable intégrant une puce RFID. Profitant du développement technologique, cette puce utilise une gamme de fréquences différente (HF),
- de développer les méthodologies permettant d'étudier les performances environnementales en temps réel,
- de développer des méthodologies permettant de réduire les coûts d'approvisionnement en prenant en compte plusieurs paramètres.

Ces deux projets ont apporté de nombreux éléments justifiant la nécessité de stratégies de traçabilité et ont développé des stratégies intéressantes basées sur les technologies RFID. Toutefois, de nombreuses autres stratégies peuvent être envisagées comme des solutions de marquage, ou des solutions biométriques, c'est-à-dire basées sur l'identification de caractéristiques intrinsèques, qui offrent de nouvelles perspectives de recherche. Ces deux types de stratégie sont explorés dans ce qui suit.

**Méthodes d'identification par marquage**

L'identification par marquage des produits consiste à apposer une marque visible ou invisible sur le produit, qui a pour fonction d'obtenir directement ou indirectement (p. ex. l'identifiant joue le rôle de pointeur sur une base de données) un certain nombre d'informations originelles ou biométriques relatives au produit. Dans [Dykstra & al, 2002], les auteurs présentent bon nombre de méthodes de marquages dans le cadre de la gestion des chaînes d'approvisionnement. Les solutions ont énormément évolué avec les avancées technologiques et l'introduction de nouveaux concepts comme l'*Internet of Things*, le « *Cloud* », les nanotechnologies, etc. [McFarlane & al, 2013]. Ces avancées offrent de nouvelles capacités aux produits comme des capacités de stockage, de surveillance, voire de prise de décision [Meyer & al, 2009]. Toutefois, des solutions basiques telles que le martelage ou l'utilisation de peinture permettent de marquer les objets à moindre coût. Trois types de marquage peuvent être identifiés :

- les marques : ce type de marquage donne peu informations (propriétaire, date de production, etc.) mais il combine l'avantage d'être simple de réalisation (peinture, marque de marteau) et économique, mais il est facile à contrefaire. Enfin, bien que théoriquement possible, il est difficile dans la pratique d'identifier les objets individuellement. On retrouve souvent ce type de marquage en début de chaîne logistique (marquage des grumes et des arbres),
- les codes à barres (CAB) : ils sont largement employés dans tous les secteurs (grande distribution, bois,…) car leur coût reste très abordable (p. ex. moins couteux que la technologie RFID), sans compter que les CAB 2D permettent le stockage de plus grandes quantités d'informations que les CAB 1D (jusqu'à 40 fois supérieur). La lecture de ces codes ne peut être réalisée que si le CAB est visible (bon positionnement du produit, non souillé, etc.), ce qui limite leur usage dans certains secteurs où l'environnement du produit est « rude » (sale, mouillé, etc.) comme c'est le cas dans des scieries [Tajima, 2007]. Les CAB sont par conséquent principalement utilisés pour le marquage de produits semi-finis, où les environnements sont plus appropriés. Ajoutons que cette technologie peut facilement être falsifiable/contournable voir obsolète (p. ex. le CAB peut être retiré du produit).
- La technologie RFID : cette technologie utilise les ondes radiofréquences pour les communications entre les puces et les lecteurs. Cette technologie permet d'identifier des produits sans que le marquage ne soit visible. L'évolution de cette technologie

montre que ses capacités ne cessent d'augmenter, alors que sa taille ne cesse de diminuer (on parle de micro-puces RFID [Usami & al, 2007]. Le principal inconvénient de cette technologie est relatif au prix d'achat qui, bien qu'il soit amené à baisser considérablement [Ginet & Golja, 2007], reste relativement élevé.

Ces trois types de marquages sont très utilisés dans l'industrie du bois et présentent tous des avantages et des inconvénients résumés dans le tableau 1.

*Tableau 1: Comparatif des principales solutions de marquage dans l'industrie du bois*

| Solutions de marquage | Marquage | | Code à barres | | RFID |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Peinture** | **Martelage** | **CAB papier** | **CAB frappé** | **RFId** |
| Lecture | ++ | - | - | - | ++ |
| Mise en place | - | ++ | + | + | + |
| Pérennité | ++ | ++ | -- | - | + |
| Prix | ++ | ++ | + | - | -- |
| Transport d'informations | -- | -- | + | + | ++ |
| Espace nécessaire | -- | ++ | + | ++ | ++ |
| Falsification | -- | -- | - | + | ++ |

L'inconvénient majeur qui en ressort est relatif au marquage « discret ». Le marquage est dit « discret » lorsque le produit porte une et une seule marque. Lors d'opérations de débit de la matière, cela pose un problème majeur puisque certains morceaux résultants de la découpe sont vierges de marquage et donc d'informations. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des actions de marquage et de transferts des informations adéquates pour éviter ce type de problème.

- **Méthodes d'identification biométrique**

De nombreuses recherches sont menées sur l'identification biométrique humaine, mais également pour la reconnaissance d'objets en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques. Ces caractéristiques doivent répondre à quatre exigences [Jain & al, 2008]:

- universalité : la caractéristique mesurée doit se retrouver sur tous les objets à identifier.
- unicité : la mesure de la caractéristique doit être unique pour chaque objet à identifier
- facilité: la mesure ne doit pas induire de changement drastique de l'organisation et de l'acquisition de la donnée mais s'intégrer au système existant ou utiliser des outils existants.

- performance : cela reflète la capacité d'identification de l'objet vis-à-vis des variations, des cadences et l'obsolescence du matériel et du matériau.

Pour que l'identification biométrique soit possible, il faut d'abord que la donnée biométrique de référence permettant d'identifier l'objet soit enregistrée une première fois. A partir de là, il est possible de faire le lien entre cette donnée biométrique et l'identité de l'objet. Pour le ré-identifier, il suffit de récupérer sur le produit présent au poste d'identification, la donnée biométrique avec un capteur et de la comparer avec celle de référence enregistrée lors de la première identification. La donnée biométrique peut être transformée et interprétée suivant différents niveaux (figure 14) : vecteur caractéristique, score de similarité et décision. Ces trois niveaux permettent aussi d'identifier l'objet et offrent l'avantage de se détacher de la donnée biométrique brute qui peut varier suivant les capteurs utilisés pour l'obtenir, ou de l'évolution de cette dernière dans le temps.

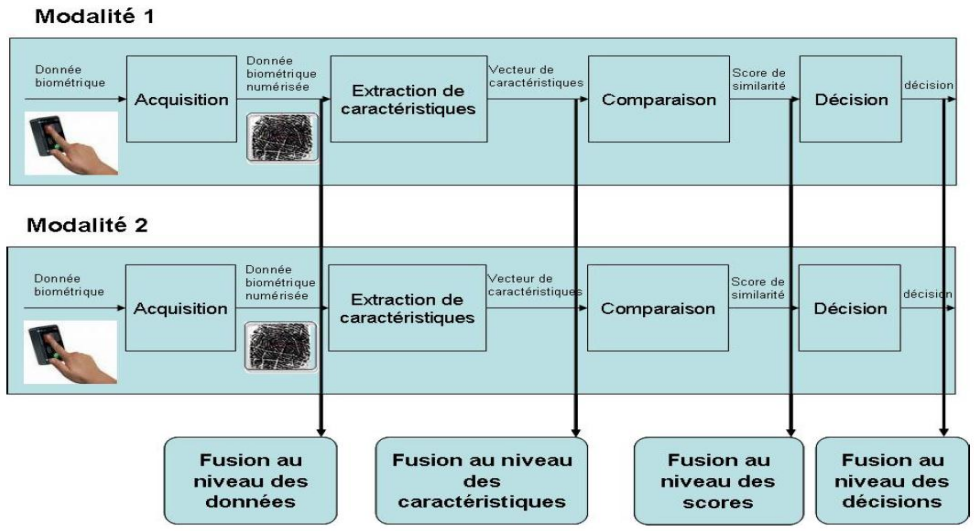



*Figure 14 : Les différents niveaux de fusion*

Dans l'idéal, ces caractéristiques ne doivent pas évoluer dans le temps pour que l'identification soit pérenne [Anil & Pankanti, 2001]. Suivant les caractéristiques et les objets identifiés, une évolution est cependant possible, limitant ainsi la stratégie d'identification. Chaque variation des caractéristiques est donc un frein à la reconnaissance future du produit. Afin d'améliorer et de pérenniser l'identification, plusieurs solutions sont envisageables.

- Utiliser la biométrie multimodale : plusieurs caractéristiques sont considérées, combinées à plusieurs instances ou techniques de mesure par caractéristique pour identifier le produit. Suivant les règles de fusion de l'information, il est possible d'assurer la reconnaissance et d'améliorer la sureté de fonctionnement de la lecture [Allano, 2009].

- Utiliser des caractéristiques qui évoluent peu ou pas dans le temps (p. ex. utiliser l'ADN comme identifiant).
- Trouver le niveau de fusion pour lequel les variations sont minimes (données, comparaison, score, décision).
- Identifier dans le cycle de vie du produit, les périodes où les changements biométriques sont faibles et l'identification possible. Cela implique de procéder à des identifications fréquentes. Cette solution peut aussi être utilisée dans des situations où l'on désire contrôler le bon déroulement de l'opération (passage d'un homme dans une zone peu sûre, …).

Dans l'industrie du bois, plusieurs recherches ont mis en évidence des signes biométriques permettant d'identifier les grumes, les billons et les produits. [Charpentier & Choffel, 2003] et [Fuentealba, 2005] utilisent le passage des micro-ondes dans le bois pour reconnaitre les produits finis. Lors de leur passage à travers le bois, ces micro-ondes sont plus ou moins atténuées par le bois et les singularités. Une première identification est faite pour l'enregistrement de l'identifiant. Le produit passe entre deux sondes (émettrice et réceptrice) et un profil de mesure est enregistré. Lors de l'identification un nouveau profil est enregistré et les données sont comparées entre elles par la méthode des k plus proches voisins. Du point de vue de l'instrumentation, cette méthode est peu couteuse, rapide et offre des taux de reconnaissance corrects. L'identification est toutefois sensible à différents éléments (caractéristiques hygrométriques du bois, position de la pièce pendant l'enregistrement, …), sans compter qu'il est nécessaire d'avoir physiquement le produit pour réaliser la mesure du profil (il est p. ex. impossible d'identifier le produit avant même le sciage de la grume).

Dans [Peterson, 2009], l'auteur propose d'utiliser une photographie du bout des billons pour leur identification. Cette partie est choisie car elle n'est pas altérée par le délignage du billon. L'identification est faite par comparaison des données des deux images. Cependant, cette identification est très sensible aux variations d'humidité du bois qui modifient la couleur et la taille des cernes. Son utilisation offre tout de même un taux de reconnaissance intéressant (83% dans le pire des cas). Avec une telle méthode, il est essentiel d'avoir un suivi de chaque modification afin que la reconnaissance des produits et des liens de parenté soient continuellement maintenus. Il est possible d'identifier les produits avant le sciage par projection du plan de sciage et identification du produit sur le billon.

Dans [Chiorescu & al, 2003], les auteurs utilisent les mesures des caractéristiques obtenues grâce à un tomographe à rayons X sur des grumes (longueur, flèche, différents

diamètres, le volume, …) pour les identifier entre l'entrée en scierie et le sciage de tête. Dans ce même article, les auteurs montrent que le taux de reconnaissance des grumes est élevé mais grandement influencé par la précision du capteur, les opérations déjà réalisées, et la présence d'éléments externes (boue, neige). L'avantage d'une telle méthode est qu'elle utilise des instruments de mesure déjà existants dans les scieries (caméras, scanner d'enveloppe, scanners RX…). Dans [Chiorescu & Grönlund, 2004], les auteurs couplent l'utilisation du tomographe avec la mise en place de la technologie RFID afin de stocker les informations directement sur la grume. [Flodin & al, 2008] utilise un processus similaire pour identifier les grumes et les produits en utilisant une fois encore un tomographe à rayons X. La variante de son approche repose sur la prise en compte des positions des singularités sur la longueur et la largeur des produits pour générer une sorte de code à barres propre à chacun de ces produits. La figure 15 montre cette approche sur un exemple de grume et de produit fini. La projection de la largeur de la singularité sur l'axe longitudinal permet d'obtenir un code qui est unique pour chaque produit. Là encore, les auteurs obtiennent des taux de reconnaissance très satisfaisant (92%). Ces deux méthodes, appelées « *fingerprint* », permettent d'identifier les produits en scierie mais ne permettent pas d'obtenir le lien qui existe entre l'objet parent (grume) et les objets enfants (produits).

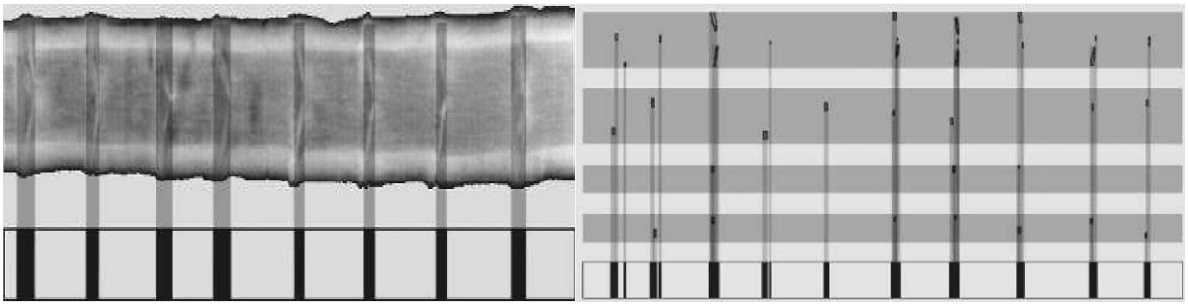


*Figure 15: Utilisation de la position des nœuds pour identifier les objets en scierie. A droite: utilisation pour les grumes, à gauche : utilisation pour les produits bois [Flodin & al, 2007]*

Pour finir, [Deguilloux & al, 2004]] proposent une méthode pour tracer l'origine des grumes de chêne dans l'industrie de la tonnellerie. Cette approche utilise l'ADN présent dans les mitochondries des cellules du bois pour déterminer la région géographique de provenance (Europe de l'est ou de l'ouest dans leur cas). Toutefois, aucune information précise relative à la parcelle ne peut en être extraite. De plus, la méthode d'analyse de l'ADN est bien trop longue pour des processus industriels.

En conclusion, les méthodes biométriques sont utilisables dans l'industrie du bois et offrent des taux de reconnaissance des objets acceptables. Les périodes d'identification sont toutefois limitées et lient difficilement les parents aux enfants. Il est par conséquent nécessaire

de développer de nouvelles méthodes d'identification des objets afin de garantir des informations exhaustives et pérennes, liées continuellement aux produits. Donc, quelles que soient les solutions (de marquage ou biométriques), aucune ne permet à l'heure actuelle de : i) tracer de manière pérenne les informations relatives à l'origine de la matière, sauf en utilisant des solutions complexes d'échange de données, et ii) de connaitre à l'avance les informations biométriques des produits enfants et de créer les liens de parenté entre les produits. Afin de valider nos recherches, la section suivant étudie les enjeux économiques sous-jacents.

### 1.2.3 Enjeux économiques sous-jacents

En gestion de production, différents indicateurs de performance peuvent être étudiés afin de connaitre l'état et les gains entre les différentes étapes de la production. Cette section vise à étudier l'influence de la traçabilité et de l'anticipation virtuelle des débits suivant trois aspects: la productivité, la satisfaction client et les stocks.

#### Gain de productivité

La productivité est définie par l'APICS (*American Production and Inventory Control Society*) comme « *la capacité d'une entreprise à produire un bien ou un service afin de satisfaire le client en nombre, en coût et en délais tout en assurant la pérennité de l'entreprise* » [Cox & Blackstone, 2008]. L'amélioration de la productivité passe par la réduction des défauts, des pannes machines, des temps de réglages machines, l'amélioration du processus, etc.

Pour améliorer la productivité, les scieurs ne l'imaginent que par deux voies : soit ils cherchent à mieux optimiser les grumes afin de tirer le maximum de produits en dépit de la qualité, soit ils produisent en grande quantité grâce à un appareillage industriel capable de supporter des cadences importantes, mais acceptent beaucoup de gaspillage. Comme nous l'avons déjà dit, 20% des sciages ne correspondent pas aux prévisions des scieurs lorsqu'elles sont faites sur la base des informations extraites de l'enveloppe de la grume. Il est donc nécessaire de combler ce manque. De plus, les études montrent que les scieries ne constatent leur production qu'en fin de processus, lorsque la campagne est finie [Nicosia & al, 2002]. Lorsqu'ils constatent un manque, ils sont obligés de ré-insérer dans leur planning une campagne de production suffisante afin, d'une part, de combler le manque constaté et, d'autre part, d'avoir des coûts de production suffisamment faibles pour débuter la production. L'insertion de ce lot n'est pas facile car les carnets de commandes des scieries sont souvent chargés et les quantités de matière première limitées. La productivité des scieurs en est par

conséquent réduite. [Pischedda, 2007] estime qu'il est possible de gagner jusqu'à 10% d'efficacité grâce à l'apport d'informations. [Maness, 1993] explique quant à lui que la mise en place de systèmes de contrôle des produits (via des cartes de contrôle) permettrait d'améliorer la qualité mais également la réactivité. La mise en place d'un système de prévision des débits et de traçabilité des produits bois permettrait de mieux appréhender les produits destinés au sciage et de pouvoir attribuer bien plus tôt ces produits à des commandes clients. Enfin, la réactivité en serait améliorée car les manques seraient prévisibles, ce qui permettrait de compléter les lots de production pour avoir les bonnes quantités.

**Gain sur la satisfaction client**

La satisfaction client est définie par l'APICS comme « *la capacité d'une entreprise à satisfaire les besoins, les demandes, et les requêtes des clients* » ou comme « *la mesure des commandes livrées aux clients à la date spécifiée par le client* » [Cox & Blackstone, 2008]. Une entreprise qui veut avoir un taux de service client important se doit avant tout de livrer ses clients à temps, mais surtout de livrer des produits de qualités correspondantes aux besoins du client. Afin de répondre à ces deux définitions, les scieries gèrent leur production en fonction de leur capacité à produire et de leurs stocks. Pour pallier aux pertes dues aux déclassements qualité, les scieurs produisent plus afin d'être certains de disposer des quantités appropriées aux besoins clients. Cependant, comme nous l'avons relevé précédemment, le temps de réactivité dans les scieries est faible, ce qui les pousse à posséder beaucoup de stock.

Les scieurs sont donc capables, avec une quantité de stock importante et des cadences de production importante, d'avoir un taux de service client élevé, mais « fragile » (réactivité). La mise en place de systèmes d'anticipation des sciages et de traçabilité des produits permettrait d'avoir une meilleure connaissance des produits finis durant l'ensemble de leur cycle de vie.

**Gain sur les stocks**

Les stocks sont l'ensemble des produits immobilisés dans l'entreprise, finis ou en cours de production. Les stocks, s'ils sont utilisés de manière raisonnée, sont d'une grande aide pour les entreprises. Ils créent des points de découplage dans les flux physiques pour éviter les ruptures dans la production ou l'approvisionnement des clients. A l'inverse s'ils sont trop importants, ils peuvent perturber la gestion des ateliers et créer des perturbations dans la gestion financière de l'entreprise.

Dans les scieries, trois principaux stocks existent : le stock de grumes (matière première), le stock de billons et celui de produit finis. Afin d'avoir un taux de satisfaction client important, les scieurs sont dans l'obligation d'avoir des stocks de produits finis importants. Pour assurer le chargement du goulot (scie de tête), les scieurs possèdent un stock de billons important. Et pour assurer de ne pas tomber en rupture de matière première, le stock de grumes est important. Les déclassements participent aussi à l'augmentation des stocks des scieries. Les produits dont les caractéristiques ne satisfont pas les besoins clients entrent en stocks et y passent souvent de longues périodes. D'une part, parce qu'ils ne font pas partie de la demande exprimée, ils n'ont donc pas de commande à laquelle ils pourraient être attribués. D'autre part, parce qu'ils représentent une perte pour le scieur ou le client car, soit ils sont de qualité supérieure et sont une perte financière pour l'entreprise (vendu au prix du déclassé), soit ils sont de qualité inférieure et ne peuvent pas être surclassés pour être vendus car cela représenterait un vice pour le client. Finalement, ces produits non vendus perdent de leur qualité (perte de couleur - tendent vers le gris-, attaque d'insectes, …) et finalement, ne peuvent être vendus aux clients que dans des classes esthétiques et mécaniques basses.

Les stocks représentent pour les scieurs une part importante de l'immobilisation financière. Mais par ailleurs, la valeur ajoutée sur la matière en entrée et en-cours est faible donc les pertes financières et qualitatives dues à une immobilisation le sont aussi. C'est le stockage des produits finis qui crée l'immobilisation et des pertes financières les plus importantes. Les pertes qualitatives des produits finis, dues à un stockage prolongé, représentent entre 10 et 20% du stockage de ces produits [Pischeda, 2007]. Ce ne sont pas les seules pertes liées au stockage car, nous l'avons vu, une grande partie des produits en stock ne sont pas prévus (environ 20%) et augmente le stock final.

Imaginons que les scieurs soient capables de prévoir les sciages qu'ils vont réaliser dans une grume. L'optimisation serait meilleure et donc plus en accord avec les besoins clients. Cet équilibre production/besoins clients réduirait les stocks très sensiblement. De plus, et même si on est capable de prévoir les sciages, il est probable qu'il reste encore une partie des produits issus de la grume qui ne pourrait pas être en accord avec les besoins. Pour autant en connaissant cette partie, les scieurs pourraient réagir bien plus rapidement et prévoir d'autres utilisations (commande, ré-usinage, déchet, …) à ces produits.

Finalement, les gains escomptés pour l'ensemble de la chaîne, et en particulier pour les scieurs, sont importants au regard des trois indicateurs choisis. La partie suivante présente les

deux paradigmes que nous avons choisi d'étudier pour pallier aux manques de solutions de traçabilité et tendre vers une identification pérenne de l'origine des produits.

## 1.3 Vers de nouveaux paradigmes.

Dans cette partie, nous introduisons deux paradigmes qui seront les bases des deux chapitres suivants: l'un est une extension du paradigme de produit communicant, la « matière communicante » et l'autre est la numérisation du processus de transformation, le « *Virtual Manufacturing* » ou « maquette numérique pour la fabrication ».

### 1.3.1 Introduction des paradigmes utilisés.

Pour comprendre comment nous en sommes arrivés à ces deux paradigmes, nous rappelons quelques éléments de synthèse relatifs à la conservation des informations relatives aux origines des produits et à la prévision des débits.

**Conservation des informations de l'origine du bois**

Nous savons que beaucoup d'informations sont perdues tout au long de la chaîne logistique bois mais que les pertes les plus importantes se situent en début du processus. Ces informations qui sont relatives à l'origine de l'arbre ne sont pas directement identifiables sur le bois. Il est donc nécessaire d'avoir en permanence un lien entre le produit et les informations qui lui sont propres. L'une des solutions envisageables serait de marquer chaque produit issu d'une grume par un marquage discret (RFID, Code à barres, marque). Cependant, ce marquage reste discret et peut être retiré par n'importe quelle opération de débit. Le premier questionnement est donc de savoir comment lier la matière à l'information et faire en sorte que ce lien soit pérenne malgré les opérations de débit.

La biométrie est attachée à la matière mais elle suppose que l'on puisse à tout moment de la chaîne logistique du bois, retrouver à partir d'un échantillon, des caractéristiques physiques permettant d'identifier de manière unique la matière première. Nous avons vu que l'ADN, bien qu'utilisable, ne permet pas d'avoir des cadences industrielles importantes ni une identification claire des origines (au mieux la région forestière). En plus, les informations originelles, ne sont pas identifiables sur le produit. Donc la biométrie ne peut pas être utilisée dans l'état pour conserver tout au long du cycle de vie du bois les informations originelles.

L'idéal serait donc d'avoir un marquage qui soit le même dans tout l'arbre et qui fasse référence aux informations propres à la matière première. Pour faire un parallèle, l'idée serait de mettre un code similaire au codage ADN, c'est-à-dire qu'il serait unique et présent dans la

globalité de chaque individu, mais dont la lecture soit facile, rapide et donne des informations sur l'origine de l'arbre. Grâce à cela, quelle que soit la partie de l'individu que l'on coupe, le code est toujours présent et les informations ne peuvent plus être perdues. Une telle solution peut être identifiée sous le terme et sous le paradigme de « matière communicante » que nous présenterons par la suite. Grâce à ce paradigme nous pourrions établir un lien pérenne entre la matière première et ses informations originelles.

**Prévoir les débits en scierie.**

Nous avons vu que le deuxième problème important se situe au niveau des processus divergents dont l'effet boite noire ne permet pas de connaitre précisément quels vont être les produits sciés dans une grume. Cet effet boite noire crée beaucoup d'incertitude dans la production des scieries car les caractéristiques des produits usinés ne sont connues qu'à la sortie du processus de transformation. Cet effet empêche la mise en place d'une traçabilité totale car, d'un côté nous savons que le marquage discret impose beaucoup de contraintes pour assurer le passage des informations de la matière première aux produits et de l'autre, les techniques actuelles d'identification biométrique impliquent d'avoir physiquement le produit pour enregistrer ses caractéristiques. Dans le paragraphe précédent nous proposions d'utiliser le paradigme de matière communicante. Bien que ce paradigme soit dans la théorie possible (et nous le montrons par le début d'une potentielle mise en œuvre dans cette thèse), nous verrons qu'il nous faut néanmoins assurer, avant le sciage de la matière première, le transfert des informations entre la matière première et les produits finis générés (produits parents et enfants).

Pour pouvoir réduire cet effet boite noire, il nous faut pouvoir prévoir le plus tôt possible quels vont être les produits qui seront sciés dans une grume ainsi que leurs caractéristiques. L'idéal serait donc de voir et connaître les produits avant même que la matière première ne soit usinée. Nous nous sommes donc penchés sur l'utilisation du paradigme de « V*irtual Manufacturing* », de « digitalisation » de la matière et de virtualisation du processus de transformation.

Afin de comprendre les tenants et les aboutissants des deux paradigmes proposés, une étude bibliographique a été réalisée pour chacun d'eux.

### 1.3.2 La matière communicante

Avant de parler du paradigme de « matière communicante » et du positionnement de cette thèse, revenons sur le paradigme de « produit intelligent ».

**Le produit intelligent**

Le développement des systèmes informatiques fait tendre notre société vers une époque dans laquelle chaque individu possède divers appareils informatiques (téléphone portable, ordinateur, tablette, …) tous reliés entre eux via internet et les réseaux sans fils. Le concept d'« *internet of things* » (*IoT*) proposé par Kevin Ashton en 1998 est un très bon exemple du développement des réseaux informatiques et de la tendance actuelle. Ce concept peut être formulé comme : « *des objets ayant des identités et des personnalités virtuelles, opérant dans des espaces intelligents et utilisant des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer au sein de contextes d'usages variés* [Tan & Wang, 2010]».

Avant l'*IoT*, le terme de « produit intelligent » fut utilisé pour la première fois par [Ives & Vitale, 1988] dans le cadre du service après-vente. Différents auteurs donnent des définitions du produit intelligent comme [McFarlane & Sheffi, 2003], [Kärkkäinen, 2003] ou [Ventä, 2007] en posant les bases de ce paradigme. Il en ressort que le produit est dit intelligent si :

- il possède un identifiant unique,
- il a la capacité de communiquer de manière efficace avec son environnement,
- il peut stocker ou conserver les données le concernant,
- il peut déployer un langage pour décrire ses caractéristiques ou les contraintes de production,
- il est capable de participer ou de prendre des décisions importantes pour son devenir.

C'est [Meyer & al, 2009] qui propose la définition la plus complète en prenant en plus en compte la notion d'agrégation de l'intelligence (l'intelligence pouvant être sur le contenant ou le produit). Il propose trois axes d'évaluation à différents niveaux.

- Le degré d'intelligence (trois niveaux) : le traitement de l'information (il gère ses propres informations, plus bas niveau), la notification de problèmes (le produit peut informer l'utilisateur), la prise de décision (le produit est autonome et capable de prendre des décisions, plus haut niveau).
- La localisation de l'intelligence (deux niveaux) : soit l'intelligence est sur un réseau et le produit communique avec celui-ci pour avoir les décisions, soit l'intelligence est sur le produit.
- L'agrégation de l'intelligence (deux niveaux) : soit l'intelligence est au niveau du produit et il est capable de gérer ses propres informations, soit elle est au niveau du conteneur qui gère ses informations mais aussi celles de son contenu.

Les produits intelligents offrent des réponses intéressantes à plusieurs enjeux : gérer les informations produits durant l'ensemble du cycle de vie, assurer la pérennité de ces informations ; connaitre en temps réel l'état de la chaîne de production, d'approvisionnement et de distribution ; améliorer celle-ci ; participer à la synchronisation des flux physiques et informationnels ; et assurer un niveau de sécurité.

Mais le produit intelligent à ses limites. [Thomas, 2009] et [McFarlane & al, 2013] mettent en avant des problèmes liés à la collecte des informations liées au produit, le stockage, la gestion ou la dissémination de ces informations. Les produits sont souvent rendus intelligents par l'ajout et l'utilisation d'une puce RFID et donc d'un marquage discret. Ce marquage discret limite la notion de produit intelligent [Kubler, 2012].

- La lecture discrète pose souvent le problème de l'orientation du produit afin que le marquage soit lisible et inscriptible (comme c'est le cas des codes à barres) mais aussi de la concentration de l'information dans ce marquage.
- La détérioration du marquage rompt le lien existant entre l'information stockée et le produit, du fait de la concentration de l'information.
- La découpe d'un produit parent marqué impose d'assurer le transfert de l'information sur les produits enfants.
- Suivant les marquages, la capacité de mémoire est limitée.
- Le niveau d'agrégation de l'intelligence : la plupart des produits discrets n'agissent pas comme un conteneur intelligent.

**La matière communicante**

C'est après avoir constaté les limites du produit intelligent qu'au sein du laboratoire a émergé un nouveau paradigme dans lequel le produit acquiert la capacité d'être intrinsèquement et intégralement « communicant » [Thomas, 2009]. Ce n'est donc plus le produit mais la matière dans son intégralité qui devient communicante. Les premiers travaux réalisés par [Kubler, 2012], apportent une réponse à ce paradigme avec une application dans l'industrie du textile. Pour expliciter l'idée de ce paradigme, donnons l'exemple suivant : Si on prend un morceau d'acier, lequel est composé de fer et de carbone dans un type de structure donnée et qu'on le divise en morceaux de plus en plus petits, nul besoin de se soucier de savoir où sont les atomes de carbone, il y en a partout ! Si ces atomes de carbone étaient les instruments de communication, nous dirions que la matière est intrinsèquement communicante !

Cette vision est très futuriste car les limitations techniques sont nombreuses. Mais grâce à ce paradigme, il serait possible de découper la matière tout en conservant les informations qui lui sont attachées. Dans [Kubler & al, 2010], les auteurs font ressortir les différents problèmes scientifiques et techniques que pose la matière communicante qu'ils classent en quatre groupes :

- La conception de la matière : ce groupe pose essentiellement des contraintes sur l'instrumentation de la matière et sa mise en œuvre.
- L'architecture de communication : ce groupe comprend l'ensemble des problématiques relatives à la conception de l'architecture de communication entre le produit et son environnement (protocole de communication pour les différentes couches). Dans cette partie sont traités des problèmes d'accessibilité de la matière pour la lecture et l'écriture.
- L'exploitation des données : dans cette partie sont traitées les problématiques de stockage de l'information dans la matière, d'assurance d'un service aux utilisateurs tout au long du cycle de vie de la matière. D'après [Kubler & al, 2010] cette partie est la plus importante du point de vue problématique de recherche.
- La sécurité/exhaustivité : la matière étant en évolution constante autant d'un point de vue physique (usinage, assemblage, …) qu'informationnel (modification, ajout ou retrait des informations), une multitude de problèmes se posent concernant la conservation, la modification des données mais aussi la sécurisation de celle-ci.

**Positionnement**

Kubler apporte d'importantes réponses à la classe de problème « exploitation des données » en traitant le sujet de la dissémination des informations dans le textile tout au long de son cycle de vie [Kubler, 2012]. Il propose aussi une solution concernant l'instrumentation de la matière textile par l'utilisation de puces RFID [Kubler & al, 2011]. Dans notre cas, les problématiques traitées sont relatives à une « matière bois communicante », plusieurs problématiques se posent alors.

Tout d'abord, nous nous retrouvons face à un matériau « vivant ». Au vu du processus de transformation et de l'utilisation recherchée (conservation des informations originelles du produit), il nous faut identifier la façon d'instrumenter la matière bois alors que l'arbre est sur pied. Il nous est impossible, à l'évidence, d'utiliser des technologies telles que la RFID pour instrumenter la matière. Ensuite, si nous trouvons une solution pour réaliser le marquage, il nous faut trouver comment coder l'information et déterminer la granulométrie de

l'identification. Dans une parcelle de forêt, il peut exister plusieurs milliers d'arbres, et sur un territoire, il existe plusieurs centaines de parcelles. Devant un tel nombre d'individus à identifier et suivant le nombre de codes qu'il est possible d'obtenir, avons-nous intérêt à identifier tous les individus? Enfin suivant la solution utilisée pour générer le marquage, comment pouvons-nous faire pour augmenter le nombre d'identifiants possibles?

Le deuxième chapitre de cette thèse propose un ensemble de réponse à ces problématiques.

### 1.3.3 Digitalisation du processus de transformation

Afin de répondre au deuxième axe de recherche de cette thèse, la réduction de l'effet boite noire dans un processus divergent de l'industrie du bois, nous nous sommes orientés vers le paradigme de « *Virtual Manufacturing* » (VM). Avant d'en expliquer les raisons, explicitons le « *Virtual Manufacturing* ».

**Le paradigme de « *Virtual Manufacturing* ».**

L'amélioration de la performance passe par plusieurs actions dans une entreprise : l'innovation, l'amélioration de la production, mise en place de systèmes qualités, l'amélioration de la flexibilité, … C'est pour des raisons d'anticipation que l'informatique s'est développée dans les entreprises afin de faciliter, d'améliorer et optimiser les actions de réflexion et de prise de décision.

Le VM est définie par [Nahavandi & Preece, 1994] comme :

> *« Une simulation d'un procédé, existant ou pas, dans son état actuel. Il inclut l'ensemble des informations relatives à ce processus, à son contrôle et sa gestion et revoit des informations spécifiques. Il est aussi possible d'avoir des parties représentant un processus existant et d'autres représentants des parties virtuelles. »*

[Lin & al, 1995] définissent le VM comme l'utilisation de modèles informatiques et de simulations du processus afin d'aider au design et à la production de produits finis. [Lawrence ,1995] distingue trois axes à ce paradigme.

- VM centré design : permettre aux designers de concevoir des produits en intégrant les contraintes de conception et de réalisation (CFAO, prototypage rapide).
- VM centré production : donner les moyens de développer et analyser les différentes voies de production et différents processus possibles.

- VM centré contrôle : permettre l'évaluation du design produit, des plans de production et des stratégies de contrôle et donner les moyens d'améliorer itérativement l'ensemble à travers l'utilisation de simulation du processus (ERP).

Le VM permet donc de simuler et prévoir l'ensemble des actions qui sont menées dans une entreprise. [Shukal & al, 1996] montre à travers différents exemples (John Deer, Boeing, …) les avantages qu'offre ce paradigme en terme de gains financiers. [Lee & al, 2001] fait une revue bibliographique complète de ce paradigme et explique qu'il est utilisé dans différents systèmes virtuels comme le prototypage virtuel, usinage virtuel, inspection virtuelle, assemblage virtuel, … Grâce à lui les entreprises sont capables de prévoir aux différentes échelles de la vision stratégique et aux différents niveaux du cycle de vie du produit, quels seront les comportements observés dans la production ou les produits, avant même que cela ne se soit déroulé, permettant ainsi à l'entreprise d'être plus réactive et d'avoir de nouvelles stratégies d'évolution.

Cependant, [Lee & al, 2001] font ressortir un ensemble de problématiques de recherche qui, bien que des réponses aient déjà été apportées, reste encore d'actualité suivant les cas d'application.

- La rapidité des systèmes : cette partie a été améliorée par l'évolution des technologies informatiques et permet aujourd'hui d'avoir des vitesses importantes de traitement.
- La représentation des systèmes, de la connaissance des experts et de la matière : cette partie est en développement constant. L'utilisation de langages de modélisation comme UML ou NIAM a permis de mieux représenter la connaissance humaine, les systèmes ou de la matière. Par exemple [Tzong-Ming & Tu, 2011] proposent une méthodologie pour intégrer les déformations constatées dans un processus de transformation réel à un processus de transformation virtuel afin d'approcher au plus près la réalité du système.
- L'intelligence artificielle permettant la prise de décision : dans le VM les informations récoltées doivent être traitées afin de faire ressortir l'état à l'instant t de ce qui est modélisé et de permettre la prise de décision quant à l'évolution future. Les réseaux de neurones, mais aussi les méthodes de décision multicritères, se sont largement développés et intègrent maintenant des données floues permettant de prendre en compte les imperfections et imprécisions des données fournies.
- L'unification des standards : il est nécessaire pour que les systèmes puissent interagir entre eux d'avoir des standards de représentation et d'expression des données. Le

domaine de l'interopérabilité des systèmes se charge de donner les moyens de faire en sorte que deux systèmes puissent interagir entre eux via, par exemple, l'utilisation de modèles de données standards ou de modèles normés comme UML ou SysML.

- La gestion des bases de données : le VM nécessite la mise en place d'une base de données conséquente et organisée afin d'intégrer au système le maximum de données en provenance des clients, fournisseurs ou de l'entreprise. Ces données ont tendance d'après [Lee & al, 2001] à augmenter au fur et à mesure des années à cause de l'évolution des entreprises.
- L'évaluation des techniques et des normes : il est nécessaire lorsqu'une entreprise veut s'orienter vers le VM de trouver des indicateurs ou des normes à mettre en place permettant d'évaluer les performances du système virtuel par rapport au système réel.

Nous allons voir dans le prochain paragraphe que dans l'industrie du bois, le VM est déjà bien développé mais que certaines caractéristiques du processus imposent de fortes contraintes.

**Le VM dans l'industrie du bois**

Comme nous l'avons dit, le VM consiste à rendre virtuels tout ou parties des processus d'une entreprise afin de prévoir l'évolution future de la production ou des produits.

Dans la seconde transformation, la virtualisation des processus existe depuis longtemps avec l'introduction des logiciels de CAO ou de gestion de production. Comme nous l'avons vu, ces entreprises sont organisées selon des processus convergents et impliquent donc moins de contraintes pour l'anticipation et la traçabilité des produits. En revanche, dans la sylviculture et la première transformation, la mise en place de méthodes d'anticipation et de contrôle de la production est bien plus complexe (voir partie 1.1.2).

En ce qui concerne l'anticipation de la production, [Maturana & al, 2010] font une revue de la littérature des différentes recherches qui ont proposé des algorithmes permettant de prévoir la production dans les scieries. Ils arrivent à la conclusion que l'utilisation d'un modèle mathématique est plus efficace qu'une heuristique sur un cas idéal (modèle simpliste de la matière première) mais ne prend pas en compte l'ensemble de la complexité (plusieurs produits dans un plan de sciage, un plan différent pour chaque grume, …).

En ce qui concerne l'évaluation et le contrôle de la production, il existe beaucoup de recherches qui montrent qu'il est possible d'avoir l'état de la production en utilisant des capteurs de vision. Il existe deux types de capteurs : les capteurs surfaciques (caméra, laser,..) et les capteurs volumiques (Rayon-X, Micro-ondes, ultrasons, …). [Bucur, 2003] expose

différents capteurs volumiques utilisables pour l'étude des billons. Il conclut sur le fait que le plus utile et le plus prometteur est le capteur à rayon X. Concernant les capteurs permettant l'étude des produits finis, il s'avère que les caméras sont les capteurs les plus adaptés à l'estimation des produits et au contrôle de la production.

[Rinnhofer & al, 2003] poussent encore en avant le concept de VM dans l'industrie du bois. Ils proposent de simuler l'opération de sciage dans le monde virtuel sur une représentation de la matière première obtenue avec un tomographe à rayon-X au niveau du poste d'optimisation. Grace à ce concept il est possible de prévoir les caractéristiques des sciages avant même qu'ils ne soient sciés. Mais dans le cas de Rinnhofer, aucune automatisation de la mesure des caractéristiques n'est mise en œuvre. Ainsi, il est possible de voir les produits qui seront sciés dans une grume mais l'évaluation et la modification de plan de production ne se fera que par l'opérateur. De plus, aucune identification ni du produit, ni de la famille de produits, n'est faite.

En synthèse, le VM apporte déjà beaucoup aux entreprises de première transformation du bois afin de simuler et prévoir la production. Cependant, il reste une grosse part d'incertitude sur les prévisions à court terme car la méconnaissance et l'hétérogénéité des caractéristiques internes du bois rendent les opérations d'optimisation et de prévision incertaines. Et même lorsqu'il est possible de connaitre les produits, l'automatisation n'est pas encore possible.

**Positionnement**

Dans l'optique de cette thèse portant sur la réduction des pertes d'information dans l'industrie du bois, nous pouvons imaginer que si nous sommes capables de prévoir et caractériser les produits qui seront issus d'une grume avant même que cette grume ne soit usinée, alors il sera possible d'établir le lien entre les objets parents et les objets enfants et d'établir la nomenclature des produits issus de la grume.

Une première problématique provient de la ressemblance entre les produits virtuels et les produits réels. Rinnhofer introduit dans le sciage virtuel des fausses couleurs permettant d'avoir un rendu similaire aux produits finis. Mais un tomographe à rayon X renvoie une information de densité. Il serait donc intéressant de savoir s'il existe un lien entre les caractéristiques extraites sur l'information de densité et celles sur l'information de couleur du bois.

Ensuite, l'information fournie par le tomographe étant la densité du matériau, la précision des informations extraites permet-elle d'avoir une caractérisation suffisamment

précise des produits et dans le cas où celle-ci ne le soit pas, est-il possible de mettre en œuvre une caractérisation prenant en compte cette imperfection ?

Enfin, si nous arrivons à caractériser les produits et donc à obtenir les dimensions, la qualité esthétique et mécanique, comment faire en sorte de générer la nomenclature des produits issus des grumes et ainsi créer le lien entre les objets parents et enfants?

*

**Points Importants à Retenir :**

- Les informations à conserver sont de deux types : originelles et biométriques.
- Pour les informations relatives à l'origine, les solutions existantes, autant dans le marquage que dans la biométrie, ne permettent pas de les conserver tout au long du cycle de vie du produit.
- Pour les informations biométriques, aucune solution ne permet actuellement de les anticiper.
- Cela impose donc d'utiliser des voies différentes pour les conserver, nous avons choisi les paradigmes de « Matière Communicante » et de *Virtual Manufacturing*.
- Les gains envisageables dans l'industrie de première transformation sont importants.

# CHAPITRE 2 :

# IDENTIFICATION PAR RESONANCE QUADRUPOLAIRE NUCLEAIRE (RQN) DE MARQUEURS CHIMIQUES INTRODUITS DANS LE BOIS.

**2.1 Contexte d'utilisation de la Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN) ... - 47 -**
2.1.1 Justification de l'utilisation de la RQN ..... - 47 -
2.1.2 La Résonance Quadrupolaire Nucléaire ..... - 50 -
2.1.3 Produits, matériels et méthodes ..... - 56 -
**2.2 Etude de faisabilité du marquage dans la masse du bois ..... - 71 -**
2.2.1 Les premiers essais de marquage ..... - 72 -
2.2.2 Analyse de l'influence de différents facteurs relatifs aux échantillons. ..... - 73 -
2.2.3 Quantitativité RQN en relation avec le temps de mesure. ..... - 82 -
**2.3 Codage de l'information dans l'industrie du bois ..... - 86 -**
2.3.1 Les premiers essais de marquage et de codage de la matière ..... - 86 -
2.3.2 Le marquage dans la masse : limites et compléments ..... - 90 -
**2.4 Conclusions du chapitre ..... - 93 -**

Dans le chapitre 1, nous avons vu que l'information relative à l'origine de l'arbre est une information sensible car elle n'est pas contenue dans le matériau et ne peut, dans le cas où elle est perdue, être retrouvée facilement. Il est donc nécessaire de trouver une solution de marquage qui permette de lier cette information au matériau et de la conserver tout au long de la vie du bois.

L'approche proposée dans ces travaux de thèse, qui est certes un peu spéculative, est d'utiliser un marquage qui soit disséminé dans l'ensemble de la matière. Notre objectif est de pouvoir lire le code correspondant à ce marquage et de retrouver ainsi les informations relatives à la provenance de l'arbre quelle que soit la taille de l'échantillon du matériau considéré.

Nous tenons à préciser dès maintenant, pour ceux qui envisageraient de nous traiter de parfaits pollueurs, que nous avons bien conscience que les solutions proposées à l'heure actuelle ne sont pas viables d'un point de vue environnemental. Tous nos essais ont été réalisés en laboratoire sur des bois isolés et ne sont à l'origine d'aucune contamination. Cette thèse est la deuxième action de recherche relative au paradigme de « matière communicante », après celle de S.Kubler [Kubler, 2012].

Dans un premier temps, les besoins et les contraintes relatives à un tel type de marquage du matériau bois sont présentés. Ensuite, nous nous focalisons sur la partie identification qui est le point crucial de la méthode. Les solutions envisageables n'étant pas légion, une des originalités de cette thèse a été d'avoir recours à la spectroscopie par résonance quadrupolaire

nucléaire (RQN). Bien qu'elle ait fait ses preuves pour la détection d'explosifs ou de substances illicites, la transposition à la détection d'une molécule dispersée dans le matériau bois relevait de la gageure. La détection du marquage, représente donc le défi que nous avons voulu relever. Le choix de cette technique impose, pour assurer le marquage, l'utilisation de molécules particulières. Les techniques de marquages aux moyens de ces molécules ainsi que l'influence des méthodes utilisées pour réaliser ce marquage sont détaillées dans la deuxième partie. Enfin, dans la dernière partie, nous proposons une première version de marquage sur deux bits et son extension potentielle.

## 2.1 Contexte d'utilisation de la Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN)

### 2.1.1 Justification de l'utilisation de la RQN

Dans l'industrie du bois, les informations relatives à l'origine de la matière concernent principalement la parcelle sur laquelle l'arbre a poussé. Afin de lier de manière définitive ces informations à la matière, nous avons vu qu'il est possible d'utiliser le paradigme proposé par Thomas : la matière communicante [Thomas, 2009]. Dans cette partie nous rappelons les bases de ce qu'est le paradigme du bois communicant et nous justifions l'utilisation de la RQN.

- **Le paradigme de matière communicante appliqué à l'industrie du bois**

Nous avons décrit les premiers essais qui ont mis en avant une possible réalisation de ce paradigme dans l'univers du textile [Kubler & al, 2011]. Les lés sont instrumentés avec des puces RFId disséminées dans l'ensemble du matériau afin de se rapprocher au plus près du concept de matière intrinsèquement communicante. Il est donc possible de lui offrir la capacité de stocker de l'information, de communiquer avec son environnement et, dans le cas où le matériau est découpé en plusieurs parties, de conserver ces capacités de stockage et de communication.

Transposons ce paradigme à l'industrie du bois. Un arbre serait marqué pendant sa croissance en forêt. On le marquerait dans la masse et de telle sorte qu'il soit identifiable de manière unique. Il serait alors possible d'obtenir les informations sur l'origine de chaque individu d'une parcelle tout au long du cycle de vie du bois. Cela présenterait un avantage

considérable pour les certifications de provenance qui pourraient ainsi spécifier les origines des produits.

En poussant le paradigme un peu plus loin, le marquage pourrait être modifiable si, à partir de cette matière, de nouveaux objets sont créés dans le cadre de processus divergents. Il serait donc possible d'identifier chaque produit enfant sans avoir recours à une autre opération de marquage. Une telle solution permettrait d'avoir une identification pérenne et unique ainsi qu'un transfert et une conservation de l'information tout au long du cycle de vie de la matière.

En conformité avec ces considérations, on peut rechercher les solutions possibles permettant de marquer le bois dans la masse de manière pérenne et unique.

- **Marquage et contrainte de taille**

Le marquage consiste à apposer sur le produit un élément d'identification de façon à obtenir l'ensemble des informations plus ou moins complexes qui lui sont liées. Le marquage est couramment utilisé dans l'industrie pour permettre le suivi des objets. Poussé à son paroxysme, le marquage permet l'identification unique de chaque produit et d'obtenir les informations qui leurs sont rattachées. En outre, pour que l'identification automatique soit possible au niveau industriel, il faut que la lecture soit rapide, robuste et unique.

Pour le marquage dans la masse, plusieurs solutions ont été imaginées, mais il n'est guère raisonnable actuellement d'imaginer disséminer en masse des puces RFID dans le bois.

Le bois est un matériau fibreux. Ses fibres sont un ensemble de cellules longitudinales appelées trachéides reliées entre elles par des ponctuations. Celles-ci sont les voies de communication principales et conduisent la sève brute du bas de l'arbre vers le haut. D'autres voies existent. Les canaux résinifères ou le parenchyme radial qui, respectivement, permettent le transport de la résine et constitue une voie de communication vers l'intérieur de l'arbre [Trouy-Triboulot & Triboulot, 2012]. L'ensemble de ces voies de communication possède des dimensions de l'ordre du micro au dixième de millimètre. (Jusqu'à 300µm de diamètre pour les canaux, et entre 15 µm et 35 µm pour les trachéides des résineux) [Guidoum, 2012]. Ce sont ces voies de communication de petites dimensions qui permettraient d'introduire le marquage dans le bois (figure 16) d'où la nécessité de trouver un marquage induisant des « médias » de petites tailles.

Au vu de ces constatations, la taille des marqueurs (dans sa globalité) doit donc être inférieure à la taille des vaisseaux constituant le bois. Hitachi a conçu le µtag. Ce composant RFId est constitué, à ce jour, de la plus petite puce électronique possible d'une taille de 0,4*0,4mm soit 0.16mm² (sans l'antenne). Cette taille, bien qu'infime pour une puce, reste de

dimensions trop importantes pour être utilisée comme marqueur dans la masse du matériau bois.

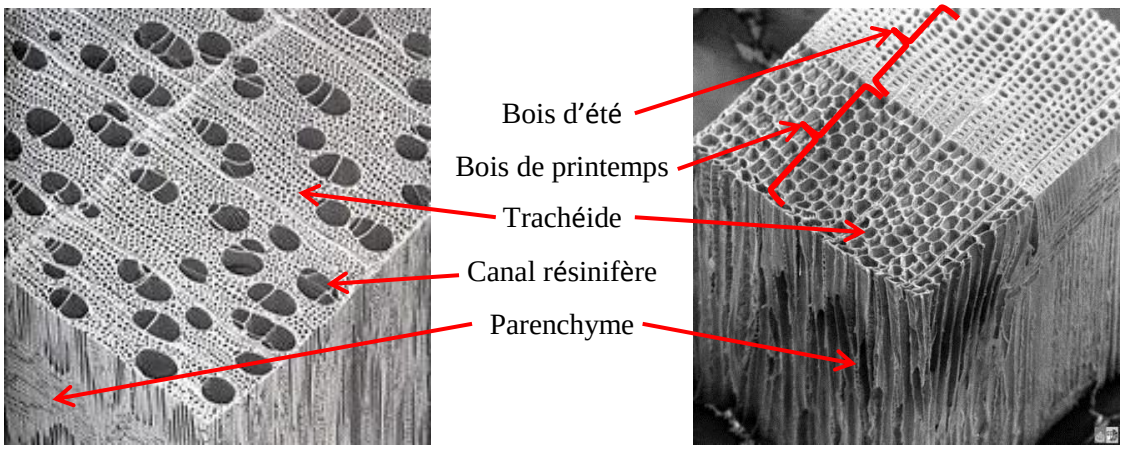



*Figure 16 : Vue microscopique d'un bois de feuillus (gauche) et de résineux (droite).*

La taille des cellules plaide donc en faveur d'un marquage moléculaire et l'utilisation de méthodes d'identification des molécules. Les méthodes d'identification que l'on peut envisager vont maintenant être décrites de façon critique.

- **Les méthodes d'identification**

La méthode d'analyse retenue doit en principe permettre l'identification des molécules alors que l'arbre est encore sur pied mais également d'explorer le matériau dans sa masse. Ceci exclut les spectroscopies optiques (IR, Raman, UV visible, Etc.) qui sont des moyens d'investigation de surface.

En plus de cela, il est nécessaire que la méthode choisie permette d'identifier chaque produit introduit dans le bois de manière unique et non ambiguë. Il est évident que si la méthode d'identification utilisée ne le permet pas, le marquage n'est pas utile. Cette contrainte empêche donc l'utilisation de méthodes de diffraction ou de diffusion qui sont peu sensibles à la nature de la molécule (p.ex. les rayons X)

Du fait de ces contraintes, il apparait qu'il ne reste que des méthodes spectroscopiques utilisant des ondes radiofréquences, celles-ci pénétrant le matériau bois et peuvent permettre l'identification des molécules introduites dans le bois. Parmi les techniques utilisant des ondes radiofréquences, les résonances magnétiques sont certainement celles qui apportent le plus d'informations moléculaires. Ce sont :

- La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), fondée sur l'effet Zeeman (présence d'un champ magnétique statique) et qui vaut par le phénomène de déplacement chimique.

- La Résonance Paramagnétique Electronique (RPE), fondée également sur l'effet Zeeman, mais réservée aux systèmes paramagnétiques.
- La Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN), que l'on présente souvent comme la RMN en champ nul et qui, faisant l'objet de cette thèse, sera détaillée plus loin.

Comme nous le verrons, la RQN s'adresse à des solides cristallisés. Elle fait appel à des noyaux de spin supérieur à ½ (dits noyaux quadrupolaires, comme l'azote-14). Dans ce cas, la fréquence de résonance est parfaitement spécifique de la molécule détectée. En outre, n'utilisant pas d'aimant, elle est plus facilement portable que la RMN et pourrait donc s'appliquer à des arbres sur pied.

### 2.1.2 La Résonance Quadrupolaire Nucléaire

La RQN est une technique assez ancienne (1950, donc à peine plus jeune que la RMN). La RQN de l'azote-14 connait depuis plusieurs années un regain d'intérêt pour ce qui est de la détection des explosifs et des substances illicites. Afin de comprendre le fonctionnement de cette technique, le principe fondamental de la RQN sera tout d'abord présenté. Puis l'instrumentation ainsi que la méthode d'identification seront exposées et nous terminerons par les facteurs influençant la mesure de la RQN

- **Principe physique**

Les résonances magnétiques correspondent à des transitions entre niveaux d'énergies d'un système de spin. Il peut s'agir de spin électronique ou de spin nucléaire. Très souvent on se référera à des spins ½ (électron, proton, neutron, Carbone-13, Azote-15, Phosphore-31, etc…). Ceux-ci ne comportent que deux états qui donnent naissance à deux niveaux d'énergie si le système de spin est placé dans un champ magnétique. Cette dernière propriété est exploitée en RMN et RPE.

Il existe des noyaux de spin supérieur à ½, appelés encore noyaux quadrupolaires (par exemple, l'azote-14 qui fait l'objet de cette thèse). Il se trouve que ces noyaux possèdent un moment quadrupolaire électrique, du fait de la répartition non sphérique des charges, qui ne peut qu'interagir avec le gradient de champ électrique (au niveau du noyau considéré). Ce gradient de champ électrique provient de la distribution électronique dans la molécule considérée (électrons et autres noyaux à proximité). On conçoit dès lors que cette interaction soit spécifique de l'édifice moléculaire. Il se trouve que cette interaction crée des niveaux d'énergies distincts et par voie de conséquence, la possibilité d'induire des transitions de résonance magnétique en appliquant un champ magnétique alternatif et sans recourir à

l'application d'un champ magnétique constant extérieur (donc sans aimant, nécessaire en RMN et RPE). L'absence d'aimant nous permet d'envisager de rendre le matériel d'identification portatif (un des critères de choix de la RQN, vu précédemment). Il s'agit de la Résonance Quadrupolaire Nucléaire (RQN). La figure 17 donne un schéma explicatif du principe de la RQN.

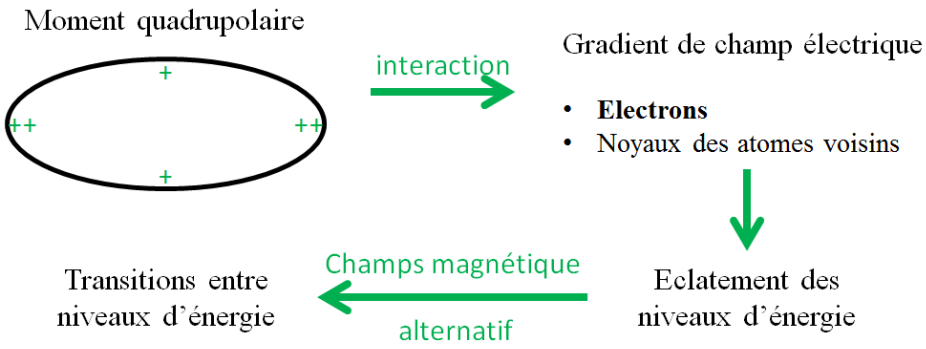



*Figure 17: Principe de la RQN (extrait de [Ferrari, 2008])*

Du fait du « moyennage » à zéro de certaines grandeurs moléculaires à l'état liquide (ici le gradient de champ électrique), la RQN ne peut se pratiquer que sur des solides. Par ailleurs, les fréquences de résonance de l'azote-14 sont relativement basses (quelques MHz) ce qui est à l'origine d'une sensibilité médiocre.

Nous avons eu nous aussi recours à la RQN de l'azote-14 tout simplement parce que le laboratoire possède une forte expérience en la matière (d'où également le choix de molécules azotées). L'azote-14 est un noyau de spin 1, donc possédant trois états repérés par le nombre quantique m qui peut prendre les valeurs 1, 0, -1. Les fonctions d'ondes associées à ces trois états (dont l'expression analytique est inconnue) sont notées respectivement $|1\rangle, |0\rangle, |-1\rangle$. Les niveaux d'énergie d'un spin 1, soumis à l'interaction quadrupolaire, découlent de la considération de l'hamiltonien quadrupolaire. Nous n'allons pas détailler ici les calculs, mais simplement donner le diagramme des niveaux d'énergie (figure 18). $\omega_Q$ représente la fréquence de résonance quadrupolaire et est proportionnelle à l'élément le plus important du tenseur de gradient de champ électrique sous forme diagonale ($V_{zz}$). $\eta$, le paramètre d'asymétrie, est défini par $\eta = \frac{V_{yy}-V_{xx}}{V_{zz}}$ avec $|V_{xx}| \leq |V_{yy}| < |V_{zz}|$. Les fonctions d'ondes associées aux différents niveaux d'énergie sont indiquées à droite de chaque diagramme. Dans le cas général ($\eta \neq 0$), on constate que deux d'entre elles sont des combinaisons linéaires de $|1\rangle$ et $|-1\rangle$ ce qui fait qu'il existe trois transitions permises de fréquences indiquées dans ce même diagramme. Evidemment, la transition de fréquence la plus élevée ($\omega_+$) correspond à la

meilleure sensibilité. En revanche, dans le cas où le tenseur de gradient de champ électrique est de symétrie axiale (et par conséquence avec un paramètre d'asymétrie égale à 0), les deux niveaux de plus haute énergie se regroupent. On dit que le nouveau niveau est dégénéré avec comme fonction d'onde $|1\rangle$ ou$|-1\rangle$. Dans ce cas, on a affaire à une seule transition de fréquence ($\omega_Q$).

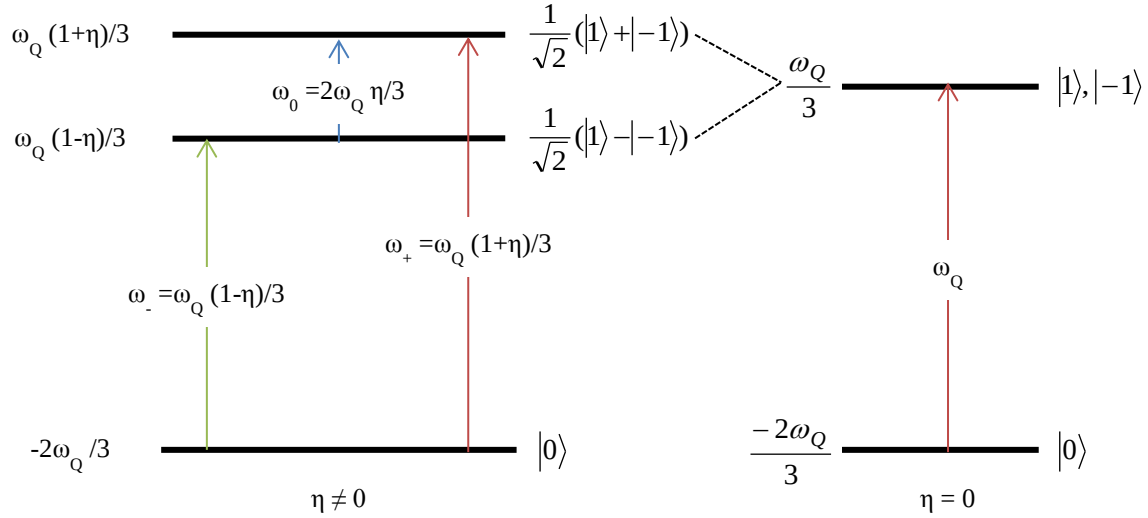



*Figure 18 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un spin 1 soumis à la seule interaction quadrupolaire. A gauche : cas général ($\eta \neq 0$). A droite : tenseur de gradient de champ électrique de symétrie axiale*

La RQN de l'azote-14 est surtout utilisée pour la détection des composés explosifs et des narcotiques [Miller & Barrall, 2005]. Un large développement des techniques de détection s'est fait pour ces deux applications. L'utilisation de ces appareils dans les aéroports permet par exemple aux douaniers de déceler dans les bagages la présence ou non de l'un ou l'autre de ces composés. De même, la technique est utilisée pour détecter les mines anti-personnel sur le terrain. Les mines étant réalisées de plus en plus en composés plastiques (mise à part certaines pièces dont la composition doit être métallique), les détecteurs de métaux arrivent à leur limite et se voient de moins en moins efficaces. La RQN détectant le composé et non le métal, l'identification est bien plus pertinente.

Les fréquences de résonance relatives aux transitions entre les niveaux d'énergie sont donc propres à chaque noyau. Ceci permet une identification unique des noyaux étudiés. C'est ce sur quoi se base l'identification du marquage dans la masse. Une cartographie des différentes fréquences de résonance de l'azote-14 pour certains explosifs, narcotiques ou produits chimiques est donnée en figure 19.

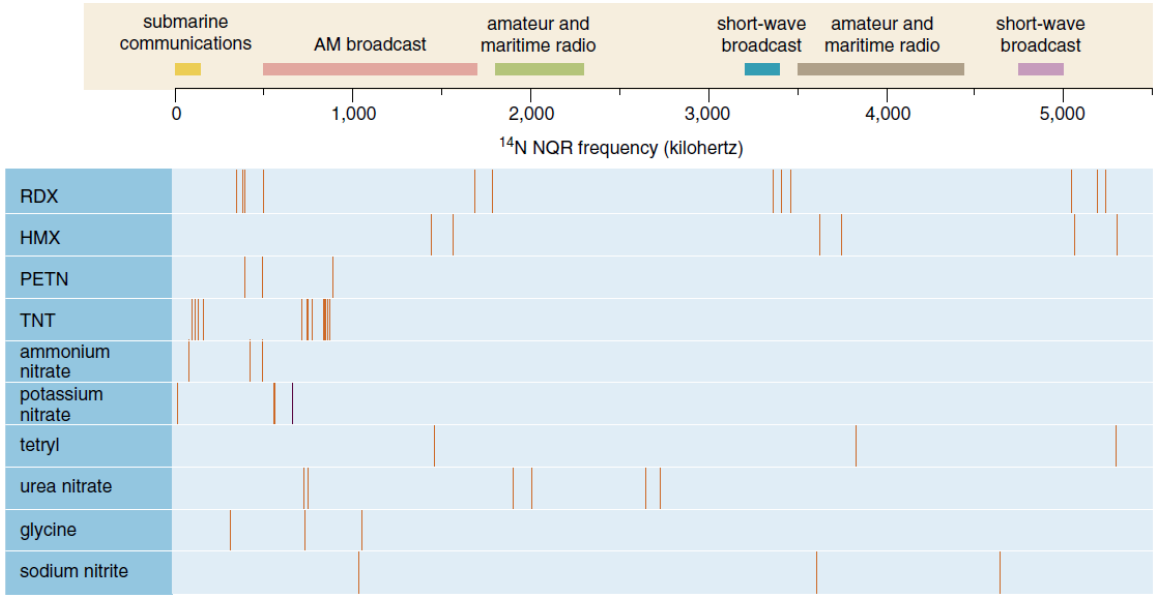



*Figure 19 : Fréquences de résonance de l'azote-14 pour différents composés azotés. Mise en relation des gammes de fréquence (haut) avec les fréquences de résonance (bas)*

- **Méthodologie**

L'instrumentation que nous avons utilisée au laboratoire est une instrumentation « faite maison » [Hiblot & al, 2008].

La sonde est constituée d'une antenne émettrice/réceptrice. Cette antenne est une bobine de fil de cuivre. Deux capacités servent au calibrage de la sonde : la capacité du *tuning* qui permet (comme son nom l'indique) d'accorder la sonde à la fréquence de la mesure et la capacité du *matching* qui sert à adapter l'impédance de l'ensemble (figure 20). La sonde est calibrée pour une fréquence donnée (la porteuse) qui est, la plupart du temps, la fréquence de résonance de la molécule étudiée.

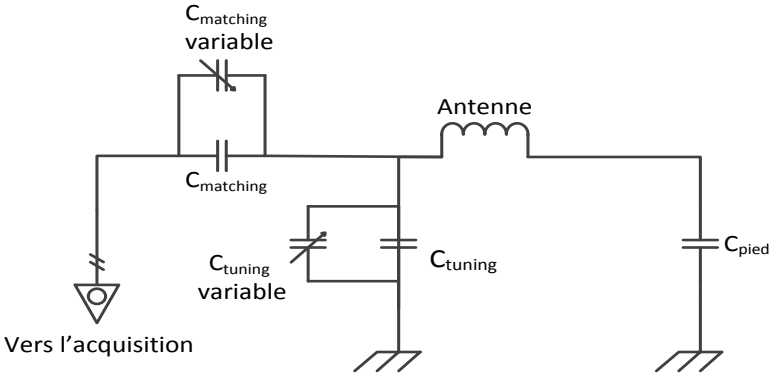



*Figure 20. Schéma électronique de la sonde RQN*

Depuis un ordinateur contrôlant un système d'émission, une série d'impulsions de champ radiofréquence (à une fréquence proche de la fréquence de résonance RQN) est

envoyée vers la sonde. Un amplificateur de puissance permet d'augmenter l'amplitude de ces impulsions afin d'en réduire la durée. Les spins répondant à chacune de ces impulsions par un signal (sinusoïdale décroissante ou superposition de sinusoïdales décroissantes) appelé fid (pour *free induction decay*) (Cf. figure 21). Ces signaux sont généralement additionnés (accumulés) pour améliorer le rapport signal/bruit. Ces signaux accumulés sont ensuite soumis à une transformée de Fourier de façon à passer dans le domaine des fréquences et de visualiser ainsi le spectre traditionnel.

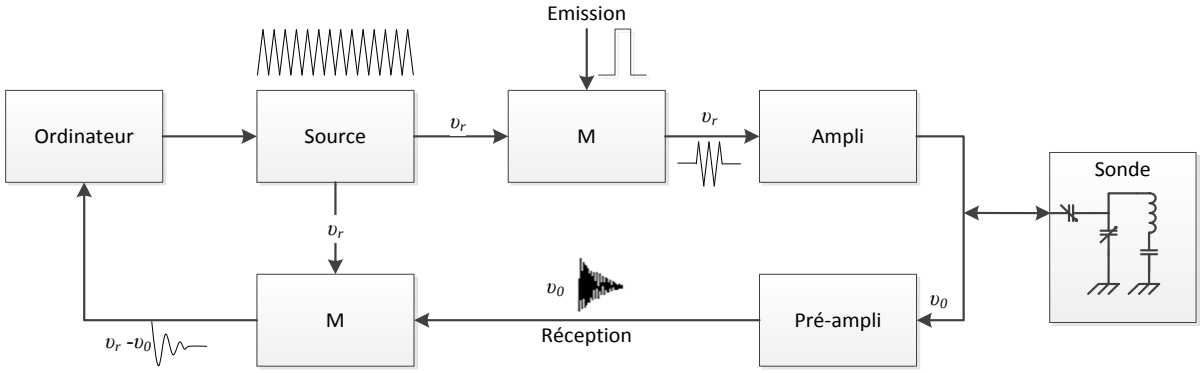



*Figure 21. Fonctionnement de l'appareillage RQN*

Le fid suit une fonction Lorentzienne définie par l'équation ci-dessous.

$$S(t) = A * e^{i*(2\pi * f * t + \varphi)} \times e^{-\pi(LW)t} \qquad (1)$$

Les différents paramètres sont définis ainsi :

- la fréquence *f* de résonance spécifique du produit à identifier,
- l'amplitude *A* du signal,
- la largeur à mi-hauteur *LW (Line Width)* qui est reliée au temps de relaxation $T_1$,
- la phase du signal $\varphi$.

Il est possible de déterminer de manière calculatoire ces paramètres expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaire (NLLS : *Non Linear Least Squares* décrit en annexe) afin de rechercher la meilleure estimation des paramètres. Les spectres présentés dans la suite du document sont, lorsque cela est possible, traités par la méthode NLLS afin de déterminer les valeurs des paramètres et évaluer la pertinence du spectre au regard de ces valeurs. Les spectres traités apparaissent en rouge et les spectres réels en bleu. Nous avons pour cela développé un logiciel décrit dans l'annexe B.

- **Paramètres influençant la mesure RQN**

La RQN dont la sensibilité est médiocre, est influencée par plusieurs facteurs décrits ci-dessous [Guibé & al, 1999], leur impact pouvant considérablement aggraver ce défaut de sensibilité.

Le premier facteur est relatif aux produits que l'on veut détecter (qu'il s'agisse d'une poudre placée dans un tube conventionnel ou d'un composé introduit dans le matériau bois). Afin que le signal RQN soit mesurable, le produit doit être cristallisé aussi bien que possible. La forme de la raie et sa largeur dépendent en effet de façon cruciale de la régularité du réseau cristallin. Tout défaut va contribuer de façon plus ou moins importante à l'élargissement de la raie de résonance et aller même jusqu'à sa disparition. Cet aspect est l'un des plus gros enjeux de ces recherches qui n'a pu aboutir que parce que les produits introduits dans le matériau ont pu cristalliser de telle sorte que les résonances fussent observables.

La température est l'un des facteurs externes qui influencent le plus le signal RQN. Elle intervient dans des oscillations de rotation autour de l'axe principal du gradient de champ électrique qui réduisent par effet de moyenne les composantes effectivement vues par le noyau (théorie développée par Bayer [Bayer, 1951]). Ainsi la modification du gradient de champ électrique influence la fréquence de résonance du noyau, celle-ci étant gouvernée par l'interaction moment quadrupolaire – gradient de champ électrique. Elle impacte aussi le mouvement moléculaire qui contribue à la relaxation nucléaire caractérisée par le temps de relaxation ($T_1$). Guibé cite plusieurs études sur le sujet [Guibé & al, 1999]. Elle a aussi une action sur les transitions de phases rencontrées dans beaucoup de solides [Guibé & al, 1999]. Nous avons eu recours, entre autre, à la résonance de fréquence la plus élevée du nitrite de sodium. Il a été déterminé précédemment que pour cette résonance, une variation de 1°C entraîne un déplacement de la fréquence de résonance de 2000Hz.

Les contraintes exercées sur le composé influencent la mesure RQN [Guibé & al , 1999]. L'introduction d'une pression hydrostatique (qui sera plus simple à appliquer qu'une pression monodirectionnelle sur un cristal) comprise entre 5 et 15 bars va permettre de modifier la distance intermoléculaire ou inter-ionique et ainsi modifier les constantes de couplage quadripolaire. Il en est de même pour l'impact de la température sur les effets de dilatation de la matière qui peuvent influencer la pression appliquée sur les molécules et par voie de conséquence sur les noyaux. Outre les contraintes appliquées de l'extérieur et qui ne sont pas systématiques (voir ci-dessus), il faut également tenir compte des contraintes internes dues aux traitements subis par le matériau. Comme nous le verrons, ces contraintes internes

sont de nature à agir sur le réseau cristallin des molécules insérées dans le matériau et en quelque sorte à y créer des défauts. Le tenseur de gradient de champ électrique s'en trouve légèrement modifié et cela se traduit généralement par un élargissement des raies [Caulder & al, 2004]

### 2.1.3 Produits, matériels et méthodes

Afin de montrer la faisabilité du marquage dans la masse, nous avons réalisé des essais en vue de pouvoir détecter in situ des produits chimiques préalablement introduits dans un échantillon de bois. La réussite est loin d'être assurée et ce pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, les produits introduits dans le bois peuvent interagir avec ce dernier ou avec d'autres composés.
- Après introduction, les produits doivent recristalliser (condition *sine qua non* pour les détecter par RQN).
- Si ces deux dernières conditions sont remplies, pour des raisons d'identification, il faut que les fréquences RQN n'aient pas été modifiées de façon significative.

Afin de vérifier ces conditions, les échantillons de bois sont tout d'abord imprégnés avec une solution aqueuse contenant la (les) molécule(s) à identifier. Ils sont ensuite séchés suivant différentes méthodes afin de faire cristalliser les produits chimiques. Enfin, l'échantillon est placé dans la sonde RQN de façon à mesurer les caractéristiques du signal : fréquence, amplitude et largeur de raie.

Cette partie a pour objectif de présenter les molécules choisies ainsi que le matériel et les protocoles expérimentaux utilisés de façon à procéder au marquage du bois.

- **Molécules utilisées et échantillons**

Pour marquer le bois, les produits retenus doivent être à l'état solide à température ambiante et pouvoir être solubilisés de préférence dans l'eau. La solubilité doit être importante pour qu'il y ait une quantité suffisante de molécules dans l'échantillon. Afin de prouver la faisabilité de la méthode, nous avons choisi des molécules azotées conduisant à des signaux intenses et bien définis en RQN de l'azote-14.

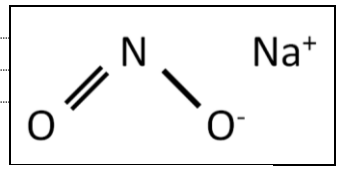
Pour réaliser les imprégnations, deux composés azotés ont été retenus : le nitrite de sodium et l'HexaMéthylèneTétramine (HMT).

Le nitrite de sodium de formule chimique $NaNO_2$ est une molécule modèle utilisée en RQN de l'azote-14. Ce composé possède un paramètre d'asymétrie non nul et conduit donc à trois fréquences de résonance, (à 4.64MHz, 3.60MHz et 1.04MHz). D'un point de vue

biocompatibilité, c'est un produit qui, utilisé en faible quantité, sert de conservateur pour les aliments [Bonnard & al, 2001]. Cependant, en grande quantité, il devient néfaste pour l'environnement et l'être humain. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de quelques propriétés intéressantes pour la suite de cet exposé.

*Tableau 2 : Quelques données sur les propriétés chimiques du $NaNO_2$*

| | |
|---|---|
| Nom | Nitrite de sodium |
| Formule | $NaNO_2$ |
| Solubilité dans l'eau à 25°C | 850g/L |
| Fréquences de résonance RQN de l'azote-14 | 4.647MHz, 3.607MHz et 1.041MHz. |



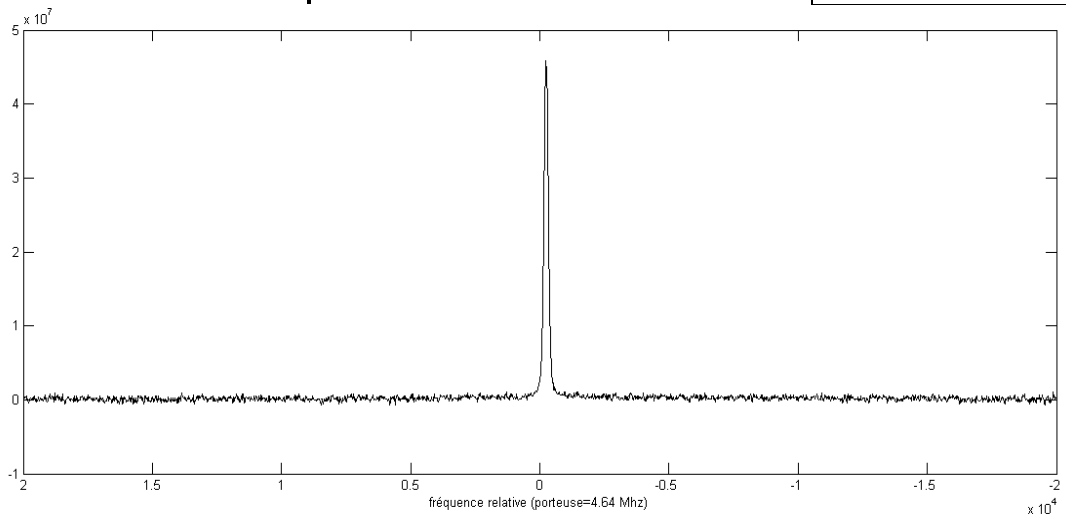
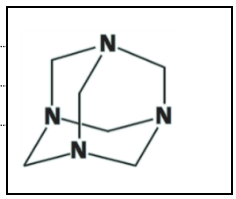




*Figure 22 : Spectre de référence de $NaNO_2$ pour une quantité de 3,29g. 512 fids ont été accumulés puis traités par transformée de Fourier*

L'HexaMéthylèneTétramine que nous noterons dans le document HMT de formule chimique $C_6H_{12}N_4$ est un produit couramment utilisé comme intermédiaire dans la fabrication des explosifs [Bonnard et al, 2008]. C'est sans doute pour ces raisons et parce que ce n'est pas un explosif qu'il est utilisé comme modèle en RQN de l'azote-14. Il possède un paramètre d'asymétrie nul et présente donc une seule fréquence de résonance RQN. Ce composé ne présente aucune prédisposition de biocompatibilité justifiant son utilisation comme marqueur. Cependant il a été choisi car, comme le nitrite de sodium, il est soluble dans l'eau et est susceptible de recristalliser dans le bois. En outre, il n'y a aucune raison pour qu'il ne réagisse avec le nitrite de sodium et il devient donc envisageable d'utiliser un mélange de ces deux molécules en solution aqueuse. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de quelques propriétés du HMT.

*Tableau 3: Quelques données sur les propriétés chimiques du HMT*

| | |
|---|---|
| Nom | HexaMéthylèneTétramine (HMT) |
| Formule | $C_6H_{12}N_4$ |
| Solubilité dans l'eau à 25°C | 600 à 1500g/L (900g/l en moyenne) |
| Fréquence de résonance RQN de l'azote-14 | 3.3019MHz |



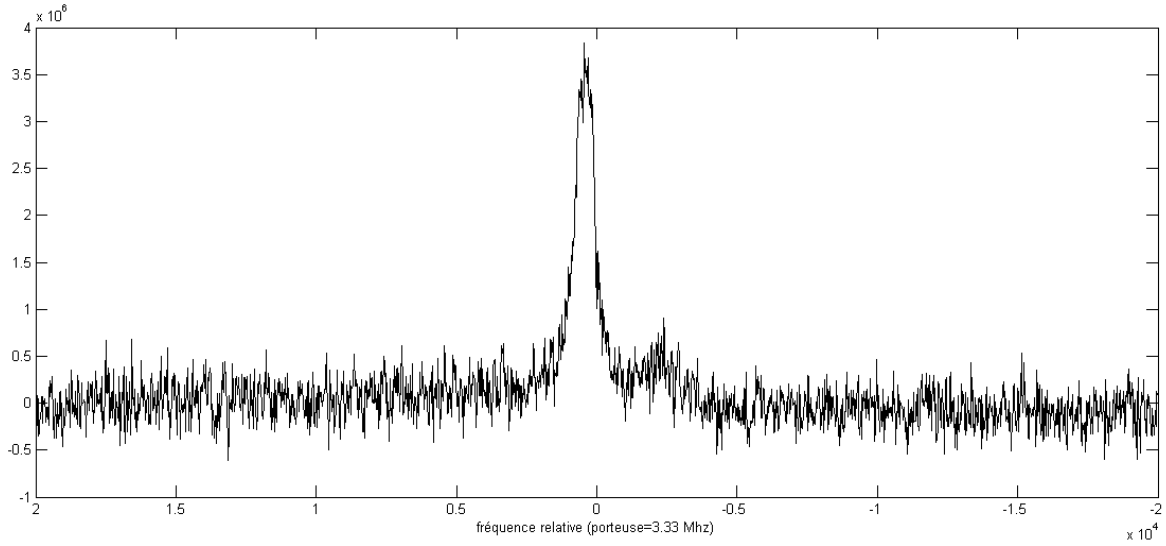




*Figure 23 : Spectre de référence du HMT pour une quantité de 1,893g. 512 fids ont été accumulés puis traités par transformée de Fourier*

Nous avons identifié un autre produit chimique qui pourrait potentiellement être utilisé pour le marquage : l'urée. Dans la littérature, une transition est fréquemment observée à la fréquence RQN de 2913,32 kHz [Iselin, 1995]. Ce produit offre l'avantage, par rapport aux produits précédents, d'avoir une faible écotoxicité qui permettrait de l'utilisé sur des arbres vivant. Nous n'avons pas pu essayer ce produit par manque de matériel et de temps mais il est intéressant de noter la possibilité de l'utiliser.

Les solutions utilisées pour le marquage sont des solutions aqueuses saturées de façon à pouvoir bénéficier d'une sensibilité optimale (en ce qui concerne la RQN).

Pour des raisons de facilité et compte tenu de la façon dont la sonde RQN a été conçue, nous avons utilisé des tubes RMN standards de 10mm de diamètre extérieur. Les échantillons destinés à être placés dans ces tubes sont des pièces de bois cylindriques de diamètres compris entre 6 et 8mm. La hauteur des échantillons est de 7cm correspondant approximativement à la zone d'homogénéité du champ radiofréquence. Ils sont sans singularité (nœuds, poches de résine, …) afin de disposer d'échantillons homogènes et comparables. Dans le même ordre d'idées, pour chaque série d'essais, les échantillons utilisés sont tous issus de la même pièce de bois.

- **L'imprégnation des échantillons**

Cette étape consiste à introduire, par trempage simple ou par imprégnation assistée, les produits chimiques dans le bois. Il existe plusieurs méthodes pour imprégner le bois : par trempage, sous vide ou sous vide/pression. Suivant la méthode mise en œuvre, la profondeur de pénétration et le temps d'imprégnation varient. Nous allons décrire ces trois types d'imprégnation afin de comprendre les avantages et les inconvénients de chacun.

La première méthode est l'imprégnation par trempage qui est la plus utilisée dans l'industrie car elle est la moins coûteuse. Le principe est de laisser la/les pièce(s) tremper dans la solution d'imprégnation. Le bois étant hygroscopique et hydrophile, la solution d'imprégnation va pénétrer au sein du matériau. Cependant l'épaisseur d'imprégnation est très faible car l'absorption de l'eau par le bois est très lente et limitée par la structure du matériau. Le cœur d'une pièce de bois n'est donc généralement pas imprégné. De plus, suivant les essences, le taux d'imprégnation naturelle est plus ou moins important (cf. tableau 4) limitant d'autant plus les quantités et l'épaisseur imprégnées. Pour des raisons de sensibilité concernant la méthode de détection (RQN de l'azote-14), il importe que le maximum de produit puisse recristalliser dans le matériau. Cette première méthode n'apparaît donc pas comme optimale.

| Résineux | Imprégnabilité du bois parfait | Imprégnabilité de l'aubier |
|---|---|---|
| Douglas | non imprégnable | moyennement à peu imprégnable |
| Epicéa | peu à non imprégnable | peu imprégnable |
| Mélèze | non imprégnable | moyennement imprégnable |
| Pin maritime | non imprégnable | imprégnable |
| Pin sylvestre | peu à non imprégnable | imprégnable |
| Sapin | moyennement à peu imprégnable | moyennement imprégnable |

| Feuillus | Imprégnabilité du bois parfait | Imprégnabilité de l'aubier |
|---|---|---|
| Châtaigner | non imprégnable | moyennement imprégnable |
| Chêne | non imprégnable | imprégnable |
| Frêne | moyennement imprégnable | moyennement imprégnable |
| Hêtre | imprégnable | imprégnable |

*Tableau 4 : Imprégnabilité de différentes essences (Norme EN305-02)*

Une première amélioration (connue sous le nom d'imprégnation sous vide) consiste à éliminer l'air contenu dans l'échantillon de bois. La pénétration de la solution aqueuse dans le matériau en sera ainsi facilitée (figure 24). Le vide est réalisé grâce à une pompe à palettes de laboratoire, il n'est pas très important mais est suffisant pour favoriser significativement la pénétration de la solution aqueuse. Dans ce cas, l'épaisseur d'imprégnation est un peu plus

importante que dans le cas précèdent car une partie du produit est entrée afin de combler les vides occupés précédemment par de l'air. Cette méthode est avantageuse car elle permet d'utiliser une quantité minimum de solution nécessaire à l'immersion des échantillons tout en permettant une profondeur d'imprégnation satisfaisante. De plus cette méthode offre l'avantage de ne faire subir aucune contrainte, ni au liquide ni au matériau.

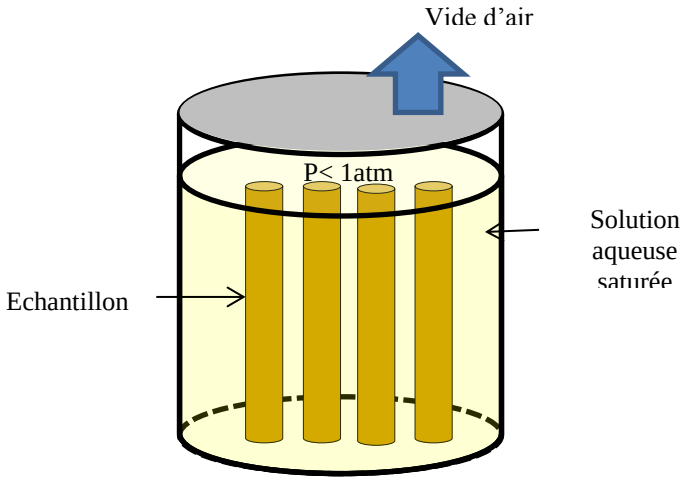



*Figure 24 : Cuve permettant la mise sous vide des échantillons*

La deuxième amélioration (appelée imprégnation vide/pression) consiste d'abord à réaliser un vide d'air puis à introduire la solution et à la mettre sous pression. C'est l'une des méthodes d'imprégnation les plus efficaces. Cela permet d'améliorer la pénétration de la solution dans le matériau et d'avoir des profondeurs d'imprégnation importantes. Le montage, présenté figure 25, est plus compliqué que pour l'imprégnation sous vide car il ne doit pas rompre le vide au moment de l'introduction du liquide et doit supporter des pressions comprises entre 5 et 15 bars. L'utilisation successive du vide et de la pression permet d'avoir une imprégnation à cœur avec la perspective d'introduire une plus grande quantité de produit.

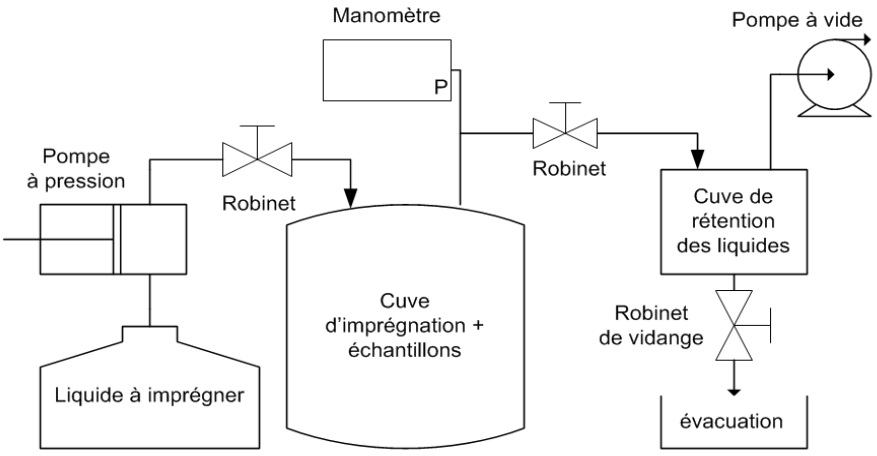



*Figure 25 : Schéma du montage d'imprégnation sous vide/pression*

Différents essais seront effectués à l'aide de ces deux méthodes de manière à déterminer leur incidence sur le processus de recristallisation.

- **Séchage des échantillons**

La deuxième étape est le séchage. Cette étape permet aux produits chimiques de se solidifier et si possible de recristalliser dans les vides intercellulaires du bois. Le séchage peut être naturel (à l'air libre) ou artificiel (dans un séchoir) et peut influencer la qualité et la nature de la recristallisation. On peut rappeler que la bonne lisibilité du signal RQN (s'accompagnant d'une identification aisée de la molécule) va de pair avec la régularité du réseau cristallin.

Il faut savoir que le bois est composé des deux types d'eau : l'eau libre et l'eau liée. L'eau libre est présente dans les espaces vides intercellulaires du bois (trachéides, canaux, …). Elle n'est présente que lorsque l'humidité du bois est supérieure au Point de Saturation des Fibres (PSF) qui est en moyenne de 30%. En deçà de ce point, il ne reste que de l'eau dite liée. L'eau liée est présente dans les parois des cellules du bois. L'abaissement du taux d'humidité en dessous du PSF crée un retrait du bois suivant trois dimensions (radiale, tangentielle et longitudinale) (figure 26). La distinction entre ces deux types d' « eau » est importante car une fois que le bois a atteint le PSF, le bois ne possède plus d'eau dans les vides cellulaires, ce qui est favorable à la recristallisation des produits.

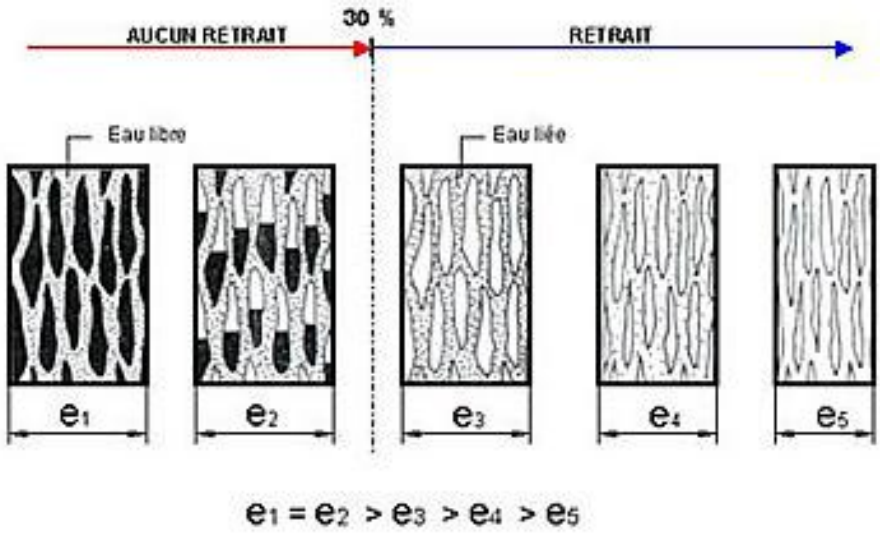



*Figure 26 : Distinction entre eau libre et eau liée ainsi que leur impact sur le bois (Extrait du CNDB)*

Le séchage à l'air libre est très utilisé dans l'industrie du bois car il permet de ne pas consommer de chaleur et permet ainsi des économies importantes. Cependant ce séchage est beaucoup plus long qu'avec un séchoir en particulier pour des pièces de grosses sections. Dans le cadre de cette thèse, le séchage à l'air libre est réalisé dans une halle dont l'humidité

relative est de 12%, la température variant entre 15 et 25°C (suivant les saisons). Ce type de séchage permet de ne pas faire subir de variations violentes de température au bois et aux produits chimiques. La cristallisation est plus lente car l'évaporation de l'eau dans le bois se fait lentement. L'humidité finale du bois avec le séchage naturel est d'environ 6% dans les conditions citées précédemment.

Le séchage artificiel impose l'utilisation d'un séchoir qui permet de diminuer le taux d'humidité du bois par apport de chaleur. Pour la réalisation du séchage des échantillons, un séchoir régulé à une température de 103±2°C[9] permet d'obtenir une humidité finale de 0% [NF-B 51004, 1985]. Ce séchage artificiel permet de gagner du temps mais est à l'origine de d'avantage de contraintes de température sur le bois et les produits chimiques.

Ces deux protocoles de séchage feront l'objet de différents essais avec comme critère l'intensité du signal RQN.

- **Protocoles expérimentaux de préparation des échantillons**

Comme les protocoles expérimentaux sont peu nombreux et qu'ils sont réutilisés constamment dans les expériences, ils sont décrits dans cette partie et les numéros qui leur sont attribués sont utilisés pour les appeler. Deux étapes sont à noter dans les protocoles (figure 27) :

- L'imprégnation qui est réalisée sur l'échantillon : sous vide ou sous vide/pression. Les échantillons passent quatre jours en imprégnation.
- Le séchage réalisé sur l'échantillon : laisser à l'air libre ou séchage rapide au séchoir. Ils sont séchés pendant une semaine (temps nécessaire au séchage à l'air libre pour avoir un taux d'humidité stable).

| Type d'imprégnation | Type de séchage | Nom du protocole |
|---|---|---|
| Sous vide | Air libre | P1 |
| Sous vide | Séchoir | P2 |
| Vide/pression | Air libre | P3 |
| Vide/pression | Séchoir | P4 |

*Figure 27 : Protocoles expérimentaux*

[9] Température utilisée dans les protocoles expérimentaux normatifs [NF-B 51004, 1985] de détermination de l'humidité du bois. Cette température est le seuil avant dégradation du bois par la chaleur.

- **Protocoles de mesure RQN**

Les protocoles de mesure en RQN sont souvent considérés comme étant proches de ceux utilisés en RMN. Comme nous l'avons vu précédemment, les parties électronique et informatique d'un appareil de RQN sont quasiment identiques à celle d'un spectromètre RMN, mise à part la gamme de fréquences de travail : en RMN, la gamme de fréquence va généralement de quelques dizaines de MHz à plusieurs centaines de MHz alors que les mesures RQN de l'azote-14 requièrent une gamme de fréquences allant de plusieurs centaines de kHz à 6 MHz.

Les années 1970 ont vu l'avènement de la RMN par transformée de Fourier. Il s'agit en fait d'exciter le système de spins au moyen d'un champ magnétique alternatif (produit par une bobine appropriée : voir par exemple le schéma de la figure 20) dont la fréquence est fixe et proche des résonances constituant le spectre (on parle de « fréquence porteuse »). Ce champ est appliqué sous forme d'une impulsion de puissance. On parlera alors d'impulsion de champ radiofréquence ou plus simplement d'impulsion rf. La réponse du système de spins est, nous l'avons vu, ce que l'on appelle un « fid » (pour « *free induction decay* ») dont la transformée de Fourier conduit au spectre traditionnel, tel qu'il pouvait être précédemment observé par les méthodes de balayage de fréquence (dites « cw » pour « *continuous wave* »). La RMN par transformée de Fourier présente deux avantages :

- L'instrumentation est plus simple,
- Les fids s'atténuent en moins d'une seconde alors que l'acquisition d'un spectre en onde continue nécessite plusieurs minutes (voir plusieurs dizaine de minutes).

Ce dernier point est en fait à l'origine de la popularisation de la RMN par transformée de Fourier (que l'on pourrait appeler RMN impulsionnelle) car il permet la mise en œuvre des méthodes d'accumulation. On sait en effet que l'addition cohérente de n résultats indépendants conduits à une amélioration du rapport signal-sur-bruit (S/N) par un facteur $\sqrt{n}$ . Une telle procédure est évidemment inapplicable aux spectres cw mais est parfaitement envisageable s'il s'agit de fids. Ceux-ci sont donc accumulés n fois (on parlera de « n scans ») et une transformée de Fourier est appliquée au résultat. Comme cela a déjà été évoqué plus haut, le S/N du spectre final est donc augmenté d'un facteur $\sqrt{n}$ par rapport à une acquisition unique. Evidemment, compte tenu de la sensibilité médiocre de la RQN de l'azote-14, les mêmes procédures expérimentales lui sont appliquées et on parlera plutôt de RQN impulsionnelle (ou en anglais de « *pulsed NQR* »).

On ne considérera ici que la plus simple des expériences, celle qui consiste à appliquer une impulsion rf et à acquérir le fid. En RMN, deux paramètres sont à prendre en compte :

- La durée de l'impulsion qui détermine ce que l'on appelle l'angle de basculement (« *flip angle* ») et par là l'amplitude du fid donc, *in fine*, l'intensité des pics dans le spectre. Cet angle de basculement est proportionnel à la durée de l'impulsion et le maximum de l'intensité est obtenu pour une valeur de 90°, ce qui a pour effet de basculer l'aimantation nucléaire de l'axe Z (qui coïncide avec le champ magnétique statique) vers le plan de mesure.
- Le temps de répétition (entre deux impulsions consécutives) qui permet un retour partiel de l'aimantation nucléaire vers sa position d'équilibre (selon Z). Ce sont les phénomènes de relaxation qui gouvernent l'importance de la restauration de l'aimantation nucléaire lorsqu'il y a accumulation.

On trouve généralement un compromis entre angle de basculement et temps de répétition de façon à optimiser l'amplitude du signal.

En RQN, lorsqu'il ne s'agit pas d'un monocristal pour lequel il existerait une direction privilégiée (dont il ne sera plus question dans cette thèse), les conditions sont radicalement différentes par le fait qu'il n'existe pas de champ magnétique statique (donc pas de direction privilégiée). Il en résulte, entre autres, qu'il n'y a pas de polarisation comme en RMN. L'autre conséquence est qu'on ne peut plus recourir au concept du repère tournant qui, en RMN, permet de comprendre facilement l'effet d'une impulsion rf et conduit à la notion d'angle de basculement. Une approche théorique correcte repose sur un traitement par la matrice densité [Canet & Ferrari, 2009] et fait nécessairement appel à une « moyenne de poudre » puisqu'il faut tenir compte de l'orientation de chaque micro-cristallite par rapport à la bobine qui est à la fois émettrice (impulsion rf) et réceptrice (détection du signal). Sans vouloir rentrer dans les détails, il apparait que le temps de répétition n'est pas critique [Ferrari & al, 2007] du fait d'un effet des impulsions rf très différent d'un micro-cristallite à l'autre. Il reste à déterminer l'équivalent de l'angle de basculement. Celui-ci ne peut être déterminé théoriquement (et expérimentalement) qu'au moyen de courbes de nutation. Une courbe de nutation est obtenue en mesurant l'amplitude du signal S en fonction de la longueur de l'impulsion $\tau$. En RMN, une courbe de nutation est une simple sinusoïdale telle que $S(\tau) = \sin(\gamma B_1 \tau)$, $\gamma$ étant le rapport gyromagnétique du noyau considéré et $B_1$ l'amplitude du champ rf. Bien entendu, le premier maximum de la courbe de nutation (en RMN) se produit pour $\gamma B_1 \tau \equiv \pi/2$ (90°) et le passage par zéro pour $\gamma B_1 \tau \equiv \pi$ (180°). $\pi/2$ et $\pi$ correspondent aux angles de basculement.

En RQN, comme cela a été dit précédemment, il faut effectuer une « moyenne de poudre » (sur l'orientation des micro-cristallites) ce qui entraine des courbes de nutation plus compliquées qu'une fonction sinus mais qui restent universelles. Il convient cependant de faire la distinction entre η =0 (tenseur de gradient de champ électrique de symétrie axiale) et η ≠0. Dans le cas général (η ≠0), la courbe de nutation de la figure 28 est valable pour les trois transitions. Le premier maximum intervient pour une valeur de 119°, $\gamma B_1 \tau$ étant en degrés, et le passage par zéro pour 257°. On constate que les valeurs sont significativement différentes de celles de la RMN. Il se trouve que pour η =0 la courbe de nutation est différente (ce qui s'explique théoriquement par une différence de phase des signaux correspondant à $\omega_+$ et à $\omega_-$). Dans la figure 28, on trouve les valeurs du premier zéro. Bien entendu, le problème de sensibilité étant particulièrement aigu dans notre cas, on réglera la longueur de l'impulsion de manière à recueillir un signal correspondant au premier maximum.

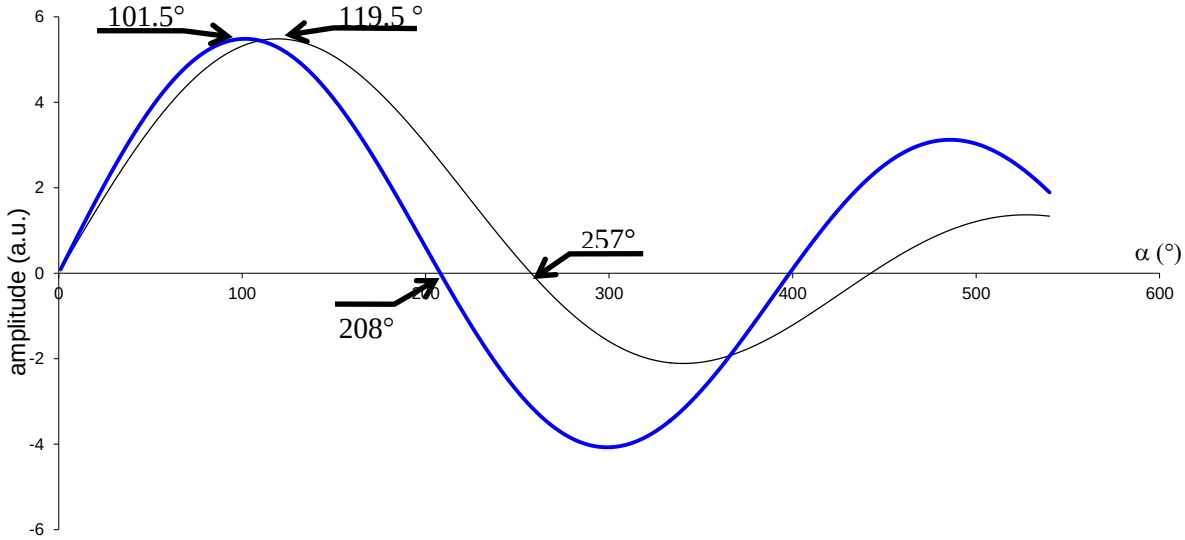



*Figure 28 : Courbes de nutation en RQN. En bleu : η=0. En noir : η ≠ 0*

Un autre problème crucial, inhérent à la RQN de l'azote-14 du fait des basses fréquences auxquelles se font les mesures, tient à ce que l'on appelle en anglais le *« probe ringing »*. Il s'agit d'oscillations indésirables qui suivent ou prolongent l'impulsion rf. L'amplitude de ces oscillations étant supérieure à celles des signaux RQN, la seule façon d'éviter que ces derniers soient totalement occultés est de retarder le début de l'acquisition du signal en imposant ce que l'on appelle un temps mort (« *dead time* »). Ce temps mort n'a évidemment de sens que si l'atténuation du signal RQN (fid) est plus lente que celle du *ringing*. Cette procédure s'accompagne évidemment d'une perte de sensibilité puisque le signal RQN qui existe durant ce temps mort est irrémédiablement perdu. En outre, ce temps

mort doit être convenablement choisi en fonction de l'amplitude du signal RQN. Comme le montre la figure ci-dessous correspondant au premier essai de détection du nitrite de sodium recristallisé dans le bois, on pourrait penser que les signaux autres que celui correspondant à la fréquence de résonance habituelle correspondent à du nitrite de sodium mal recristallisé.

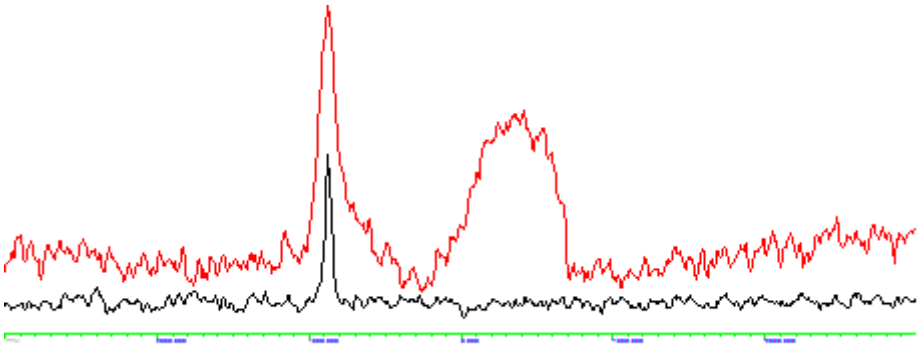


*Figure 29 : Spectre RQN du nitrite de sodium. En noir : échantillon test de nitrite de sodium, 8 scans. En rouge : nitrite de sodium imprégné dans un échantillon, 40 000 scans*

Des travaux ultérieurs ont démontré qu'il n'en était rien et que ces signaux larges étaient attribuables à des résidus de « *ringing* ». En fait, nous avons développé au sein du laboratoire de nouveaux protocoles expérimentaux qui, dans le cas de signaux faibles (nécessitant de longues accumulations), évitent l'apparition de tels signaux parasites. L'idée est relativement simple et consiste à utiliser des impulsions rf de puissance beaucoup plus faible et, par conséquent, utilisant des impulsions beaucoup plus longues (pour se placer au premier maximum de la courbe de nutation). Le bienfait de ces impulsions de faibles puissances apparaît sur la figure 30 et la figure 31.

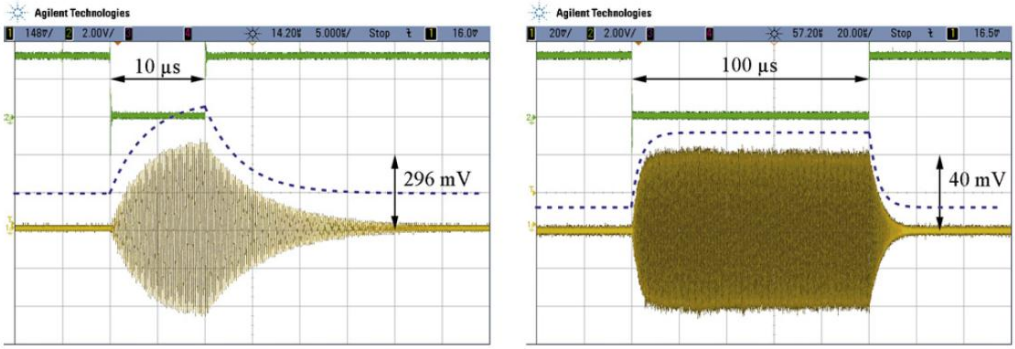



*Figure 30 : Impulsion rf (4.6MHz) visualisée grâce à une petite bobine de détection positionnée dans la sonde RQN à la place de l'échantillon. A gauche : impulsion de 10µs (correspondant au premier maximum du signal) pour une puissance de 175W. A droite : impulsion de 100µs (correspondant au premier maximum du signal) pour une puissance de 3W*

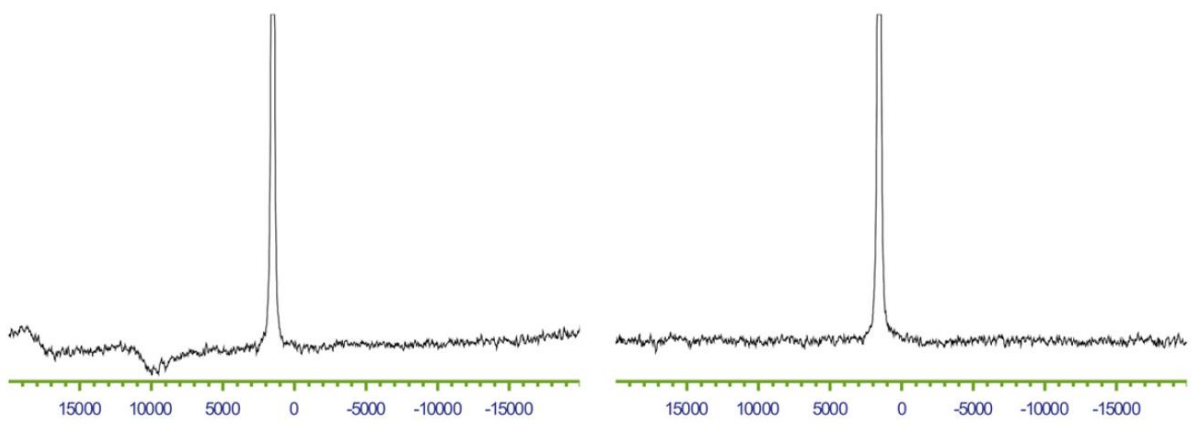



*Figure 31 : Spectre RQN ($^{14}N$) de $NaNO_2$ à 4 .64Hz. A gauche : avec une puissance de sortie de l'émetteur de 175W et une durée d'impulsion de 10µs. A droite : avec une puissance de sortie de l'émetteur de 3W et une durée d'impulsion de100µs. Afin de mettre en évidence les défauts de la ligne de base, on a procédé à 4000 accumulations et appliqué le même traitement aux deux expériences. Fenêtre spectrale : 40kHz. La largeur du pic à mi-hauteur est de l'ordre de 130Hz.On remarquera les déformations de la ligne de base dans le spectre de gauche*

Compte tenu de toutes ces considérations, nous avons défini le protocole général pour la détection du $NaNO_2$ et du HMT recristallisé dans le bois :

- $NaNO_2$ : Durée de l'impulsion : 100µs ; *Dead time*: 250µs ; Puissance : 2.2W
- HMT : Durée de l'impulsion : 100µs ; *Dead time*: 250µs ; Puissance : 1.8W
- Acquisition du signal : 2048pts. Fenêtre spectrale : 40kHz.
- Temps de répétition (entre deux impulsions consécutives) : 0.5s

- **Traitement des données RQN**

Après avoir amélioré les protocoles expérimentaux qui ont permis de ramener le temps de mesures de quelques heures à quelques minutes, nous avons tenté d'aller plus loin en écrivant un logiciel de traitement de données qui inclut une procédure permettant de retrouver un signal qui émerge à peine du bruit de fond. Cette procédure permet d'envisager un temps de mesure de moins d'une minute (donc susceptible de convenir à une utilisation industrielle). Nous décrirons maintenant les différents traitements que peut effectuer ce logiciel sachant qu'ils sont très classiques et issus de la RMN [Canet, 2002]. Nous n'avons retenu que ceux qui sont utiles à nos expériences.

Comme nous l'avons dit ci-dessus, le début de l'acquisition est décalé afin de réduire au maximum la quantité de signal parasite et de n'avoir que le signal RQN. Cependant, en fonction de la durée du temps mort, des signaux parasites peuvent subsister et affecter les premiers points du fid. On peut décaler le début du fid d'une ou plusieurs positions de façon à

éliminer les données polluées. Des zéros sont concomitamment placés à la fin du fid. Grâce à cette opération (connue sous le nom de « *Left shift* », les déformations de la ligne de base sont atténuées voir supprimées comme le montre la figure 32. Cependant le nombre de points à retirer doit être limité pour préserver, autant que faire se peut, l'intensité du signal RQN.

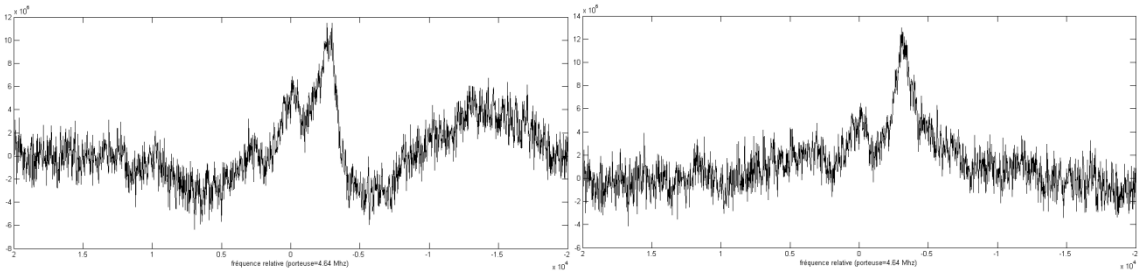


*Figure 32 : Influence du « Left shift » sur le spectre RQN (obtenu après transformée de Fourier du fid). A gauche : spectre brut. A droite : application d'un décalage à gauche de 2 points sur le fid*

Il est également possible d'éliminer une partie du bruit de fond. Ce dernier est particulièrement visible à l'extrémité droite du fid lorsque le signal RQN s'est suffisamment atténué pour être très proche de zéro. Compte tenu de cette observation, on peut mettre en œuvre un filtre très simple qui consiste à multiplier le fid par une exponentielle décroissante de constante de temps *T*. *T* est choisi de telle sorte que l'exponentielle décroissante soit très proche de zéro pour la partie du fid qui (à vue) ne comporte pas que du bruit, ce qui aura pour effet de réduire d'autant le bruit dans le spectre qui résulte d'une transformée de Fourier du fid. Cependant cette opération n'est pas sans incidence sur le signal RQN tel qu'il apparaît dans le domaine des fréquences. En effet, sans multiplication exponentielle, sa largeur de raie à mi-hauteur est égale à $\frac{1}{\pi T_2}$ où $T_2$ est la constante de temps de la décroissance du fid qui s'exprime par $e^{-t/T_2}$ (dans le domaine des temps). La multiplication par une exponentielle décroissante fait que à $e^{-t/T_2}$ on doit substituer $e^{-t(1/T_2+1/T)}$. La largeur de raie devient $\frac{1}{(\pi T_2)}+\frac{1}{(\pi T)}$. L'élargissement additionnel doit être « raisonnable », tel que le pic reste parfaitement visible (donc *T* doit rester très inférieur à $T_2$). Dans la pratique, plutôt que d'indiquer la valeur de *T*, on fournira ce que l'on appelle en anglais LB (pour « *Line broadening* »), c'est-à-dire $\frac{1}{(\pi T)}$. Ce traitement permet facilement d'améliorer le rapport signal sur bruit comme le montre la figure 33.

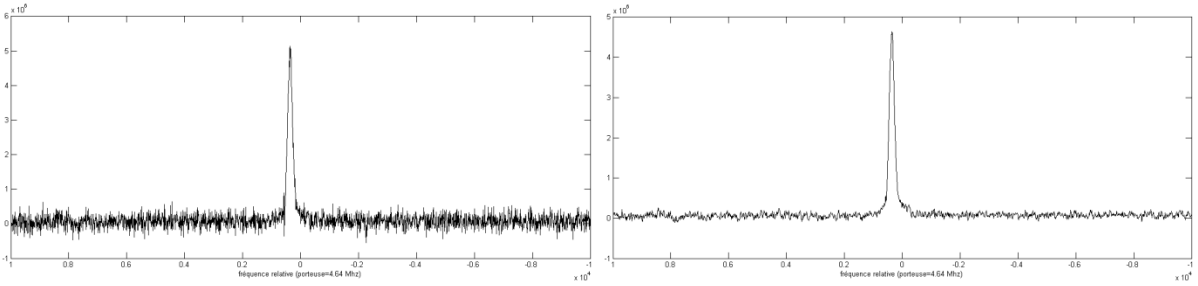


*Figure 33 : Influence de la multiplication exponentielle sur l'allure du spectre. A gauche: spectre résultant d'un fid non traité. A droite : spectre résultant d'un fid traité avec une multiplication exponentielle de 50Hz.On notera que l'élargissement du pic (dans le spectre de droite) reste très acceptable*

Après que ces deux traitements aient été appliqués (ou non), les fid sont traités par transformée de Fourier de façon à passer dans le domaine des fréquences. Une correction dite « de phase » est généralement nécessaire pour obtenir ce que l'on appelle un « pic d'absorption », c'est-à-dire un pic totalement positif comme le montre la figure 34. La partie réelle de la transformée de Fourier du fid est en principe un pic d'absorption A et la partie imaginaire un pic de dispersion D. Cette situation idéale est rarement rencontrée dans la pratique du fait de déphasages divers dans la chaîne de réception. Les parties réelle et imaginaire peuvent alors s'écrire :

$$\begin{aligned} Re &= A\cos(\varphi) + D\sin(\varphi) \\ Im &= A\sin(\varphi) - D\cos(\varphi) \end{aligned} \qquad (2)$$

φ est l'angle de phase qu'il suffit de trouver par essais erreurs. Il suffira ensuite de combiner partie réelle et partie imaginaire pour obtenir un spectre d'absorption dans la partie réelle :

$$\cos(\varphi)Re + \sin(\varphi)\,Im = A \qquad (3)$$

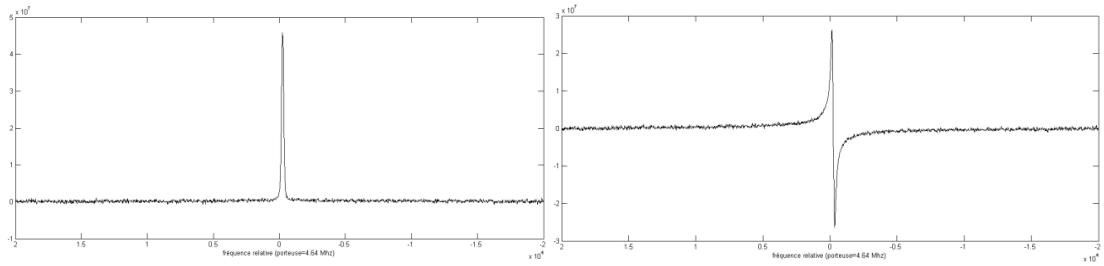


*Figure 34 : A gauche : Partie réelle après transformée de Fourier, « pic d'absorption ». A droite : partie imaginaire après transformée de Fourier, « pic de dispersion »*

C'est à partir de ce spectre qu'il sera possible de déterminer s'il y a présence ou non de la molécule étudiée. Les paramètres mesurables à partir du signal dans le domaine des fréquences sont la fréquence de résonance, la largeur de raie à mi-hauteur, l'intensité du signal (aire du pic) et la phase.

Lorsque le rapport signal-sur-bruit est médiocre, la détermination de ces paramètres à partir du spectre est imprécise, voire impossible. C'est la raison pour laquelle nous avons développé un algorithme par moindres carrés conduisant à une estimation optimale de ces paramètres. Ceux-ci sont calculés de telle sorte qu'ils minimisent la somme des carrés des écarts entre fid expérimental et fid théorique (2).

$$\sum_{k=0}^{n} \left(Sexp(k) - Scal(k)\right)^2 \qquad (4)$$

Avec *Sexp(k)* le k$^{ème}$ point du fid (comportant n points au total) et $Scal(k) = S_0 * e^{i(2\pi f(k\Delta t)+\varphi)} \times e^{-\pi(LW)k\Delta t}$ dans l'hypothèse d'une décroissance exponentielle, donc d'une raie Lorentzienne. $S_o$ est l'amplitude du fid (donc l'aire du pic dans le domaine des fréquences), $\Delta t$ le pas d'échantillonnage, f la fréquence de résonance, LW la largeur de raie à mi-hauteur (domaine des fréquences) et φ le facteur de phase défini plus haut. Le calcul qui relève des algorithmes de moindres carrés non linéaire (*NLLS* pour « *Non Linear Least Square* ») est effectué au moyen d'une fonction incorporée dans le logiciel MATLAB (fonction : *fminsearch*, algorithme : *Simplex*). Du fait du faible nombre de paramètres à optimiser et de la connaissance d'une valeur approchée pour certains d'entre eux, il n'est pas apparu nécessaire ici de faire appel à des algorithmes plus élaborés. Cette méthode avait fait ses preuves en RMN lorsque le spectre comportait plusieurs pics [Montigny & al, 1990]. Elle doit d'autant mieux s'appliquer ici où nous n'avons affaire qu'à un seul pic.

En tout état de cause, cette procédure par moindres carrés nécessite de disposer de valeurs initiales assez proches des valeurs optimales. L'originalité de l'algorithme que nous avons développé réside dans son automatisation. Nous recourons, dans un premier temps, au spectre de puissance pour déterminer trois des quatre valeurs requises. Le spectre de puissance (qui est obtenu en additionnant les carrés des parties réelle et imaginaire de la transformée de Fourier du fid) possède en effet quelques propriétés intéressantes au vu de la détermination des paramètres initiaux :

- Il est indépendant du facteur de phase φ ;

- Sa surface est égale à $S_0^2$ ;
- Sa largeur de raie à mi-hauteur est identique à celle du spectre d'absorption ;
- Son maximum intervient à la fréquence de résonance.

La valeur initiale de l'angle φ est choisie arbitrairement à zéro ou est fixée par l'utilisateur. Cette détermination automatique des paramètres initiaux peut être mise en défaut si le rapport signal-sur-bruit est insuffisant. Dans ce cas, l'utilisateur doit fournir des valeurs initiales pour les quatre paramètres.

Grâce au logiciel, décrit plus en détail en annexe B, il est donc possible d'obtenir les paramètres optimaux relatifs à toute mesure même si les conditions expérimentales sont médiocres. Dans la suite de cette thèse, lorsque l'optimisation conduit à un résultat pertinent, le spectre expérimental (dénommé « fftSexp ») et le spectre théorique (dénommé « fftScal ») sont affichés, respectivement, en bleu et en rouge (figure 35).

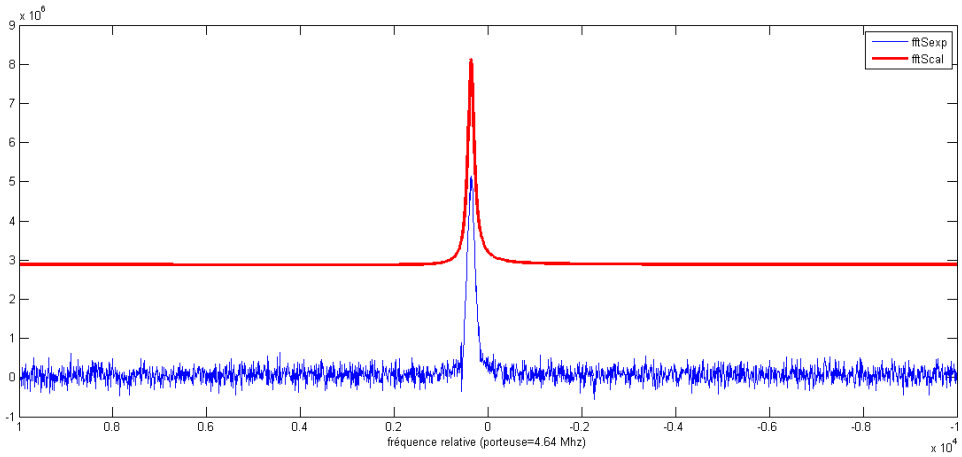



*Figure 35 : Spectre expérimental (en bleu) et théorique (en rouge) obtenu par la méthode NLLS. Le décalage vertical est introduit manuellement pour des raisons de lisibilité*

## 2.2 Etude de faisabilité du marquage dans la masse du bois

Dans cette partie nous allons décrire les expériences que nous avons réalisées afin de prouver la faisabilité du marquage dans la masse du bois. Dans un premier temps, nous décrirons les premiers essais. Ensuite, nous présenterons diverses expériences qui nous ont permis de déterminer l'influence du type d'imprégnation, du type de séchage, de l'essence et du produit imprégné. Enfin, nous avons effectué un certain nombre d'essais en vue de définir les conditions expérimentales permettant de réduire le temps de mesure (donc le nombre de scans) tout en préservant la précision des grandeurs à déterminer : l'amplitude du signal (qui conduit à la quantité introduite dans le matériau), la fréquence (qui conduit à l'identification de la molécule de marquage et qui fournit une indication sur l'éventuelle évolution de

l'échantillon) , la largeur de raie (qui peut apporter des informations quant aux interactions entre la molécule de marquage et le matériau bois).

### 2.2.1 Les premiers essais de marquage

Il faut bien comprendre que, par rapport au point où nous en sommes aujourd'hui, l'idée initiale de marquer le bois dans la masse était réellement une gageure. Du fait des nombreux points exposés précédemment sur la sensibilité de la technique et les conditions d'acquisition d'un signal correct en spectroscopie RQN, il n'apparaissait pas évident de pouvoir détecter un produit ayant recristallisé après imprégnation du matériau et séchage. Malgré d'importantes réserves, nous avons quand même effectué quelques tentatives qui auraient pu, éventuellement, invalider cette idée. Nous avons choisi d'utiliser des nitrites de sodium de deux provenances différentes (que nous qualifions selon leur temps de stockage de « nouveau » et « d'ancien »). Nous voulions, au travers de ces deux essais, savoir si les expériences étaient répétables et si le choix du produit avait un impact sur le signal final.

Presque contre toute attente, on observe bel et bien un signal RQN à la fréquence de résonance du nitrite de sodium de l'échantillon de référence comme le montre la figure 36. Ce résultat prouve que, non seulement le bois a été convenablement imprégné, mais que le nitrite de sodium a pu recristalliser au sein du matériau.

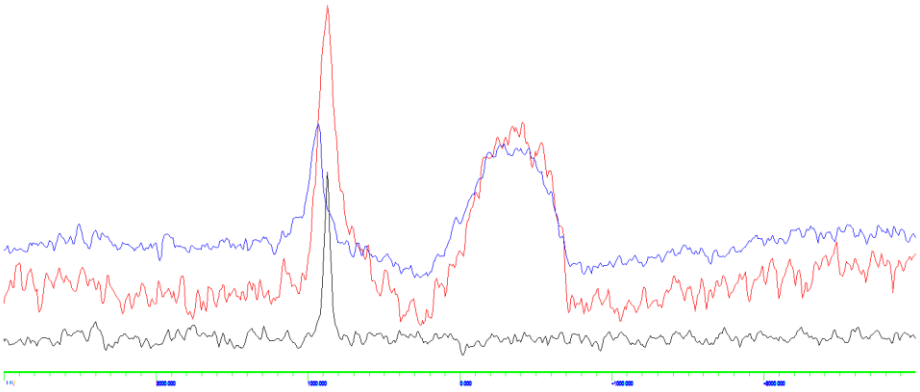


*Figure 36 : Premiers spectres du nitrite de sodium introduit dans du bois. (En noir, le spectre de l'échantillon de référence de nitrite de sodium avec 8 scans; en bleu, le spectre du nitrite de sodium « neuf » dans le bois avec 40 000 scans ; en rouge, le spectre du nitrite de sodium « ancien » dans le bois avec 40 000 scans*

Cependant, ces premiers spectres avaient été obtenus avec des réglages standards qui impliquaient des impulsions de puissance et un nombre élevé d'accumulations, ces deux derniers points pouvant entraîner un échauffement de la sonde et vraisemblablement une disparition du signal. Par ailleurs, les deux signaux larges, apparaissant à la droite du pic du

nitrite de sodium sont, comme cela a été dit plus haut, attribuables au « *ringing* » de la sonde. Le protocole décrit précédemment impliquait donc de passer à la RQN de faible puissance, ce qui nous a permis d'obtenir des spectres de qualité (présentés dans les paragraphes suivants) nécessitant un temps de mesure raisonnable.

### 2.2.2 Analyse de l'influence de différents facteurs relatifs aux échantillons.

Après avoir démontré que le nitrite de sodium recristallisait dans le bois après imprégnation (par une solution aqueuse) et séchage, nous avons procédé à une série d'essais de façon à étudier l'influence des protocoles de préparation des échantillons.

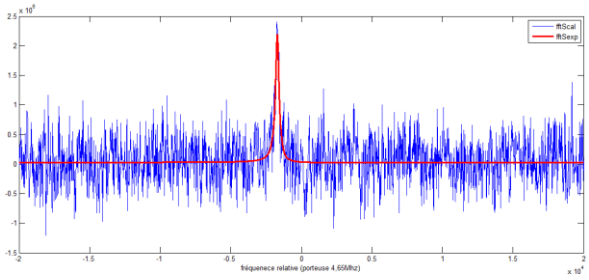
- **Influence de l'essence et du mode de séchage**

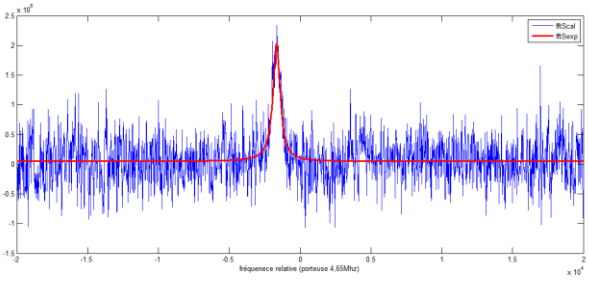
L'essence d'un bois est évidemment de première importance lorsque l'on étudie l'imprégnation de ce matériau. Afin de déterminer dans quel type de bois on peut introduire le plus possible de $NaNO_2$, nous avons, en premier lieu, étudié l'influence de l'essence. Pour cela, cinq essences ont été sélectionnées et pour chacune d'elles, deux échantillons ont été préparés et traités selon les protocoles P1 et P2 respectivement (figure 27). Notre but n'était pas ici de réaliser une expérience le plus brièvement possible mais de disposer de spectres directement lisibles et comparables même lorsque l'imprégnation était relativement faible. Nous avons généralement accumulés 16000 scans et, si aucun signal n'était visible, nous sommes passés à un plus grand nombre d'accumulations en nous limitant toutefois à 131000 scans. En l'absence de signal dans ce dernier cas, nous décréterons que l'échantillon ne contient pas de nitrite de sodium.

Les cinq essences choisies, qui sont représentatives des essences françaises, sont :

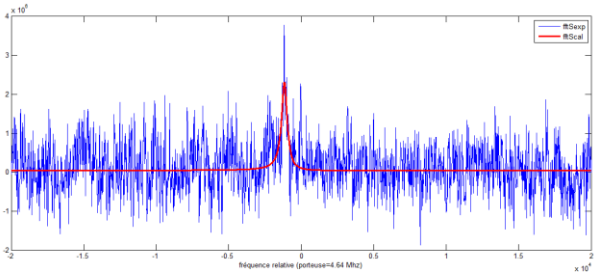
- Le chêne qui est l'une des essences de feuillus les plus difficiles à traiter par imprégnation. Si l'on obtient un signal, on peut espérer que, pour toutes les autres essences, l'imprégnation et le marquage seront réalisables.
- Le hêtre qui est une essence imprégnable va nous permettre de savoir s'il existe une interaction entre le matériau bois et le produit chimique. Cette essence sert aussi de référence dans le domaine du bois. Il est certain que la solution d'imprégnation pénètre dans ce type d'échantillon, il reste à savoir si le produit recristallise de telle sorte qu'un signal RQN soit visible.
- Le frêne qui est une essence médiane entre le chêne et le hêtre (imprégnabilité moyenne) permettra de savoir s'il existe une limite quant au taux d'imprégnation du bois.

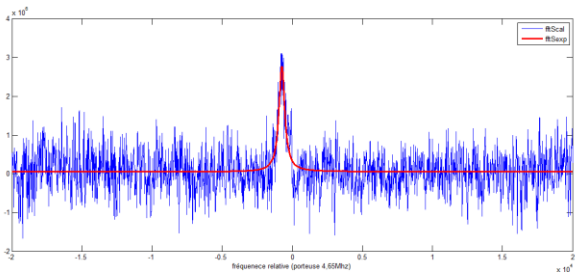
- Le sapin qui a été l'essence de référence pour les premiers essais que nous avons réalisés. C'est aussi une essence très présente dans l'industrie du bois et présente de ce fait un intérêt financier certain.
- Enfin le pin, autre résineux fortement représenté dans certaines régions de France.



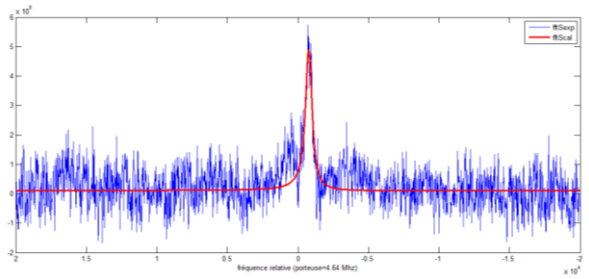


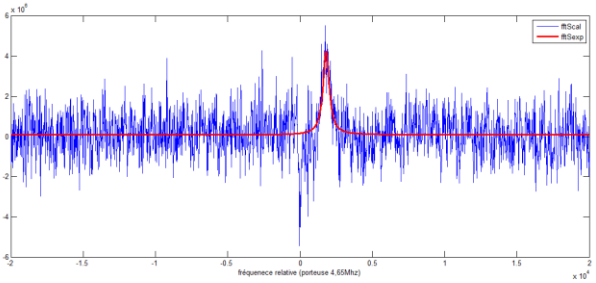
| Essence | Sapin | Essence | Sapin |
|---|---|---|---|
| Séchage | air libre | Séchage | séchoir |
| Nb scans | 16000 | Nb scans | 16000 |
| Amplitude du fid | 46699 | Amplitude du fid | 58376 |
| LW | 413 ± 10 Hz | LW | 750 ± 30 Hz |



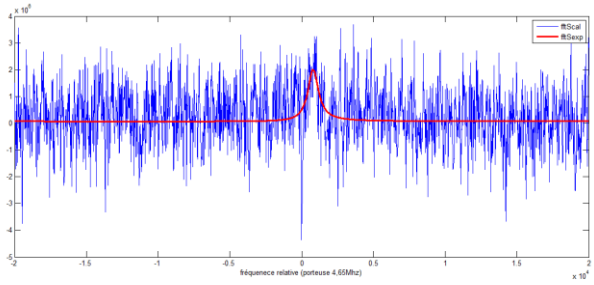


| Essence | Hêtre | Essence | Hêtre |
|---|---|---|---|
| Séchage | air libre | Séchage | Séchoir |
| Nb scans | 16000 | Nb scans | 16000 |
| Amplitude du fid | 21181 | Amplitude du fid | 34626 |
| LW | 465±40 Hz | LW | 485±40Hz |

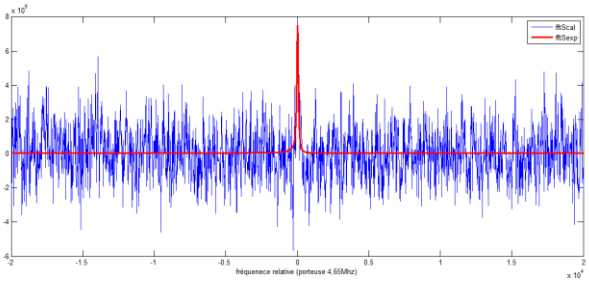




| Essence | Pin | Essence | Pin |
|---|---|---|---|
| Séchage | air libre | Séchage | séchoir |
| Nb scans | 16000 | Nb scans | 16000 |
| Amplitude du fid | 27813 | Amplitude du fid | 42160 |
| LW | 445±10 Hz | LW | 499±40Hz |



| Essence | Frêne | Essence | Frêne |
|---|---|---|---|
| Séchage | air libre | Séchage | séchoir |
| Nb scans | 64000 | Nb scans | 64000 |
| Amplitude du fid | 136553 (8534) | Amplitude du fid | 227236 (14202) |
| LW | 900±40Hz | LW | 670±30Hz |



| Essence | Chêne | Essence | Chêne |
|---|---|---|---|
| Séchage | air libre | Séchage | séchoir |
| Nb scans | 131000 | Nb scans | 131000 |
| Amplitude du fid | 77561 (2424) | Amplitude du fid | 67790 (2118) |
| LW | 413±10 Hz | LW | 275±9 Hz |

*Figure 37 : Spectres RQN de l'azote-14 d'échantillons de différentes essences de bois imprégnés avec du $NaNO_2$. A droite : séchage à l'air libre ; à gauche : séchage au séchoir*

La comparaison des différents spectres présentés dans la figure 37 montre que le signal diffère en fonction de l'essence. La comparaison de l'amplitude des fids rapportée à 16 000 scans[10] (entre parenthèses dans les figures) permet d'estimer la quantité de nitrite de sodium introduit dans le bois. Ainsi un classement des essences peut être établi sur les quantités imprégnées dans les échantillons (de la plus imprégnée vers la moins imprégnée): Sapin>Pin=Hêtre>Frêne>Chêne. L'étude du tableau 4, extrait de la norme EN 305-02 sur la durabilité naturelle du bois massif, nous indique un ordre similaire mis à part pour le hêtre qui, d'après cette norme, est le plus imprégnable. Pour cette norme, on a établi le classement en fonction de l'épaisseur d'imprégnation. Ainsi un bois très imprégnable sera totalement imprégné alors qu'un bois peu imprégnable aura une épaisseur d'imprégnation de 3 à 6mm. Au vu de la taille de nos échantillons, l'imprégnabilité ainsi définie n'explique pas l'ensemble de nos résultats.

[10] La RQN étant quantitative il est possible de ramener l'amplitude du signal au nombre de scans et ainsi d'établir une comparaison fiable.

L'étude des masses volumiques basales[11] (MVB) permet d'apporter une réponse quant à l'emplacement du hêtre ci-dessus. Le sapin et le pin ont des MVB respectivement de 360kg/m$^3$ et 485kg/m$^3$. Le hêtre possède lui une MVB de 560kg/m$^3$. Plus la MVB est basse et plus il est possible d'introduire de produit. Ainsi malgré leur faible imprégnabilité et la petitesse des échantillons, une quantité équivalente de produit (voire supérieure) a pu être introduite dans le sapin et le pin par rapport au hêtre (qui est très imprégnable).

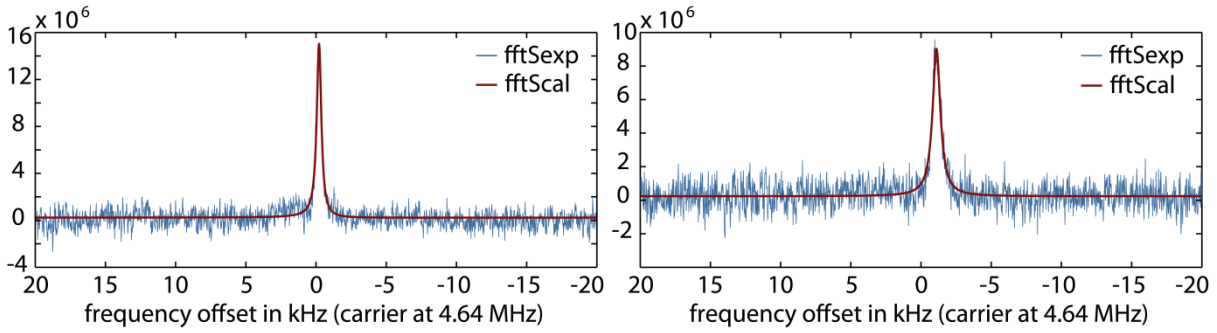
La comparaison des spectres pour une même essence montre que le mode de séchage influence la recristallisation des produits introduits dans le bois. Pour les trois premiers spectres présentés dans la figure 37, la largeur à mi-hauteur (LW) est plus importante dans le cas du séchage au séchoir. Cela signifie qu'il existe des défauts dans le réseau cristallin et on pourra donc qualifier la cristallisation de moins bonne qualité dans le cas du séchage au séchoir. Bien que les amplitudes des fids semblent plus importantes dans le cas du séchage au séchoir, cette tendance ne peut pas être certifiée du fait des incertitudes expérimentales.

Le sapin est l'essence susceptible d'accueillir la plus grande quantité de nitrite de sodium. C'est donc lui qui sera choisi pour étudier les différents modes d'imprégnation sachant que, dans chaque cas, on considérera les deux types de séchage.

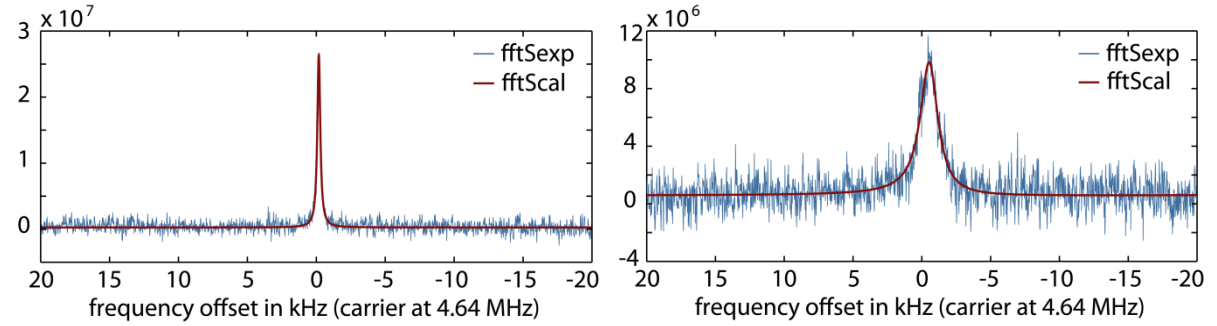
- **Influence du mode d'imprégnation des échantillons.**

Le type d'imprégnation détermine *a priori* la quantité de produit qui sera introduite dans le bois. Dans le cas de l'imprégnation sous pression, le produit et le bois subissent des contraintes importantes qui peuvent affecter la recristallisation et donc le signal. Quatre échantillons sont imprégnés, respectivement, avec le protocole P1 à P4 (figure 27). Ces expériences permettent de voir l'effet de la pression sur les quantités de nitrite de sodium imprégnées et la recristallisation. La figure 38 montre les résultats pour les quatre échantillons cités précédemment.

[11] La masse volumique basale est le rapport entre la masse de bois anhydre et le volume de ce même échantillon à saturation d'humidité. Elle permet de connaitre la proportion d'espaces vides qu'il y a dans un échantillon de bois. Ainsi, plus elle est basse, plus il y a de vides intercellulaires.




| Imprégnation | sous vide | Imprégnation | sous vide |
|---|---|---|---|
| Type de séchage | air libre | Type de séchage | séchoir |
| Nb scans | 4000 | Nb scans | 4000 |
| Amplitude du fid | 456477 | Amplitude du fid | 461949 |
| LW | 392 ± 4 Hz | LW | 670 ± 13 Hz |




| Imprégnation | sous pression | Imprégnation | sous pression |
|---|---|---|---|
| Type de séchage | air libre | Type de séchage | séchoir |
| Nb scans | 4000 | Nb scans | 4000 |
| Amplitude du fid | 529148 | Amplitude du fid | 1134670 |
| LW | 257 Hz | LW | 1560 Hz |

*Figure 38 : Spectres RQN de l'azote-14 du $NaNO_2$ à 4.64MHz dans du Sapin. En haut: imprégnation sous vide. En bas : Imprégnation par vide/pression à 15bars. A gauche : séchage à l'air libre, A droite : séchage au séchoir*

Les échantillons imprégnés grâce à la méthode du vide/pression présentent des amplitudes bien plus importantes et donc des quantités de nitrite de sodium recristallisées plus importantes que dans le cas de l'imprégnation sous vide. Il paraît évident que la mise sous pression favorise la pénétration d'une plus grande quantité de produit dans le matériau [Lebow, 2010]. Il est aussi important de remarquer que dans le cas du séchage au séchoir, la quantité est pratiquement deux fois supérieure que dans le cas d'un séchage à l'air libre (pour un volume d'échantillon équivalent). On peut en déduire que l'échantillon est imprégné et séché à cœur. Le séchage au séchoir se faisant à une température plus importante, la chaleur peut pénétrer le bois plus en profondeur et, de ce fait, provoquer la recristallisation d'une partie plus importante de nitrite de sodium. Le séchage à l'air libre étant lent et non forcé, le nitrite de sodium en surface cristallisera avant celui qui est situé à cœur, ce qui a pour effet de maintenir au sein du bois des poches d'humidité dans lesquelles le nitrite de sodium ne peut

recristalliser. Il est montré que le séchage artificiel permet, *via* l'augmentation de température et la vaporisation de l'eau, d'augmenter suffisamment la pression dans l'échantillon pour que les pores du bois soient libérés et l'humidité évacuée [Zhang & Cai, 2008]. Les auteurs montrent que le séchage du bois permet de rompre les ponctuations aréolées qui bloquent la perméabilité du bois. Dans notre cas, l'idée est la même : l'augmentation de la température provoque la vaporisation, donc une augmentation de la pression sur les pores bouchés par le nitrite de sodium. Cela conduit à leur rupture et ainsi à l'apparition de voies pour l'évacuation de l'humidité (c.f. figure 39). Donc le couplage de l'imprégnation sous pression et du séchage au séchoir permet d'obtenir la plus grande quantité de produit recristallisé dans le bois.

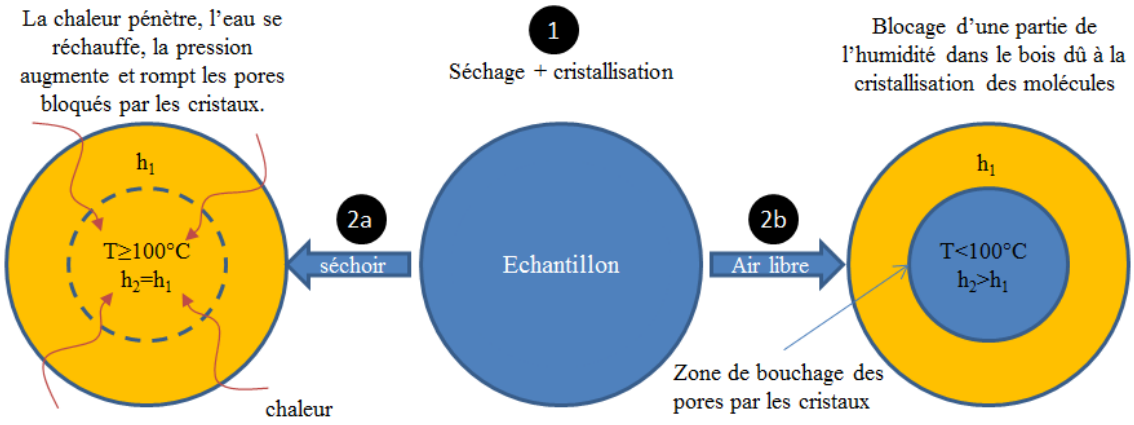



*Figure 39 : Influence du mode de séchage sur la cristallisation des molécules et l'humidité du bois*

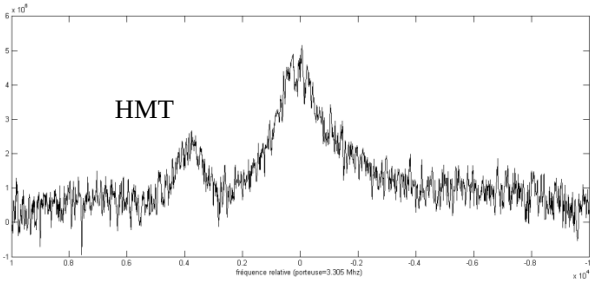
Les spectres relatifs aux échantillons séchés au séchoir présentent cependant une largeur de raie plus importante que dans le cas du séchage à l'air libre. Cette observation rejoint celle faite ci-dessus : le séchage au séchoir crée vraisemblablement des défauts au sein du réseau cristallin. En outre, l'imprégnation sous pression provoque une pénétration à cœur qui ne donne lieu à recristallisation qu'à des températures élevées (le séchage à l'air libre ne permet que la recristallisation du nitrite de sodium superficiel). C'est évidemment à cœur que les contraintes exercées sur le réseau cristallin de $NaNO_2$ seront les plus importantes (du fait du retrait du bois) d'où l'augmentation de la largeur de raie.

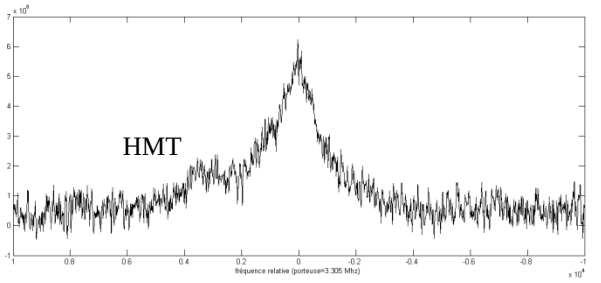
Pour les expériences nécessitant de maximiser les quantités introduites (imprégnation de solutions avec plusieurs produits chimiques de concentration nécessairement plus faible), l'imprégnation sous pression est évidemment conseillée et il en va de même pour le séchage au séchoir.

- **Imprégnation avec une solution aqueuse d'HexaMéthylèneTétramine (HMT)**

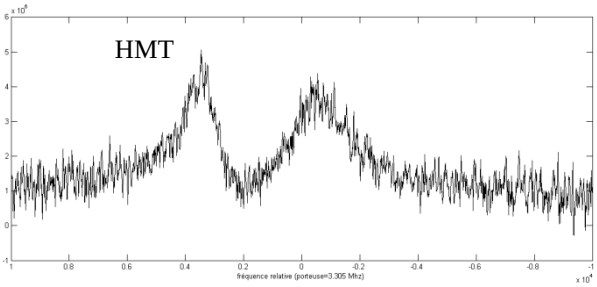
Un véritable marquage du matériau bois doit faire appel à au moins un autre produit conduisant à un signal RQN de l'azote-14 facilement détectable pour imaginer pouvoir constituer un code. Cet autre produit, si l'on fait abstraction d'un marquage fondé sur la concentration des produits, offrirait quatre possibilités d'identification. Dans le cadre de nos travaux, qui sont essentiellement prospectifs, il serait intéressant que ce produit soit également soluble dans l'eau (de façon à ce que nous puissions disposer d'une solution aqueuse comportant un mélange des deux produits). Il se trouve qu'une des molécules modèles utilisée pour la RQN de l'azote-14, en l'occurrence le HMT, possède cette propriété. L'autre interrogation concerne son aptitude à recristalliser dans le bois.

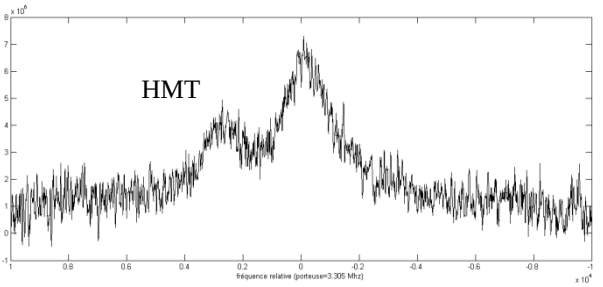
Nos premiers essais portent sur quatre échantillons que nous avons imprégnés avec une solution contenant du HMT en concentration massique égale à 900g/L. Les échantillons sont imprégnés suivant les protocoles P1 à P4 (figure 27). Cela permet par ailleurs de savoir si le HMT se comporte différemment du nitrite de sodium. Les spectres sont présentés en figure 40.




| Imprégnation | sous vide | Imprégnation | sous vide |
|---|---|---|---|
| Type de séchage | air libre | Type de séchage | séchoir |
| Nb scans | 8000 | Nb scans | 8000 |




| Imprégnation | sous pression | Imprégnation | sous pression |
|---|---|---|---|
| Type de séchage | air libre | Type de séchage | séchoir |
| Nb scans | 8000 | Nb scans | 8000 |

*Figure 40 : Spectre à 3.305MHz d'échantillons imprégnés avec du HMT. En haut : échantillons imprégnés sous vide. En bas : échantillons imprégnés sous pression. A gauche : séchage à l'air libre. A droite : séchage au séchoir*

Il apparait deux pics, respectivement à 3.305MHz, la fréquence de la porteuse et à 3.309MHz, la fréquence de résonance de l'échantillon de référence du HMT. Le pic à 3.305MHz existe encore à l'issue d'une mesure effectuée sans échantillon dans la sonde. Il s'agit donc d'un pic parasite et non significatif (dont la fréquence est celle de la porteuse) que l'on n'a pas pu éliminer avec les méthodes précédemment exposées (« *left shifts* »par exemple). De même il s'est avéré impossible d'ajuster par NLLS les résultats expérimentaux selon deux signaux.

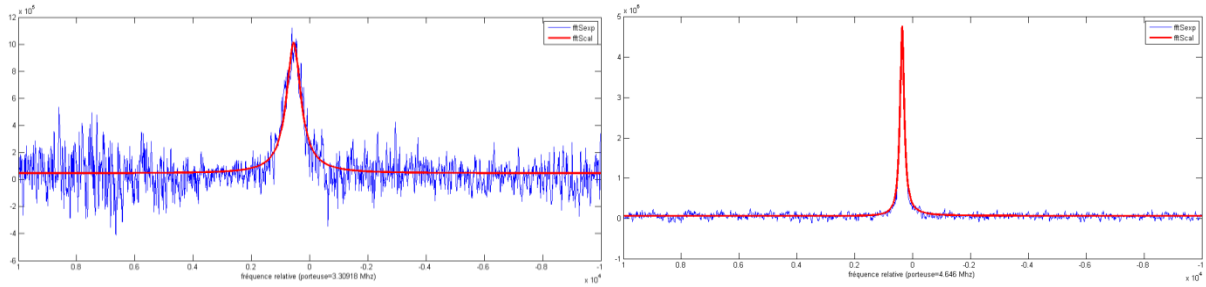
Néanmoins, le résultat principal est là. L'existence d'un signal à la fréquence du HMT prouve qu'il y a bel et bien eu recristallisation. On peut constater que l'imprégnation sous pression a considérablement augmenté l'aire sous le pic à la fréquence de 3.305MHz (comme avec le $NaNO_2$). Cette augmentation confirme donc que l'imprégnation sous pression permet d'avoir de plus grandes quantités de produit au sein de l'échantillon. On peut aussi remarquer, en particulier sur les spectres relatifs à l'imprégnation sous pression, que la largeur de raie est augmentée lorsque le produit est séché au séchoir. Cela indique une altération du réseau cristallin du HMT comme nous l'avions déjà observé dans le cas du nitrite de sodium.

On constate donc que les protocoles de préparation ont la même influence sur le HMT et le $NaNO_2$. La constatation que ces deux produits recristallisent et sont identifiables dans le bois nous laisse donc espérer en la faisabilité d'un marquage à deux produits.

- **Imprégnation avec un mélange $NaNO_2$/HMT en solution aqueuse**

Dans un premier temps, il est nécessaire de s'assurer que le $NaNO_2$ mélangé en solution aqueuse puis simplement recristallisé conduise à des signaux aux fréquences habituelles (de manière à vérifier que le mélange ne conduise pas à la formation d'entités indésirables).

Pour ce faire, nous avons préparé deux solutions saturées de $NaNO_2$ et de HMT. Le mélange se faisant à partir de deux volumes égaux provenant de ces solutions. Ce mélange est ensuite placé dans un cristallisoir de façon à être séché à l'air libre. A partir de la poudre ainsi obtenue, on a recherché le signal du $NaNO_2$ à 4.64 MHz et celui du HMT à 3.309MHz. Le résultat est positif comme le montre les spectres de la figure 41.

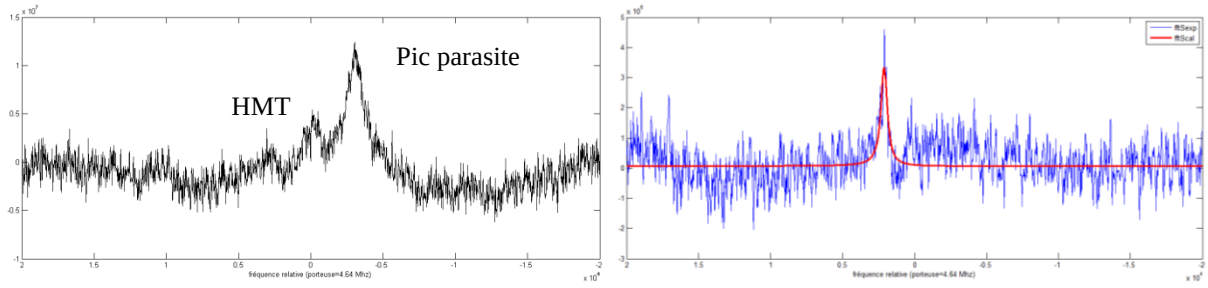


| Molécule | HMT | Molécule | $NaNO_2$ |
|---|---|---|---|
| Nb scans | 1024 | Nb scans | 1024 |
| Amplitude du fid | 92196 | Amplitude du fid | 132730 |
| LW | 1908±400Hz | LW | 562±10Hz |

*Figure 41 : Spectre du HMT et du $NaNO_2$ après recristallisation d'une solution contenant un mélange des deux produits*

L'identification des deux produits peut donc se faire sans ambiguïté en partant d'un simple mélange en solution aqueuse. Il reste à vérifier que l'on obtient ce même résultat après que du bois ait été imprégné par ce mélange puis ait été soumis à une procédure de séchage.

Pour cela, un échantillon a été imprégné avec le mélange précèdent suivant le protocole P1 puis étudié par RQN aux fréquences de 4.64MHz et 3.33MHz. Les résultats sont reportés dans la figure 42. Le pic du $NaNO_2$ est distinctement visible de même que le pic du HMT bien que le spectre à 3.309MHz comporte toujours le pic parasite décrit plus haut. En tout état de cause, les expériences préliminaires montrent que le $NaNO_2$ et le HMT issus d'un mélange recristallisent parfaitement dans le bois et pourraient, de ce fait, être utilisés à des fins de marquage.




| Molécule | HMT | Molécule | $NaNO_2$ |
|---|---|---|---|
| Nb scans | 16384 | Nb scans | 16384 |
| Amplitude du fid | 140240 | Amplitude du fid | 132730 |
| LW | 602±100Hz | LW | 464±50Hz |

*Figure 42 : Spectre RQN de l'azote-14 du $NaNO_2$ et du HMT dans un échantillon de sapin ayant été imprégné par une solution aqueuse contenant un mélange de $NaNO_2$ et HMT, puis séché selon le protocole P1*

### 2.2.3 Quantitativité RQN en relation avec le temps de mesure.

On expose ici les méthodes et procédures qui vont être utilisées pour estimer la quantité de produit associée au signal RQN. Ce résultat devra être confronté avec ce que l'on peut déterminer par pesée avant imprégnation et après séchage

- **Mesure des quantités recristallisées**

La RQN est une méthode de spectrométrie dite quantitative c'est-à-dire que le spectre est représentatif de la quantité de produit recristallisé dans l'échantillon. De cette caractéristique découle donc la possibilité de déterminer, par rapport à un spectre de référence, la quantité (plus précisément la masse si on connaît la masse du même produit dans l'échantillon de référence) de produit qui est recristallisée dans les échantillons.

Le spectre du nitrite de sodium sous forme de poudre est présenté en figure 22. Il permet de connaître la valeur de l'amplitude du fid (égale à la surface du pic dans le domaine des fréquences) représentative d'une quantité donnée de ce produit. L'amplitude du fid est cependant dépendante de l'instrumentation avec lequel ont été effectuées les mesures et bien sûr du type d'échantillon. Pour que la comparaison entre les signaux RQN de deux échantillons différents ait un sens, on doit utiliser le même type de tube-échantillon et le remplir de manière identique. Ainsi la hauteur de la pièce de bois doit être identique à la hauteur de la poudre de $NaNO_2$ dans le tube. Finalement, de manière à accéder à la quantité de produit recristallisé dans le bois, l'amplitude du fid (qui est proportionnelle au nombre d'accumulation) doit être rapportée à un nombre fixe de scans qui pour des raisons de simplicité sera fixé ici à 512. La quantité (masse de produit, noté $M_{ref}$) de $NaNO_2$ pesée est de 3,29g. L'amplitude du fid calculée ($A_{ref}$) est de 535093 pour 512 scans ($N_{ref}$).

La masse ($M_p$) de produit recristallisée est calculée, en fonction de l'amplitude du fid relatif à l'échantillon de bois imprégné ($A_p$) et du nombre de scans ($N_s$), grâce à l'équation ci-dessous.

$$M_p = \frac{M_{ref} \times A_p \times N_{ref}}{A_{ref} \times N_s} \qquad (5)$$

Pour estimer le taux de recristallisation, $M_p$ peut être comparée à la masse de produit chimique ($m_p$) mesurée par pesée. Cette masse est obtenue par différence de la masse finale de l'échantillon imprégné puis séché ($m_f$) et de la masse ($m_i$) de l'échantillon avant imprégnation. Cette masse ($m_p$) est représentative de ce qui a été introduit et qui est resté dans le bois

(produit recristallisé, autres formes du produit non détectables, et éventuellement solution d'imprégnation, eau, …).

$$m_p = m_f - m_i \qquad (6)$$

Le tableau 5 donne, pour différents échantillons ayant fait l'objet de différents protocoles, l'amplitude du fid mesurée avec la méthode NLLS ($A_p$), la masse de produit chimique (ici du $NaNO_2$) calculée à partir de la mesure RQN et celle mesurée par pesée. Deux d'entre eux (échantillons 3 et 4) ont été traités, en plus du protocole indiqué, un séchage préliminaire de l'échantillon à 103°C (avant imprégnation).

*Tableau 5 : Masses calculées et mesurées sur différents échantillons. Les valeurs d'amplitude sont rapportées à 512 scans. L'échantillon de $NaNO_2$ pur pèse 3,29g et possède une amplitude de 535093 pour 512 scans réalisés. $m_i$ : masse initiale, SI : Séchage initial*

| Echantillon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $m_i$ (en g) | 1.36 | 1.4 | 1.47 | 1.05 | 1.08 | 1.34 | 1.29 | 1.25 |
| protocole | P1 | P2 | SI+P1 | SI+P2 | P3 | P4 | P1 | P2 |
| $A_p$ (512 scans) | 49869 | 54135 | 32070 | 16299 | 66144 | 141783 | 57060 | 57744 |
| $M_p$ (en g) | 0.31 | 0.33 | 0.20 | 0.10 | 0.41 | 0.87 | 0,35 | 0,36 |
| $m_p$ (en g) | 0.47 | 0.54 | 0.30 | 0.30 | 1.1 | 1.16 | 0.53 | 0.62 |
| rapport $M_p/m_i$ | 23% | 24% | 11% | 10% | 37% | 65% | 27% | 28% |

Les quantités calculées sont toutes inférieures aux quantités mesurées. Cela signifie bien qu'une partie de la masse mesurée ($m_i$) correspond au produit chimique recristallisé (la plus importante) et qu'une autre partie de cette masse correspond à d'autres substances introduites comme (eau, solution d'imprégnation, forme non détectable du $NaNO_2$,…).

D'autre part l'analyse des proportions imprégnées indique que suivant le protocole des différences notables existent. Pour les échantillons ayant subi une imprégnation sous vide (protocole P1et P2), le mode de séchage n'a quasiment aucun effet sur cette proportion. Cependant l'imprégnation sous pression et le séchage au séchoir (protocole P4) présente une proportion de nitrite de sodium bien plus importante (deux fois supérieure) que l'imprégnation sous pression et séchage à l'air libre (protocole P3). Ce résultat quantitatif conforte la discussion de la partie 1.2.2 qui suggère que l'imprégnation sous pression permet d'introduire dans le bois une plus grande proportion de produit chimique et que le séchage au séchoir permet d'ouvrir des réseaux de communication ayant été bouchés par la recristallisation.

Un dernier point à étudier concerne les échantillons 3 et 4. Ces deux échantillons ont subi un premier séchage avant imprégnation. Il s'avère que dans ces échantillons la quantité vue par RQN est bien plus faible que dans les autres cas. [Matsumura & al, 1999] montre que le séchage du bois à forte température permet d'extraire les pectines qui confèrent au bois une caractéristique hydrophobique. Ainsi les bois ayant subi un séchage préliminaire sont moins imprégnables et même, en fonction de l'essence, peuvent perdre leur capacité d'imprégnabilité. Cela explique que le faible signal RQN observé est dû à un défaut d'imprégnabilité.

- **Temps minimum d'accumulation nécessaire à la détection du signal RQN**

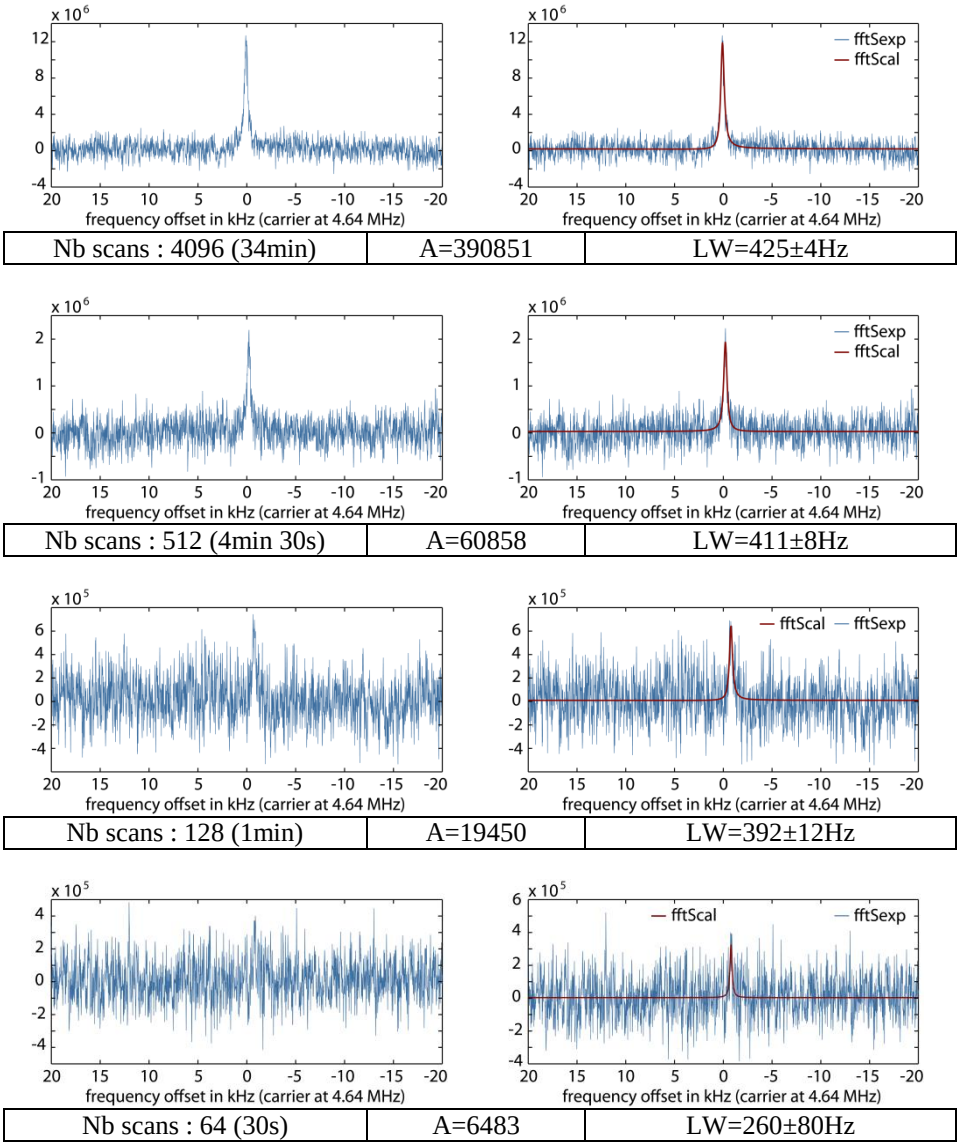
La RQN de l'azote-14 étant une technique peu sensible, il est nécessaire d'accumuler les fids. Seul l'échantillon de référence de $NaNO_2$ permet d'observer le signal en un seul scan et il est bien évident que la quantité de nitrite de sodium recristallisée dans le bois est bien inférieure à celle de l'échantillon de référence. Nous avons exposé précédemment les améliorations que nous avions apportées au protocole de mesure et nous devons maintenant déterminer le temps minimum requis. Il est bien évident que la méthode que nous essayons de mettre en œuvre ne peut pas s'accommoder d'un temps de mesure dépassant plusieurs minutes

Une série d'expériences a donc été réalisée pour déterminer, dans le cas d'un échantillon de bois représentatif, quel était le nombre minimum de scans nécessaire permettant une détection non ambigüe du pic (et attestant ainsi la présence du nitrite de sodium). Nous avons bien entendu mis à profit les procédures de traitement que nous avons mises au point (NLLS, voir plus haut), la séquence en étant la suivante :

- Une multiplication exponentielle est appliquée sur le signal (LB=50Hz).
- Un décalage vers la gauche du fid de 1 point est éventuellement appliqué (pour un « dead time » standard de 250µs et un pas d'échantillonnage de 25µs.
- Le spectre du fid est obtenu par transformée de Fourier.
- Un phasage automatique est réalisé (description en annexe B).
- Les paramètres initiaux de la procédure NLLS sont déterminés.
- La procédure NLLS est lancée et les résultats analysés.

En fonction de la réponse du logiciel, il est possible de savoir si les paramètres calculés ($f$, $A$, $LW$ et $\varphi$) correspondent au pic relatif du produit à détecter. La figure 43 présente les résultats pour différentes accumulations avec à gauche le spectre non traité et à droite le

spectre traité par la méthode NLLS. Les valeurs des paramètres *f*, *A*, *LW* (*φ* présente peu d'intérêt pour déterminer si le pic est relatif au produit) sont données en dessous des spectres.




| | | |
|---|---|---|
| Nb scans : 4096 (34min) | A=390851 | LW=425±4Hz |
| Nb scans : 512 (4min 30s) | A=60858 | LW=411±8Hz |
| Nb scans : 128 (1min) | A=19450 | LW=392±12Hz |
| Nb scans : 64 (30s) | A=6483 | LW=260±80Hz |

*Figure 43 : Spectres RQN de l'azote -14 du $NaNO_2$ imprégné dans du Sapin suivant le protocole P1. A gauche : spectres non traités (en bleu). A droite : spectres traités superposés aux spectres de gauche par la méthode NLLS (en rouge)*

La diminution du nombre de scans provoque nécessairement la diminution du rapport signal-sur-bruit. La séquence automatique est capable de déterminer les paramètres relatifs au pic du nitrite de sodium à partir de 128 accumulations. Le pic est identifiable dans le spectre à l'œil nu et le calcul donne un signal théorique proche du signal expérimental (malgré le bruit).

Pour un fid obtenu avec 64 scans, la détection automatique est bien plus difficile. D'abord le rapport signal sur bruit est très faible (de l'ordre de 1). A l'œil nu et connaissant la position du pic, il est possible de le trouver. En forçant l'optimisation, il est possible d'obtenir

des paramètres correspondant au pic du spectre expérimental (voir spectre de gauche pour la ligne 64 scans). La principale contrainte est d'obtenir la position du pic avec la méthode de détermination des paramètres initiaux. Cette méthode se basant sur la position du maximum, si le rapport signal-sur-bruit est trop faible, le maximum ne sera pas à la fréquence représentative du produit. L'autre paramètre permettant de faciliter la détection de ce maximum est le phasage automatique. Dans notre cas, la méthode de phasage cherche à maximiser le maximum du fid. Or, là encore, si le rapport signal-sur-bruit est trop faible, le maximum ne correspondra pas au pic relatif au produit et le phasage ne sera pas optimal.

Enfin cette mesure est quantitative. Le nombre minimum de scans est donc fonction de la quantité à détecter dans le bois mais aussi de la sonde. Ainsi pour notre dispositif expérimental, on s'aperçoit qu'un temps de mesure d'environ une minute est raisonnable. Ce résultat ne fait que renforcer la crédibilité de la méthode développée dans cette thèse.

## 2.3 Codage de l'information dans l'industrie du bois

Bien que cette partie de la thèse puisse faire l'objet de recherches spécifiques, le but ici est juste est de montrer qu'il est possible de marquer et d'identifier le bois dans la masse (démonstration de faisabilité). Nous avons, dans les parties précédentes de ce chapitre, exposé des expériences qui attestent que le nitrite de sodium et le HMT sont détectables une fois introduits dans le bois. Il est nécessaire maintenant d'expliquer comment l'information peut être codée, les solutions permettant d'améliorer ce codage et les limites d'une telle procédure.

### 2.3.1 Les premiers essais de marquage et de codage de la matière

Dans le cadre du marquage dans la masse du bois, il faut identifier les objets (arbres, parcelles, …) de manière unique afin de retrouver les informations faisant références à l'origine de ces objets. Le marquage dans la masse doit permettre cette identification au travers d'un code faisant le lien entre les informations et les objets identifiés. Cette partie a pour objectif de proposer deux manières de concevoir les codes en utilisant les produits chimiques et les informations (fréquence, amplitude…) qu'il est possible d'extraire des spectres RQN. Nous proposons donc ici deux solutions pour obtenir les codes : soit le code est composé de lettre à deux états (1 et 0) soit à n états.

- **Codage sur des lettres à plusieurs états**

Nous avons vu que le nitrite de sodium ainsi que le HMT sont détectables lorsqu'ils sont introduits dans du bois sous forme d'un mélange en solution aqueuse. On imagine

aisément alors qu'il est possible de créer des codes. La première solution qui vient à l'esprit consiste donc à détecter la présence ou non des produits introduits dans le bois. Cette solution de codage est de loin la plus simple qui puisse être mise en œuvre.

Le codage est simple : chaque code identifiant, que nous notons C, possède un nombre déterminé de lettres, notées $C_i$, correspondant chacune à un produit chimique à identifier. Ces lettres possèdent deux états, 0 et 1, représentant respectivement l'absence et la présence du produit qu'elles représentent. Si l'on note *y* le nombre d'objets à identifier (p.ex. parcelles, arbres, …), alors le nombre total de produits, noté *z*, que la solution de marquage doit comporter pour assurer que tous les objets à identifier le soit, est $z = \lceil log_2(y) \rceil$. Ensuite les codes sont réalisés en assemblant, en solution aqueuse, tout ou partie des produits identifiables par RQN. Puis le matériau est marqué de cette dernière solution dont le code est connu.

Après l'imprégnation et le séchage, l'identification est alors réalisée en effectuant une mesure RQN pour chaque fréquence de résonance faisant référence respectivement aux *z* produits qui ont pu être introduits dans le bois. Pour chacune de ces mesures i, le fid est traité afin de savoir si il y a présence ou non d'un pic (et donc du produit qui est lié à cette fréquence). Si le spectre atteste de la présence du produit, la lettre ($C_i$) correspondante se voit attribuer la valeur 1. Une fois l'ensemble des fréquences possibles scannées, le code C, peut être établi. Le processus d'identification est décrit en figure 44.

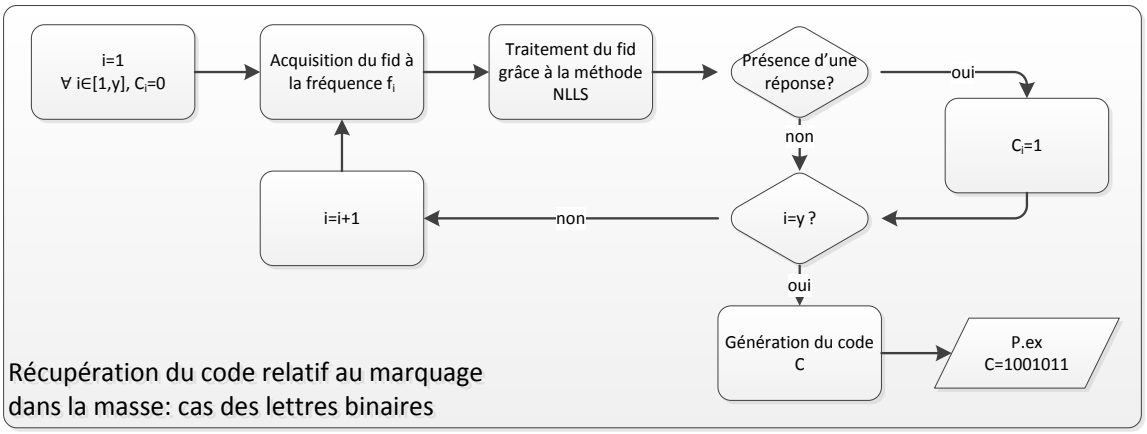



*Figure 44 : Processus d'identification du code relatif à un marquage*

Cette solution offre une obtention simple du code. Cependant le temps d'acquisition peut devenir très long en fonction du nombre de fréquences à scanner. De plus en fonction du nombre d'objet à identifier le nombre de produit sera d'autant plus grand. Ainsi, il apparaît

judicieux de trouver des solutions permettant de minimiser le nombre de produits d'imprégnation utilisés tout en conservant ou en augmentant le nombre de codes possibles.

- **Codification sur des lettres à plus de deux états**

Afin d'augmenter le nombre de codes permettant l'identification, deux solutions sont possibles : soit on augmente le nombre de lettres ($C_i$) composant le code (représentatives des produits introduits dans le bois) et on ne détecte que deux états (présence ou absence du produit), soit on augmente le nombre d'états que peuvent prendre les lettres. Ces deux solutions sont représentées dans la figure 45 sous la forme d'une « constellation » des solutions.

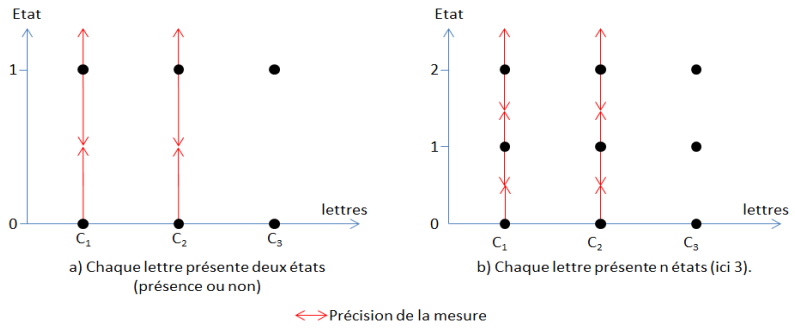



*Figure 45 : Constellation des états possibles pour les solutions de codage envisagées*

Nous proposons ici une méthodologie pour augmenter le nombre d'états possibles pour une lettre. La détermination du code pouvant se faire sur différents échantillons, il faut nécessairement que la valeur utilisée soit intensive. Une solution viable est de déterminer la proportion (ou le pourcentage) des produits introduits dans les échantillons qui est une variable indépendante du volume de l'échantillon.

Le pourcentage de produits composant la solution de marquage (et donc introduit dans le matériau) est établi lors de la préparation de la solution de marquage. Pour ce faire, une solution aqueuse, de concentration massique identique, est préparée pour chaque produit à identifier. Le mélange de tout ou partie de ces dernières dans des proportions connues permet de réaliser la solution de marquage. Ainsi le code relatif à la solution est connu : les lettres correspondantes aux produits prennent la valeur du ratio intégré dans la solution. Une fois le matériau imprégné de la solution et séché, le code peut être retrouvé en mesurant les masses des produits (calculables en fonction de l'amplitude du fid, voir paragraphe 2.2.3 sur les mesures quantitatives par spectroscopie RQN).

La détection du code se fait suivant le processus présenté en figure 46. Il reprend les étapes du processus présenté en figure 44 , mais intègre des étapes permettant de quantifier la

proportion des produits composant la solution de marquage à identifier. Ainsi après qu'un produit ait été détecté, la masse recristallisée est calculée à partir de l'amplitude calculée par NLLS. Une fois l'ensemble des fréquences possibles parcourues, le rapport entre les masses mesurées ($M_i$) et la somme de ces masses permettent d'obtenir la proportion. On imagine bien qu'il n'est pas possible d'obtenir une infinité d'états car cela impliquerait que l'on soit capable de détecter et de discerner des quantités de produits très faibles. En fonction de l'appareillage RQN, il est possible d'établir la proportion minimale mesurable (qui est liée à la quantité minimale de produits qu'il est possible de mesurer dans un temps raisonnable). Cette valeur, que l'on peut assimiler à la précision de la mesure RQN, permet d'établir le nombre d'états que les lettres composant le code pourront prendre (par exemple, l'appareil ne pourra détecter que des ratios par tranche de 20% soit 5 états). Ainsi l'état de la lettre sera celui qui est le plus près du ratio calculé. Lorsque toute les mesures ont été effectuées et les états déterminés, il est possible d'obtenir le code correspondant.

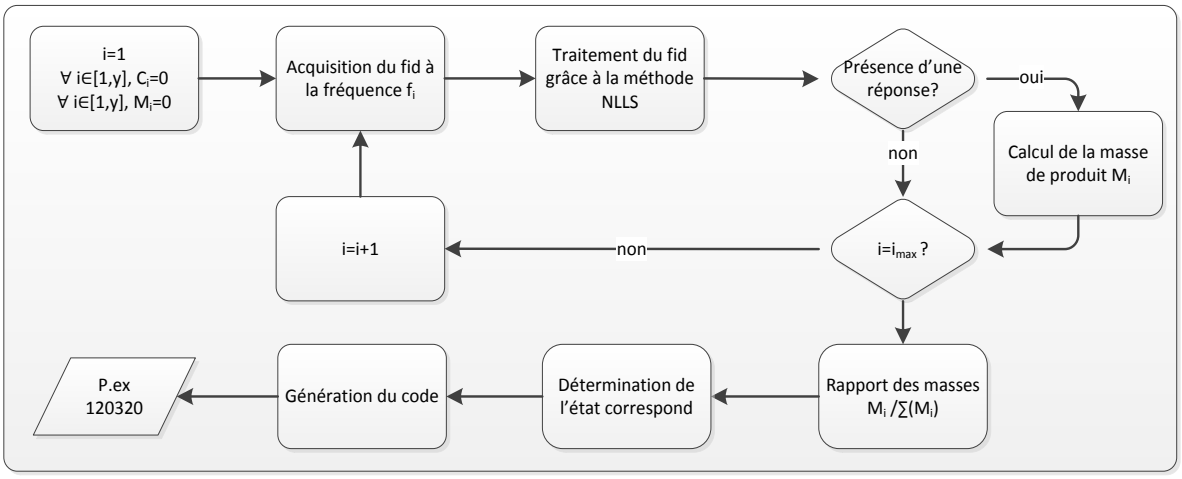



*Figure 46 : Détermination du code correspondant à un marquage dans le cas où les lettres de ce dernier peuvent prendre n-état*

Cependant d'autres considérations sont à prendre en compte, limitant le nombre de codes qu'il est possible d'utiliser. L'identification se basant sur le rapport des masses et de leur somme, certaines combinaisons, qui pourraient être utilisables dans le cas où le volume de bois est invariant, ne le sont pas ici :

- L'introduction d'un seul produit ne permet de distinguer qu'un seul état, sa présence ou son absence qu'il n'est pas possible d'établir de proportion autre que 100% sur une valeur.
- De même lorsque deux produits sont introduits dans les mêmes proportions, il n'est possible de distinguer qu'un seul état pour chacun des produits, la proportion 50/50. Il

faut introduire une différence de masse pour que l'utilisation des proportions soit possible.

En prenant en compte ces deux considérations, le nombre de codes possibles est donc supérieur à la solution de codage sur deux états, mais il n'est pas maximum par rapport à un codage sur n états dont on peut distinguer l'ensemble des états quelle que soit la situation.

### 2.3.2 Le marquage dans la masse : limites et compléments

Nous avons montré la possibilité de marquer dans la masse un échantillon de bois et l'intérêt que cela peut susciter. Cependant il reste un certain nombre de limites pour un tel marquage. Des voies d'amélioration existent et nous proposons donc d'expliquer les solutions que nous envisageons pour pallier aux limites explicitées précédemment.

- **Limites de la méthodologie proposée**

Le paradigme de marquage dans la masse présenté en début de chapitre, spécifie quatre besoins :

- Le marquage doit permettre de stocker un identifiant intrinsèque à la matière.
- L'identification doit être unique pour chaque objet à identifier.
- Le marquage doit être biocompatible.
- L'identification doit être évolutive afin d'identifier les produits enfants issus des arbres.

Parmi ces besoins, seul le premier peut être considéré comme validé car nous avons montré qu'il était possible d'identifier deux produits introduits dans un échantillon de bois. Le marquage ainsi présenté permet donc d'introduire un marquage servant d'identifiant à l'ensemble de la matière.

Initialement nous souhaitions marquer chaque arbre d'un identifiant unique. Ce point nous semble à l'heure actuelle, utopique mais aussi inutile. Le nombre d'arbres à identifier est vraiment grand et nécessiterait de trouver un nombre important de produits possédant les caractéristiques souhaitées pour être utilisé comme marqueur (identifiable par RQN, soluble dans l'eau, qui n'interagissent pas avec les autres produits utilisés pour le marquage, …). En fait, si nous revenons à l'objectif initial de cette partie de la thèse qui était de conserver les informations relatives à l'origine des arbres. Finalement cette information d'origine fait en grande partie référence à la parcelle de provenance des arbres. Si nous imaginons réduire la granularité des objets à identifier, le nombre de produits à utiliser serait moins important et le marquage envisageable. Il apparait donc intéressant d'identifier non pas les arbres, mais

simplement les parcelles de provenance de ces derniers. Ainsi avec une telle solution, tous les arbres composant une parcelle auraient le même marquage dont l'identifiant ferait référence à la parcelle d'origine.

Le troisième besoin fait référence à la biocompatibilité des molécules utilisées or actuellement celle que nous avons utilisé dans nos expériences ne sont pas biocompatibles. Nous avons mené une expérience afin de voir si des arbres sur pied sont capables d'assimiler le nitrite de sodium lorsqu'il est introduit dans l'eau d'arrosage. Cinq jeunes arbres élevés en pot ont donc été arrosés avec une solution contenant le produit. Il s'avère (et c'est ce qu'explique la fiche INRS) que les arbres ne peuvent pas vivre si on les arrose avec une telle solution. Dans notre cas il a suffi de quinze jours pour que les arbres présentent des stigmates de l'arrosage et meurent. L'analyse au spectroscope RQN ne révèle aucune trace visible de nitrite de sodium dans le tronc ou les feuilles de l'arbre.

Pour finir, le dernier besoin reste pour le moment le plus utopique à réaliser de tous via le marquage dans la masse. Comme nous l'avons vu les solutions envisageables pour réaliser le marquage dans la masse ne sont pas nombreuses. Le marquage dans la masse par RQN étant réalisé avec des produits chimiques, les possibilités d'évolution, une fois le bois marqué, sont très limitées. Il apparait évident que la modification des molécules introduites dans le bois est impossible. Ainsi les informations qui seront conservées le resteront jusqu'à la fin du cycle de vie du produit bois. Mais l'identification des éléments sciés à partir d'un arbre ne pourront pas se faire par la présente méthode.

Ainsi la méthode de marquage dans la masse proposée ici pour référencer les parcelles permettrait de conserver une partie déjà importante de l'information comme le montre la Figure 47 déjà présentée auparavant.

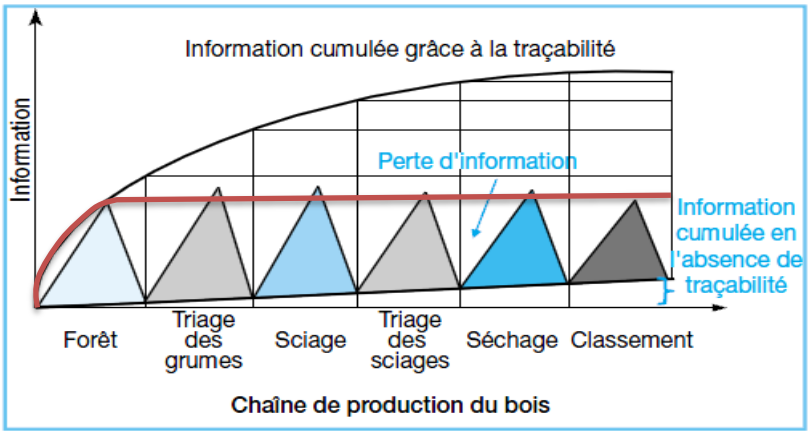



*Figure 47 :Informations cumulables pour un produit dans l'industrie du bois avec et sans traçabilité. La courbe rouge présente les gains engageables en mettant en œuvre le marquage dans la masse pour l'identification de la parcelle d'origine*

- **Nécessité de le compléter**

La méthode de marquage dans la masse que nous proposons est donc limitée dans ses possibilités d'identification et d'évolution. Il est donc nécessaire de trouver des solutions palliatives pour pouvoir identifier les produits enfants en augmentant le nombre d'identifiants utilisables ou en complétant l'identifiant proposé précédemment.

L'identification des produits issus d'un arbre n'est pas facile à mettre en œuvre si l'on cherche des solutions du côté du marquage (discret ou massique). L'explosion de la nomenclature (et donc du nombre de produits) implique qu'il est nécessaire de trouver un nombre important de marqueurs. De plus, comme nous l'avons expliqué dans la première partie de cette thèse, la rupture de l'identification des objets au moment du sciage pose d'importants problèmes dans la continuité de la conservation de l'information.

Pour identifier les produits finis de manière unique sans avoir à augmenter la taille de l'identifiant obtenu par RQN, nous avons choisi d'utiliser des identifiants propre au produits que nous concaténerons avec l'identifiant obtenu par RQN. Si nous analysons la nomenclature d'un produit issue d'une scierie (figure 48), nous remarquons que de chaque niveau (parcelle, arbre) est extrait différents objets enfants. Pour qu'une nomenclature soit complète, il est nécessaire que chaque objet possède une référence produit qui est la même pour tous les objets de caractéristiques identiques. Ainsi, si à chaque niveau de la nomenclature, il est possible d'attribuer un code unique à chaque objet-enfant (un arbre, p.ex) d'un produit-parent (une parcelle, p.ex) et que nous concaténons les identifiant de chaque objet de chaque niveau pour une même branche familiale, alors on peut tendre vers une identification unique des produits au fur et à mesure du cycle de vie de la matière.

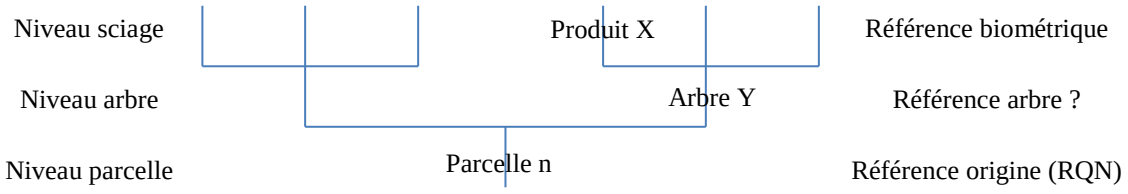



*Figure 48 : Nomenclature divergente de l'industrie du bois avec pour chaque niveau le code servant de référence produit*

Les solutions de marquage n'étant pas utilisables, c'est donc vers des solutions d'identifications biométriques que nous nous sommes tournés dans la partie suivante pour obtenir une référence produit et compléter son identifiant. La solution proposée n'est pas *a priori* la solution ultime pour identifier de manière unique les produits finis puisqu'il existe un « trou » dans l'identification, l'identification des grumes. De plus avec la proposition faite ici,

deux produits dont la référence est identique issus du même arbre ne pourraient pas être différenciés. Cependant cela permettrait d'améliorer la conservation des différentes informations relatives aux produits.

## 2.4 Conclusions du chapitre

Dans cette partie de la thèse, nous avons donc démontré qu'il était possible d'identifier par RQN des produits chimiques quand leurs caractéristiques le permettaient. D'un point de vue prospectif, cela s'apparentait à une véritable gageure, les différentes expériences qui ont pu être menées en ont cependant prouvé la faisabilité. Les facteurs influençant les mesures RQN ainsi que les protocoles de préparation des échantillons ont différents impacts sur la fiabilité de la détection des produits mais laisse à penser qu'il est possible de concevoir un marquage identifiable dans un laps de temps respectant les contraintes industrielles (proche voire inférieur à la minute). En effet, le développement de procédures très simples de traitement du signal nous a permis, malgré la sensibilité médiocre de la mesure RQN, de diminuer les temps de détection de façon significative. Des progrès en matière d'instrumentation devraient également améliorer les performances de ce mode de détection.. Ces développements, qui n'ont pas été envisagés dans cette thèse, visent notamment à la portabilité et à l'amélioration de la sensibilité. Ils concernent également de nombreuses applications ayant trait à la détection et l'identification d'explosifs, de substances illicites, de produits pharmaceutiques, etc…

En acceptant le fait que ce marquage dans la masse puisse un jour trouver une réalité industrielle, il s'agit alors de l'exploiter dans les processus logistique et de production de la première transformation du bois. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

*

**Points Importants à Retenir :**

- Ce chapitre présente une instance du paradigme de matière communicante, le bois marqué dans la masse.
- L'identification de produits recristallisés dans le bois, qu'ils soient seuls ou en mélange, est possible par la Résonance Quadrupolaire Nucléaire.
- L'identification et la « qualité » de la cristallisation sont influencées par de nombreux facteurs tels que la température, les méthodes d'imprégnation et de séchage du bois, …
- La faisabilité du marquage dans la masse du bois est montrée et ses limites cernées.

# CHAPITRE 3 :

# METHODOLOGIE DE VIRTUALISATION DE PRODUITS A NOMENCLATURE DIVERGENTE

**3.1 Méthodes de prévision de la production ..... - 97 -**
3.1.1 Numérisation de la matière première ..... - 98 -
3.1.2 L'approche « billon » ..... - 102 -
3.1.3 L'approche « produit » ..... - 104 -
**3.2 Obtention des produits virtuels et caractérisation des singularités ..... - 105 -**
3.2.1 Virtualisation du processus de transformation (sciage) ..... - 105 -
3.2.2 Extraction des singularités du produit virtuel ..... - 111 -
3.2.3 Contexte d'évaluation de la qualité esthétique des Produits Virtuels. ..... - 114 -
**3.3 Calcul de l'impact des singularités sur le produit ..... - 119 -**
3.3.1 Expression des critères d'évaluation ..... - 119 -
3.3.2 Méthodologie pour l'estimation de l'impact. ..... - 121 -
3.3.3 Mise en œuvre de la méthodologie et interprétations des résultats. ..... - 124 -
**3.4 Mesure de la qualité virtuelle des produits. ..... - 128 -**
3.4.1 Critère évaluant le nombre de nœuds ..... - 128 -
3.4.2 Opérateurs de fusion retenus ..... - 128 -
3.4.3 Evaluation du comportement des opérateurs de fusion sur un cas réel. ..... - 130 -
3.4.4 Transposition de la qualité esthétique dans le vocabulaire de l'expert ..... - 134 -
**3.5 Génération de la nomenclature divergente et vérification post processus . - 136 -**
3.5.1 Génération de la nomenclature divergente des produits. ..... - 136 -
3.5.2 Détermination de la qualité esthétique optimale à attribuer. ..... - 139 -
3.5.3 Vérification de la nomenclature virtuelle après le processus de débit ..... - 143 -
**3.6 À propos de la validation ..... - 144 -**
**3.7 Conclusions du chapitre ..... - 147 -**

Afin de réduire l'effet boite noire existant dans les industries à processus divergents, nous avons vu dans le premier chapitre, qu'il serait intéressant d'obtenir l'identification des produits enfants avant que le produit parent ne subisse d'opération de transformation. Cela permettrait d'obtenir par anticipation la nomenclature des produits sciés et donc de pouvoir gérer plus facilement la production. Pour cela, il est nécessaire d'avoir des informations sur les caractéristiques de ces produits enfants (sciages) avant qu'ils ne soient physiquement existants.

Nous nous sommes donc orientés vers le paradigme du « *Virtual Manufacturing* » (voir section 1.3.3) qui nous permet d'envisager l'utilisation de techniques de numérisation de la

matière, de virtualisation du processus et des opérations de transformation. Ce paradigme nous laisse entrevoir la possibilité d'identifier les produits finis dans le monde virtuel, et ce avant qu'ils ne soient créés et ainsi d'obtenir leur « nomenclature divergente virtuelle ».

Afin de caractériser et d'identifier les produits dans le monde virtuel, il est nécessaire de proposer une méthodologie utilisable dans ce contexte particulier. Il est évident que le marquage des produits dans le monde virtuel est une vue de l'esprit. C'est pour cette raison que nous nous sommes orientés vers l'utilisation de méthodes d'identification pour obtenir une caractérisation des produits finis dans le monde virtuel. Bien qu'elles soient le plus souvent difficiles à évaluer et à anticiper, certaines caractéristiques du produit sont essentielles pour le client final car elles influent sur la qualité du produit fini. Il est donc nécessaire d'en avoir une connaissance détaillée. Plusieurs contraintes relatives à ces caractéristiques, que nous décrivons par la suite, nous imposent d'utiliser des méthodes qui les prennent en compte le plus précisément possible afin d'assurer une estimation de la qualité au plus proche de la réalité.

Ce chapitre a donc pour objectif de proposer une méthodologie pour anticiper la nomenclature des produits issus de processus divergents. Différentes approches permettent de prévoir la production avec plus ou moins de précision et nous les décrivons dans la partie 3.1. Les parties suivantes présentent successivement les différentes étapes de la méthodologie. L'obtention des produits virtuels et l'extraction des singularités présentes sur ces derniers sont détaillées dans la partie 3.2. C'est à partir de ces singularités que la méthodologie proposée détermine la qualité suivant deux étapes : une première qui estime l'impact des singularités et qui est décrite dans la partie 3.3 puis une seconde qui estime la qualité, présentée en partie 3.4. Enfin, la méthode de génération de la nomenclature est développée dans la partie 3.5.

## 3.1 Méthodes de prévision de la production

Trois approches peuvent être mises en place pour prévoir la production dans les scieries. La première approche classique, décrite dans le chapitre I, consiste à évaluer la production future à partir des informations qu'il est possible d'observer sur l'enveloppe de la grume. Nous avons vu que cette approche, basée sur la connaissance des experts, reste très incertaine et génère entre 15 et 20% de produits non conformes aux besoins des clients et des scieurs. C'est pour cette raison que nous présentons deux autres approches, l'approche que nous nommons « billon » que nous comparons à l'approche dite « produit », le sujet de cette thèse, schématisées dans la figure 49 et qui permettent de diminuer ce taux de non qualité. Ces deux

approches étant basées sur la représentation numérique, volumique et interne de la matière première, nous commençons par décrire ses méthodes de numérisation possible et comment nous avons choisi la nôtre.

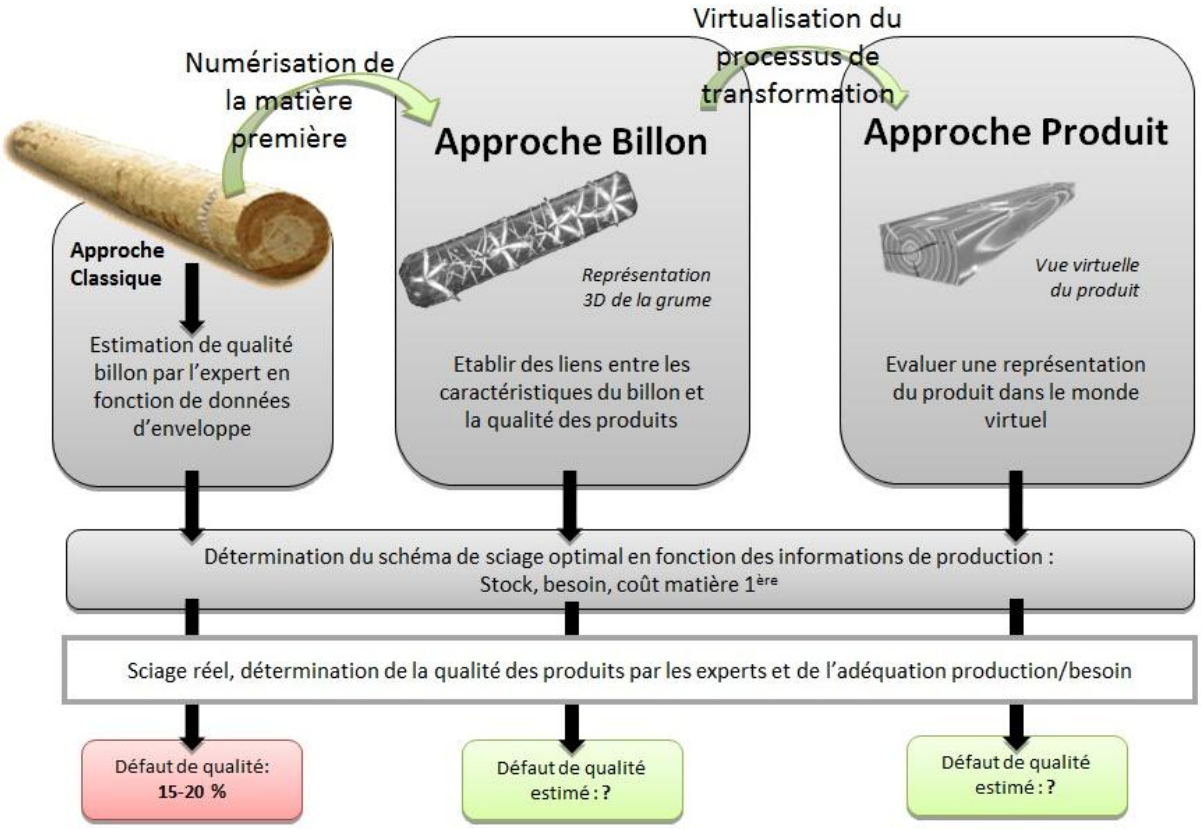



*Figure 49 : Les trois approches permettant d'estimer la production dans les scieries*

### 3.1.1 Numérisation de la matière première

Quelle que soit l'approche (billon ou produit), la première étape consiste à numériser la matière (passage du réel au numérique, ou virtuel). Différentes recherches dans le domaine du matériau bois ont déjà éprouvé plusieurs des capteurs utiles pour y arriver. Afin de faire émerger le plus pertinent à utiliser dans notre cas, un état de l'art est réalisé afin de montrer les avantages et inconvénients de chacun. Puis dans le paragraphe suivant, nous déterminons le(s)quel(s) permet(tent) d'avoir la représentation la plus complète, précise et réaliste du produit.

- **Les capteurs permettant de numériser la matière première**

De multiples capteurs sont utilisés dans l'industrie du bois pour avoir une représentation autant surfacique que volumique de la matière. Ici nous ne décrivons que les capteurs volumiques car les capteurs surfaciques sont utilisés en post processus, sur les produits finis. Ces capteurs utilisent différentes technologies basées sur des longueurs d'ondes différentes.

Les capteurs permettant d'obtenir une représentation volumique de la matière doivent utiliser des ondes ayant la capacité de pénétrer cette matière. Dans [Bucur, 2003] et plus récemment [Brashaw & al, 2009], les auteurs présentent les capteurs dont les ondes ont cette capacité et dont l'utilité dans l'industrie du bois est prouvée. Ils mettent en avant plusieurs méthodes d'imagerie : celles utilisant l'effet thermique, les micro-ondes, les ultra-sons, la résonance magnétique (Imagerie par Résonance Magnétique, IRM) et les radiations Ionisantes (rayons X et gamma).

Bien que les ondes du visible ne pénètrent pas le matériau, nous citons une catégorie de capteurs permettant d'avoir une représentation de l'enveloppe de la grume par l'utilisation de caméras et/ou de lasers (figure 50.a). En couplant plusieurs de ces capteurs, il est possible d'obtenir une représentation de l'enveloppe de l'objet scanné. La représentation est volumique mais elle ne permet pas d'avoir une vision interne du bois. Cette technique est très utilisée en scierie car elle permet d'avoir une information assez précise du volume et de la forme des billons et des grumes avec un investissement « raisonnable ». De nombreuses recherches sur l'optimisation de la matière première se basent sur ce type de représentation [Todoroski & Rönnqvist, 2002]. Néanmoins, ces capteurs ne permet pas d'obtenir, par anticipation du processus de transformation, une représentation des futurs produits potentiellement sciés.

Les techniques dites « thermiques » utilisent la température du matériau et sa capacité à propager la chaleur pour obtenir une image (figure 50.b). Il est possible d'utiliser soit une méthode active où le bois subit des cycles de chaleur, ce qui permet de déterminer l'impact d'une singularité sur la mécanique du bois par effet de dilation, soit une méthode passive dans laquelle le bois est seulement chauffé (sans cycle). Cette deuxième méthode permet d'avoir une bonne connaissance de l'intérieur du matériau et de déterminer la présence de nœuds, de cavités, ou l'humidité du bois. Il est cependant difficile d'obtenir une image correcte et facilement exploitable de l'intérieur du bois par cette technique.

Les méthodes utilisant les micro-ondes se basent sur les propriétés diélectriques du matériau (figure 50.c). Utilisées initialement pour des produits collés entres eux et surtout pour le contrôle qualité dans d'autres industries, elles se développent dans les industries du bois pour détecter les singularités telles que les nœuds, les variations structurelles (fentes, trous, …) ou l'humidité du bois [Kaestner & Batth, 2000] [Fuentéalba, 2005]. L'inconvénient majeur des micro-ondes provient de l'interprétation des images qui est souvent complexe à réaliser du fait de la transformation des ondes dans le matériau [Bucur, 2003].

La propagation des ondes ultrasonores dans le bois permet aussi de détecter des caractéristiques intéressantes du bois puisqu'elle est corrélée à sa résistance mécanique [Waterhouse, 1993]. Grâce aux ultrasons, il est possible de détecter les nœuds, l'humidité, la direction du fil, les zones de vide [Lin, 2008] [Wang & al, 2009]. Pour ce type de capteurs, il est souvent nécessaire d'être en contact avec le bois. [Vun & al, 2008] proposent une étude sur un capteur sans contact mais limitent leur étude à la détection de l'humidité du bois. [Fleming & al, 2005] utilisent les ultrasons pour détecter les larves dans le bois. Comme on peut le voir dans la figure 50.d, les images sont aussi complexes à traiter et ne donnent pas une représentation fidèle du matériau.

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) délivre une information basée en grande partie sur la présence de l'eau dans le bois (propriété quantique des noyaux d'hydrogène) dont une représentation est donnée en figure 50.e. Cette méthode permet d'identifier l'humidité du bois et par extension la présence de singularités dont les proportions en eau sont différentes (comme les nœuds, les espaces vides, …) [Chang & al, 1989]. Cette méthode présente l'inconvénient d'utiliser un matériel de mesure particulièrement volumineux à cause de la nécessité d'avoir un aimant supraconducteur pour générer un champs statique $B_0$ (voir chapitre 2 et les explications sur la RMN dont l'IRM découle). Notons par ailleurs que lorsque le bois est sec, l'IRM est bien moins efficace.

Enfin l'utilisation des rayons ionisants, tels que les rayons X et gamma délivre une information sur la densité du matériau. Ces ondes sont plus ou moins atténuées suivant la densité du matériau et la présence de l'eau. Les images qui en sont extraites donnent une représentation particulièrement proche de la réalité comme la figure 50.e le montre. De par la constitution cellulaire du bois, cette caractéristique autorise l'identification précise des différentes zones d'intérêt du bois comme les cernes d'accroissement ou les singularités [Wei & al, 2010].

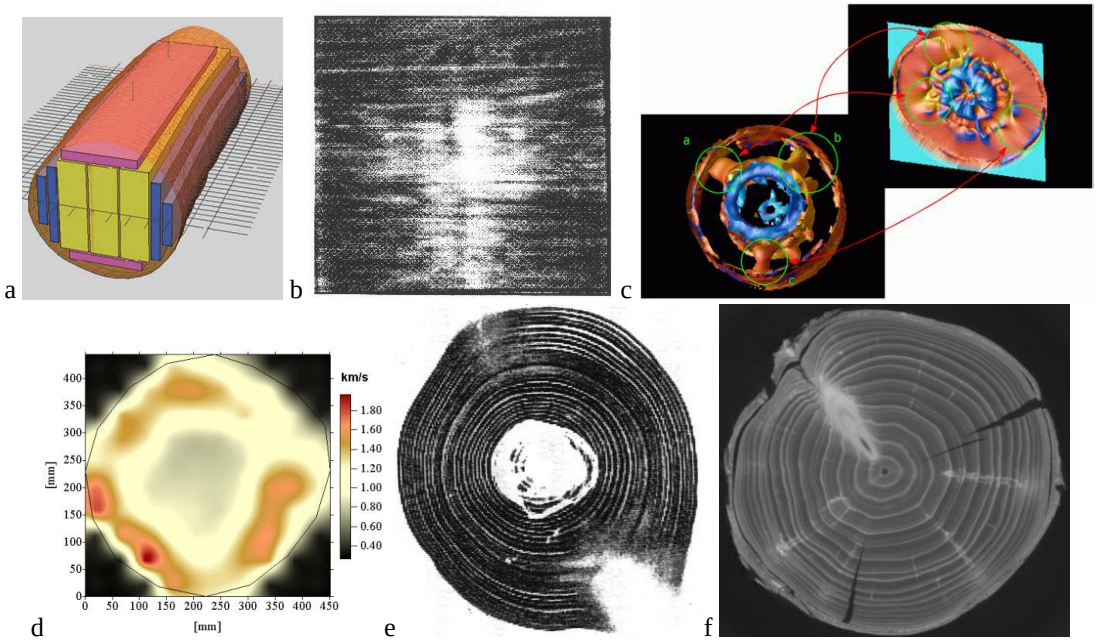



*Figure 50 : Images de différents systèmes d'acquisition (a : laser +caméra ; b : caméra thermique, c : micro-ondes, d : ultra-sons, e : IRM, f : rayon-X)*

Les capteurs « volumiques » fournissent une représentation de l'intérieur de la matière par tranches. Or, il est nécessaire pour nous d'obtenir une représentation de l'ensemble du volume de la matière première. Pour cela, nous proposons d'utiliser la tomographie (*Computed Tomography* en anglais, CT) qui fournit une représentation tridimensionnelle de l'ensemble du volume du bois par reconstruction depuis la suite d'images des tranches de la matière. Le principe de la tomographie est décrit dans la figure 51.

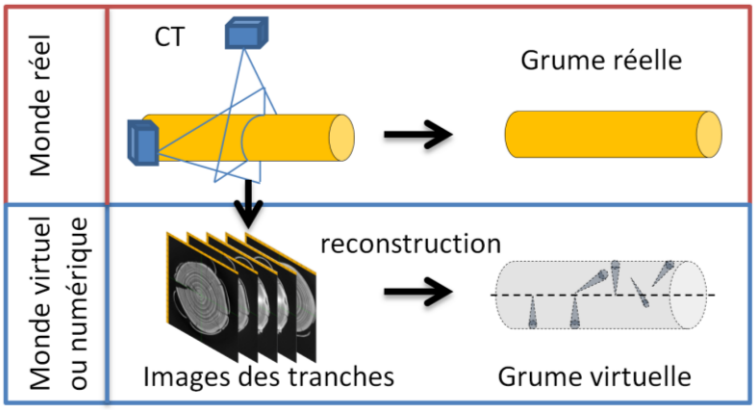



*Figure 51 : Principe de la tomographie (Computed Tomography ou CT)*

Parmi tous ces capteurs, l'IRM et les rayons ionisants donnent les représentations les plus réalistes. Cependant l'information qu'ils délivrent n'est toujours pas complète et nécessite donc d'être encore améliorée.

- **Choix et complémentarité des capteurs**

D'après [Osterloh & al, 2007], la tomographie à rayons X est, parmi les méthodes citées précédemment, celle qui offre le plus de potentiel avec une qualité de représentation des plus intéressante et comme le bois se prête bien à l'imagerie RX [Wei & al, 2010], notre choix s'est donc porté sur l'utilisation de ce matériel dont la plateforme Tracilogis [Tracilogis, 2013] du CRAN est équipée.

Précisons que les résultats obtenus par les capteurs présentés peuvent être exploités conjointement par fusion des informations fournies [Hasenstab & al, 2006]. Il est évidemment que coupler des capteurs procurant des informations complémentaires est une voie à privilégier afin d'obtenir les informations « justes nécessaires » à la décision. Par exemple, la couleur qui est une information particulièrement importante dans le domaine du bois n'est pas disponible avec les capteurs « volumiques ». Elle est généralement obtenue avec des capteurs surfaciques (de type caméras) après les opérations de débit sur les produits finis réels. Nous pouvons donc d'ores et déjà dire que ce type de capteur doit être utilisé pour compléter l'information et vérifier la production en fin de processus.

### 3.1.2 L'approche « billon »

Cette approche anticipe la production sur la base des caractéristiques internes des billons. Elle est étudiée par B. Almecija dans ses travaux de recherche [Almecija & al, 2012a] [Almecija & al, 2012b]. L'objectif principal est de trier les billons à partir de critères évalués dessus, en fonction de la qualité des produits finis qui pourront être fait avec.

La stratégie adoptée dans cette étude vise à établir le lien existant entre la qualité du billon définie dans l'entreprise partenaire, correspondant à la capacité d'un billon à produire d'un certain type de produits, et la qualité des produits finis. Le but est donc de déterminer les caractéristiques à mesurer et les différents seuils de décision qui y sont attachés, afin de paramétrer le système de tri, et d'attribuer la bonne qualité au billon en assurant par la même une production au plus juste.

Pour établir ces relations, trois phases ont été mises en œuvre. Une première consiste à créer un modèle représentant la connaissance des experts sur la qualité billon et un autre relatif à la qualité produit afin de déterminer les liens directs, indirects, voire inexistants (et qu'il faut donc créer) entre ces deux modèles. L'utilisation d'un modèle représentant la connaissance sur le matériau bois permet de compléter les liens inexistants. Dans un cas, la caractéristique mesurée sur le billon permet de connaitre directement la valeur du critère sur

le produit (p. ex. l'essence), dans l'autre, il faut passer par la mesure d'autres caractéristiques afin d'avoir une estimation du critère désiré (p.ex. les nœuds ou l'entre-écorce[12]) [Almecija & al, 2012]. Cette alternative offre l'avantage de mettre à plat la connaissance de l'entreprise et de faire émerger des vérités difficiles à identifier sans la modélisation. Cependant, elle ne permet pas de définir les liens mathématiques qui existent entre les critères d'évaluation de la qualité billon et ceux de la qualité produit.

La deuxième phase consiste à utiliser la simulation pour observer l'influence de certaines caractéristiques du billon (comme le diamètre moyen des nœuds) sur les produits finis. Ces simulations permettent d'avoir une connaissance sur le lien mathématique existant entre les critères d'évaluation de la qualité billons et la qualité produit. Cependant, cette étape a ses limites car certaines singularités et, en particulier, celles dont la présence est aléatoire comme les poches de résine, ou les attaques biologiques sont difficiles à simuler de manière réaliste. Il n'est donc pas possible de déterminer l'ensemble des valeurs relatives à chacun des critères permettant de définir les classes de qualité billons.

La dernière phase repose sur le traitement de données, c'est-à-dire qu'elle est basée sur l'exploitation de résultats obtenus par l'expérience. Pour cette étape, une quantité importante de billons doit être scannée, caractérisée puis sciée. Les sciages ainsi obtenus sont eux aussi scannés (avec une caméra dans ce cas) et caractérisés. A partir de là, il s'agit d'établir les liens qui existent entre des singularités (nœuds, fentes, …) préalablement sélectionnées, pour déterminer les critères pertinents à relever sur les billons ainsi que les valeurs limites relatives à la détermination des qualités. Une telle solution semble « chronophage et énergivore » du fait de la nécessité de scanner une quantité importante de billons pour couvrir l'ensemble des cas possibles. Cependant c'est une bonne alternative pour valider les simulations et les modèles proposés précédemment.

Pour finir à propos de cette approche billon, on s'aperçoit que son utilisation repose sur une évaluation stochastique de la qualité des produits finis. Il existe beaucoup d'incertitude concernant la fiabilité de la méthode car le bois est un matériau hétérogène et extrêmement variable. L'utilisation de critères propres au billon pour prévoir la qualité des produits finis est donc très incertaine et imprécise. Il est ainsi évident que le taux de non-conformité de la production ne peut pas être minimal.

[12] Le diamètre visible en surface d'un produit est lié au diamètre moyen de ce dernier sur le billon : lien indirect géométrique. L'entre écorce est identifiable sur le billon par la présence de branches ramicornes : lien indirect anatomique.

### 3.1.3 L'approche « produit »

Cette approche, qui est le cœur de cette partie de la thèse, évalue la qualité d'un produit quelconque appartenant au billon non plus au travers du billon dans sa globalité, mais directement sur sa représentation numérique.

Afin d'obtenir cette représentation du produit fini, il est nécessaire de trouver un moyen de l'extraire de l'image tomographique 3D. Pour cela, les opérations de transformation ont été « virtualisées » afin de les réaliser numériquement, de la même façon que dans le monde réel (délignage, tronçonnage, corroyage, ...). L'utilisation conjointe de la numérisation de la matière et de virtualisation des opérations de transformation permet d'obtenir une représentation de chaque produit fini, appelée Produit Virtuel et présenté section 3.2.2., aussi proche que possible du produit réel.

Ainsi, il est envisageable de caractériser ces Produits Virtuels sur la base de cette représentation et d'en approcher les caractéristiques avant que le billon ne soit scié. Contrairement à l'approche précédente, les caractéristiques sont évaluées avec des critères propres au produit et non ceux propres au billon, ce qui laisse envisager une meilleure précision dans leur caractérisation.

Enfin, par cette approche, il est possible de déterminer plus précisément la nomenclature des produits issus d'un billon. La caractérisation des produits (et en particulier la qualité esthétique) permet d'établir à quelle famille de produits[13] ils appartiennent, et ainsi d'en déterminer la quantité pour chacune des familles (élément nécessaire à l'établissement d'une nomenclature). Avec cette anticipation, les scieurs peuvent mieux prévoir *a priori* leur production et agir en conséquence de ce qu'ils observent virtuellement (manques, défauts, …). L'ensemble de la méthodologie est détaillée dans ce chapitre.

La figure 52 reprend la présentation des deux approches en détaillant les opérations permettant d'évaluer la qualité des produits. Les auteurs de l'approche billon prévoient, d'avoir un taux de non-conformité proche de 5% de la production. Suivant nos premières estimations, l'approche produit devrait permettre de prévoir la production avec un taux d'erreur n'excédant pas 1%.

[13] Définie en majeure partie par les dimensions du produit et sa classe de qualité

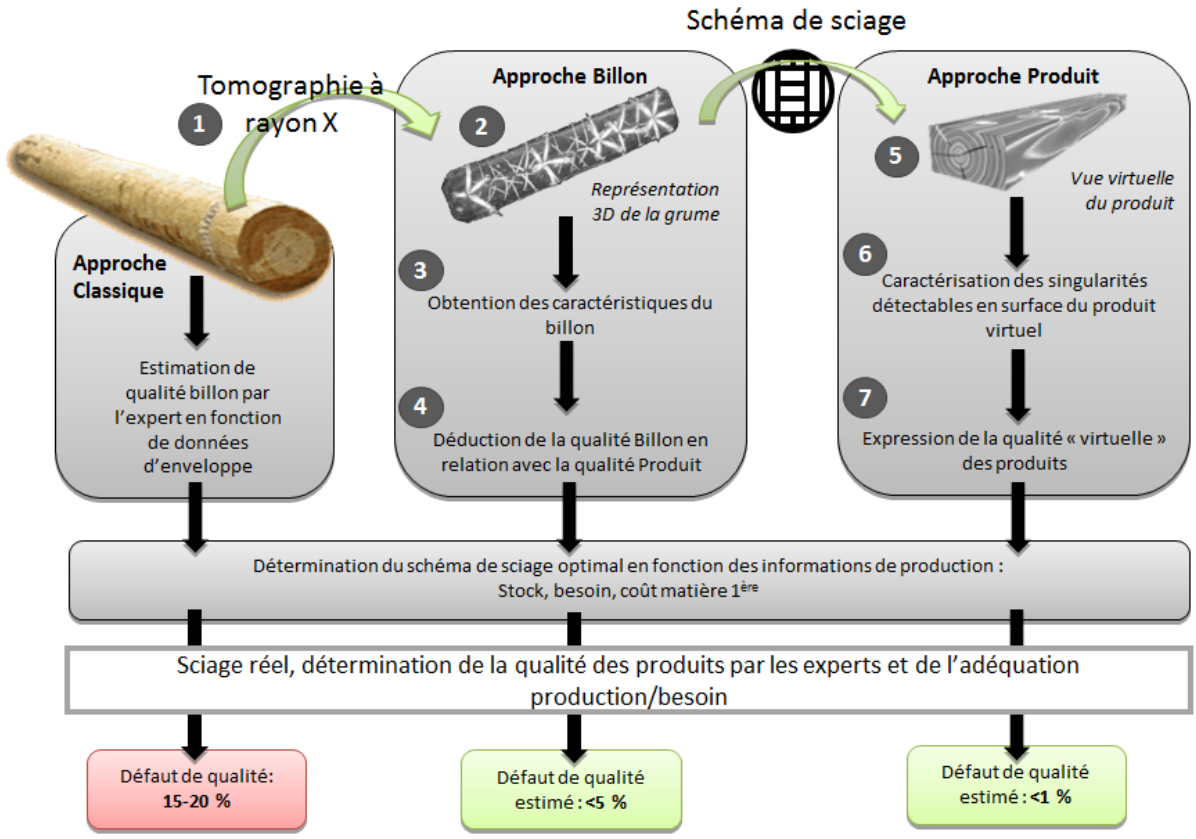



*Figure 52 : Détails des trois approches permettant d'anticiper la production*

## 3.2 Obtention des produits virtuels et caractérisation des singularités

La première étape de la méthodologie proposée est de générer les Produits Virtuels. Le sciage virtuel qui permet cette génération est tout d'abord décrit. La méthode d'extraction et de caractérisation des singularités est ensuite introduite et le dernier paragraphe détaille l'évaluation de la qualité dans un environnement introduisant une grande quantité d'imperfections qu'il faut prendre en compte.

### 3.2.1 Virtualisation du processus de transformation (sciage)

Pour obtenir les Produits Virtuels, il est nécessaire de simuler, sur la représentation issue du tomographe à rayons X, les opérations qui sont réalisées sur ce même billon dans la suite du processus. Il est évident que cette application est généralisable à l'ensemble des processus de transformation divergents et présente alors le même intérêt d'anticipation, en améliorant la gestion.

- **Sciage virtuel**

La virtualisation des opérations de débit consiste à simuler le résultat d'opérations de production réelles, sur l'image 3D du billon. Ces opérations peuvent être plus ou moins complexes suivant le domaine industriel étudié. Le principe de cette simulation est de « positionner », sur la représentation virtuelle de la matière première (et en particulier sur les sections obtenues précédemment qui permettent la reconstruction 3D), les voxels (éléments de volume d'une image 3D) appartenant aux surfaces des produits finis usinés.

Pour déterminer ces voxels, il faut trouver comment représenter le résultat de l'opération de débit afin de déterminer les coordonnées de l'ensemble des voxels correspondant à la surface du produit fini. Pour cela, plusieurs solutions peuvent être retenues comme l'utilisation d'un plan de débit ou d'une fonction spécifique décrivant la forme de la surface. Une fois les coordonnées déterminées, il suffit de les identifier sur l'ensemble des images que la surface coupe et de les assembler dans une matrice représentant l'image surfacique (2D) du produit. La figure 53 présente ce principe dans le cas du sciage virtuel.

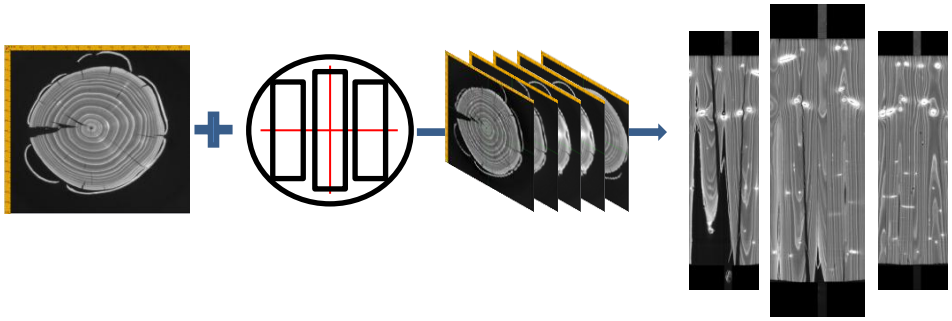


*Figure 53 : Processus de sciage virtuel : exemple du délignage (cas du bois)*

Dans notre étude, nous virtualisons deux opérations relatives à l'industrie du bois: le tronçonnage et le délignage.

Le tronçonnage est une opération plutôt simple à réaliser sur le lot d'images. Cette opération correspond à la découpe du produit suivant un plan radial à la grume. Ainsi, il suffit de repérer l'image (qui représente la coupe radiale du billon) à la longueur désirée. L'opération de tronçonnage, réalisée virtuellement sur la matière première, nécessite très peu de temps de calcul. C'est une opération qui peut être réalisée avec une précision de l'ordre du millimètre, compatible avec les systèmes industriels mis en place, ce qui est très largement compatible avec les exigences de ce type d'industrie.

Le délignage est plus complexe que le tronçonnage. Cette opération de découpe consiste à scier le bois selon un plan longitudinal. Il est donc nécessaire de prendre en compte toutes les images tomographiques de la grume pour obtenir l'image finale du produit. Les

coordonnées des voxels à extraire sont définies par un plan de débit qui, une fois positionné sur la première image de la section de la grume, est appliqué à toutes les autres. Une fois le processus terminé, l'ensemble des voxels constituant une face d'un produit virtuel sont assemblés pour obtenir une représentation de la face virtuellement sciée. En fonction du nombre d'images, de leur résolution, et des capacités de traitement de l'ordinateur, ce processus peut s'avérer long. De même que pour le tronçonnage, la précision est de l'ordre du millimètre.

Nous avons développé un logiciel ad-hoc pour réaliser le processus de sciage virtuel sur nos images (voir annexe C). D'autres processus pourraient être simulés comme le déroulage des billons afin, de la même manière, d'anticiper la qualité des plaquages issus de cette opération. Il en est de même pour des opérations de mise en forme des produits finis (planches, poutres, tasseaux, …) comme le corroyage ou le profilage. Pour de telles opérations, les coordonnées sont alors définies par une fonction permettant de déterminer le voxel qui est le plus proche du trait de coupe réel.

Les images ainsi obtenues donnent une représentation virtuelle des surfaces de chaque produit potentiellement issu de la matière première pour un plan de débit particulier. Il est alors possible de reconstituer le produit et d'en avoir une vue en trois dimensions. Pour cela nous projetons sur le « patron » d'un produit les images des faces extraites précédemment comme le montre la figure 54. Nous obtenons ainsi le sciage (produit fini) avant qu'il ne soit réellement scié : le Produit Virtuel.

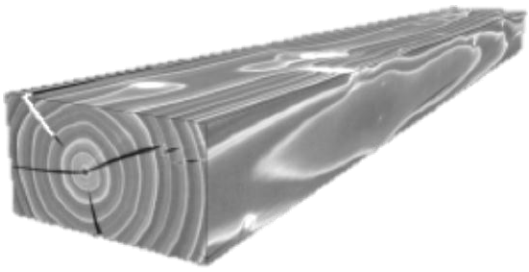


*Figure 54 : Représentation en 3D du PV extrait après l'opération de sciage virtuel*

- **Rapprochement de la vue du produit virtuel et la vue du produit réel**

Le rapprochement pour comparaison des vues du produit virtuel et du produit réel, nous permet de montrer qu'il est possible d'établir une correspondance. La figure 55 présente, pour un produit, les deux vues pour les deux faces principales.

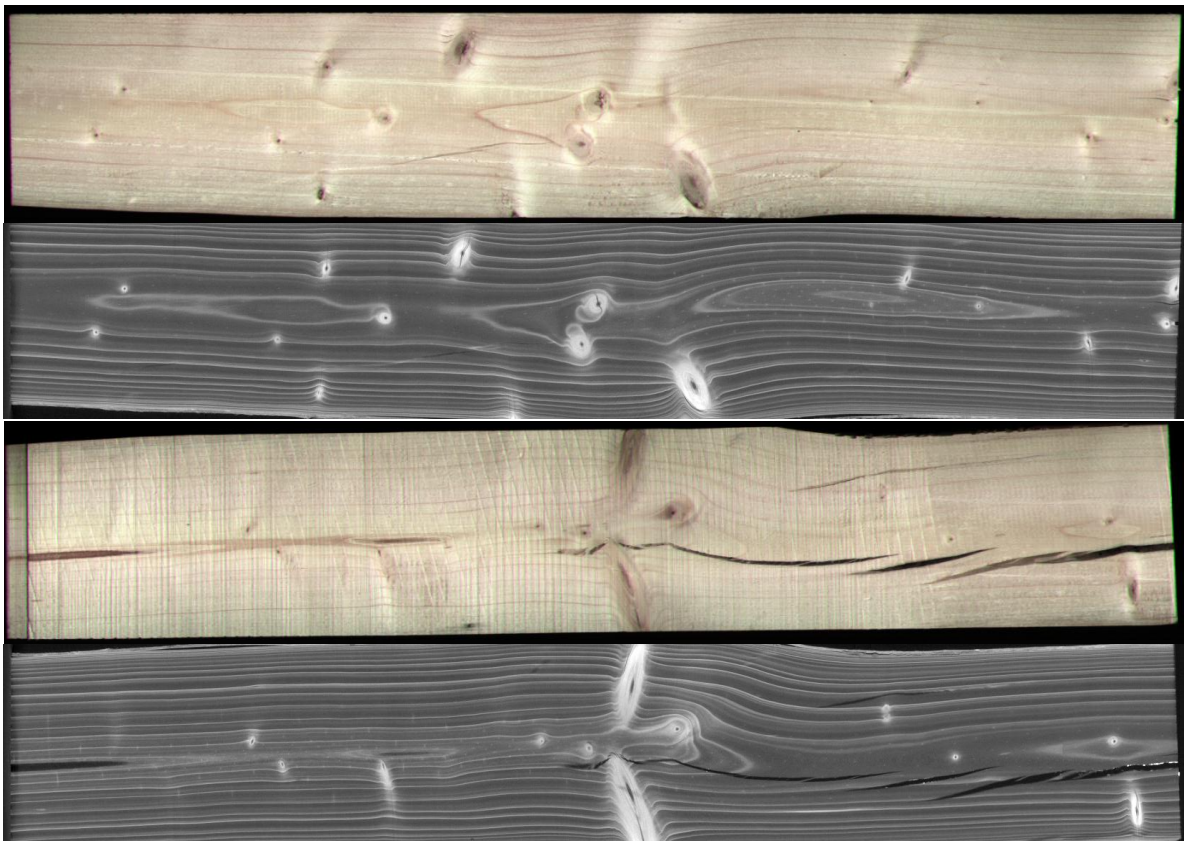


*Figure 55: Comparaison de deux vues des faces principales d'une planche (en couleur : obtenue grâce à une caméra - en niveau de gris : obtenue par sciage virtuel)*

On voit nettement les ressemblances entre les deux représentations. De la position des nœuds aux dessins réalisés par les cernes d'accroissement, en passant par les fentes et les trous qui présentent les mêmes caractéristiques sur les deux vues, on peut aisément imaginer en faire le rapprochement (analyse comparative).

Sur les images couleurs, la détection de certaines singularités n'est pas évidente du fait de leur manque de contraste avec le bois sain. Notons que le tomographe apporte un avantage indéniable car il permet de détecter de manière bien plus précise les singularités qui présentent une densité plus importante. Cette différence est aussi à prendre en compte lors de l'identification des produits car il est possible que certaines singularités ne soient pas détectées physiquement alors qu'elles l'étaient virtuellement et réciproquement. Cela a pour impact de limiter la caractérisation et donc l'identification des produits.

Certain défauts ne sont visibles que sur les images de la caméra car ce sont des défauts d'usinage qui apparaissent après le sciage réel. A gauche sur l'image couleur du bas (figure 55), on constate, par exemple, une partie plus sombre correspondant à un trait de scie mal placé pendant le délignage réel. Bien que ces défauts soient pris en compte dans l'évaluation de la qualité esthétique du produit fini, le sciage virtuel ne peut naturellement pas mettre en

évidence ces défauts. Il est évident qu'ils sont un frein (quantité d'informations supplémentaires) à la caractérisation des produits et qu'il est nécessaire de mettre en œuvre une vérification des produits finis après usinage.

Dans [Rinnhofer, 2003], les images présentées aux scieurs sont en « fausses couleurs ». La ressemblance entre les deux est notable. La mise en place de fausses couleurs permet d'avoir une représentation plus facilement interprétable des produits. Dans cet article, les parties denses sont claires (nœuds) et les parties peu denses sont foncées (fente, moelle). Mais comme on peut le remarquer dans les images ci-dessus, avec l'essence présentée ici, il n'existe pas de lien direct entre la fausse couleur et la densité. Ainsi la mise en place de fausse couleur ne permet pas forcément d'approcher le bois réel et peut même induire de mauvaises interprétations. Suivant l'essence, la présence de certains champignons ou l'humidité du bois peuvent également modifier la densité observée au RX et donc l'intensité de la représentation en niveau de gris (ce qui complexifie la détection des singularités lorsque le bois est humide). Ainsi, il est difficile d'avoir une représentation fidèle pour tous les types de bois simplement en utilisant des fausses couleurs. A notre sens, l'interprétation doit se faire sur le niveau de gris pour éviter les non-sens.

- **Limites du sciage virtuel**

Il existe plusieurs contraintes relatives au sciage virtuel qui devront être prises en compte dans la suite du processus et qui peuvent entraver la bonne réalisation de la prédiction et du suivi de la production.

Les systèmes de vision ne permettent pas d'avoir l'ensemble des informations. Dans le cas du tomographe, les images obtenues donnent une information sur la densité du bois et renvoient donc des images en niveau de gris. Dans [Bombardier & al, 2008], l'auteur donne les caractéristiques à étudier pour déterminer la nature des singularités. Une partie des singularités comme les nœuds noirs, les poches de résine, ou le bleuissement nécessitent l'information de couleur ou de texture pour assurer leur identification. Or ces informations, et en particulier la couleur, ne sont pas disponibles sur des images RX. Il faut donc trouver des moyen détournés pour les caractériser ce qui rend l'information imparfaite (incomplète voire incertaine).

Les temps de calcul informatique nécessaires à l'acquisition des images RX sont aussi un frein. Dans [Wei & al, 2010], les auteurs identifient plusieurs contraintes relatives à la mise en place de tels systèmes de vision dans l'industrie du bois. Tout d'abord, le temps de passage des grumes dans le scanner est important et ne correspond pas aux vitesses de travail

habituelles. La résolution des images est liée à la rapidité de passage des grumes. Ainsi pour obtenir des images correctes, il est nécessaire de ne pas avoir des vitesses de passage des grumes trop élevées. Récemment, l'entreprise Microtec a mis sur le marché un scanner RX ayant la capacité de fournir des images de bonne résolution (de l'ordre du millimètre) pour des cadences industrielles proches de celles rencontrées dans les scieries [Giudiceandrea & al, 2011]. Ce progrès nous laisse imaginer de futurs développements quant à cette technique.

Même si l'on imagine que les scanners soient capables de fournir des représentations virtuelles dans des temps acceptables, la réalisation du sciage virtuel nécessite de la puissance de calcul afin d'être, lui aussi, réalisé dans des temps compatibles avec les cadences de production. Dans notre cas, sur une machine de gamme moyenne (Windows 7/intel i5/ 6Go Ram), le temps nécessaire à la réalisation de ce processus est d'environ 1 mn pour 2000 images. Dans une scierie, un tel temps est encore trop long pour que les lignes de production ne soient pas ralenties.

Enfin la dernière contrainte concerne la reproduction exacte, pendant le sciage réel, du plan de débit prévu lors du sciage virtuel. Il est évident que pour obtenir physiquement les pièces virtuellement sciées, il faut respecter le même positionnement du plan de débit par rapport à la grume. Or, lors du sciage virtuel, le plan de sciage est positionné par rapport au bout de la grume sur les axes x et y mais aussi angulairement par rapport à la grume (figure 56). Une dispersion de positionnement apparaît inévitablement entre la position de la prise d'images et celle du sciage réel. Les variations induites peuvent changer la morphologie des produits finis et donc induire des écarts entre la qualité prévue et celle obtenue.

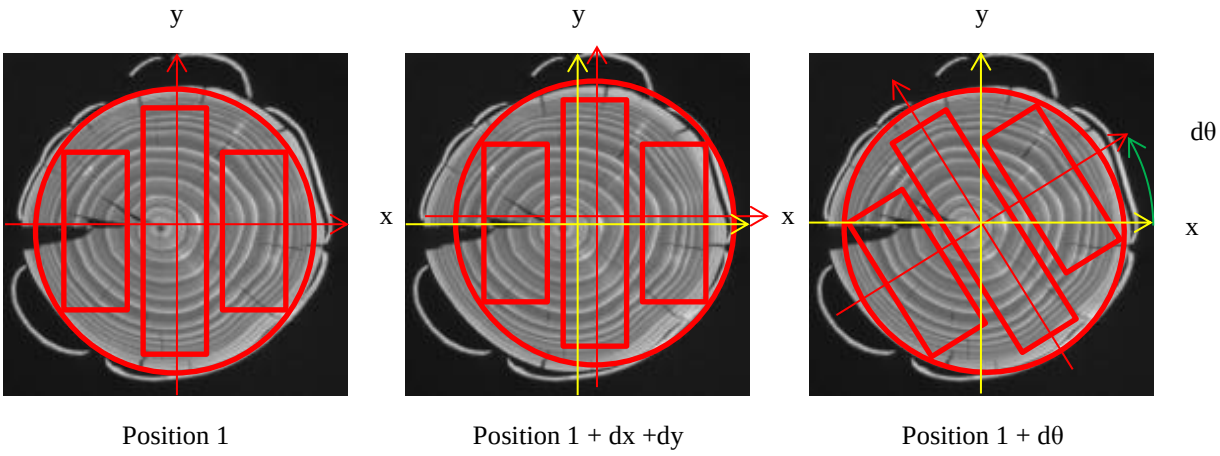



*Figure 56 : Variations sur le positionnement du plan de coupe par rapport au billon (en rouge le plan de coupe et son repère et en jaune celui du billon)*

De plus, le positionnement longitudinal de la grume, pendant l'acquisition, doit être conservé. Le moindre décalage entre l'axe longitudinal de la grume et son axe du passage dans le scanner impacte la représentation virtuelle. Pour que les sciages réels correspondent aux sciages virtuels, il faut nécessairement conserver (ou annuler) ce décalage angulaire. Dans [Lundahl & Grönlund, 2010], les auteurs étudient l'influence de cette variation sur l'optimisation et le rendement des scieries. Les auteurs se basent sur l'enveloppe de la grume (et non sur la représentation complète) et cherchent, à l'aide d'un simulateur, à améliorer les rendements matières. Ils concluent qu'il est possible d'augmenter de 3% ce rendement en incluant le positionnement de la grume dans l'optimisation. Ils estiment des gains encore plus importants si les nœuds étaient pris en compte pour estimer la qualité des produits et donc améliorer aussi la réponse industrielle aux besoins des clients. Néanmoins, les auteurs constatent qu'il est nécessaire de tracer les billons pour conserver et connaitre le positionnement du plan de sciage et de la grume. Ne traitant pas cet aspect dans la thèse, nous posons donc comme hypothèse pour la suite de ce chapitre que cette dispersion de positionnement est nulle.

### 3.2.2 Extraction des singularités du produit virtuel

Afin de déterminer la qualité des produits, qui est principalement basée sur les caractéristiques des singularités, il est nécessaire de les détecter par différentes opérations de traitement d'images. Ces opérations n'étant pas le cœur de cette thèse, nous ne détaillons pas les traitements permettant l'extraction et nous ne présentons que la voie que nous avons suivie.

Alors que l'expert en scierie donne la qualité du produit suivant sa propre réflexion et sa propre évaluation des singularités, l'automatisation de cette tâche nécessite un processus complet de détection, d'extraction, de caractérisation des singularités puis de prise de décision et d'optimisation de la qualité sur la base des informations extraites. Ces systèmes appelés couramment Système d'Observation se décomposent donc en cinq grandes étapes : l'acquisition, le prétraitement des images, la segmentation, la classification et l'optimisation [Gunasekaran, 1996] comme décrit dans la figure 57.

Une fois les images acquises, une étape de prétraitement est souvent appliquée afin de faciliter l'opération suivante. Cette étape permet, par exemple, d'augmenter le contraste de certains pixels, de faire ressortir les contours ou les surfaces présentant des valeurs significatives, … Les images ainsi prétraitées, sont ensuite segmentées afin d'extraire les

régions d'intérêt (singularités) ainsi que leurs caractéristiques (diamètre, valeur moyenne des pixels, surface, …), qui sont ensuite chacune caractérisée. A partir de du vecteur caractéristique généré, il est possible d'utiliser des méthodes de classification pour déterminer le type de singularités (nœud sain, nœud noir, poche de résine, …). Par exemple, dans [Bombardier & Schmitt, 2010], les auteurs utilisent un classificateur à base de règles linguistiques floues pour cette étape. La dernière étape permet de déterminer la qualité des produits. Nous n'en faisons pas de description précise ici car elle est l'objet des deux parties suivantes de ce chapitre.

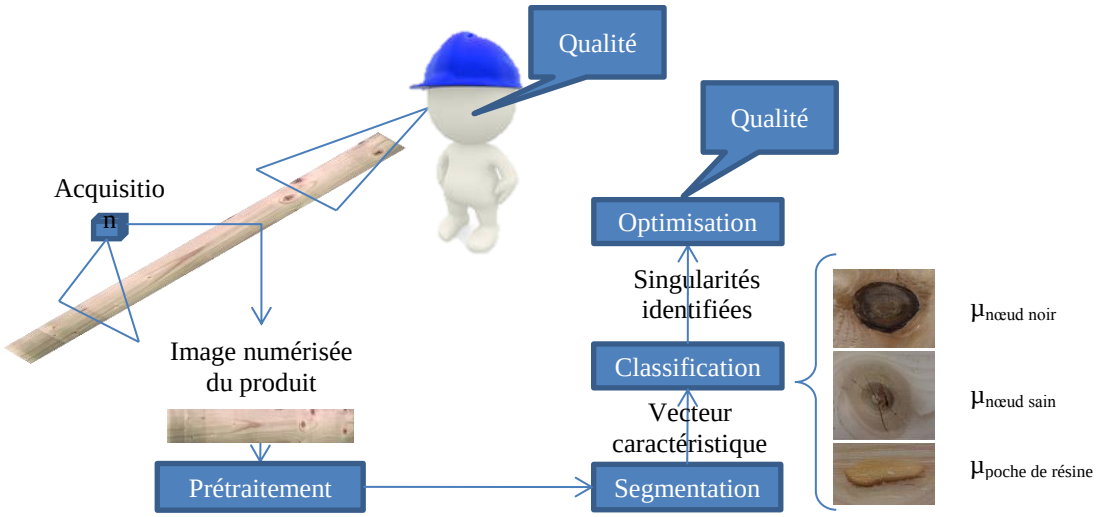



*Figure 57 : Chaîne d'acquisition et de traitement des images pour l'extraction des singularités et la caractérisation des produits avec un système d'observation ou un opérateur*

Dans le cas du sciage virtuel, les images acquises suivant le processus décrit dans la section 3.2.1, donnent une représentation de la surface du produit final en fonction de la densité du matériau. La segmentation se base sur cette valeur pour faire émerger les régions d'intérêt observables à la surface du bois sain. Effectivement, certaines singularités possèdent une densité plus faible que celle du bois sain, tels les trous, les fentes, les poches de résines ou le cœur et d'autres une densité plus importante comme les nœuds sains [Wei, 2010]. Sur la base de ces différences de densité, il est possible de réaliser une segmentation de l'image et faire ressortir ces deux types de singularités [Oja, 2000] [Aguilera & al, 2002] [Rinnhofer, 2003].

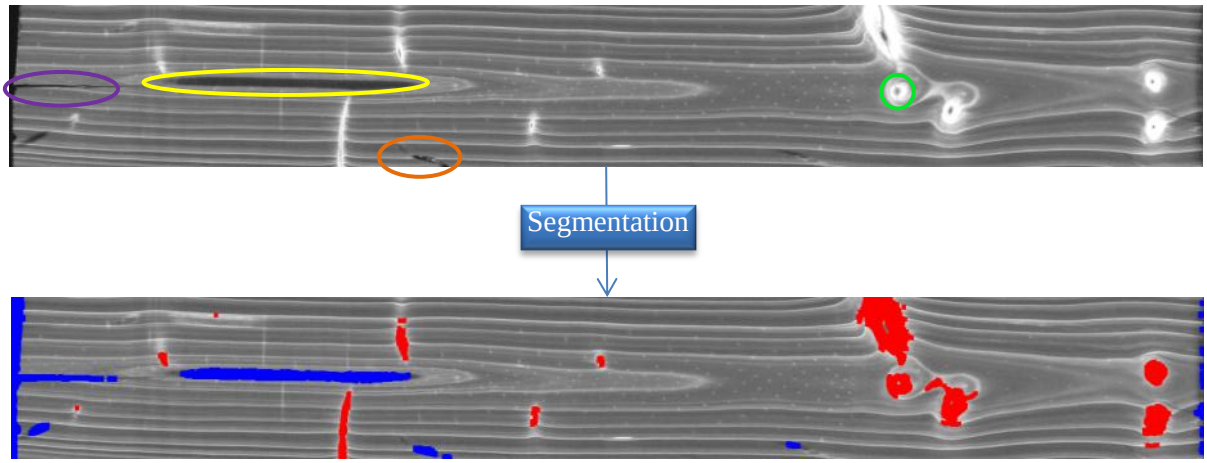



*Figure 58 : Segmentation des images des produits virtuels sur la base de la donnée de densité. Sur l'image du haut ; en violet : une fente, en jaune, du bois de cœur, en orange, des attaques d'insectes, en vert un nœud. Sur l'image du bas ; En bleu : les régions d'intérêt de faible densité ; En rouge : les régions d'intérêt de forte densité (par rapport au bois sain)*

A partir de cette étape, il est possible de mesurer les caractéristiques des régions d'intérêt qui peuvent être regroupées sous différentes « notions » comme il est expliqué dans [Schmitt, 2007]. Dans le cas de la classification des singularités sur la base d'images issues de caméras, l'auteur propose six notions (forme, taille, position, contraste, couleur, texture) qui permettent de déterminer le type de singularité. L'une des limites la représentation tomographique provient de l'impossibilité d'obtenir l'information de couleur. Cette limite est cependant nuancée par l'information de densité qui est disponible avec ce type de capteur et caractéristique de bon nombre de singularités ou de défauts comme le présente le tableau 6. La figure 58 donne un exemple des singularités visibles et de leurs types observables sur un produit virtuel complet.

Ainsi, les défauts dont la couleur est le principal élément caractéristique, comme le bleuissement, le cœur rouge et certaines attaques de champignons, ne sont pas détectables car leur densité est très proche de celle du bois sain. Concernant les autres singularités, la classification peut s'avérer difficile car certaines singularités présentent des caractéristiques similaires comme les poches de résines et les fentes. Cependant, du fait du manque d'information et de la similarité de leur impact sur la qualité, elles peuvent être classées dans une même catégorie de singularités induisant dans le bois des zones de faiblesse qui seront traitées de la même manière par la suite.

*Tableau 6 : Caractérisation des singularités du bois suivant différentes notions [Schmitt, 2007]*

| Notion de / Singularités | Forme | Taille | Position | Contraste | Couleur | Texture | Densité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nœud sain | x | x | - | x | - | - | x |
| Nœud cerné | x | x | - | x | x | - | x |
| Nœud noir | x | x | - | x | x | - | x |
| Fente | x | x | - | x | - | - | x |
| Flache | x | x | x | x | x | x | x |
| Entre-écorce | x | - | - | x | x | x | x |
| Trou | x | x | - | x | - | - | x |
| Bois de compression | - | - | - | x | x | x | x |
| Aubier | - | - | x | x | x | - | x |
| Cœur | x | x | x | x | x | - | x |
| Poche de résine | x | x | - | x | x | - | x |
| bleuissement | - | x | - | x | x | - | - |
| Coloration | - | - | - | x | x | x | - |

La détection des singularités peut être améliorée en prenant aussi en compte les informations issues de la vue de la coupe radiale comme le font [Flood & al, 2003] et [Longuetaud, 2005], ou de la représentation 3D du billon [Grungberg & Grönlund, 1992]. Ainsi les singularités et les défauts présents à la surface du produit, ainsi que leurs caractéristiques, sont les données d'entrée de la méthodologie permettant de déterminer la qualité esthétique des Produits Virtuels.

### 3.2.3 Contexte d'évaluation de la qualité esthétique des Produits Virtuels.

La méthodologie choisie pour déterminer la qualité des Produits Virtuels est dépendante d'un certain nombre de paramètres relatifs, d'une part à la décision, et d'autre part, au contexte d'évaluation (les données, le capteur, le matériau). Nous analysons donc ces deux éléments pour choisir dans quelle théorie nous placer et choisir les opérateurs les plus judicieux à utiliser pour notre évaluation.

- **Qualité esthétique du bois**

Dans un processus traditionnel, cette donnée est estimée en fin de processus de transformation par des experts qui attribuent la qualité esthétique adéquate aux produits finis sortant et entrant dans le stock.

La qualité esthétique est une caractéristique particulièrement importante pour les clients comme pour les scieurs car elle fixe une grande partie du prix d'achat/vente du produit. Une norme européenne, la NF EN 1611, fixe les critères permettant de la définir pour un produit. Ces critères, relatifs aux singularités présentes sur les faces des produits, prennent en compte

la taille, le type et le nombre des singularités par type. La norme donne des valeurs précises et restrictives à respecter pour ces critères. La qualité esthétique est ainsi représentée, suivant le vocabulaire utilisé dans le domaine, par cinq « classes » incluses[14] l'une dans l'autre et allant de 0 (« la meilleure ») à 4 (« la pire »).

Cependant, on imagine aisément que certaines de ces caractéristiques (voir l'ensemble) sont difficiles à estimer, au défilé, sur des produits qui, de l'un à l'autre, changent de longueur, de section, voire de couleur. Les experts estiment donc la qualité en fonction de critères qu'ils ont évalués « à vue d'œil » et de leur propre interprétation de la qualité. Ces deux éléments sont fonction aussi de l'environnement d'observation (lumière, climat, …) et de l'état physique ou psychique de l'expert (état de fatigue, santé, volonté, …). De ce fait, il y a donc, dans l'attribution finale de la qualité esthétique, une part importante de subjectivité, limitant la bonne mise en application de la norme. Cette subjectivité doit être prise en compte, dans notre approche, afin de rester au plus près du fonctionnement habituel des scieries.

Suivant le contexte, le type de produits et les différents acteurs (expert au classement, client, …) de la chaîne logistique, la qualité esthétique peut être définie de deux manières différentes :

- Soit elle est représentée sur une échelle monodimensionnelle et, est dans ce cas évaluée suivant une mesure qui lui est propre. Les classes de qualités sont alors liées à cette mesure et ordonnées entre elles. Même si la sortie n'est liée à aucune classe, cette mesure est toujours interprétable. Les entreprises de première transformation (scierie) ont souvent une estimation de la qualité qui s'apparente à ce type de représentation. Les méthodes de décision utilisées dans ce cas sont bien souvent apparentées à des régressions. La figure 59 représente la méthode de décision vis-à-vis du classement.

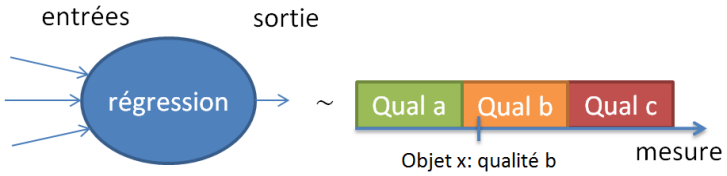



*Figure 59 : Représentation du système et du caractère monodimensionnel de la décision*

- Soit la qualité est représentée dans un espace multidimensionnel et les classes de qualité sont les sorties potentielles du système auxquelles sont attachées une mesure d'appartenance. Le choix de la classe se fait, par exemple dans le cas de la règle de

[14] La classe 0 est incluse dans la classe 1, qui est incluse dans la classe 2, …Il est donc possible d'attribuer à un produit de classe 0, l'une des quatre autres classes. L'inverse n'est pas possible.

Bayes, sur le maximum a posteriori (MAP). Les méthodes mises en œuvre pour cette catégorie sont de type classification. Il est possible qu'un objet évalué ne soit pas affecté à une classe de qualité si le système prévoit une classe de rejet. Cette représentation est souvent liée à des entreprises pour lesquelles la couleur ou la texture du produit intervient dans le classement qualité comme dans le cas du parquet, de produits reconstitués (rampe d'escalier, p.ex.) ou le plaquage. La figure 60 représente l'opérateur de classification vis-à-vis des choix pour la décision.

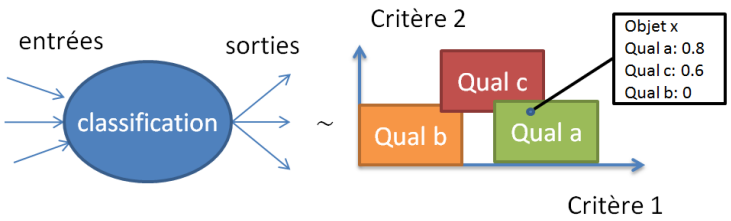



*Figure 60 : Représentation d'une classification et du caractère multidimensionnel de la décision*

Le type de représentation de la qualité est donc dépendant des acteurs de la chaîne logistique. Il faut nécessairement étudier leur comportement vis-à-vis de la caractérisation des produits pour représenter au mieux la décision.

Finalement, le classement esthétique induit, de par sa subjectivité, de l'incertitude et de l'imprécision, mais aussi, de par les multiples points de vue des acteurs, de l'incomplétude.

- **Contexte d'évaluation**

Les capteurs permettant d'avoir une représentation de la structure interne de la matière ne renvoient qu'une information interprétable en niveau de gris. Il y a donc un manque évident d'informations qui induit de l'incomplétude qu'il sera nécessaire de prendre en compte.

Le bois est un matériau particulièrement complexe à étudier. Dans [Bombardier et al, 2008], les auteurs le décrivent comme un matériau « intrinsèquement flou ». Le bois sain est une alternance graduelle de bois de printemps et d'été présentant des caractéristiques différentes et en particulier de couleur et de densité. Ces variations sont liées aux saisons et il est donc naturellement difficile de distinguer les limites précises entre ces deux « bois ». De même, les singularités du bois présentent des différences de couleurs et de densité plus ou moins marquées suivant l'essence. Les frontières entre ces dernières et le bois sain sont graduelles ce qui implique donc qu'il est plus difficile pour un processus de traitement d'images de segmenter et d'extraire de manière précise les caractéristiques des singularités. Il

y a donc une part importante d'imprécision à prendre en compte sur les critères permettant de définir la qualité.

Enfin, certaines caractéristiques des produits, habituellement utilisées par les experts pour évaluer la qualité esthétique, ne peuvent être mesurées que de manière indirecte (voir approche billon section 3.1.2). Ces liens indirects sont une source d'incertitude importante dans le processus d'évaluation.

En conclusion, le contexte dans lequel la qualité esthétique est évaluée induit également une grande part d'incertitude et d'imprécision des caractéristiques mesurées, mais aussi une incomplétude des informations en fonction de leur processus d'obtention.

- **Proposition d'une méthodologie d'estimation de la qualité esthétique**

Ainsi, l'estimation de la qualité esthétique sera forcément entachée d'imperfection. De ce fait, nous nous plaçons dans le cadre de la théorie des possibilités qui est adaptée pour la prise en compte de l'imperfection [Dubois & Prade, 1994] plutôt que dans le cadre de la théorie des croyances puisque nos informations ne sont pas contradictoires [Liu, 2006]. N'ayant pas été en mesure d'obtenir des données industrielles en volume suffisant, les lots estimés (et servant à la mise en œuvre et à la validation de nos propositions) ont été sciés par nos soins et sont donc en conséquence de faibles quantités[15]. Cette contrainte implique donc d'utiliser des méthodes ayant une capacité à généraliser à partir de lot d'apprentissage de faibles tailles. Ainsi, nous utilisons des opérateurs (intégrales de Choquet, opérateurs de fusion flous, …) qui permettent de considérer l'ensemble des contraintes [Dubois et Prade, 2004], [Wendling, 2006].

Pour évaluer la qualité esthétique des produits, nous nous sommes placés dans le cas où la qualité esthétique est exprimée de façon monodimensionnelle et dépend principalement de l'impact qu'ont les singularités. Ce principe est, d'après nous, plus proche de la vision des experts que peut l'être la norme : un produit sans aucune singularité est, en effet, considéré comme étant de la meilleure qualité qu'il soit. Chaque singularité présente vient alors diminuer sa qualité esthétique. Suivant le type de singularité, son impact sur le produit est plus ou moins important. En fusionnant tous ces impacts, il est possible d'estimer la qualité qui peut décroitre jusqu'à une valeur limite au-delà de laquelle, elle sera considérée comme étant « la pire qualité ». L'ensemble du processus est décrit dans les figures 61 et 62.

[15] Le paragraphe 3.6 reviendra en synthèse sur la partie évaluation et validation de notre proposition.

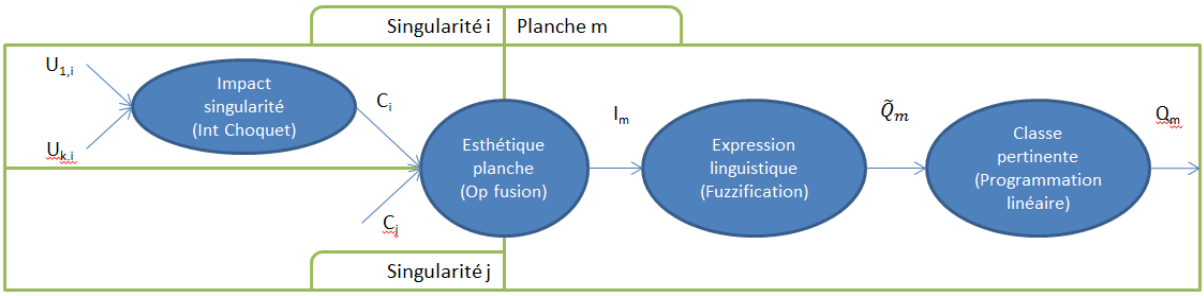



*Figure 61: Processus de détermination des caractéristiques subjectives du bois*

Une première étape consiste à estimer l'impact des singularités sur le produit. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les travaux de modélisation de la qualité réalisés par Almecija [Almecija & al, 2012]. Dans leurs travaux, les auteurs expliquent qu'il existe une quarantaine de critères pertinents pour évaluer la qualité. Sur ces quarante critères, seule la moitié correspond à la caractérisation de la qualité esthétique, et pour un type de produit, il est possible d'en n'utiliser qu'une dizaine. L'utilisation d'un capteur de type rayons X restreint encore cette liste. Finalement, nous retenons quatre critères relatifs aux singularités : taille, position sur la longueur et la largeur, contraste, que nous considérons comme « locaux » à la singularité. Ils nous servent à mesurer leur impact sur la qualité. Cette mesure d'impact constitue une information « globale » vis-à-vis du produit.

Une fois l'impact des singularités sur le produit mesuré, il faut en évaluer la qualité esthétique. Pour cela, nous proposons de fusionner les impacts des singularités entre eux en ajoutant un critère représentant leur nombre à la surface du produit puisqu'un grand nombre de singularités de faible impact doit néanmoins diminuer la qualité esthétique. Au final, nous obtiendrons une « mesure » de la qualité esthétique pour le produit considéré.

Cette mesure est difficilement interprétable par les scieurs et leurs clients qui ont pour habitude d'utiliser comme vocabulaire, le classement basé sur un vocabulaire exprimé en cinq termes (de 0 à 4). Il est donc essentiel de transposer cette mesure dans ce vocabulaire. Cette traduction que nous proposons d'effectuer à l'aide de variable linguistique floue nous permet de conserver une part de subjectivité, exprimant l'hésitation que peuvent avoir les experts entre deux classes de qualité esthétique.

Enfin, pour prendre en compte cette subjectivité, un processus d'optimisation est mis en place afin de déterminer « *on-line* » quelle est la qualité esthétique qui est la plus intéressante à attribuer pour satisfaire le client et maximiser les gains (besoins clients exprimés au programme directeur de production (PDP) de l'entreprise). Pour cela, l'algorithme prend en compte les informations issues du PDP (besoins nets en particulier), des différents coûts

imputables à la production et au stockage des produits ainsi que de leur prix de vente (figure 63).

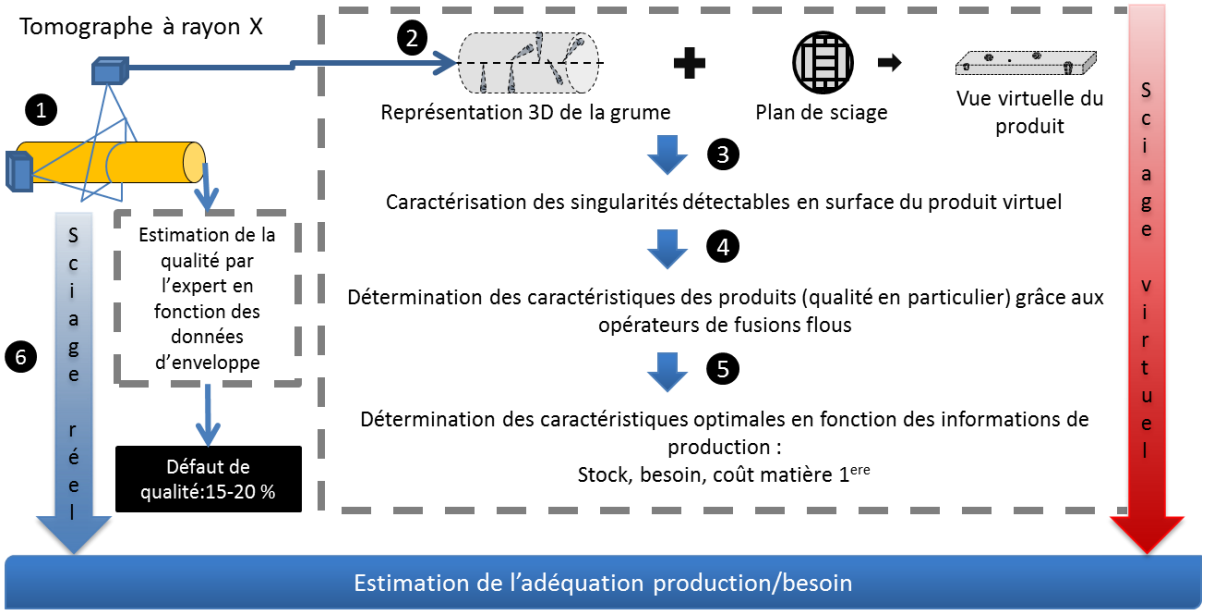



*Figure 62 : Processus de détermination de la qualité virtuelle par estimation des produits avant usinage*

## 3.3 Calcul de l'impact des singularités sur le Produit Virtuel

Ce paragraphe décrit successivement les étapes du processus proposé. La première étape dans l'évaluation de la qualité esthétique est de mesurer l'impact des singularités sur la qualité du Produit Virtuel. Pour cela, il faut représenter les caractéristiques choisies par des critères. Puis, ces critères doivent être fusionnés entre eux afin d'obtenir une valeur représentative de l'impact. Pour cela, l'intégrale de Choquet est utilisée ainsi qu'un algorithme d'apprentissage permettant d'en déterminer les capacités et permettant de prendre en compte la vision de l'expert. Enfin les résultats sont présentés et interprétés.

### 3.3.1 Expression des critères d'évaluation

Chaque singularité impacte plus ou moins la qualité du produit en fonction de ses caractéristiques.

Lorsque, sur une pièce de bois, une singularité est fortement visible (typiquement : grosse, noire et en plein milieu de la face visible), le produit est de fait fortement dévalorisé : on peut donc dire que l'impact de la singularité est important. A l'inverse, si la singularité est petite, fondue dans le bois, alors la qualité esthétique est très peu dévalorisée et la singularité a donc peu d'impact. Les quatre caractéristiques citées précédemment (taille, position sur la

longueur et la largeur, contraste) permettent de traduire ce concept d'impact visuel. Cependant, pour pouvoir les fusionner, il est nécessaire d'utiliser des critères représentatifs de chacune de ces caractéristiques et que, de plus, ils soient exprimés sur la même échelle avec les mêmes tendances. Nous proposons donc de normaliser les critères entre 0 et 1, représentant respectivement que le critère a beaucoup d'impact ou pas du tout.

*Tableau 7: Variables utilisées pour l'évaluation de l'impact des singularités*

| | |
|---|---|
| $L_p$ | Longueur du produit |
| $l_p$ | Largeur du produit |
| $I_p$ | Niveau de gris du bois sain |
| $T_s$ | Taille de la singularité |
| $X_s$ | Position de la singularité sur la longueur |
| $Y_s$ | Position de la singularité sur la largeur |
| $I_s$ | Niveau de gris de la singularité |
| $u_i$ | Critère pour le caractéristique i |
| $C_j$ | Valeur de l'impact de la singularité j |
| $\mu$ | Capacités utilisées dans l'intégrale de Choquet |

1- Le **rapport entre taille de la singularité** ($T_s$) et **largeur de la face observée** (*l*), défini par l'équation (7), permet d'évaluer l'importance de la singularité sur la pièce. Plus une singularité est petite vis-à-vis de la pièce, plus la valeur du critère tend vers 1. Néanmoins, le jugement d'expert stipule qu'une singularité supérieure à 50mm est considérée comme très critique. Ainsi ce critère est calculé par rapport à la largeur du produit (*l*) si (*l*) est inférieure à 50mm et par rapport à une singularité de 50mm si la largeur du produit est supérieure à cette valeur. Enfin si la singularité est supérieure à 50 mm le critère vaut 0.

$$\begin{cases} si\ l \le 50mm, u_t = 1 - \dfrac{T_s}{l} \\ si\ l > 50mm et\ T_s \le 50mm, u_t = 1 - \dfrac{T_s}{50} \\ si\ l > 50mm et\ T_s > 50mm, u_t = 0 \end{cases} \qquad (7)$$

2- La **proximité de la singularité du bord** du produit, défini par l'équation (8), permet de savoir si une singularité est simple ou non à enlever par des opérations de débit comme le dégauchissage ou le rabotage. Plus la singularité est proche d'un bord plus le critère tend vers 1. Afin d'avoir une estimation de cette proximité par rapport à chaque coté du produit, nous calculons la distance entre le milieu de la largeur (*l*) de la pièce et la position du centre de gravité de la singularité projeté sur cet axe ($Y_s$).

$$u_y = \frac{|l/2 - Y_s|}{l/2} \qquad (8)$$

3- La **proximité de la singularité du bout** du produit, défini par l'équation (9), traduit le fait qu'une singularité est facile ou non à purger par des opérations de débit comme le tronçonnage. Plus la singularité est proche d'un bout, plus le critère tend vers 1. Afin d'avoir une estimation de cette proximité par rapport à chaque bout du produit, nous calculerons la distance entre le milieu de la longueur ($L$) de la pièce et la position du centre de gravité de la singularité projeté sur cet axe ($X_s$).

$$u_x = \frac{|L/2 - X_s|}{L/2} \qquad (9)$$

4- Le **contraste** de la singularité par rapport au bois sain, défini par l'équation (10), est également pertinent dans l'expression de la qualité esthétique. Une face aura une meilleure perception esthétique lorsque les singularités sont faiblement contrastées. Donc, plus le contraste est faible, plus la valeur du critère tend vers 1. Pour l'obtenir, nous utilisons l'intensité moyenne des pixels de la singularités ($I_s$) et celle du bois ($I_p$) [Gonzalez & al, 2009].

$$u_c = 1 - \frac{(I_s - I_b)}{I_b} \qquad (10)$$

Ces quatre critères ont donc tous le même comportement et varient entre 0 et 1, de plus ils tendent vers 0 quand ils impactent fortement la qualité et vers 1 dans le cas contraire. Sur la base de ces quatre critères, il faut maintenant évaluer l'impact des singularités.

### 3.3.2 Méthodologie pour l'estimation de l'impact.

Parmi les critères d'évaluation, il apparait que tous n'ont pas la même importance relative. La taille et le contraste ont une importance supérieure à la position car une singularité a, avant tout, un impact visuel. L'estimation de l'impact passe donc par l'utilisation d'un opérateur de décision multicritères permettant de prendre en compte l'importance des différents critères mais aussi l'interaction qu'il peut exister entre eux. Compte tenu des contraintes explicitées précédemment, nous avons choisi d'utiliser l'intégrale de Choquet qui permet de proposer un résultat d'évaluation intégrant tous ces critères. Cette intégrale a été

proposée par Gustave Choquet en 1954 et explicitée dans [Choquet, 1956]. Son utilisation dans les méthodes de décisions multi-critères apparait dans les années 90 pour différentes utilisations et notament pour des problèmes similaires de classification [Grabisch & al, 2008(b)].

Soit $\{X\}:\{x_1,\ldots, x_n\}$ une liste de critères normés, considérons une capacité $\mu : P(X) \rightarrow [0,1]$ pour cette liste,vérifiant :

$$\begin{cases} \mu(\phi) = 0 \\ \mu(X) = 1 \\ \mu(A) < \mu(B), \forall A \subset B \; et \; \forall B \subset X \end{cases} \qquad (11)$$

Les capacités définissent l'ensemble des poids et interactions existant entres les critères. L'intégrale de Choquet est définie comme :

$$C_\mu(u_1,\ldots,u_n) = \sum_{i=1}^{n} (u_{\sigma k} - u_{\sigma k-1}).\mu(A_{\sigma k}) \qquad (12)$$

Où σ est la permutation d'indices telle que (classement croissant):

$$\begin{aligned} &0 = u_{\sigma 0} \le u_{\sigma 1} \le \ldots \le u_{\sigma n-1} \le u_{\sigma n} \le 1 \\ &u_{\sigma 1} = Min(u_i) \; et \; u_{\sigma n} = Max(u_i) \end{aligned} \qquad (13)$$

Et $A_{\sigma k} = \{g_{\sigma k}, \ldots, g_{\sigma n}\}$ sont les caractéristiques non utilisées dans les étapes précédentes (de 1 à k-1).

Dans notre cas $C_\mu(u)$ correspond à la mesure de l'impact des singularités sur le produit lorsque l'intégrale est appliquée aux critères ($\mu_i$). Plus cette valeur tend vers 1 moins la singularité est importante suivant notre standard.

L'utilisation des intégrales de Choquet est relativement facile pour autant que les capacités soient déterminées. Mais, la détermination intuitive des capacités n'étant pas facile [Grabisch & al, 2008(a)], il est préférable d'utiliser un algorithme d'apprentissage. Différentes approches peuvent être utilisées pour identifier ces capacités [Grabisch & al, 2008(a)]:

- L'approche des moindres carrés (*Least Square approach* : LS) est basée sur la connaissance qu'a l'expert de chaque élément du lot d'apprentissage, c'est-à-dire qu'il est capable de leur attribuer une valeur $C_\mu$ cible. L'algorithme cherche les capacités minimisant l'écart entre les valeurs cibles et les valeurs calculées.

$$Min\ F_{LS}(\mu) := \sum_{x \in O} \left[ C_\mu(u(x)) - y(x) \right]^2 \qquad (14)$$

- L'approche par programmation linéaire (*Linear Programming approach* : LP) : Dans cette approche, proposée par Marichal et Roubens [Marichal & Roubens, 2000], l'apprentissage est basé sur la connaissance qu'a l'expert du classement global des éléments composant le lot d'apprentissage et de différentes contraintes sur les critères. Cette approche cherche donc les capacités qui permettent de satisfaire le classement des éléments et les contraintes définies par l'expert par l'équation (15).

$$Max\ F_{LP}(\varepsilon) := \varepsilon$$
$$sujet\ à \begin{cases} \sum_{T \subseteq S} m_v(T \cup i) \geq 0, \forall i, \forall S \\ \sum_{T \subseteq N} m_v(T) = 1 \\ C_v(u(A)) - C_v(u(B)) \geq \delta_C \\ \vdots \end{cases} \qquad (15)$$

Dans [Grabisch & al, 2008(a)], les auteurs expliquent que l'approche des moindres carrés est intéressante quand l'expert est réellement capable d'attribuer aux éléments du lot d'apprentissage des valeurs précises. Ils expliquent aussi que l'approche par programmation linéaire est efficace dans les cas où l'évaluation des éléments est difficile et qu'il est donc plus simple d'établir un pré-ordre entre les éléments du lot d'apprentissage. Dans notre cas, l'expert n'est pas capable de donner une valeur précise de l'impact de chaque singularité mais il est capable d'établir un classement des singularités. Il peut donc nous donner un pré-ordre entre les éléments (enrichis du paramètre $\delta_C$ correspondant à l'écart minimum entre deux impacts garantissant que le classement établi soit respecté). Cette contrainte, que nous noterons E, est transcrite par l'équation (16) :

$$C_\mu(a) > C_\mu(b) > \cdots > C_\mu(k)$$
$$avec\ C_\mu(u(i)) \geq C_\mu(u(i+1)) + \delta_C \qquad (16)$$

D'autres conditions peuvent être fixées sur l'importance des critères et/ou sur les interactions existant entre eux. La condition sur l'importance relative des critères est fixée à l'aide de l'indice de Shapley $\phi$ dont la formule est décrite en annexe D, qui indique la participation globale de chaque critère dans l'intégrale de Choquet. L'expert exprime la

distance maximale $\delta_\phi$ qu'il peut y avoir entre un couple d'indices de Shapley. Cette condition, notée S, s'exprime pour un couple de critères A et B par l'équation (17):

$$-\delta_\phi \leq \phi_v(\mu_A) - \phi_v(\mu_B) \leq \delta_\phi \qquad (17)$$

L'autre condition est relative aux interactions existant entre les critères. Il est facile pour un expert de donner une tendance de l'interaction entre deux critères. Ça l'est moins lorsqu'il s'agit de plus de deux critères. Afin d'exprimer cette condition sur les interactions, les indices de Murofushi (dont la formule est décrite en annexe D) sont utilisés. Ainsi cette condition, notée I, peut-être pour, un couple de critères {A, B}:

- Négative (redondance) : $I_v(\{A,B\}) < 0 - \delta_I$
- Positive (synergie) : $I_v(\{A,B\}) > 0 - \delta_I$
- Nulle (pas d'interaction) : $I_v(\{A,B\}) = 0 \pm \delta_I$

$\delta_I$ étant l'écart minimum, en valeur absolue, pour considérer que l'interaction est significative.

Dans le paragraphe suivant, la mise en œuvre de cette étape de la méthodologie est présentée ainsi que les interprétations qu'il est possible d'en faire.

### 3.3.3 Mise en œuvre de la méthodologie et interprétations des résultats.

En utilisant le logiciel R et le package Kappalab R, nous avons mis en œuvre la méthode d'apprentissage LP afin de déterminer les capacités les plus pertinentes et de voir leur influence sur les valeurs de l'intégrale de Choquet. Le lot d'apprentissage utilisé, décrit dans le tableau 8, est composé de singularités communément trouvées sur les produits bois.

*Tableau 8: Lot d'apprentissage*

| Singularité | T | X | Y | C |
|---|---|---|---|---|
| a | 0.75 | 0.72 | 0.2 | 0.93 |
| b | 0.41 | 0.09 | 0 | 0.98 |
| c | 0.39 | 0.27 | 0.24 | 0.9 |
| d | 0.69 | 0.36 | 0.8 | 0.37 |
| e | 0.42 | 0.75 | 0.32 | 0.3 |
| f | 0.75 | 0.81 | 0.52 | 0.09 |

L'expert a exprimé les contraintes suivantes, relatives:

- aux éléments (condition E) : les singularités sont classées dans le même ordre que dans le tableau de la meilleure à la pire avec $\delta_C$ =0.05

- à l'importance de chaque élément (condition S) : les critères [$\mu_t$, $\mu_c$] ont la même importance, les critères [$\mu_x$, $\mu_y$] ont aussi la même importance et les critères [$\mu_t$, $\mu_c$] sont plus importants que les critères [$\mu_x$, $\mu_y$] (avec $\delta_\phi$=0.1). On a donc $\phi_v(\mu_t)=\phi_v(\mu_c)>\phi_v(\mu_x)=\phi_v(\mu_y)$.
- à l'interaction entre critères (condition I) : Les critères [$\mu_t$, $\mu_c$] sont en synergie, les critères [$\mu_x$, $\mu_y$] aussi (avec $\delta_I$=0.05). Nous avons donc $I_v(\{\mu_c,\mu_t\})>0-\delta_I$ et $I_v(\{\mu_x,\mu_y\})>0-\delta_I$

Les capacités, les valeurs de l'intégrale de Choquet, les indices de Shapley et les indices de Murofushi sont respectivement décrits dans le tableau 9, tableau 10, tableau 11, tableau 12. Le symbole Ø dans la colonne des contraintes indique le cas pour lequel le système n'a subi aucun apprentissage. On peut facilement constater que chacune des conditions imposées est bien respectée.

*Tableau 9 : Valeurs des capacités calculées par l'algorithme d'apprentissage (présentées sous la forme de Möbius en annexe E)*

| μ{} | 0 | S | X | Y | C | S,X | S,Y | S,C | X,Y | X,C | Y,C | S,X,Y | S,X,C | S,Y,C | X,Y,C | S,X,Y,C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ø | 0 | .25 | .25 | .25 | .25 | .5 | .5 | .5 | .5 | .5 | .5 | .75 | .75 | .75 | .75 | 1 |
| E | 0 | .251 | 0 | 0 | .711 | .537 | .251 | 1 | .537 | 1 | 1 | .537 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E+S | 0 | .624 | .086 | 0 | .711 | .624 | .624 | 1 | .624 | .711 | .711 | .624 | 1 | 1 | .711 | 1 |
| E+S+I | 0 | .455 | .455 | .144 | .683 | .455 | .647 | 1 | .683 | .683 | .683 | .778 | 1 | 1 | .683 | 1 |

*Tableau 10: Résultats des intégrales de Choquet pour les différentes conditions*

| Singularité | a | b | c | d | e | f |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ø | 0.65 | 0.37 | 0.45 | 0.55 | 0.46 | 0.49 |
| E | 0.878 | 0.815 | 0.753 | 0.450 | 0.387 | 0.325 |
| E+S | 0.878 | 0.815 | 0.753 | 0.569 | 0.422 | 0.359 |
| E+S+I | 0.873 | 0.799 | 0.738 | 0.593 | 0.532 | 0.471 |

*Tableau 11: Indices de Shapley des critères sous chaque condition*

| Indices de Shapley | T | X | Y | C |
|---|---|---|---|---|
| Ø | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| E | 0.152 | 0.117 | 0.069 | 0.662 |
| E+S | 0.397 | 0.074 | 0.045 | 0.484 |
| E+S+I | 0.322 | 0.169 | 0.098 | 0.411 |

*Tableau 12: Indices de Murofushi obtenus sous chaque condition*

| Contrainte : E | | | |
|---|---|---|---|
| critère | X | Y | C |
| T | 0.006 | -0.138 | -0.119 |
| X | NA | 0.131 | -0.137 |
| Y | | NA | 0.007 |

| Contraintes : E+S | | | |
|---|---|---|---|
| critère | X | Y | C |
| T | -0.133 | -0.090 | 0.113 |
| X | NA | 0.179 | -0.133 |
| Y | | NA | -0.090 |

| Contraintes : E+S+I | | | |
|---|---|---|---|
| critère | X | Y | C |
| T | -0.219 | 0.032 | 0.050 |
| X | NA | 0.050 | -0.285 |
| Y | | NA | -0.226 |

L'introduction de la première contrainte (E) accorde beaucoup d'importance au contraste ($\phi_v(\mu_c)=0.662$) et peu aux autres critères. On constate aussi que l'interaction entre les critères [T, C] est négative. L'introduction de la contrainte (S) permet d'obtenir une interaction positive entre [T, C] en accord avec le décideur mais pas entre [X, Y]. L'introduction de la dernière contrainte (I) permet bien d'avoir l'ensemble des *desiderata* de l'expert. Il procure ainsi une importance un peu plus grande aux critères X et Y qui sont largement minoritaires dans les deux autres cas.

Afin d'avoir une meilleure connaissance du comportement des intégrales et pouvoir déterminer quelles valeurs de capacités choisir, nous proposons d'observer leurs comportement lorsque les critères X et Y, qui sont les critères minoritaires, varient. Nous avons donc choisi une singularité pour laquelle les valeurs de T et C sont fixes ($u_t=0.75$, $u_c=0.09$ : singularité noire mais de petite taille) puis nous avons fait varier la position de la singularité tout en relevant les valeurs de l'impact. Les résultats sont présentés dans les courbes de la figure 63, pour chaque variation de X et Y.

La figure 63(a) montre la courbe représentative de la valeur de l'intégrale de Choquet pour les capacités obtenues avec la contrainte E. On peut voir que le critère Y n'a d'impact que lorsqu'il est supérieur à la valeur $u_t$ (qui est la plus grande des valeurs des critères $u_t$ et $u_c$). Comme le montre la valeur de l'indice de Shapley ($\delta_\phi(u_Y)=0.069$), ce critère présente peu d'importance dans l'évaluation globale de l'impact. La même expérience est réalisée avec une singularité « fondue » dans le bois mais de taille importante ($u_t=0.41$, $u_c=0.98$, les résultats sont en annexe F) et montre que, dans ces cas, les critères de position ont un faible impact (variation de 0.8 à 0.98) mais ont le même impact dans la décision. Cette tendance permet de traduire une vision de l'expert que l'on peut exprimer comme : « *Lorsqu'une singularité est marquée, la position de cette dernière n'a d'importance que sur la longueur sauf si elle est vraiment proche du bord. Lorsque cette dernière est peu visible, la position présente plus d'importance dans l'évaluation de l'impact*».

La figure 63(b) représente les valeurs de l'intégrale de Choquet pour des capacités obtenues avec les contraintes E et S. Ainsi, affecter très peu d'importance aux critères [X, Y]

implique que leur influence sur la décision est très faible à partir du moment où ils sont en dessous de la valeur la plus forte. Ils peuvent cependant jouer un rôle important s'ils sont au-dessus de celle-ci. Les expériences menées avec la singularité fondue (voir l'annexe F) montrent le même comportement avec des variations bien plus faible (entre 0.82 et 0.83) de la valeur de l'impact. Une autre vision d'expert peut être retranscrite : « *la position d'une singularité, quelle que soit sa taille et son contraste, a une influence sur l'impact, si est seulement si, elle est située à proximité du bord* ***et*** *du bout du produit* ».

La figure 63(c) représente les valeurs de l'intégrale pour les capacités obtenues avec les contraintes E, S et I. On peut remarquer que les critères de position X et Y ont un impact qui est plus significatif que dans les cas précédents car quelle que soit leur valeur, ils influencent celle de l'intégrale de Choquet lorsque la singularité est marquée. Si cette dernière est confondue, seul le critère Y a de l'importance lorsque la singularité est proche d'un bord (voir la courbe en annexe F). Il est aussi bon de remarquer que, malgré une faible variation de l'indice de Shapley, les critères passent de « non influents » à « influents ». Là encore une vision d'expert différente sur l'impact des singularités peut être retranscrite : « *Plus une singularité marquée sera proche du bord, moins son impact sera important. Pour une singularité non visible, la position n'a que très peu d'influence*».

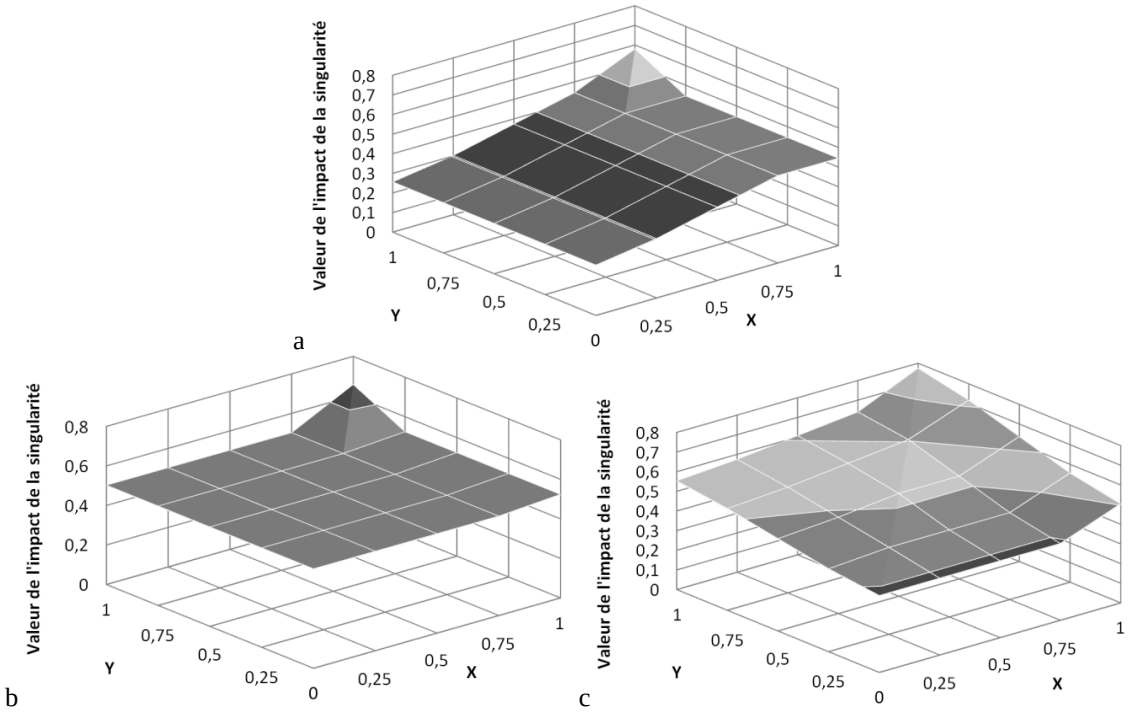



*Figure 63: Influence des critères X et Y sur les valeurs de l'intégrale de Choquet pour des valeurs de $u_t$=0.75 et $u_c$=0.09, avec les capacités obtenues sous la contrainte E (a), les contraintes E et S (b) et les contraintes E, S et I (c)*

Comme on vient de le voir, l'intégrale de Choquet permet donc de retranscrire différentes visions d'expert, relatives à la détermination de l'impact des singularités. Suivant l'importance donnée à chacun des critères, il est possible d'en moduler l'influence de façon plus ou moins importante. Dans la suite du document nous calculons les capacités avec les conditions E+S+I pour respecter le comportement de notre expert.

## 3.4 Mesure de la qualité virtuelle des produits.

Une fois que l'impact des singularités sur l'esthétique du bois est calculé, il faut estimer la qualité virtuelle du produit en fusionnant les impacts entre eux. Le nombre de singularités sur la face observée doit aussi être pris en compte car il a une influence dans l'estimation de la qualité. Nous fusionnons donc ce critère, que nous avons décrit comme « global ». De même que pour le calcul de l'impact des singularités, les experts évaluant la qualité ont des appréciations différentes, impliquant que plusieurs opérateurs de fusion soient testés.

### 3.4.1 Critère évaluant le nombre de nœuds

Le nombre de singularités est un paramètre important car plus un produit a de singularités, plus sa qualité d'esthétique diminue.

Pour évaluer le nombre de singularités ($NB_s$), nous utilisons le critère $u_{nb}$ décrit dans l'équation (18). Dans la pratique, on peut traduire la vision de l'expert par deux règles : d'une part, plus le nombre de singularités est grand, plus le produit est esthétiquement bas et d'autre part, l'esthétique diminue rapidement en fonction du nombre de singularités pour arriver à une valeur seuil au-delà de laquelle le critère tend vers 0 asymptotiquement. Pour traduire ce comportement, nous avons utilisé une fonction exponentielle décroissante dont le paramètre k permet de régler la valeur seuil du nombre de singularités. Nous fixons empiriquement le seuil à 20 singularités, ce qui correspond à une valeur k=1.1. L'explication de l'obtention de la valeur k est donnée en annexe G.

$$u_{nb} = k^{-NB_s} \; avec \; k = 1.1 \qquad (18)$$

### 3.4.2 Opérateurs de fusion retenus

Les impacts des singularités et leur nombre doivent être combinés afin d'obtenir une valeur représentative de l'esthétique. Le nombre de critères à fusionner dépend du nombre de singularités. Il nous faut donc un opérateur qui puisse calculer la valeur indépendanment du

nombre de critères. De même, l'opération de fusion doit être capable de prendre en compte le caractère imprécis, incertain, voire incomplet des critères. Nous choisissons par conséquent d'utiliser un ensemble d'opérateurs appartenant à la Théorie des Ensembles Flous [Zadeh, 1965]. Ces différents opérateurs (notés F) peuvent être classés en trois catégories [Bloch, 1996]:

- Les opérateurs sévères (ou pessimistes). L'opérateur est considéré ainsi s'il satisfait $F(a,b) \le \min(a,b)$.
- Les opérateurs indulgents (ou optimistes). L'opérateur est considéré ainsi s'il satisfait $F(a,b) \ge \max(a,b)$ $\mathrm{F(a,b)} \le \min(\mathrm{a,b})$.
- Les opérateurs prudents. L'opérateur est considéré ainsi s'il satisfait les conditions exprimé dans l'équation (19).

$$\begin{cases} a \le F(a,b) \le b \; si \; a \le b \\ b \le F(a,b) \le a \; si \; b \le a \end{cases} \qquad (19)$$

L'évaluation de l'esthétique du bois est dégressive ( la valeur idéale est 1 et les singularités ne font que détériorer l'esthétique). Ainsi, nous ne retenons pas d'opérateur optimiste. Les deux autres types d'opérateurs font ressortir des comportements différents sur la décision de l'expert quant à l'esthétique d'un produit. Nous avons donc étudié le comportement de différents opérateurs de ces catégories pour comprendre la vision qu'ils permettent de retranscrire.

Le premier opérateur choisi est l'opérateur proposé par Perez-Oramas dans [Perez-Oramas, 2000]. Cet opérateur, décrit dans l'équation (20), est un opérateur particulier qui se comporte comme un opérateur de compromis lorsque que la plus petite valeur à fusionner est inférieure à 0.5 et comme un opérateur optimiste sinon. Cette caratéristique peut être intéressante pour isoler des planches dont les singularités ont peu d'impact et sont en nombre limité (valeur de l'esthétique haute) et évaluer les produits dont la qualité est basse.

$$F(a,b) = \min(1, \frac{\min(a,b)}{1-\min(a,b)}) \qquad (20)$$

Le deuxieme opérateur est l'opérateur de Hamacher. Cet opérateur, décrit dans l'équation (21), est un opérateur pessimiste, c'est-à-dire que l'évalation est en deçà de la pire des singularités. Un tel opérateur nous permet de trier les produits pour faire ressortir ceux de très bonne facture pour l'industrie de l'ébénisterie et de la menuiserie.

$$F(a,b) = \frac{ab}{a+b-ab} \qquad (21)$$

Un autre opérateur que nous désirons éprouver est l'opérateur *Ordered Weight Average* (OWA) adapté à notre situation. Cet opérateur, décrit dans l'équation (22), est un opérateur de moyenne et donc de compromis. Lors de l'évaluation de l'esthétique d'un produit, il s'avère que les experts sont, *a priori*, plus sensibles aux singularités flagrantes qui ont donc un impact fort. Il est communément admis que ce qui est évident aux yeux masque les choses qui se voient le moins. Or, avec cet opérateur, nous pourrions évaluer l'esthétisme en nous basant sur un nombre restreint de singularités, en particulier sur celles impactant le plus le produit. L'opérateur OWA permet d'attribuer des poids à chaque valeur à fusionner. Nous avons choisi de fixer un premier seuil à 20% des pires singularités puis à 80%. Ce seuil se traduit dans l'équation par le facteur α.

$$\begin{aligned} &F(u_1,\ldots,u_n) = \sum_{i=1}^{n} w_i b_i \\ &avec\, b_1 \geq b_2 \geq \cdots \geq b_{n-1} \geq b_n \\ &et \begin{cases} w_i = 0, \forall i \in [\![1, \lfloor (1-\alpha)n \rfloor ]\!] \\ w_i = \dfrac{1}{\alpha * NB_S}, \forall i \in [\![ \lceil (1-\alpha)n \rceil, n ]\!] \end{cases} \end{aligned} \qquad (22)$$

Ces trois opérateurs sont comparés à l'opérateur moyenne arithmétique qui est un opérateur couramment utilisé lorsqu'il n'y a aucune connaissance *a priori* sur le processus de décision.

### 3.4.3 Evaluation du comportement des opérateurs de fusion sur un cas réel.

Les quatre opérateurs sont évalués afin d'étudier le comportement qu'ils permettent de retranscrire sur un lot de pièces caratéristiques décrit dans le tableau 13. La première colonne renseigne le nom du produit étudié, la deuxième le critère nombre de singularités $u_{n,}$ la troisième les valeurs de l'impact de chaque singularité (plus il tend vers 0 plus l'impact est important) et la dernière colonne donne le classement que l'expert a attribué au produit fini en scierie. Il est, pour l'expert, plus simple de nous donner la classe de qualité esthétique utilisée dans son vocabulaire qu'une mesure de l'esthétique.

*Tableau 13: Lot de pièces utilisées pour la comparaison des opérateurs*

| Produit | $u_n$ | $C_u$ | Classe esthétique |
|---|---|---|---|
| a | 0.91 | 0.888 | 0 |
| b | 0.91 | 0.439 | 1 |
| c | 0.42 | 0.888, 0.866, 0.826, 0.776, 0.748, 0.746, 0.674, 0.601, 0.520 | 1 |
| d | 0.75 | 0.814, 0.740, 0.259 | 1 |
| e | 0.75 | 0.888, 0.372, 0.332 | 2 |
| f | 0.51 | 0.814, 0.740, 0.694, 0.601, 0.565, 0.432, 0.312 | 2 |
| g | 0.51 | 0.725, 0.667, 0.587, 0.479, 0.423, 0.372, 0.332 | 3 |

- Pièce a : elle ne présente qu'une seule singularité avec peu d'impact sur le produit. L'expert n'a aucune hésitation et la classe dans la meilleure qualité.
- Pièce b : sa singularité a un impact fort et l'empêche d'être classée dans les produits de qualité 0 ; mais au vu du nombre de singularités (1), cette pièce se trouve être dans les meilleures pièces de sa classe de qualité. Classement dans les produits de menuiserie (classe 1).
- Pièce c : Ce produit possède beaucoup de singularités avec peu d'impact. Difficile de déterminer sa classe esthétique car elle dépendra de l'utilisation. L'expert la classe comme bois d'ameublement, menuiserie, car malgré le nombre important de singularités, celles-ci ont toutes un impact faible et donc plutôt « fondues » et peu visibles.
- Pièces d et e : Ces deux produits ont le même nombre de singularités. La différence provient du fait que l'une a une proportion plus importante de singularités avec un faible impact par rapport à l'autre. Les deux classes attribuées sont différentes, l'une est considérée comme du bois de menuiserie de basse qualité alors que l'autre est considérée comme du bois de charpente de bonne qualité.
- Pièces f et d : elles présentent aussi le même nombre de singularités avec un ratio de singularités de faible impact plus important pour la première. Simplement, le nombre de singularités est plus élevé et de ce fait, les classes attribuées sont plus basses.

Pour évaluer les méthodes, nous avons analysé deux caractéristiques : d'une part, le rang des produits établi par la fusion, et d'autre part, les groupements de produits obtenus. L'étude de ces deux caractéristiques est importante car les opérateurs de fusion peuvent établir un ordre entre les produits respectant le choix de l'expert mais ne pas faire ressortir les mêmes groupes de qualité que l'expert. Le tableau 14 présente les valeurs obtenues ainsi que le classement qu'il est possible d'attribuer à ces pièces. La figure 64 donne une représentation

du classement des pièces pour chaque opérateur afin de faire ressortir les groupes de produits générés.

*Tableau 14: Résultats et classement des différentes pièces du lot d'essais (CE : classement de l'expert ; QE : qualité esthétique attribuée par l'expert ; dans les parenthèses : mesure de l'esthétique des produits)*

| rang | CE | QE | Hamacher | PO | OWA (α=0.2) | OWA (α=0.8) | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | a | 0 | a (0,82) | a (1) | a (0.89) | a (.90) | a (0.90) |
| 2 | b | 1 | b (0,42) | b (0.43) | c (0.47) | b (.67) | c (0.71) |
| 3 | c | | d (0,05) | c (0.43) | b (0.44) | c (0. 66) | b (0.67) |
| 4 | d | | e (0,04) | e (0.31) | g (0.37) | d (0.64) | d (0.64) |
| 5 | e | 2 | c (0,00) | g (0.31) | f (0.35) | e (0.59) | e (0.59) |
| 6 | f | | f (0,00) | e (0.33) | f (0.55) | f (0.29) | f (0.58) |
| 7 | g | 3 | g (0,00) | d (0.26) | g (0.48) | d (0.23) | g (0.51) |

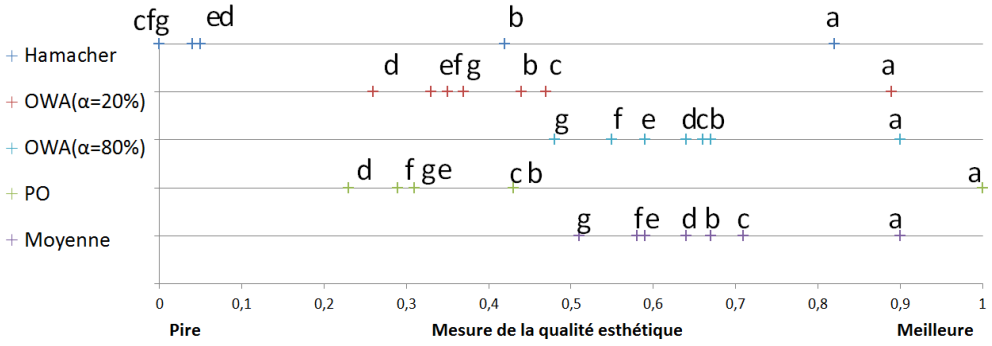



*Figure 64 : Représentation du classement pour les différents opérateurs*

Il est important de remarquer que chaque opérateur donne un classement différent, ce qui nous permet d'envisager reproduire différentes façons d'évaluer la qualité des produits et donc de s'adapter au raisonnement de l'expert.

**L'opérateur de Hamacher** est un opérateur pessimiste. Ainsi, les valeurs attribuées aux produits tendent très vite vers 0. Cet opérateur offre donc la possibilité de faire émerger des produits dont les caractéristiques sont très satisfaisantes pour ce qui est du classement en qualité esthétique 0. Le nombre de singularités est un élément important car cet opérateur déclasse très rapidement les produits qui possèdent beaucoup de singularités (à 2 singularités, même de très faibles impacts, le résultat est inférieur ou égal à 0.5). Avec cet opérateur, le classement et la distance inter-produit ont complètement changé par rapport au choix de l'expert. Les produits (a,b) respectent l'ordre établi par l'expertise. Mais dans le bas du classement, deux groupes ressortent : (e,d) et (c,f,g). Dans ces deux groupes, on peut voir que, L'ordre n'est pas conservé du fait de la sévérité avec laquelle est prise en compte la moindre

singularité tendant à être « mauvaise ». En conclusion, un tel opérateur est utile pour trier les pièces pour l'industrie du meuble et de l'ébénisterie dans lesquelles les singularités sont proscrites.

**L'opérateur de Pérez-Oramas** présente une caractéristique intéressante car il est de compromis lorsque le minimum est en dessous de 0.5 et optimiste sinon. Un tel comportement, qui est quasiment le comportement inverse de l'opérateur de Hamacher, permet de faire émerger les produits typiques de qualités esthétiques basses. Avec cet opérateur, tous les produits présentant moins de sept singularités d'impact supérieur à 0.5 se voient attribuer une valeur de 1. Si le nombre de singularités est supérieur à sept, la valeur maximum qu'une pièce se voit attribuer (pour des singularités d'impact supérieur à 0.5) est de 0.87. Pour tous ces produits et ceux dont les singularités ont beaucoup d'impact (produits de basse qualité), cet opérateur permet d'obtenir une mesure plus cohérente avec l'expertise. Il semble donc plus efficient pour classer ce type de produits. L'étude de la répartition (classement et distances entre les valeurs attribuées aux pièces), met en avant plusieurs groupes de produits, avec aux extrêmes a et d et en position centrale (b,c) et (e,f,g). Mis à part le produit d qui n'est pas classé dans la même zone que (b,c), les groupements de produits restent les mêmes. On peut ainsi penser utiliser cet opérateur pour obtenir les groupes de produits présentant des ressemblances. Cet opérateur est donc utile au tri de produits dont la qualité esthétique est basse comme ceux utilisés dans l'industrie de la palette ou de l'emballage.

Avec **l'opérateur OWA**, nous avons souhaité évaluer les produits sur un certain nombre des « pires » singularités. Ce comportement est simulé en fixant la valeur de α dont nous proposons deux valeurs:

- l'une avec α=0.2 (20% des critères évalués) qui pourrait s'apparenter à une évaluation suivant le principe de Pareto en considérant que 80% du jugement de l'expert ne se fait que sur les 20% des pires singularités.
- l'autre avec α=0.8 (80% des critères évalués) qui signifierait que 20% des meilleures singularités n'ont pas d'impact sur la qualité esthétique au vu des 80% restant qui manifestement sont plus visibles.

Le classement sur 20% des critères (α=0.2) se rapproche du comportement de l'opérateur de Perez-Oramas en formant 4 groupes ((a), (c, b), (e, g, f) et (d)). Ces groupes occupent une part moins importante de l'espace d'évaluation ce qui signifie que l'opérateur

est un peu plus strict vis-à-vis de la décision. Il est cependant évident que nous pouvons arriver aux mêmes constatations que pour l'opérateur précèdent.

Le classement sur 80% des critères (α=0.8) établit un ordre pour lequel les pièces forment 4 groupes ((a), (b, c, d), (e, f), (g)) sensiblement identique aux choix de l'expert. Ces groupes sont contigus (distances entres les pièces de classes différentes faibles) mais permettent de réaliser un classement proche de celui de l'expert. On peut donc dire que cet opérateur permet d'avoir un comportement similaire à notre expert.

Enfin l'opérateur moyenne, bien que donnant un ordre différent de celui de l'expert respecte les groupes établis. Il est donc également possible d'utiliser cet opérateur dans le cas d'un classement de produits réalisés dans des entreprises de charpente pour lesquels la décision de l'expert se rapproche d'une décision de moyenne.

Nous pouvons conclure que le choix de l'opérateur de fusion est à faire en fonction des habitudes et du comportement de l'expert définissant la qualité esthétique en scierie. Dans notre cas l'opérateur OWA (α=0.8) est le plus en adéquation avec notre expert. Dans le cadre de cette thèse, nous choisissons donc l'opérateur OWA avec α=0.8.

### 3.4.4 Transposition de la qualité esthétique dans le vocabulaire de l'expert

La mesure effectuée précédemment est difficilement interprétable par l'expert. Pour la traduire dans son vocabulaire, une solution envisageable est l'utilisation des variables linguistiques floues.

Elles sont définies par trois éléments (V, X, $T_v$) [Bouchon-Meunier & al, 2007]: V représente la variable (dans notre cas, la qualité esthétique), X représente le référentiel (univers de discours) sur lequel la variable est définie (ici, [0,1]), $T_v$ représente l'ensemble des termes de X qui sont utilisés pour caractériser V, définissant des restrictions des valeurs que prend V dans X (pour la qualité esthétique du bois : $T_v$={Qualité 4, Qualité 3, Qualité 2, Qualité 1, Qualité 0}). La figure 65 donne une représentation possible de la variable linguistique utilisée pour décrire la qualité esthétique du bois.

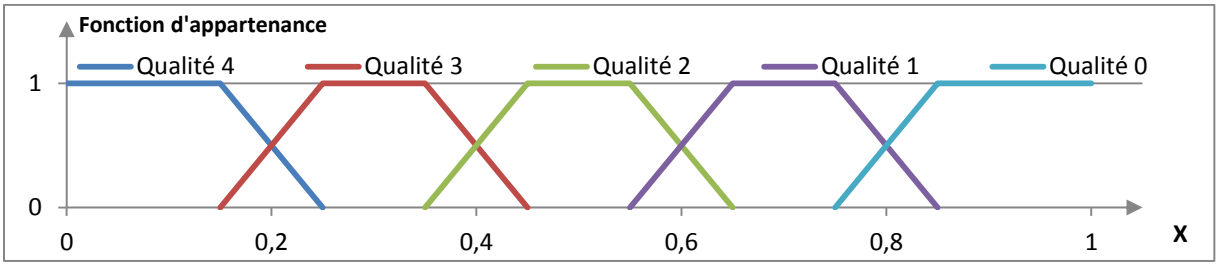



*Figure 65 : Représentation d'une variable linguistique décrivant la qualité esthétique du bois. V : Qualité esthétique, X= [0,1], Tv= {Qualité 4, Qualité 3, Qualité 2, Qualité 1, Qualité 0}*

La fuzzification, qui est une opération de traduction des variables numériques en variables linguistiques, donne le degré d'appartenance d'un produit à chaque terme et donc à chaque classe de qualité esthétique en fonction de sa mesure. Il existe plusieurs façons d'interpréter une variable linguistique [Dubois & Prade, 1996], dans notre cas, elle correspond à la possibilité d'appartenance d'un produit à une ou plusieurs classes de qualité. Cette étape permet de prendre en compte l'aspect subjectif et imprécis de l'estimation qualité, mais aussi de modéliser la gradualité qu'il peut exister entre les classes de qualité.

La définition de la variable linguistique utilisée est faite en tenant compte des contraintes suivantes :

- Les classes de qualités ne sont pas imbriquées, et l'expert ne peut hésiter qu'entre deux qualités pour un produit, puisqu'elles sont ordonnées sur une seule dimension. Cela implique que les sous-ensembles flous se chevauchent deux à deux et pour des raisons pratiques, nous imposons que la somme des fonctions d'appartenance doit être égale à 1. Cela peut être interprété comme le fait qu'un produit ne peut pas appartenir de façon certaine a plus d'une classe.
- Nous imposons que chaque fonction d'appartenance possède un noyau (degré égal à 1), ce qui signifie qu'il existe pour chaque classe de qualité, un intervalle de la mesure qui lui correspond de façon unique.
- Tout produit possède une qualité, ce qui implique qu'à toute mesure de qualité correspond au moins une classe de qualité.
- Par hypothèse, nous n'avons utilisé que des fonctions d'appartenance trapézoïdales ou triangulaires (qui sont des représentations classiques pour ce type de contexte).

Afin de déterminer la distribution de possibilité définissant les classes de qualité, nous nous basons sur les qualités esthétiques attribuées par l'expert dans le tableau 13 en considérant que ces produits sont caractéristiques d'une seule classe. Des lots d'échantillons plus conséquents permettraient d'affiner les valeurs. Ils seraient alors possible d'utiliser les méthodes de fuzzification automatique telles que [Schmitt & al, 2006]. La figure 66 donne la représentation linguistique de la mesure obtenue par l'opérateur OWA (0.8).

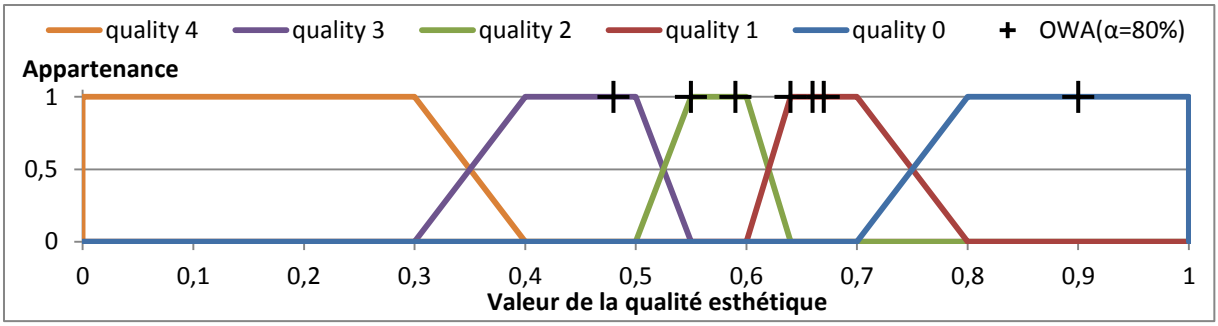



*Figure 66: Fuzzification des mesures de l'esthétique*

Avec l'utilisation des variables linguistiques, il est possible d'obtenir la qualité esthétique des Produits Virtuels selon le vocabulaire des experts et ensuite d'en générer la nomenclature.

## 3.5 Génération de la nomenclature divergente et vérification post processus

Dans cette partie, nous utilisons les informations précédemment extraites pour générer la nomenclature des Produits Virtuels. Dans un premier temps, nous expliquons comment cette nomenclature est générée. Ensuite, nous proposons un processus permettant de déterminer la qualité esthétique finale à attribuer en fonction des informations issues de la production (Prix de vente des produits, cout d'achat de stockage, …). Enfin le dernier paragraphe explique comment la nomenclature est vérifiée après l'usinage afin de valider la production et réagir le plus rapidement aux manques.

### 3.5.1 Génération de la nomenclature divergente des produits.

En gestion de production, une nomenclature de fabrication est à la fois, la liste de l'ensemble des éléments (articles), sous parties et matières premières, entrant dans la réalisation d'un produit parent ; mais aussi pour chacun d'eux, les quantités respectives nécessaires à la réalisation de l'assemblage (nomenclature convergente) ou extraites d'une unité de matière première (nomenclature divergente) ; et enfin, c'est une représentation du processus de production et des points de stock. Elle met en avant (*a minima*) trois éléments caractéristiques : les liens de parenté qui existent entre les éléments, la référence des éléments qui sont nécessaires à la fabrication, le nombre de ces éléments pour chaque lien de parenté. Habituellement, les nomenclatures servent à prévoir les besoins pour chaque élément afin qu'il n'y ait pas de manque pour la réalisation de la production (concepts de « besoins dépendants », « d'explosion de la nomenclature » et de « calcul des besoins nets »).

Le PDP génère des besoins nets (quantités minimales à produire par période) par références produits sur la base des commandes clients, des stocks et de la nomenclature des produits finis. Dans le cas des processus divergents, la nomenclature n'étant pas connue, il est difficile de prévoir la production. Les entreprises produisent ce qu'ils estiment pouvoir extraire de leur matière en masse, puis constatent les écarts entre la production finale/réelle et les besoins clients initiaux. Cette pratique, dite « fabrication sur stock », induit nécessairement un niveau élevé de stocks de produits finis.

Grâce à la méthodologie proposée, nous avons pu extraire les produits et déterminer leurs différentes caractéristiques, en particulier la qualité esthétique. A ce niveau, il est donc possible et nécessaire de déterminer la référence des différents Produits Virtuels afin de pouvoir générer leur nomenclature, les quantités pour chaque référence ainsi que les liens de nomenclature.

Les références doivent permettre d'identifier chaque type de produits[16] de manière unique. Plusieurs types de références et/ ou de codifications existent [Agard, 2004]. Afin de faciliter la compréhension entre les clients et les scieurs, il apparaît intéressant dans notre cas d'utiliser une référence donnant les caractéristiques du produit (appelée référence significative). Ces références peuvent s'avérer inefficaces si la diversité des produits finis est importante [Maurino, 1994]. Cependant, dans le cas des scieries, cette diversité est restreinte au vu de la variété des besoins clients, ces derniers ne s'intéressant qu'à cinq caractéristiques : l'essence, la longueur, la section (deux caractéristiques) et la qualité esthétique ou mécanique. C'est donc à partir de ces informations que nous avons choisi de référencer les types de produits suivant le schéma de la figure 67 (notons que la définition de la codification optimale utilisable dans ce contexte ne fait pas l'objet de ces travaux). A cette référence, il est possible d'ajouter le code obtenu dans l'étape précédente de marquage dans la masse. Une telle référence garantit ainsi de conserver les origines du produit et ses caractéristiques. Finalement, la concaténation des deux codes permet d'avoir une traçabilité quasi-complète et définitivement liée au produit (pour autant que le marquage dans la masse soit un jour industriellement validé!)

[16] On entend par type de produit un groupement d'entités dont les caractéristiques sont identiques.

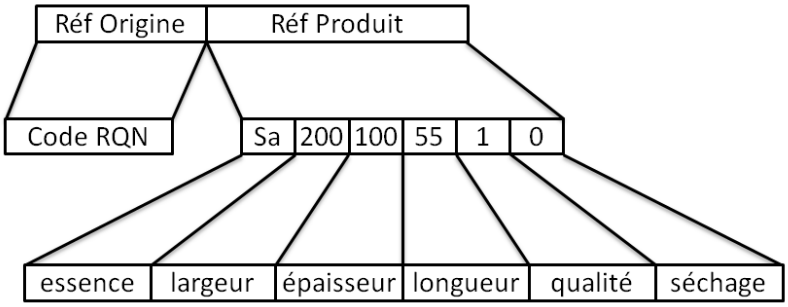



*Figure 67 : Représentation de la référence-produit utilisée dans le cadre de ces travaux*

En appliquant la méthodologie proposée, le produit est caractérisé suivant l'ensemble des éléments nécessaires à l'établissement du code identifiant. En fonction des références-produits prévues et des besoins nets issus du PDP, le scieur peut estimer si le carnet de commande peut être (sera) réalisé et ainsi lancer en production le nombre suffisant de grumes avec le bon schéma de sciage.

Une fois le processus de caractérisation des Produits Virtuels effectué pour une grume, le nombre de produits par référence ainsi que les liens de parenté sont connus et la nomenclature divergente des produits peut être établie pour cette grume. A l'issue de cette étape, la grume est mise en stock avant d'être sciée. Ce processus est réitéré jusqu'à ce que les besoins nets de la période considérée et pour les références voulues, soient satisfaits. Il apparait évident que tous les besoins nets de l'entreprise ne peuvent pas être satisfaits en une seule production, ce processus doit donc être réalisé en continu et « *on-line* ». Une fois les besoins nets satisfaits « dans le monde virtuel », le scieur peut procéder au débit réel des grumes en suivant le schéma de sciage précédemment choisi lors du sciage virtuel[17]. Si les grumes sont sciées suivant le schéma de sciage fixé et dans la position définie précédemment, la production peut ainsi être réalisée au plus juste. L'ensemble du processus est repris dans la figure 68.

[17] Il apparaît donc qu'il est nécessaire de tracer les billons. Plusieurs technologies et solutions existent pour cela (voir chapitre 1).

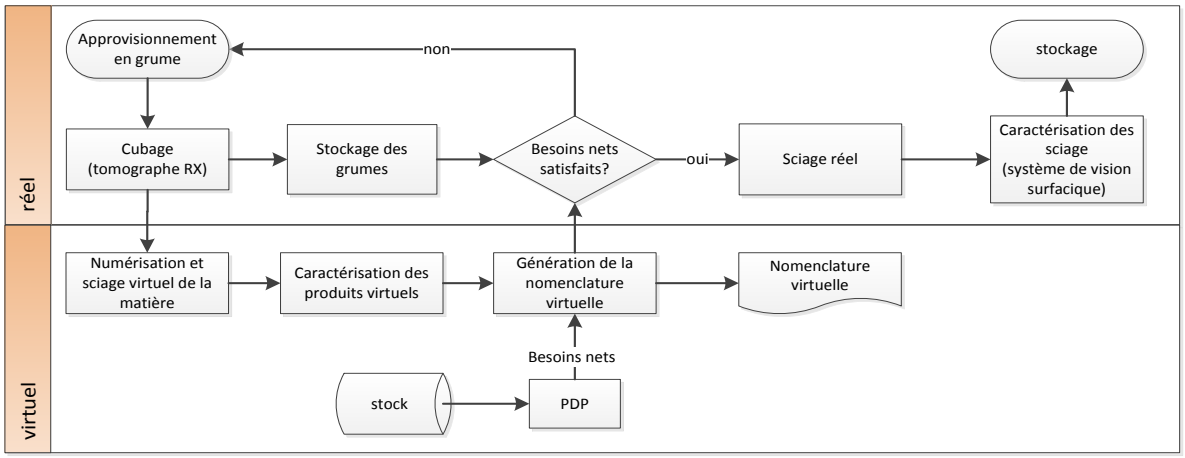



*Figure 68 : Processus de génération de la nomenclature virtuelle*

## 3.5.2 Détermination de la qualité esthétique optimale à attribuer.

Pour la suite du processus de gestion des commandes clients, il est nécessaire de décider de la qualité définitive à attribuer au produit à partir de son degré de possibilité d'appartenance à chaque classe. Nous proposons d'affecter la classe de qualité définitive en combinant le degré de possibilité esthétique avec d'autres informations provenant du PDP pour quelle maximise la rentabilité d'une grume.

- **Objectif de l'optimisation**

L'objectif de cette étape est donc d'affecter « *on-line* » au Produit Virtuel sa qualité esthétique définitive. Cette opération peut être classiquement faite en utilisant l'opérateur maximum. La classe définitive est ainsi celle pour laquelle le degré de possibilité est maximum. La possibilité maximale d'appartenance d'un produit à une classe de qualité peut être considérée comme la qualité la plus « certaine » pour le produit. Or, la qualité esthétique « possible » n'est peut-être pas en concordance avec les besoins nets et peut impliquer que le produit soit stocké. Une autre solution serait d'attribuer au produit la « pire » des qualités sur lesquelles il y a hésitation. Dans ce cas, l'idée est de privilégier la satisfaction client en ne surestimant pas la qualité. Enfin, le produit pourrait être étiqueté avec une qualité supérieure, en prenant un risque de retour client, mais en satisfaisant les besoins nets pour la période considérée.

Il peut donc être intéressant d'étudier s'il est plus rentable de vendre le produit dans une qualité moindre (et donc avec un prix de vente plus bas) et en impliquant des coûts de stockage plus faibles, ou de lui attribuer la meilleure des classes de qualité sur lesquelles il y a

une incertitude en prenant le risque que le client ne soit pas satisfait, mais en diminuant le temps de stockage et en augmentant le prix de vente.

- **Définition des contraintes, variables et fonction objectif de coût**

Il est donc intéressant de proposer au scieur, une qualité finale du produit qui permette de maximiser les profits de l'entreprise sur une grume tout en respectant au mieux les besoins client. Notre volonté étant uniquement de montrer le principe de cette étape, nous avons choisi d'utiliser un programme linéaire simple permettant de maximiser une fonction coût intégrant les différentes informations relatives à la production (stock, prix de vente, prix d'achat de la grume, …). Nous décrivons, ci-après, les variables, les contraintes et la fonction-coût permettant de déterminer la qualité optimale à attribuer aux Produits Virtuels d'une grume.

Les variables de choix sont l'ensemble des qualités envisageables pour chaque produit. Nous nommons les variables par la matrice $x_{ij}$ avec $i$ l'indice des pièces et $j$ l'indice de la qualité. A chaque itération de l'algorithme, une classe de qualité « possible » est testée. Les autres valeurs étant considérées constantes :

- Le prix de vente est fonction de la qualité du produit. Les produits ne peuvent pas être affectés à une qualité dont le degré de possibilité est nul. Les valeurs de la matrice Cp prennent comme prix de vente ceux des qualités possibles et la « valeur » $-\infty$ si la qualité est différente. L'introduction de la valeur $-\infty$ empêche donc ces qualités d'être sélectionnées.
- A l'inverse, un produit stocké coûte de l'argent à l'entreprise. Ce coût est évalué en fonction de l'espace qu'il occupe et du coût au mètre carré de stockage (impôts, immobilisation financière, assurance …). Les valeurs de la matrice $Cs_{ij}$ prennent donc en compte le coût de stockage relatif aux caractéristiques dimensionnelles du produit pour une journée. La constante $T_i$ permet d'évaluer le temps que cette dernière reste en stock.
- Enfin la demande des produits est fonction de la qualité et de la longueur. Un produit qui n'a pas de demande n'est pas vendu et est stocké pour une durée indéterminée. Afin que le produit ne reste pas indéfiniment dans les stocks, la durée de stockage est limitée dans le temps. Ainsi, si un produit n'a pas de demande, sa durée de stockage est égale à la durée limite de stockage au-delà de laquelle il pourra être utilisé pour autre chose.

Les variables et constantes utilisées dans le modèle sont décrites dans le tableau 15. La fonction-objectif doit prendre en compte d'un côté le coût de stockage que représente chaque alternative possible pour un produit et de l'autre le prix de vente de chaque alternative. A ces deux informations, il faut retrancher le coût de la grume. Le gain direct (GD) peut donc s'exprimer comme la maximisation de la fonction coût présentée dans le tableau 15. Ce coût direct est le gain escompté si le produit est vendu sans modification de sa qualité au cours du temps.

Cette optimisation vise à déterminer quelle est la qualité esthétique à attribuer aux produits parmi les qualités possibles afin d'avoir le maximum de rentabilité de la grume en fonction des données de la production. Elle permet d'exploiter l'incertitude qui existe quant à la mesure de qualité esthétique. Ce calcul étant réalisé en fonction des besoins nets qui changent périodiquement, ces résultats peuvent être amenés à changer pour une même grume car les contraintes et les besoins relatifs à la production auront changé.

*Tableau 15 : Variables, constantes, contraintes et fonction-coût utilisées*

*Variables et constantes*

*Indices*

*i* : *Indice des pièces usinées dans le billon.*
*j* : *Indice des qualités (j∈[1,5]).*

*Variable*

$x_{ij}$ : *Variable de la fonction. Pour chaque produit i, une qualité j est attribuée.*

*Constantes relatives à la vente*

*Qij* : *Vecteur qualités pour le produit i (Qij=1 si la qualité j est envisageable, 0 sinon).*
*Cpij* : *Prix de vente du produit i dans la qualité j.*
$[P_{ij}]$ : *Matrice de besoins des produits i dans la qualité j ($P_{ij}$=1 si un besoin en produit i dans la qualité j existe).*

*Constantes relatives au stock*

$Cs_{ij}$ : *Coût de stock de la pièce i de qualité j par jour en stock.*
$T_i$ : *Temps estimé passé en stock pour la pièce i.*

*Constante relative à la grume*

*Cg* : *Coût d'achat de la grume.*

*Contraintes*

$x_{ij}=[0,1]$ ; $P_{ij}=[0,1]$ ; $Q_{ij}= [0,1]$

$$\forall i, \sum_i x_{ij} = 1$$

*Fonction objectif*

Pour i=1..n, $Max\ (\sum_i \left( (Cp_{ij} * P_{ij} * Q_{ij} - Cs_{ij} * T_{ij}) * x_{ij} \right) - Cg = GD$

Finalement, l'ensemble des caractéristiques sont déterminées afin de répondre au mieux aux besoins des clients. Il est ensuite possible de générer les codes produits ainsi que la nomenclature de débit du billon. A l'issue du calcul, les besoins nets satisfaits sont retirés du PDP et une nouvelle optimisation est lancée sur une nouvelle grume avec les nouveaux paramètres pour la même période s'il reste des clients à satisfaire. Nous présentons en annexe H un cas d'école pour lequel nous avons mis en œuvre cette optimisation. Le tableau 16 est un extrait des résultats complets présenté dans l'annexe H. Pour certains Produits Virtuels on voit que la « pire » des qualités possibles n'est pas optimale (rentabilité de 1209 euros). En effet, il est plus intéressant pour le scieur de les surclasser (produits 4, 7, 5, 19) pour diminuer les couts de stockage (rentabilité de 1752 euros), en prenant néanmoins le risque d'avoir une insatisfaction client en terme de qualité.

*Tableau 16 : Extrait des résultats de la détermination des qualités optimales*

| Produit | Larg/hau | Qualité floue | Qualité optimale |
|---|---|---|---|
| 18 | 0.25/0.25 | 0 | 0 |
| 2 | 0.25/0.25 | 0/1 | 0 |
| 12 | 0.25/0.25 | 1 | 1 |
| 4 | 0.25/0.25 | 1/2 | 1 |
| 7 | 0.25/0.25 | 1/2 | 1 |

Une fois la qualité définitive attribuée aux Produits Virtuels, il est alors possible de générer la nomenclature comme le montre la figure 69.

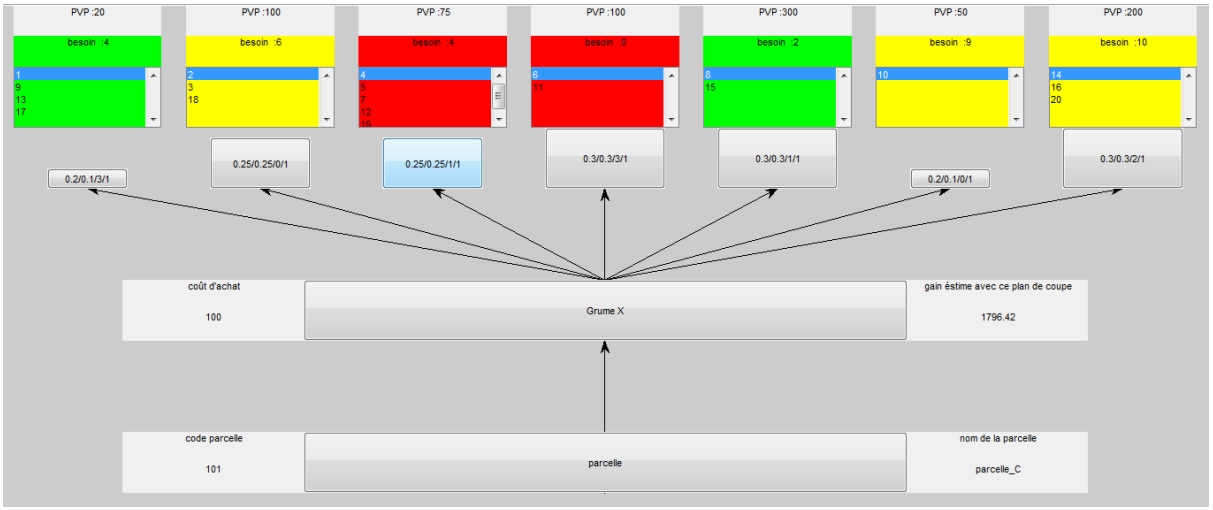



*Figure 69: Nomenclature des produits sciés. Il est possible de retrouver le code de la parcelle (code RQN) ainsi que les références produits (dans les carrés en relief). En vert: les produits dont la demande est satisfaite ; en Jaune: les produits dont la demande n'est pas satisfaite ; en rouge : les produits dont la production est trop importante (création de stock)*

La partie suivante s'attache à décrire la vérification de la production après l'opération de sciage.

### 3.5.3 Vérification de la nomenclature virtuelle après le processus de débit.

La virtualisation permet donc d'établir la nomenclature des produits issus des grumes et donc de connaitre leurs références, ainsi que les quantités par référence. Cependant pour que toutes ces informations soient validées et effectives, il faut que le sciage réel soit réalisé sans écart par rapport à ce qui a été prévu. Il faut donc vérifier, après débit, la production et pallier à ces écarts s'ils existent.

A l'aide de capteurs de vision de type caméra, un nouveau processus de caractérisation des sciages peut être mis en place après le sciage de tête. Largement représentée dans l'industrie du bois pour différentes utilisations d'identification, la caméra (couleur ou non) permet d'obtenir une image de la surface des objets observés. Beaucoup de recherches ont été menées sur ce type de matériel pour détecter les singularités [Bombardier & al, 2008] [Bombardier & Schmitt, 2010] [Cavalin & al, 2006] ou les couleurs du bois [Schmitt, 2007] et ont prouvé leur efficacité. Ce processus de vérification, décrit en figure 70, offre deux avantages.

Il permet tout d'abord de vérifier que la nomenclature virtuelle et la production prévues précédemment ont bien été réalisées. Pour chaque produit réellement scié, le système de vision va évaluer ses caractéristiques, en particulier la qualité esthétique, et générer la référence-produit « réelle ». Il suffit de vérifier que cette dernière est bien prévue dans le monde virtuel par comparaison des références. Pour les références valides, les besoins nets sont supprimés du PDP, pour les références non valides, les besoins nets sont conservés. Si les hypothèses (placement de la grume et de plan de sciage) sont respectées, on peut espérer atteindre un taux d'erreur de 1% (voir inférieur) provenant de défauts indétectables aux Rayons-X.

Il offre aussi la possibilité de compléter l'information correspondant aux produits et en particulier l'information de couleur qui n'est pas disponible pour les Produits Virtuels obtenus grâce aux images RX. Elle présente cependant un intérêt pour certaines industries dont l'esthétique du produit final nécessite une homogénéité. Dans ces industries (parquets, ameublement, ébénisterie, …), des appariements entres des éléments de bois sont souvent réalisés afin de conférer au produit final une homogénéité dans sa couleur et ses dessins. Dans ce cas, l'utilisation de ce processus post usinage est une nécessité.

Enfin, en couplant les deux avantages (vérification et apport d'information), il est possible de réaffecter des produits non désirés à des commandes en fonction de l'information apportée. Cela permet au scieur de gagner en rendement matière et financier. Une fois la production vérifiée, les produits seront stockés en attendant d'être expédié chez le client.

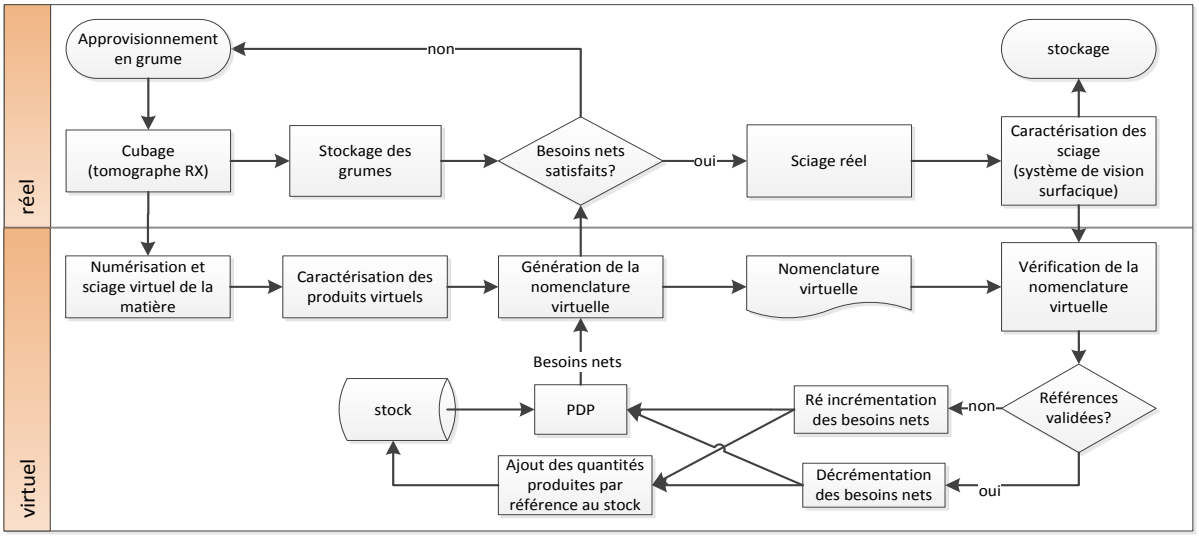



*Figure 70 : Processus de validation de la nomenclature virtuelle*

Un tel processus offre au scieur la possibilité, non plus de produire sur stock comme cela a toujours été fait, mais « quasiment » sur commande. Du fait d'une connaissance plus précise de la production, il peut la prévoir et l'affecter aux commandes clients avant que le sciage de la matière première ne soit réalisé. Il sait donc exactement, en fonction des références-produits prévues et affectées aux commandes, ce qui sera scié, livré et entrera dans ses stocks. Il est donc en mesure d'avoir une estimation de ces stocks et d'en minimiser la quantité. Enfin, il a la possibilité de mieux optimiser la matière en cherchant à produire que ce qui est nécessaire à la satisfaction des besoins nets. Cette méthodologie présente donc un avantage considérable pour les processus divergents et conduit à réduire drastiquement les stocks.

## 3.6 À propos de la validation

Comme nous l'avons expliqué au début du chapitre 3, il nous a été impossible d'obtenir des données industrielles pertinentes en quantité suffisante pour évaluer et valider nos propositions. Nous avons donc choisi d'utiliser des billons de petite taille que nous avons préparés et sciés nous-mêmes. La figure 71 en montre une image.

*Figure 71 : Image d'un rondin ayant servi à la validation*

- **Méthodologie**

Après avoir tomographié les cinq rondins, nous avons choisi un plan de débit permettant de maximiser les produits sciables sur nos machines de découpe. En fonction de ce plan de débit et des informations que nous pouvons observer sur l'extérieur du billon, nous avons estimé quelles seront les singularités visibles sur chacune des faces des produits qui seront sciés. Le but de cette estimation n'est pas d'avoir une représentation précise du produit mais de s'approcher de sa « qualité potentielle» selon l'approche classique de la figure 52, décrite dans le chapitre 1. Il est évident que, dans notre cas, l'utilisation des qualités esthétiques définies par la norme, initialement pour des billons d'au minimum deux mètres et de sections bien plus importantes, ne sont pas applicables.

Ensuite nous avons appliqué le plan de débit (figure 72) choisi afin de réaliser le sciage virtuel des rondins. Sur la base des représentations des Produits Virtuels ainsi obtenues (figure 73), nous avons évalué le nombre de produits dont nous pouvions détecter les singularités et que nous ne pouvions prévoir simplement sur la base d'une observation de l'enveloppe.

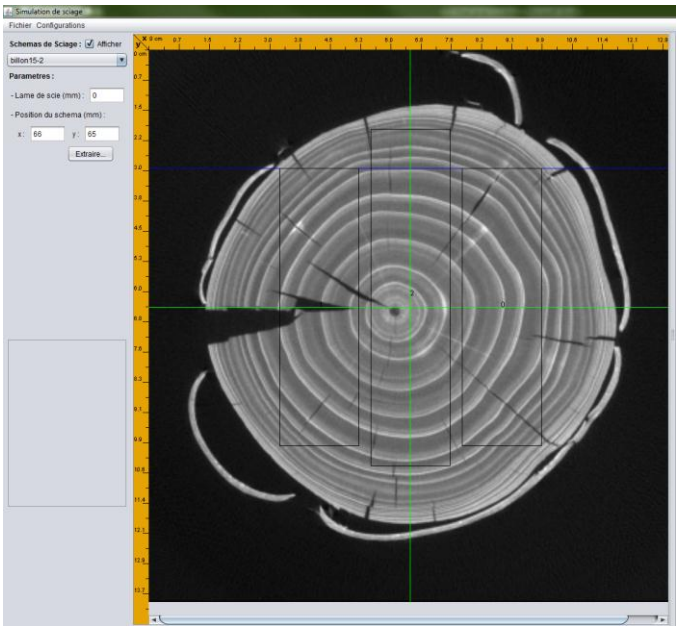



*Figure 72 : Plan de débit appliqué aux billons*

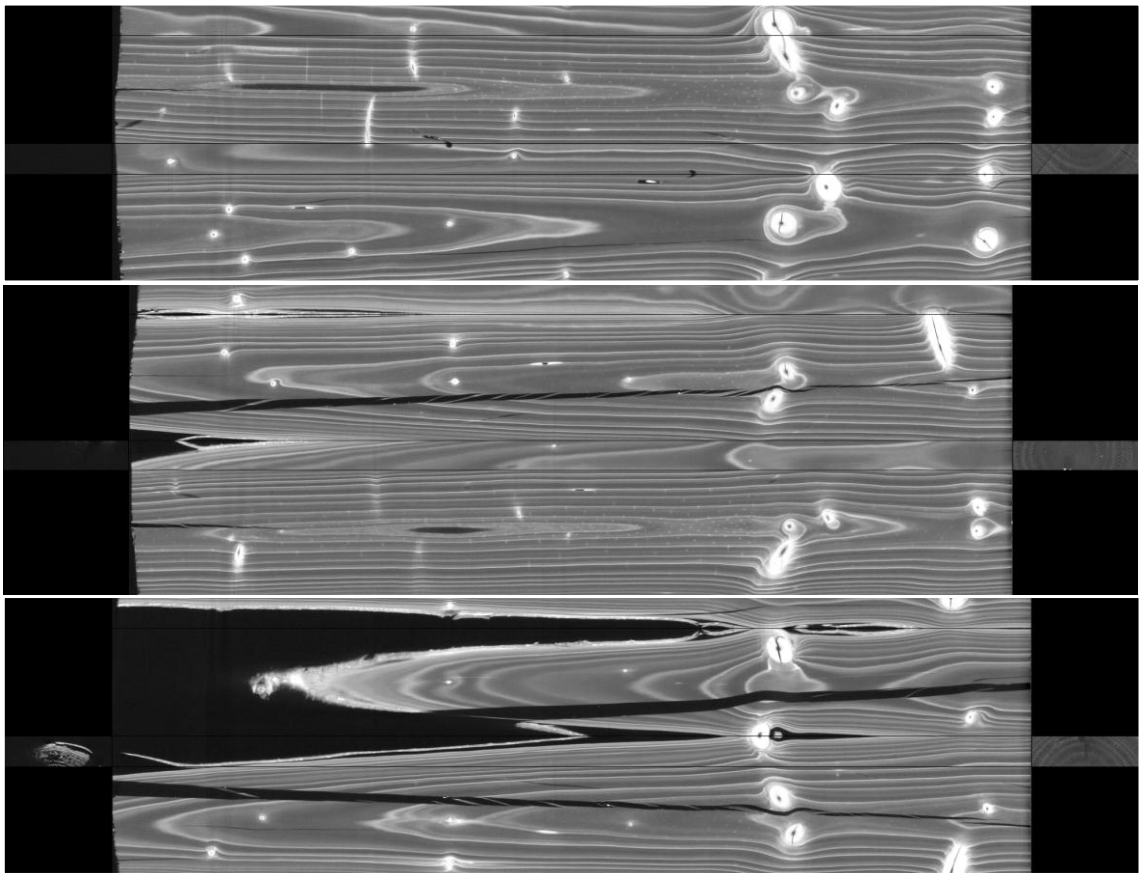


*Figure 73: Images des patrons des produits virtuels étudiés pour la validation*

Au final, nous nous sommes servis de ces produits et de leurs données pour chacune des étapes que nous avons précédemment décrites.

## 3.7 Conclusions du chapitre

Dans ce chapitre nous avons proposé un concept et une méthodologie permettant d'anticiper la production dans les processus divergents à travers l'utilisation du paradigme de *Virtual Manufacturing*.

Dans une première partie, nous exposons le concept de sciage virtuel et de génération automatique de la nomenclature virtuelle de débit. Ce concept est appliqué à l'industrie du bois et en particulier à la première transformation. Il se décompose en quatre étapes : la numérisation de la matière première, la virtualisation du processus de débit (le sciage virtuel), la caractérisation des Produits Virtuels et la génération de la nomenclature des produits. Avec cette stratégie anticipative, il est possible pour une entreprise dont le processus est divergent de connaitre à l'avance les produits qui seront issus de la matière première.

Dans une deuxième partie, nous proposons une méthodologie pour évaluer des critères relatifs aux produits virtuels qui ont la particularité d'intégrer une part d'imprécision et d'incertitude comme, dans notre cas, pour la qualité esthétique. Cette imperfection devant être prise en compte dans l'évaluation finale, nous avons donc développé une méthodologie pour estimer la qualité virtuelle des produits. Nous avons pris comme hypothèses que la qualité esthétique est monodimensionnelle et que chaque singularité, présente sur le produit, participe à la diminution de son niveau de qualité. Ainsi, dans une première étape, nous évaluons l'impact de chaque singularité sur le produit grâce à l'intégrale de Choquet qui est particulièrement bien adaptée à cette opération. Puis, nous fusionnons ces impacts ainsi qu'un critère représentatif du nombre de singularités pour obtenir une mesure de la qualité esthétique. De cette mesure, nous déduisons la qualité finale par l'utilisation, d'une part, des variables linguistiques qui offrent la possibilité de faire ressortir l'incertitude des experts et l'imprécision de mesure et d'autre part, un algorithme de programmation linéaire permettant de se déterminer sur la qualité « optimale » au regard des informations issues du PDP. Ce processus permet aux scieries de réduire les gaspillages tels que les stocks non désirés et ce, en attribuant par avance aux commandes des produits satisfaisant les besoins clients. La figure 74 (évolution de la figure 11 présentée au chapitre 1) permet de voir l'accumulation des informations si notre méthodologie est mise en place. Toutes les informations ne sont pas connues avant le sciage, une partie est donc évidement évaluée après (séchage, couleur, …) ou remesurée (dimensions, caractéristiques des singularités, …).

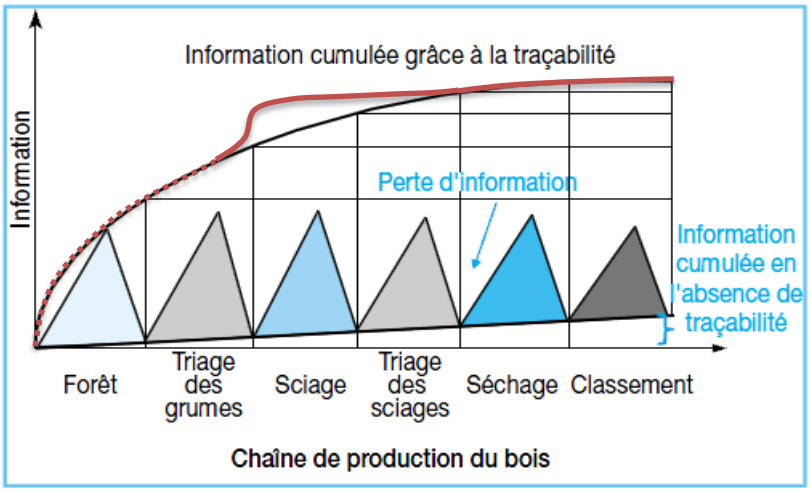



*Figure 74 : Informations cumulables pour un produit dans l'industrie du bois avec et sans le Virtual Manufacturing. La courbe rouge présente les gains envisageables en le mettant en œuvre pour l'anticipation de la production*

*

**Points Importants à Retenir :**

- Le deuxième paradigme utilisé est le *Virtual Manufacturing*
- Un processus permettant d'anticiper la production est proposé pour les scieries.
- Une première étape permet d'extraire les Produits Virtuels grâce à la numérisation de la matière et la virtualisation de l'opération de sciage (le sciage virtuel)
- Une deuxième étape de caractérisation des Produits Virtuels est réalisée avec des opérateurs de la théorie des Ensembles Flous ou des Possibilités (intégrale de Choquet, opérateur de fusion flous) qui permettent de prendre en compte l'imperfection des données. La caractérisation est faite en évaluant l'impact des singularités sur le produit puis en fusionnant ces impacts.
- Une dernière étape permet de déterminer quelles sont les caractéristiques les plus pertinentes à attribuer aux produits en fonction des données issues de la production et de générer la nomenclature de débit par anticipation.

# CONCLUSIONS GENERALES

# ET PERSPECTIVES

La présente thèse s'inscrit dans le cadre de la réduction des pertes d'informations dans les processus divergents pour en améliorer la gestion et la traçabilité. Ces travaux proposent donc deux voies d'amélioration de la traçabilité dans ce type de processus. D'une part, nous nous sommes appuyés sur un paradigme proposé au sein du laboratoire, la « Matière Communicante », afin de lier, grâce à un marquage moléculaire fixant un code à la matière elle-même de manière définitive, des informations qui lui sont propres. Cette proposition permet d'améliorer la traçabilité relative à l'origine de la matière pendant l'ensemble de son cycle de vie et a été décrite dans le chapitre 2. D'autre part, nous nous sommes intéressés au paradigme de « *Virtual Manufacturing* », afin de proposer une méthodologie permettant de connaître par avance, de façon virtuelle, les débits qui seront issus du couple [grume, plan de débit] et ainsi de générer par anticipation la nomenclature des produits fabriqués. Cette proposition a été décrite dans le chapitre 3. C'est une innovation importante car, alors qu'actuellement les entreprises considérées gèrent leur production sur stock, elles seraient alors capables de produire à la commande. Cela aurait pour impact de réduire considérablement leurs stocks et d'améliorer leur taux de satisfaction client et efficacité en production. La démarche s'apparente ainsi à une démarche *Lean Manufacturing* dont l'optique est la réduction des gaspillages. L'introduction de ces deux paradigmes a nécessité de caractériser le contexte d'application, ce qui fut l'objectif du chapitre 1. Nous avons montré que l'information est de deux types, les informations relatives aux caractéristiques physiques du produit et les informations relatives à l'origine du produit, son histoire. Dans le premier cas, ces informations sont facilement identifiables par observation et analyse du produit mais cela nécessite qu'il soit physiquement à notre disposition. Dans le deuxième cas, il faut lier l'information au produit. Nos propositions permettent ainsi une traçabilité quasi-totale des produits.

Initialement, il semblait que ce sujet de recherche était un véritable défi. Il s'avère que les recherches que nous avons menées ont ouvert des axes de recherche bien plus vastes que nous l'avions imaginé. A l'heure du bilan, nous sommes convaincus que ces travaux se poursuivront, tant par les enjeux économiques inhérents que par le nombre de verrous scientifiques restant à lever. De ce fait et en termes de perspectives, nous proposons diverses pistes organisées selon des domaines différents.

Dans le domaine de l'automatique et de la production:

- Réalisation d'un *benchmark* de différentes méthodes de détermination de la qualité esthétique et en particulier l'utilisation de méthodes de classification. C'est l'un des points que nous n'avons pas traité mais qui permettrait de bien mieux comprendre les mécanismes de décision des experts en scieries.
- Application de la méthode à des données réelles comme nous l'avons annoncé dans le paragraphe 3.6. Cela permettrait de calibrer le système bien plus finement et de pouvoir le tester dans des conditions réelles d'utilisation et enfin de réaliser une réelle validation de nos propositions.
- Mise en œuvre d'une réelle identification biométrique des produits dans le monde virtuel (et non pas une simple classification) afin, ultérieurement, de pouvoir les reconnaitre individuellement dans le réel après sciage. Cela permettrait de tendre vers de la traçabilité totale des produits mais cela implique aussi des temps d'identification importants et un respect des plans de sciages définis sans lesquels l'identification n'est plus possible.
- Application du principe de gestion de la qualité floue aux produits réels qui permettrait d'intégrer les informations du PDP et ainsi d'optimiser l'affectation des produits aux commandes clients.

Dans le domaine du traitement du signal :

- Amélioration du processus de traitement du signal RQN. Il s'agit en fait d'améliorer l'automatisation de la récupération des caractéristiques relatives aux signaux RQN. Les solutions proposées ici sont bien connues et nous ont permis de proposer une solution viable mais elle trouve ses limites lorsque le rapport signal-sur-bruit est faible.
- Validation du codage sur des quantités importantes pour le marquage dans la masse. Grâce à cela, il serait possible d'augmenter facilement le nombre de codes qu'il est possible d'utiliser pour identifier les informations relatives aux origines.

Dans le domaine de l'informatique :

- Amélioration du sciage virtuel. Actuellement, notre logiciel et notre matériel ne sont pas optimisés pour avoir une utilisation industrielle. Un développement bien plus réfléchi dans un langage compatible avec les contraintes temps réels du système de production serait nécessaire.

- Développement d'un progiciel complet intégrant toutes les étapes proposées dans la troisième partie de la thèse. Il permettrait de réaliser les différentes étapes de sciage de la matière première, de caractérisation et identification des produits virtuels, de la génération de leurs nomenclatures et de la vérification de ces dernières en temps réel.

Dans les domaines de la chimie et de la biologie, plusieurs travaux sont à réaliser pour valider de manière définitive le marquage dans la masse du bois.

- Caractérisation de nouveaux produits pour le marquage dans la masse. Beaucoup d'autres contraintes ne nous permettent pas aujourd'hui d'affirmer que le marquage dans la masse est viable. Les contraintes environnementales sont importantes car il est nécessaire de trouver des produits qui soient biocompatibles (si le marquage est réalisé sur des bois sur pied), et qui puissent être mis en solution aqueuse et identifiables une fois recristallisés dans le bois. Les premières recherches dans ces domaines doivent donc concerner, à notre avis, la caractérisation de ces produits chimiques. Nous avons vu grâce à notre recherche bibliographique que l'urée dont l'écotoxicité est faible, pourrait être un potentiel marqueur chimique. Cependant nous n'avons pas pu réaliser suffisamment d'essais afin de prouver qu'elle est identifiable dans le bois mais aussi que ce produit peut être introduit dans des arbres sur pied sans avoir d'actions néfastes sur ceux-ci. Il y a donc là un champ de recherche intéressant et important.
- Etude de l'imprégnation des bois sur pied. Ce dernier point est aussi une recherche à mener de front avec le point précédent. Dans le concept originel que nous avions proposé, l'idée était de marquer le bois sur pied. Or les études bibliographiques réalisées sur le sujet et les discutions avec les experts du domaine de la biologie du bois nous montrent que la tâche est ardue car les arbres ont des mécanismes d'autoprotection permettant de filtrer les différentes entrées et sorties aux niveaux des racines et des feuilles. Le sujet est donc très prospectif et nécessite d'imaginer des solutions viables pour le marquage. Plusieurs idées peuvent venir à l'esprit pour réaliser le marquage du bois sur pied, mais elles apparaissent, à l'instar de l'identification par RQN, comme de véritables défis–et, ici encore, s'ouvre une perspective intéressante de recherche.

Dans le domaine de l'électronique :

- Amélioration de l'instrumentation RQN. Certaines recherches étudient, d'ores et déjà, comment améliorer l'appareillage RQN afin que ce dernier soit plus sensible et permette de détecter plus rapidement les molécules utilisables pour la spectroscopie RQN.

Enfin ces travaux ont été réalisés avec comme support le matériau bois. Bien d'autres industries pourraient avoir un intérêt de mettre en œuvre cette méthode de marquage dans la masse. L'industrie alimentaire, qui présente également un processus divergent, pourrait être particulièrement intéressée par une extension de nos travaux à son domaine

***

# ANNEXES

# **A.** Processus de transformation du bois

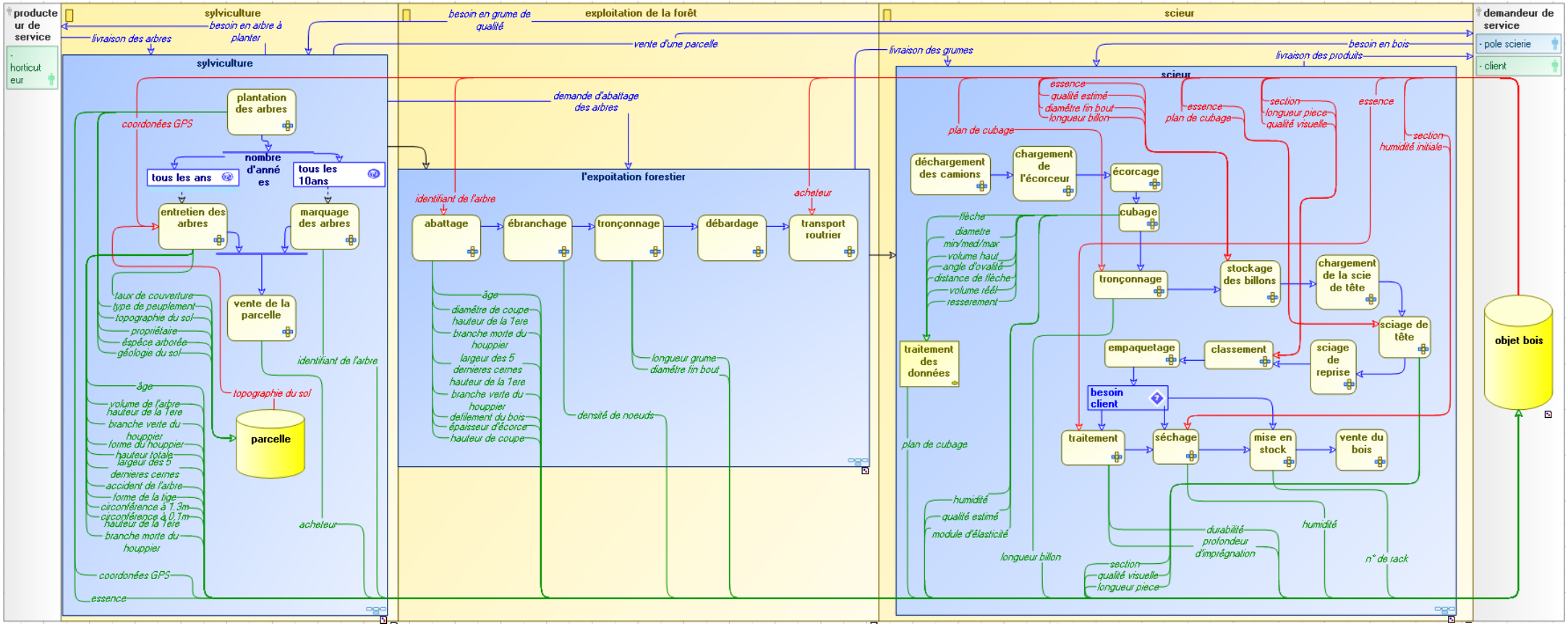



*Figure 75 : Processus global de la partie de la chaîne logistique bois nous intéressant dans le cadre de ces travaux*

## **B.** Le logiciel de traitement des signaux RQN

Comme il est dit plus haut, nous avons développé sous MATLAB un logiciel afin de procéder au traitement des signaux RQN. Nous passons en revue les fonctionnalités proposées par ce logiciel.

- **Page d'accueil du logiciel**

La page d'accueil regroupe beaucoup de fonctionnalités du logiciel et permet d'avoir une vision rapide des signaux. Décrite dans la figure 76, elle permet

- d'avoir une visibilité des différents stades de traitement du signal. Ainsi pour chaque traitement est représenté la partie réelle et la partie imaginaire du signal ou du spectre (rectangle rouge et vert).
- d'exécuter les fonctions de traitement du signal RQN (rectangle bleu).
- de phaser, grâce à l'ascenseur vertical et le spectre au-dessus de telle sorte que ce dernier soit en absorption (rectangle vert).
- de basculer vers la page NLLS
- de lancer une procédure de traitement complète.
- Revenir au signal initial.

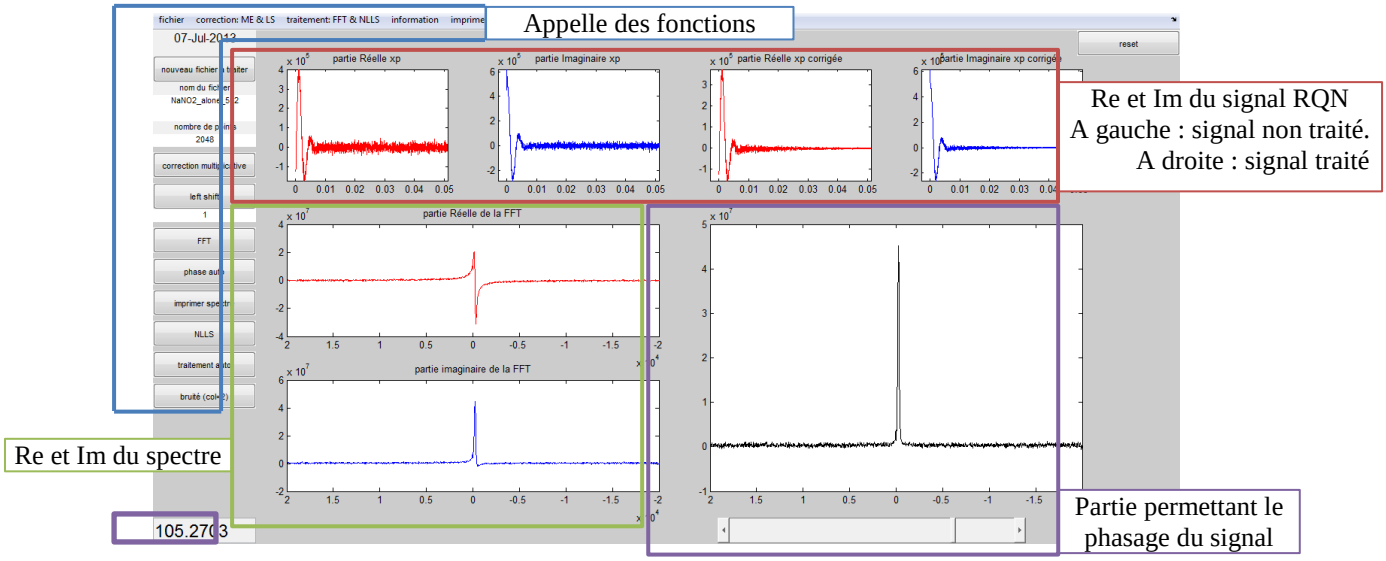



*Figure 76 : Page d'accueil du logiciel*

Nous avons fait en sorte que cette page offre une visualisation claire du signal et du spectre obtenu après transformée de Fourier ainsi que l'influence des traitements. De même l'accès aux fonctions est simplifié pour que l'utilisateur puisse réaliser des traitements répétitifs sans avoir à chercher les fonctions dans de multiples arborescences.

- **L'accès aux fonctions**

Grâce au bouton **nouveau fichier à traiter**, il est possible d'aller chercher un fichier .txt issu du logiciel d'acquisition. Le formatage du fichier, décrit plus loin, est à respecter pour éviter les erreurs. A l'ouverture d'un fichier, la fenêtre décrite en figure 77 s'ouvre. Cette dernière permet à l'utilisateur de renseigner des informations sur l'échantillon (de bois) analysé : l'essence utilisée, le nombre de scans, le protocole d'imprégnation et de séchage, le/les produit(s) imprégné(s), et la fréquence de la porteuse. Une fonction de recherche de chaînes de caractères permet au logiciel de déterminer et renseigner le nombre de scans et le produit utilisé si ceux-ci apparaissent dans le nom du fichier. En fonction du produit trouvé ($NaNO_2$ ou HMT), la fréquence de la porteuse est renseignée par la même. Par défaut, des informations sont inscrites dans les champs à renseigner (respectivement : épicéa, 4096, SVAL, $NaNO_2$, 4.64). Dans le cas où aucune de ces informations n'est connue de l'utilisateur, il est possible de laisser un blanc.

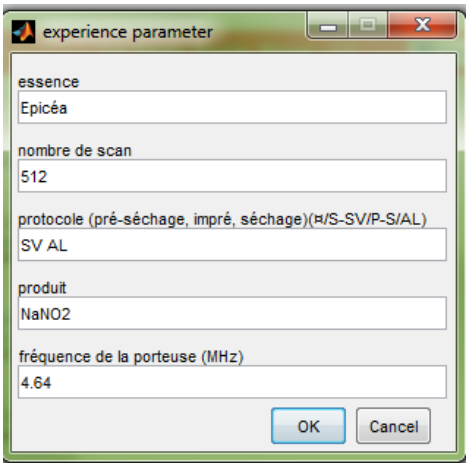



*Figure 77 : Fenêtre de renseignement des informations sur l'échantillon*

Les fonctions implémentées, qui sont décrites dans le corps du document paragraphe 2.1.3 sur le traitement des données RQN, peuvent être exécutées grâce aux boutons sur la gauche de la fenêtre ou la barre de menu en haut de la fenêtre (carré bleu figure 76).

Grâce au bouton **correction exponentielle**, il est possible de réaliser une multiplication exponentielle, dont la fenêtre de paramétrage est décrite en figure 78. Elle permet de choisir le type de multiplication (Lorentzienne ou Gaussienne) ainsi que la valeur du « *line Broadening* » (initialement réglée sur la valeur 50Hz)

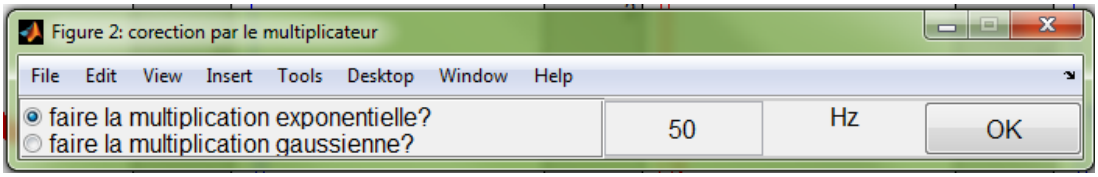



*Figure 78 : Fenêtre de paramétrage de la multiplication exponentielle*

Grâce au bouton « ***Left shift*** », il est possible de réaliser l'opération du même nom, dont la fenêtre de paramétrage est décrite ci-dessous. Il est possible de choisir le nombre de points de décalage vers la gauche. Le nombre total de points dont a été décalé le fid est inscrit dans la page principale sous le bouton de *Left shift*

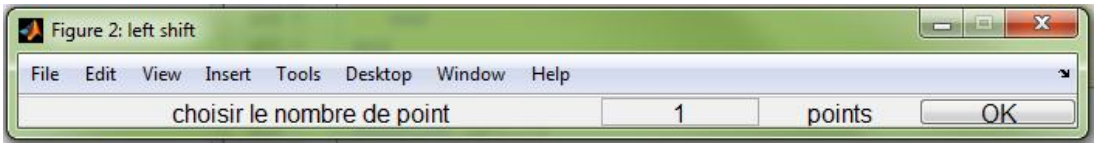



*Figure 79 : Fenêtre de paramétrage du « Left shift »*

Grâce au bouton FFT, il est possible d'obtenir la transformée de Fourier du signal, dont les parties réelle et imaginaire sont représentées par les deux spectres en bas à gauche. Le spectre permettant de réaliser le phasage du signal, situé à droite des deux spectres précédent, apparait lors de l'activation de ce bouton.

Le bouton **phase auto**, permet de chercher la valeur de la phase maximisant le maximum du spectre d'absorption. Ce traitement, bien qu'il ne soit pas optimum, permet d'obtenir une valeur correcte de la phase lorsque le rapport signal sur bruit est convenable.

Les boutons suivants permettent d'accéder à des fenêtres qui, du fait de leur importance seront décrites plus loin. Le bouton **impression** permet d'obtenir la fenêtre pour l'impression des spectres. Le bouton **NLLS** permet d'accéder à la page permettant la réalisation de l'optimisation.

Le bouton **traitement auto** permet d'effectuer une séquence de traitement permettant d'obtenir les paramètres automatiquement. Cette fonction sera décrite plus loin dans l'annexe.

Enfin Le bouton **reset**, situé en haut à droite de la fenêtre, permet de revenir au signal initial sans avoir à le recharger.

L'ascenseur vertical ainsi que le spectre au-dessus permettent de phaser pour le premier et de voir le résultat pour le deuxième. Le spectre donne la représentation de A obtenue grâce à l'équation ci-dessous qui change en fonction de la valeur de φ. Pour que le signal soit phasé, il faut que le spectre observé soit en absorption.

$$\cos(\varphi)Re + \sin(\varphi)\,Im = A$$

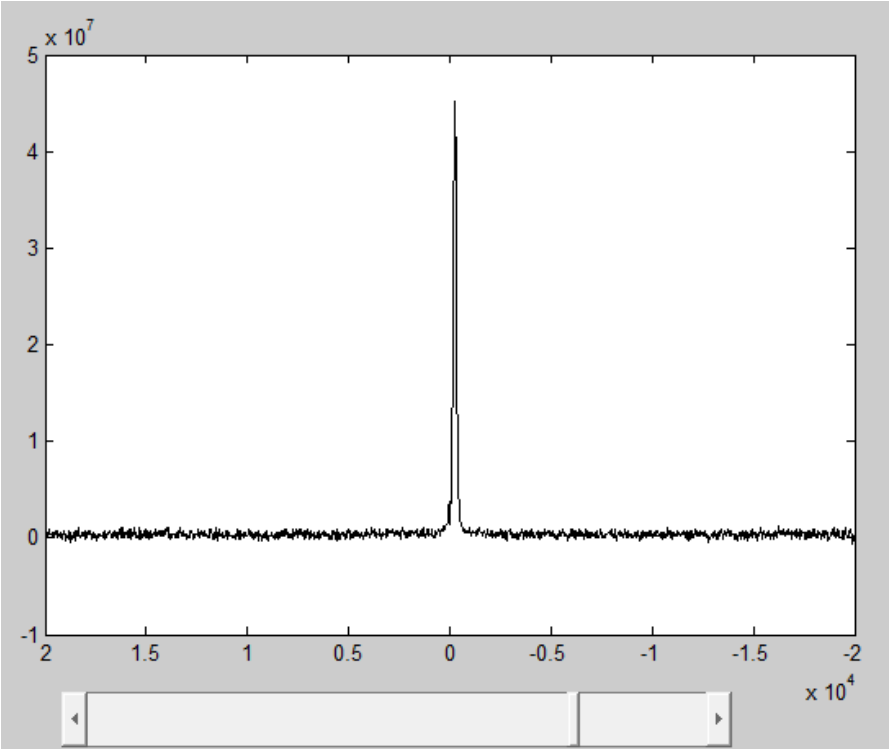



*Figure 80 : Spectre et ascenseur permettant de réaliser le phasage*

- **Le phasage automatique du signal**

Cette opération n'est pas décrite dans le texte mais est utilisée lors du calcul automatique. La phase du signal est obtenue de telle sorte que le spectre observé ci-dessus soit en absorption. De ce fait, le pic correspondant au produit recherché est le maximum du spectre. De plus lorsque le signal est phasé, le pic atteint lui-même son maximum. L'algorithme recherche donc la valeur de la phase qui maximise le maximum du spectre d'absorption.

- **L'optimisation des paramètres**

Après avoir cliqué, dans la page principale, sur le bouton NLLS, la fenêtre d'optimisation, représentée en figure 81, s'ouvre. Grâce à cette dernière, l'utilisateur pourra lancer le calcul automatique des valeurs initiales nécessaires à l'optimisation, réaliser l'optimisation et voir le résultat dans le domaine du temps ou des fréquences.

Il est en premier lieu nécessaire de régler le nombre de pics qui apparaissent sur le spectre et qui seront pris en compte. Par défaut, la valeur est un. Il suffit de lancer le calcul des paramètres initiaux grâce au bouton calcul auto. Dans le cas où il n'y a qu'un seul pic le calcul se réalise automatiquement en recherchant tout d'abord le maximum (qui doit en théorie correspondre au pic relatif au produit). Sinon l'utilisateur doit pointer les pics avec le

curseur. En fonction des pics indiqués, le logiciel cherche, à droite et gauche du pic, les points dont la valeur est égale à la moitié de la valeur du pic. L'écart entre ces deux points correspond à la largeur à mi-hauteur (LW). Toujours en fonction du pic, l'aire sous la courbe est calculée en réalisant la somme des points compris entre -3*(LW/2) et 3*(LW/2), ce qui correspond approximativement à 95% de l'air du pic. Enfin la phase prend comme valeur initiale la valeur du phasage automatique ou celle déterminée par l'opérateur. Le tout est représenté sur le spectre.

*Figure 81 : Fenêtre permettant de réaliser l'optimisation par NLLS*

Une fois les valeurs calculées le calcul de l'optimisation par NLLS est lancé en appuyant sur le bouton « NLLS ». Comme il est dit dans le corps du texte la fonction utilisée est la fonction « *fminsearch* » avec l'algorithme du *simplex*. Il est possible de régler le nombre maximum d'itérations réalisées, ainsi que la tolérance d'arrêt du calcul (somme des différences entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées) grâce aux deux carrés à droite de la fenêtre. Une fois le calcul fini, le résultat apparaît dans le domaine des temps avec, superposées, la courbe expérimentale en bleu et la courbe calculée en rouge. Les valeurs optimisées du signal sont affichées dans la liste en dessous du spectre. Grâce au bouton FFT, il est possible de voir le résultat dans le domaine des fréquences, de le phaser et d'écarter les deux courbes (expérimentale et calculée) afin que le résultat soit plus lisible (figure 82).

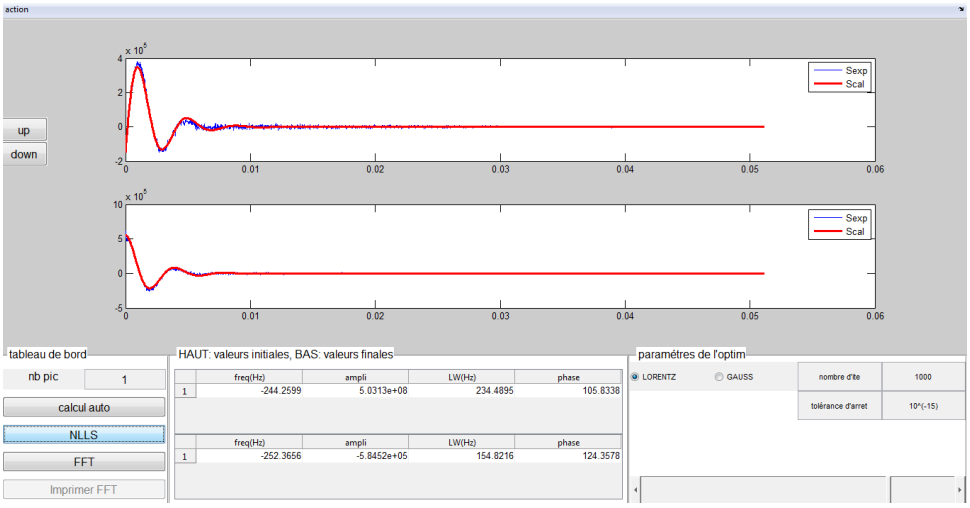



*Figure 82 : Résultat de l'optimisation par la méthode NLLS*

Enfin il est possible d'imprimer le spectre avec le bouton « imprimer FFT » qui dirige l'utilisateur vers la page d'impression d'écrite ci-dessous

- **Traitement automatique du signal**

Cette méthode est rapidement décrite dans le corps du document. L'objectif ici est de proposer à l'utilisateur une méthode qui lui permette de réaliser des traitements du signal avec une méthode paramétrée.

Six étapes sont réalisées :

- Une multiplication exponentielle est appliquée sur le signal (LB=50Hz).
- Un décalage vers la gauche du fid de 1 point est éventuellement appliqué (pour un « dead time » standard de 250µs et un pas d'échantillonnage de 25µs.
- Le spectre du fid est obtenu par transformée de Fourier.
- Un phasage automatique est réalisé (description en annexe).
- Les paramètres initiaux de la procédure NLLS sont déterminés.
- La procédure NLLS est lancée et les résultats analysés.

Dans un développement futur, le logiciel intégrera une page permettant de régler les différents paramètres du traitement automatique.

- **L'impression des résultats**

Dans la fenêtre principale et la fenêtre d'optimisation, un bouton « imprimer » permet d'accéder à la fenêtre d'impression des résultats (figure 83). Grâce à cette dernière, il est possible de sauvegarder sous différents formats ou d'imprimer la fenêtre. Il faut faire attention car le logiciel sauvegarde ou imprime la fenêtre telle quelle est affichée à l'écran. Il faut donc

bien faire attention à ce que la taille permette de voir l'ensemble des informations sur la même fenêtre. Si ce n'est pas le cas, il est possible d'agrandir ou de rétrécir la fenêtre avant l'impression. Ces deux actions sont réalisées avec les deux boutons en haut à gauche du bandeau supérieur.

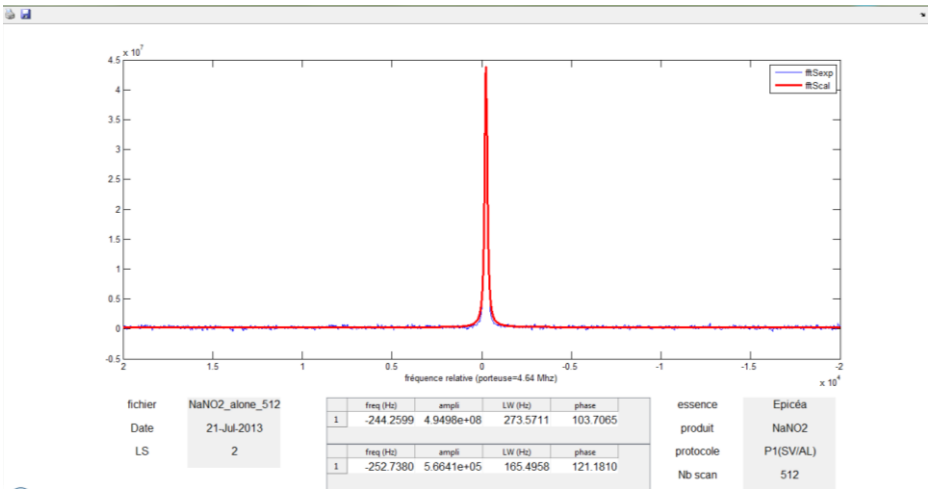



*Figure 83 : Fenêtre permettant l'impression et la sauvegarde des spectres*

## C. Logiciel de sciage virtuel

Afin d'obtenir une représentation des produits virtuels, nous avons développé un logiciel de sciage virtuel. Le sciage virtuel consiste à extraire d'une représentation de la matière première (obtenue par digitalisation des grumes grâce au CT RX), les produits qui seront sciés dans cette dernière suivant un schéma de sciage défini.

- **Page d'accueil**

Initialement vide à l'ouverture du logiciel, la figure ci-dessous la montre après avoir chargé les images tomographiques. Cette fenêtre est divisée en deux parties :

- la partie de gauche (cadre rouge) permet de gérer et visualiser le positionnement du schéma de sciage sur la section du billon. Grâce au bouton **schéma de sciage**, il est possible de sectionner celui qui sera appliqué parmi ceux définis dans la base de données. Les zones de texte en-dessous servent à indiquer l'épaisseur de la lame (essentiel pour obtenir les surfaces réelles des produits en laissant un espace entre les produits) et la position du schéma de sciage sur la section (suivant x et y). Comme on peut le voir, le plan s'affiche en noir avec son repère de référence en vert. Le positionnement de fait par rapport au centre du repère. Le trait bleu correspond à la position de la section observée dans la seconde partie (partie droite).
- la partie de droite (cadre bleu) permet de visualiser la section désirée et représentée par le trait bleu défini dans la partie précédente. Il apparait, sur la représentation de la section, la projection des produits du schéma de sciage afin de voir par avance si ces derniers ne sortent pas du billon.

Ces deux visualisations permettent de positionner le schéma de sciage de telle sorte qu'aucun produit ne présente de manque de matière, ou du moins de le minimiser.

La barre de menu en haut de la fenêtre permet soit de configurer le logiciel (échelle, fichier de sauvegarde, dossier de sortie, …) avec le menu **configurer**, soit de charger les images, configurer les produits ou les schémas de sciage avec le menu **fichier**.

Une fois que le schéma de sciage est positionné correctement, il suffit de lancer le sciage virtuel en cliquant sur le bouton **Extraire.**

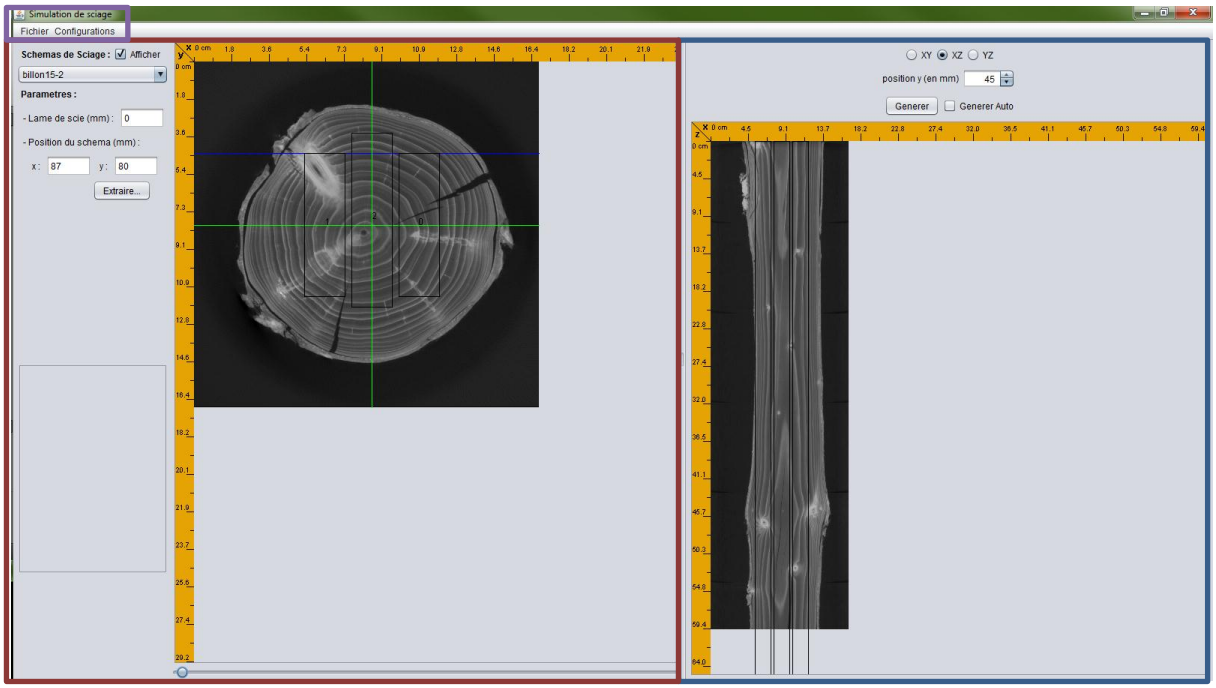



*Figure 84 : Page d'accueil du logiciel de sciage virtuel*

- **Chargement des images tomographiques**

La première étape après l'ouverture du logiciel est de charger les images tomographiques dans le logiciel. Pour cela, il faut ouvrir le menu **fichier** et cliquer sur **importer des slices.** La fenêtre décrite dans la figure 85 s'ouvre.

Grâce au bouton **parcourir,** il est possible de référencer le dossier dans lequel se trouvent les images du billon. Afin de gagner en capcité mémoire et en rapidité de traitement, il est possible de ne charger qu'une partie des images et/ou une proportion de l'image particuliere (P.ex, 50%) grâce aux deux zones de texte suivant le bouton **parcourir**. Dans les deux cas, la précision est réduite mais reste largement suffisante pour les traitements d'extraction des singularités.

Il est possible de renseigner dans la derniere zone de texte, le nombre d'images chargées en mémoire. Si cette valeur est plus petite que le nombre d'images total représentant la matière première, le logiciel devra durant le sciage virtuel, vider les images traitées pour charger celles qui ne le sont pas, au fur et à mesure de l'avancement du sciage virtuel. Cette opération est intéréssante si pour un lot d'images, plusieurs sciages virtuels sont réalisés (gain de temps en évitant de vider et de charger les images à chaque opération de sciage).

Enfin, le bouton **ajouter les images** permet de mettre en mémoire les images ou d'en rajouter à un lot déjà introduit dans le logiciel. Le bouton **vider la pile** permet de purger la mémoire de toutes les images. Différentes informations relatives aux nombres d'images introduites ou à la mémoire sont données au-dessus de ces deux boutons.

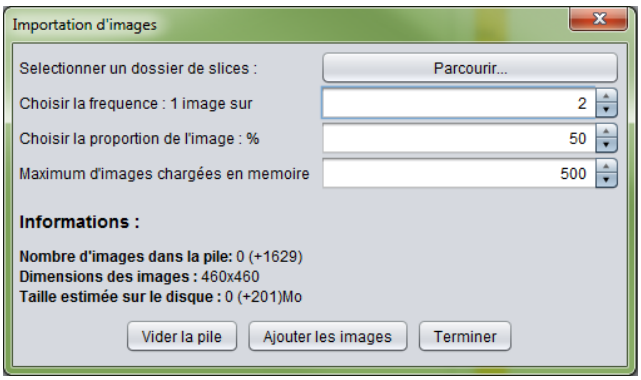



*Figure 85: Fenêtre d'importation des images tomographiques*

- **Définition des pièces d'un schéma de sciage**

Dans ce logiciel nous avons pris le parti de définir les produits indépendamment des schémas de sciage. La fenêtre représentée dans la figure 86 permet de les définir. Pour y accéder, il faut cliquer sur le bouton **Pièces** dans le menu **fichier**.

Les pièces sont définies suivant trois champs, leur nom, leur largeur et leur hauteur. C'est dans cette fenêtre que les produits sont modifiés (dimensionnellement). Une fois le produit renseigné, il faut cliquer sur **Créer** pour qu'il soit introduit dans la base des produits sciables.

*Figure 86: Fenêtre de définition des produits*

- **Définition d'un schéma de sciage**

Les schémas de sciage sont définis dans la fenêtre ci-dessous accessible en cliquant sur **gérer les schémas de sciage** dans le menu **fichier**.

Ils sont composés de plusieurs pièces sélectionnées dans la liste des pièces enregistrées dans le logiciel. Les pièces peuvent être positionnées de deux manières : par rapport au repère du schéma de sciage ou par rapport aux autres pièces. La première pièce renseignée est forcément positionnée par rapport au repère. Pour cela, il est possible de renseigner des contraintes (p.ex. l'axe X passe au centre de la pièce 1, l'axe Y passe au centre de la pièce) ou en donnant les coordonnés du point en haut à gauche du produit. Pour placer les pièces les

unes par rapport aux autres, il est de même possible de renseigner les coordonnées ou de donner des contraintes (p.ex. la pièce 2 est à droite de la pièce 1 et l'axe X passe par le centre de la pièce 2). L'utilisation des contraintes permet par la suite d'utiliser l'épaisseur de lame, le logiciel mettra automatiquement la valeur de l'épaisseur entre les produits du schéma de sciage.

*Figure 87 : Fenêtre permettant de définir les schémas de sciage*

- **Sciage virtuel et génération des produits virtuels**

Une fois le processus de sciage virtuel effectué, la fenêtre des résultats présentée en figure 88 s'ouvre ainsi que la fenêtre de visualisation en 3D du produit sélectionné (figure 89).

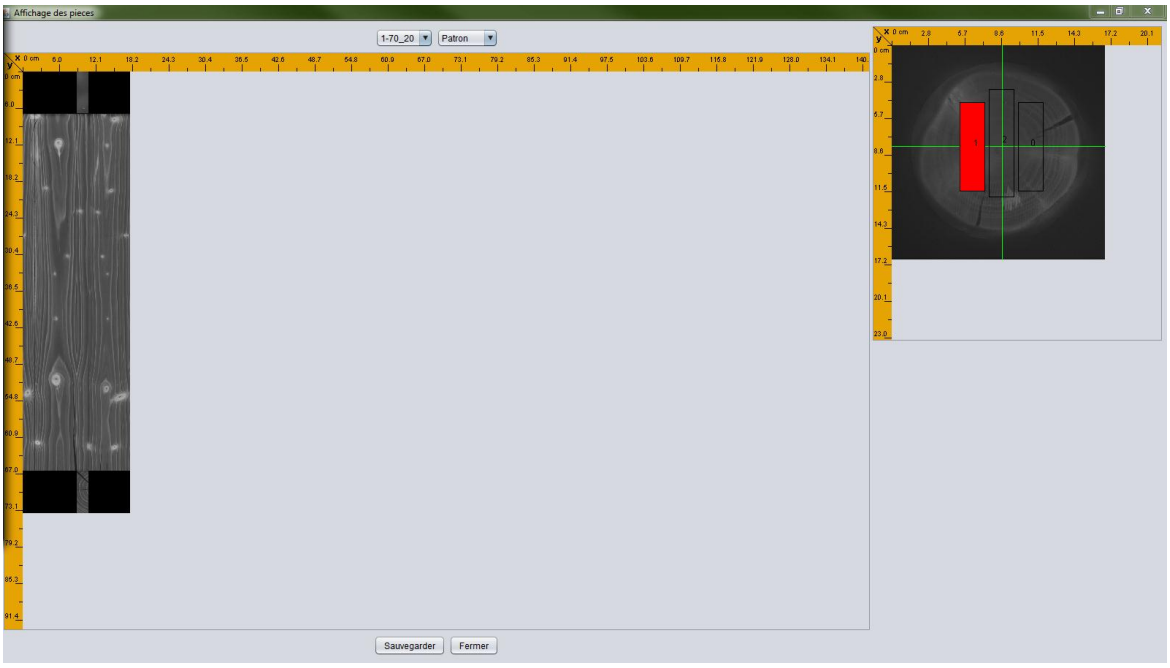



*Figure 88: Fenêtre présentant les résultats du sciage (Produits Virtuels)*

Dans la première fenêtre, il est possible d'observer les différentes faces des produits virtuels ou le patron (comme c'est présenté dans la figure ci-dessus). C'est ces images qui seront sauvegardées dans le dossier de sortie sélectionné. Sur la droite de cette fenêtre, il est affiché en rouge le produit observé. C'est à partir des différentes images du produit (et en particulier des cotés) qu'est évalué la qualité esthétique du produit.

La représentation en 3D permet d'avoir une vision d'ensemble de la pièce finale. Il est possible de la voir sous différents angles. Cette représentation est obtenue en projetant les surfaces du produit sur une enveloppe (l'intérieur de la matière n'est pas affiché dans la représentation pour des questions de temps de traitement informatique).

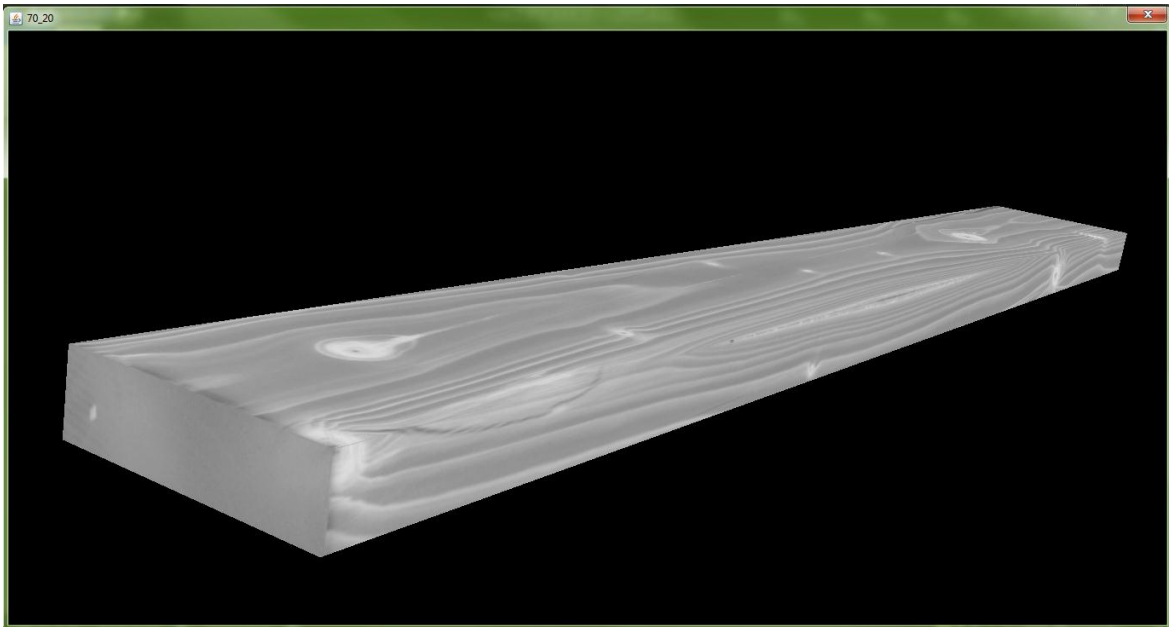



*Figure 89 : Fenêtre permettant de visualiser le produit en 3D*

## **D.** Formulaires : Les Indices de Shapley et de Murofushi

Indice de Shapley

$$\phi(i) = \sum_{A \subseteq \mathbb{N} \setminus i} \frac{(n-a-1)!\,a!}{n!} [\mu(A \cup \{i\} - \mu(A)]$$

Indice de Murofushi

$$I_{ij} = \sum_{A \subseteq \mathbb{N} \setminus \{i,j\}} \frac{(n-a-2)!\,a!}{(n-1)!} \big[[\mu(A \cup ij) - \mu(A \cup \{i\})] - \mu(A \cup \{j\} + \mu(A)\big]$$

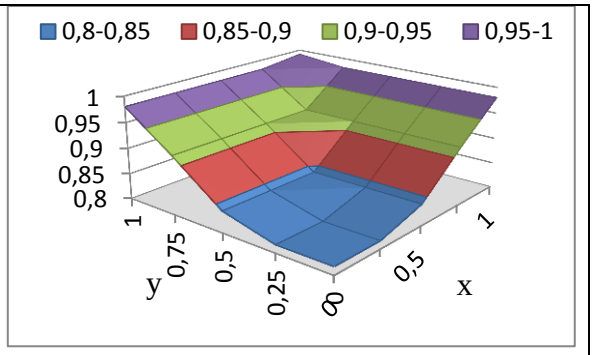
Avec a=|A|, le cardinal de A.

## **E.** Capacités représentées sous la forme de Möbius

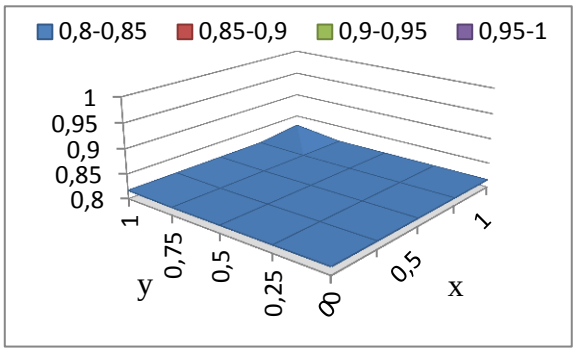
| μ{} | Ø | S | X | Y | C | S,X | S,Y | S,C | X,Y | X,C | Y,C | S,X,Y | S,X,C | S,Y,C | X,Y,C | S,X,Y,C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ø | 0 | .25 | .25 | .25 | .25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E | 0 | .251 | 0 | 0 | .711 | .286 | 0 | .038 | .537 | .289 | .289 | -.537 | -.575 | -.289 | -.826 | .826 |
| E+S | 0 | .624 | .086 | 0 | .711 | -.086 | 0 | -.335 | .537 | -.086 | 0 | -.537 | .086 | 0 | -.537 | .537 |
| E+S+I | 0 | 0 | .455 | .455 | .144 | .683 | -.455 | .048 | -.138 | .084 | -.455 | -.144 | .047 | .455 | -.048 | -.084 |

**F.** Résultat de l'intégrale de Choquet pour la singularité fondue mais de taille importante.

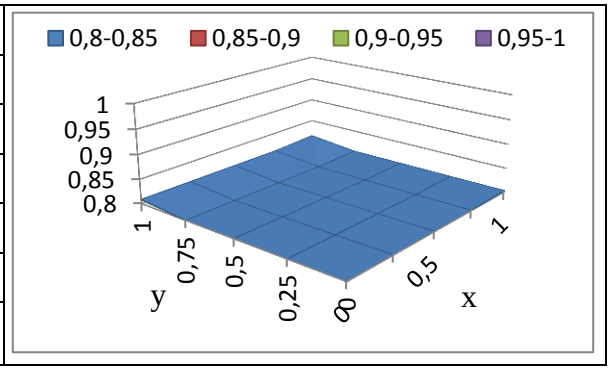
| E | | X | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 |
| Y | 0 | 0,82 | 0,82 | 0,84 | 0,91 | 0,98 |
| | 0,25 | 0,82 | 0,82 | 0,84 | 0,91 | 0,98 |
| | 0,5 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,91 | 0,98 |
| | 0,75 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,98 |
| | 1 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 |




| E+S | | X | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,25 | 0 | 0,75 | 0 |
| Y | 0 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| | 0,25 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| | 0,5 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| | 0,75 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| | 1 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,83 |




| E+S+I | | X | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,25 | 0 | 0,75 | 0 |
| Y | 0 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 0,25 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 0,5 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 0,75 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 1 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 |



## G. Evaluation du nombre de nœuds pour la qualité.

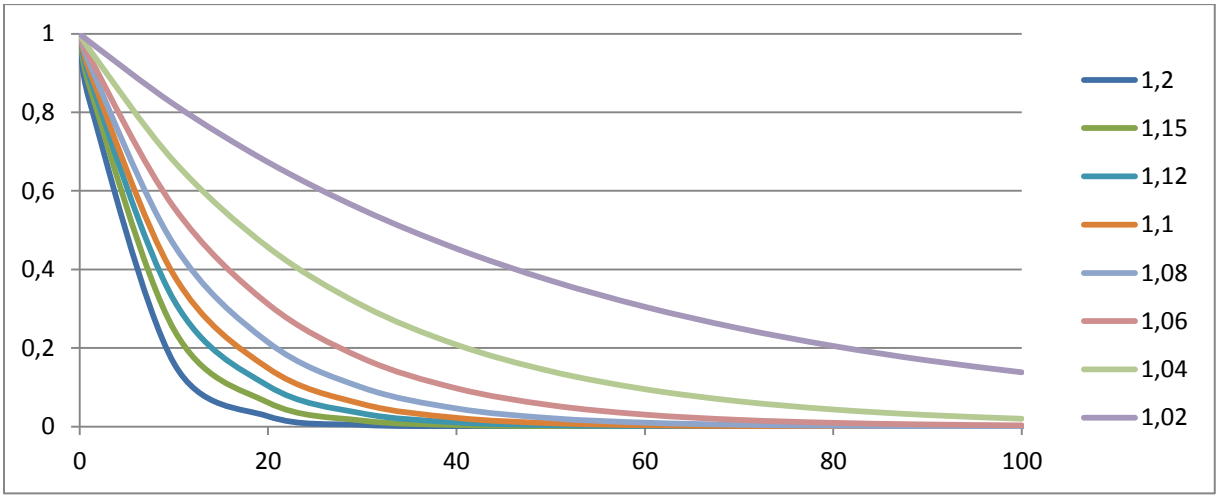
Comme il est dit en section 3.4.1sur l'évaluation de la mesure esthétique, nous utilisons un critère qui permet d'estimer l'impact du nombre de nœuds sur un produit. Cette évaluation se base sur deux observations faites dans l'industrie :

- il suffit de peu de singularité pour que la qualité chute vite et
- le nombre de nœuds tend à diminuer la qualité esthétique mais au-dessus d'un certain nombre, la qualité atteint la plus basse.

Pour représenter ce comportement, nous avons choisi d'utiliser une exponentiel décroissante représentée par la fonction ci-dessous.

$$u_{nb} = k^{-NB_s} \text{ avec } k = 1.1 \qquad (23)$$

Avec ce type de fonction, le plus difficile est d'attribuer une valeur à k pertinente. Nous avons analysé les différentes courbes représentées par cette équation en fonction des valeurs de k comme cela est présenté dans la figure ci-dessous. Le choix de la valeur de k est fait en fonction des désidératas de l'expert sur l'impact du nombre de singularités pour lequel il pourra attribuer un impact plus ou moins fort. Dans notre cas nous avons choisi k=1,1 car il correspond à la valeur pour laquelle un nombre de singularités supérieur à vingt attribue un impact proche de 0,15 qui permettra en fin de processus (choisi dans cette thèse) d'attribuer la qualité la plus faible à des produits de plus de vingt singularités sans déclasser dans cette même catégorie les produits qui en ont moins.




Il en reste que la détermination de cette valeur est dépendante du cas d'utilisation, des choix de l'entreprise et de l'expert. Dans le cas d'industrie dont les produits sont de forte valeur ajoutée (ébénisterie, meuble, menuiserie, …) la valeur de k sera plus grande. Il en sera le contraire dans une industrie telle que l'emballage.

## **H.** Cas d'école pour la détermination des qualités optimales

Données :

- Coût de stockage au m² : 20 euros/jour
- Temps maximum en stock : 90 jours (nombre de jours maximum en stock si aucune demande n'existe ou si le besoin est à un horizon plus grand que cette valeur)
- Date actuelle : 23/10/2013 (pour estimer le temps de stockage)

Le tableau 16 explicite le carnet de commandes à satisfaire. Les quatre colonnes donnent respectivement :

- la référence du produit, désignée par (largeur/hauteur/qualité),
- les besoins nets exprimés en unité de produit,
- le prix de vente unitaire de la référence,
- la date de besoin du produit. C'est à partir de cette date (et de la date actuelle) qu'est calculé le temps de stockage du produit.

*Tableau 17 : Liste des besoins*

| Ref (lar/Hau/Q) | besoin net | prix de vente (unité) | date de besoin |
|---|---|---|---|
| 0,25/0,25/0 | 6 | 100 | 28/10/2013 |
| 0,25/0,25/1 | 4 | 75 | 31/10/2013 |
| 0,25/0,25/2 | 0 | 60 | 20/01/2014 |
| 0,25/0,25/3 | 10 | 50 | 04/11/2013 |
| 0,25/0,25/4 | 9 | 45 | 24/10/2013 |
| 0,20/0,10/0 | 9 | 50 | 25/10/2013 |
| 0,20/0,10/1 | 5 | 40 | 26/12/2013 |
| 0,20/0,10/2 | 4 | 30 | 20/01/2014 |
| 0,20/0,10/3 | 4 | 20 | 26/10/2013 |
| 0,20/0,10/4 | 1 | 10 | 28/10/2013 |
| 0,30/0,30/0 | 0 | 400 | 20/01/2014 |
| 0,30/0,30/1 | 1 | 300 | 13/11/2013 |
| 0,30/0,30/2 | 10 | 200 | 31/10/2013 |
| 0,30/0,30/3 | 0 | 100 | 20/01/2014 |
| 0,30/0,30/4 | 0 | 10 | 20/01/2014 |

Le tableau 17 renseigne les produits caractérisés suivant la méthodologie proposée. Nous présentons simplement la Qualité Virtuelle obtenue ainsi que la qualité finale attribuée aux produits après avoir lancé l'optimisation. Les deux dernières colonnes renseignent sur les gains en fonction du prix de vente et du coût de stockage en attribuant respectivement la pire qualité virtuelle et la qualité après optimisation au produit. Ainsi pour la pièce 2 qui a une qualité virtuelle 0/1 (CàD que le Produit Virtuel à un degré de possibilité d'appartenance aux

classes de qualité 0 et 1 non nul), nous considérons dans le calcul que la qualité est de 1 pour le gain sans optimisation et de 0 (valeur donnée par l'optimisation) pour le gain optimal.

*Tableau 18: Liste des Produits Virtuels avec leur qualité virtuelle et optimale*

| produit | Larg/hau | qualité virtuelle | qualité optimale | PDV sans optim | PDV optimal |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 0.2/0.1 | 0 | 0 | 48,8 | 48,8 |
| 1 | 0.2/0.1 | 2/3 | 3 | 18,4 | 18,4 |
| 13 | 0.2/0.1 | 2/3 | 3 | 18,4 | 18,4 |
| 9 | 0.2/0.1 | 2/3 | 3 | 18,4 | 18,4 |
| 17 | 0.2/0.1 | 2/3 | 3 | 18,4 | 18,4 |
| 3 | 0.25/0.25 | 0 | 0 | 92,5 | 92,5 |
| 18 | 0.25/0.25 | 0 | 0 | 92,5 | 92,5 |
| 2 | 0.25/0.25 | 0/1 | 0 | 63,75 | 92,5 |
| 12 | 0.25/0.25 | 1 | 1 | 63,75 | 63,75 |
| 4 | 0.25/0.25 | 1/2 | 1 | -52,5 | 63,75 |
| 7 | 0.25/0.25 | 1/2 | 1 | -52,5 | 63,75 |
| 5 | 0.25/0.25 | 1/2 | 1 | -52,5 | 63,75 |
| 19 | 0.25/0.25 | 1/2 | 1 | -52,5 | 63,75 |
| 15 | 0.3/0.3 | 0 | 0 | 238 | 238 |
| 8 | 0.3/0.3 | 0/1 | 0 | 260,4 | 260,4 |
| 16 | 0.3/0.3 | 2 | 2 | 183,8 | 183,8 |
| 20 | 0.3/0.3 | 2 | 2 | 183,8 | 183,8 |
| 6 | 0.3/0.3 | 3 | 3 | 83,8 | 83,8 |
| 11 | 0.3/0.3 | 3 | 3 | 83,8 | 83,8 |
| | | totaux | | 1209,7 | 1752,3 |

Comme on peut le constater, pour certain produit, il est intéressant de surclasser le produit dont la qualité virtuelle présente une hésitation et donc de prendre le risque que le client ne soit pas complètement satisfait, plutôt que d'attribuer une qualité plus basse qui devra être stockée pendant un certain temps.

***

# BIBLIOGRAPHIE

- **A**

[Agard, 2004] Agard, B. (2004), Modélisation des familles de produits: État de l'art. *Mécanique & industries, Cambridge Univ Press*, **5**(3), 275-288

[Aguilera & al, 2002] Aguilera, C.; Ramos M. & Salinas, D. (2002), Internal visualization of knots in radiata pine logs using X-rays. *Maderas Cienc.Technol*, **4**(2), 193-200.

[Allano, 2009] Allano, L. (2009), *La Biométrie multimodale : stratégies de fusion de scores et mesures de dépendance appliquées aux bases de personnes virtuelles*. PhD thesis, Institut national des télécommunications.

[Almecija & al, 2012a] Almecija, B.; Bombardier, V. & Charpentier, P. (2012), Modeling Quality Knowledge to Design Log Sorting System by X Rays Tomography. *Information Control Problems in Manufacturing*, **14**(1), 1190-1195.

[Almecija & al, 2012b] Almecija, B.; Bombardier, V. & Charpentier, P. (2012) Modélisation de connaissances métier pour l'intégration d'un système de tri qualité en scierie par tomographie X. *9^e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'12*.

[Anil & Pankanti, 2001] Anil, J. & Pankanti, S. (2001), Biometrics systems: anatomy of performance IEICE transactions on information and systems. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, **84**(7), 788-799.

- **B**

[Bastien, 1998] Bastien, Y. (1998), *Sylviculture des essences résineuse*. Cours de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.

[Bastien, 2005] Bastien, Y. (2005), *Arbres-Objectif, Elagage Artificiel*. Cours de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.

[Bayer, 1951] Bayer, H. (1951), Zur Theorie des Spin gitter-relaxation in Molekül kristallen. *Zeits Phys*, **130**(1), 227

[Bloch, 1996] Bloch, I. (1996), Information combination , 2004operators for data fusion: A comparative review with classification. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, IEEE*, **26**(1), 52-67.

[Bombardier & al, 2004] Bombardier, V.; Lhoste, P. & Mazaud, C. (2004), Modélisation et intégration de connaissances métier pour l'identification de défauts par règles linguistiques floues. *Traitement du signal*, **21**(3), 227-247.

[Bombardier & al, 2008] Bombardier, V., Mazaud, C., Lhoste, P. et Vogrig, R. (2008) Contribution of fuzzy reasoning method to knowledge integration in a defect recognition system, *Computers in Industry*, **58**(4), 355-366,.

[Bombardier & Schmitt, 2010] Bombardier V. & Schmitt E. (2010), Fuzzy rule classifier: capability for generalization in wood color recognition. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **23**(6), 978-988.

[Bonnard & al, 2001] Bonnard, N.; Brondeau M.T., Jargot, D.; Lafon, D.; Miraval, S.; Protois, J. & Schneider, O. (2001) *Fiche toxicologique N°169: Nitrite de sodium*. INRS.

[Botta-Genoulaz, 2005] Botta-Genoulaz, V. (2005), *Principes et méthodes pour l'intégration et l'optimisation du pilotage des systèmes de production et des chaînes logistiques*. Habilitation à Diriger des Recherche de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[Bouchon-Meunier & al, 2007] Bouchon-Meunier, B.; Foulloy, L. & Ramdani, M. (2007), *La logique floue*. 4$^{ieme}$ édition, Presses Universitaires de France.

[Brashaw & al, 2009] Brashaw, B. K.; Bucur, V.; Divos, F.; Goncalves, R.; Lu, J.; Meder, R.; Pellerin, R. F.; Potter, S.; Ross, R. J.; Wang, X. & others. (2009), Nondestructive testing and evaluation of wood: a worldwide research update. *Forest products journal, Forest Products Society*, **59**(3), 7-14.

[Bucur, 2003] Bucur, V. (2003), Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. *Measurement Science and Technology*, **14**(12), R91.

[Buehlmann & Edward Thomas, 2002] Buehlmann, U. & Edward Thomas, R. (2002), Impact of human error on lumber yield in rough mills. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **18**(3), 197-203

- **C**

[Canet, 2002] Canet, D. (2002), La RMN, Concepts, méthodes et applications, *Universciences*, Dunod (Ed.).

[Canet & Ferrari, 2009] Canet, D. & Ferrari, M. (2009), Fundamentals of Pulsed Nitrogen-14 Quadrupole Resonance Explosives Detection Using Magnetic and Nuclear Resonance Techniques, **1**(1), 1-29.

[Caulder & al, 2004] Caulder, S.; Buess, M.; Garroway, A. & Miller, P. (2004), NQR Line Broadening Due to Crystal Lattice Imperfections and Its Relationship to Shock Sensitivity. *AIP Conference Proceedings*, **706**(1), 929-934.

[Cavalin & al, 2006] Cavalin, P.; Oliveira, L.; Koerich, A. & Britto, A. (2006), Wood defect detection using grayscale images and an optimized feature set. *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, **1**(1), 3408-3412.

[Chang & al, 1989] Chang, S. J.; Olson, J. R. & Wang, P. C. (1989), NMR imaging of internal features in wood. *Forest Products Journal*, **39**(6), 43-49.

[Chiorescu & al, 2003] Chiorescu, S.; Berg, P. & Grönlund, A. (2003), the fingerprint approach: Using data generated by a 2-axis log scanner to accomplish traceability in the Sawmill's log yard. *Forest Products Journal*, **53**(2), 78-86.

[Chiorescu & Grönlund, 2004] Chiorescu, S. & Grönlund, A. (2004), 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*, **19**(4), 374-383.

[Charpentier & Choffel, 2003] Charpentier, P. & Choffel, D. (2003), The feasibility of intrinsic signature identification for the traceability of pieces of wood. *Forest Products Journal*, Forest Products Society, **53**(9), 40-46.

[Choquet, 1953] Choquet G. (1953). Theory of capacities. *Annales de l'institut Fourier*, **5**(1), 131-295.

[Cox & Blackstone, 2008] Cox, J. F. & Blackstone, J.H. (2008), *APICS Dictionary from the American Production and Inventory Control Society* (APICS), Twelfth Edition, Falls Church.

- **D**

[Deguilloux & al, 2004] Deguilloux, M.; Pemonge, M. & Petit, R. (2004), DNA-based control of oak wood geographic origin in the context of the cooperage industry Annals of forest science, **61**(1), 97-104.

[Dubois & Prade, 1994] Dubois, D. & Prade, H. (1994), La fusion d'informations imprécises. *Traitement du Signal*, **11**(6), 447-458.

[Dubois & Prade, 1996] Dubois, D. & Prade, H. (1996), What are fuzzy rules and how to use them. *Fuzzy sets and systems*, **84**(2), 169-185

[Dubois & Prade, 2004] Dubois D. & Prade, H. (2004). On the use of aggregation operations in information fusion processes. *Fuzzy Sets and Systems*, **142**(1), 143-161.

[Dupuy, 2004] Dupuy, C. (2004), *Analyse et conception d'outils pour la traçabilité de produits agroalimentaire afin d'optimiser la dispersion des lots de fabrication*. PhD thesis de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[Dykstra & al, 2002] Dykstra, D.; Kuru, G.; Taylor, R.; Nussbaum, R.; Magrath, W. & Story, J. (2002), Technologies for wood tracking: verifying and monitoring the chain of custody and legal compliance in the timber industry. *World Bank*, 88.

- **F**

[FCBA, 2001] FCBA (Forêt, Cellulose, Bois, Ameublement). (2001), *Manuel de scierie : techniques et matériels FCBA*, 395.

[Ferrari, 2008] Ferrari, M. (2008), *Aspects fondamentaux de la Résonance Quadripolaire Nucléaire de l'azote-14 par impulsion de champ radiofréquence université*. PhD thesis de l'université Henry Poincaré-Nancy I.

[Ferrari & al, 2007] Ferrari, M.; Hiblot, N.; Retournard, A. & Canet, D. (2007), 14N pulsed nuclear quadrupole resonance. 3. Effect of a pulse train. Optimal conditions for data averaging. *Molecular Physics*, **105**(23), 3005-3012.

[Flapper & al, 2002] Flapper, S. D. P.; Fransoo, J. C.; Broekmeulen, R. A. & Inderfurth, K. (22002), Planning and control of rework in the process industries: a review. *Production Planning & Control*, **13**(1), 26-34.

[Fleming & al, 2005] Fleming, M. R.; Bhardwaj, M. C.; Janowiak, J. J.; Shield, J. E.; Roy, R.; Agrawal, D. K.; Bauer, L. S.; Miller, D. L. & Hoover, K. (2005), Noncontact

ultrasound detection of exotic insects in wood packing materials Forest products journal, **55**(6), 33-37.

[Flodin & al, 2007] Flodin, J.; Oja, J. & Grönlund, A. (2007), Fingerprint traceability of sawn products using x-ray log scanning and sawn timber surface scanning. *Proceedings of COST E53-Quality control for wood and wood product.* Warsaw, Poland, 15-17 October.

[Flodin & al, 2008] Flodin, J.; Oja, J. & Grönlund, A. (2008), Fingerprint traceability of sawn products using industrial measurement systems for x-ray log scanning and sawn timber surface scanning Forest Products Journal, **58**(11), 100-105.

[Flood & al, 2003] Flood, K., Danielsson, P.-E., and Seger, M.M. (2003), On 3D Segmentation of knots in 3D-volume data acquired from X-ray Linear cone-beam scanning. In *Proceedings of the 5th International Conference on Image Processing and Scanning of Wood*, Bad Waltersdorf, Austria, 23–26 March. 151–160.

[Francoo & Rutten, 1994] Fransoo, J. C. & Rutten, W. G. (1994), A typology of production control situations in process industries. *International Journal of Operations & Production Management*, **14**(12), 47-57.

[Fuentealba, 2005] Fuentealba, C. (2005) *Approche biométrique pour l'identification automatique des produits bois*. PhD thesis de l'université Henri Poincare-Nancy1 et de Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB).

- **G**

[GENCOD, 2001] GENCOD. (2001). *La traçabilité dans les chaînes d'approvisionnement, de la théorie à la pratique*, Issy-les-Moulineaux : GENCOD 2001, 98p.

[Ginet & Golja, 2007] Ginet, C. & Golja, R. (2007), Traçabilité et échanges électroniques pour la filière forêt-bois-papier. F*iche information Afocel*, **2**(750), 1-6.

[Giudiceandrea & al, 2011] Giudiceandrea, F.; Ursella, E. & Vicario, E. (2011), A high speed CT scanner for the sawmill industry. *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium Sopron*, 14-16.

[Gonzalez & al, 2009] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. & Eddins, S. L. Digital image processing using MATLAB Gatesmark Publishing Knoxville, 2009, 2

[Grabisch & al, 2008a] Grabisch M., Kojadinovic I., Meyer, P. (2008a). A review of methods for capacity identification in Choquet integral based multi-attribute utility theory:

Applications of the kappalab r package. *European journal of operational research*, **186**(2), 766–785.

[Grabisch & al, 2008b] Grabisch M., Labreuche C. (2008b). A decade of application of the Choquet and Sugeno integrals in multicriteria decision aid. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, **6**(1), 1–44.

[Grungberg & Grönlund, 1992] Grundberg, S., and Grönlund, A. (1992), Log scanning - extraction of knot geometry. In *Proceedings of the 1st International Seminar/ Workshop on Scanning Technology and Image Processing on Wood*, Skellefteå, Sweden, 30 August – 1 September.

[Guibé & al, 1999] Guibé, L.; Gourdji, M. & Peneau, A. (1999), Spectrométrie de résonance quadripolaire nucléaire. *Analyse et caractérisation*, *Techniques de l'Ingénieur*, **4**(p2888), 1–19.

[Guidoum, 2012] Guidoum, A. (2012), *Les matériaux de construction : le Bois.* Cours de l'université fédérale de Lausanne.

[Gunasekaran, 1996] Gunasekaran, S. (1996) Computer vision technology for food quality assurance. *Trends in Food Science & Technology*, **7**(8), 245-256.

- **H**

[Hasenstab & al, 2006] Hasenstab, A.; Krause, M.; Osterloh, K. & others. (2006) Testing of wooden construction elements with ultrasonic echo technique and X-ray. *9th European Conference on Non-Destructive Testing*, Berlin, Germany, 25-29

[Hiblot & al, 2008] Hiblot, N.; Cordier, B.; Ferrari, M.; Retournard, A.; Grandclaude, D.; Bedet, J.; Leclerc, S. & Canet, D. (2008), A fully homemade N-14 quadrupole resonance spectrometer. *Comptes Rendus Chimie*, **11**(4-5), 568-579.

[Hodges & al., 1990] Hodges, D.; Anderson, W.; McMillin, C. & others. (1990), The economic potential of CT scanners for hardwood sawmills. *Forest Products Journal*, **40**(3), 65-69.

[Houllier & al, 1995] Houllier, F.; Leban, J. & Colin, F. (1995), Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, **74**(1-3), 91-102.

- **I**

[IFN, 2012] Inventaire Forestier National. (2012), *Documentation des données sur les arbres vivants, point forêt - campagnes 2009 à 2011*. Réalisé par l'Institut National de l'information géographique et forestière (IGN).

[Ikey, 2009] The Indisputable Key. (2009), Projet Européen sur la traçabilité dans la filaire bois réalisé de 2007 à 2011. http://www.indisputablekey.com/.

[ISO 8402] Norme ISO 8402. (1994), *Management de la qualité et assurance de la qualité*. De l'International Standards Organisation (ISO).

[ISO 9000] Norme ISO 9000. (2000), *Management de la qualité*. Série des normes ISO 9000 de l'International Standards Organisation (ISO).

[Iselin, 1995] Iselin, L. (1995), *Using Nitrogen-14 Nuclear Quadrupole Resonance and Electric Field Gradient Information for the Study of Radiation Effects*. University of Florida.

[Ives & Vitale, 1988] Ives, B. & Vitale, M. R. (1988), After the sale: leveraging maintenance with information technology. *MIS Quarterly*, **12**(1), 7-21

- **J**

[Jain & al, 2008] Jain, A. K.; Flynn, P. J. & Ross, A. A. (2008), Handbook of biometrics Springer.

[Jourez, 1997] Jourez, B. (1997), Le bois de tension. 1. Définition et distribution dans l'arbre. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, **1**(2), 100-112

- **K**

[Kaestner & Batth, 2000] Kaestner, A. & Baath, L. (2000), Microwave polarimetry based wood scanning. *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Sopron, Hungary, 13-15 September.

[Kärkkäinen, 2003] Kärkkäinen, M. (2003), Increasing efficiency in the supply chain for short shelf life goods using RFID tagging. *International Journal of Retail & Distribution Management*, **31**(10), 529-536.

[Kubler & al, 2010] Kubler, S.; Derigent, W.; Thomas, A.; Rondeau, E. & others. (2010), Problem definition methodology for the Communicating Material paradigm. *10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Lisbonne, Portugal.

[Kubler & al, 2011] Kubler, S.; Derigent, W.; Thomas, A.; Rondeau, E. & others. (2011), Prototyping of a communicating textile. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Metz, France.

[Kubler, 2012] Kubler, S. (2012), *Premiers travaux relatifs au concept de matière communicante: Processus de dissémination des informations relatives au produit*. PhD thesis de l'Université Henri Poincaré-Nancy I.

- **L**

[Lawrence ,1995] Lawrence Associates Inc. (1994), Virtual Manufacturing. *User Workshop Technical Report*, 12-13 July.

[Lee & al, 2001] Lee, W.; Cheung, C. & Li, J. (2001), Applications of virtual manufacturing in materials processing. *Journal of materials processing technology*, **113**(1), 416-423.

[Lebow, 2010] Lebow, S. T. (2010) *Wood Handbook, Chapter 15: Wood Preservation*. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service (Ed.), Madison, Wisconsin.

[Lin & al, 1995] Lin, E.; Minis, I.; Nau, D. S. & Regli, W. C. (1995), Contribution to virtual manufacturing background research. *Institute for Systems Research, University of Maryland*, **1**(1).

[Lin & al, 2008] Lin, C.-J.; Kao, Y.-C.; Lin, T.-T.; Tsai, M.-J.; Wang, S.-Y.; Lin, L.-D.; Wang, Y.-N. & Chan, M.-H. (2008), Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees. *International Bio-deterioration & Bio-degradation*, **62**(1), 434-441.

[Lo & al, 2010] Lo, Y.-H.; Blanco, J. A.; Seely, B.; Welham, C. & Kimmins, J. H. (2010), Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, **259**(5), 932–942.

[Longuetaud, 2005] Longuetaud, F. (2005), *Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'épicéa commun (Picea abies (L.) karst.) par tomographie à rayons X*. PhD thesis de l'institut AgroParisTech.

[Liu, 2006] Liu, W. (2006), Measuring conflict between possibilistic uncertain information through belief function theory. *Knowledge Science, Engineering and Management*, **4092**(1) 265-277.

[Lundahl & Grönlund, 2010] Lundahl, C. G. & Grönlund, A. (2010), Increased yield in sawmills by applying alternate rotation and lateral positioning. *Forest Products Journal*, **60**(4), 331-338.

- **M**

[Maness, 1993] Maness, T. (1993), Real-time quality controls system for automated lumber mills. *Forest Products Journal*, **43**(7-8), 17-22.

[Marichal & Roubens, 2000] Marichal, J.-L. & Roubens, M. (2000), Determination of weights of interacting criteria from a reference set. *European journal of operational Research*, **124**(3), 641-650.

[Martin, 1993] Martin, P. (1993), L'informatique industrielle au service des scieries *Revue Forestière Française*, fascicule thématique" Informatique et foresterie", n° spécial, 179-188.

[Matsumura & al, 1999] Matsumura, J.; Booker, R.; Ridoutt, B.; Donaldson, L.; Mikajiri, N.; Matsunaga, H. & Oda, K. (1999), Impregnation of radiata pine wood by vacuum treatment II: effect of pre-steaming on wood structure and resin content. *Journal of wood science*, **45**(6), 456-462;

[Maturana & al, 2010] Maturana, S.; Pizani, E. & Vera, J. (2010), Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, **59**(4), 667-674.

[Maurino, 1994] Maurino, M. (2004), La gestion des Données Techniques: technologie du concurrent engineering. *Collection Organisation industrielle, Masson*.

[McFarlane & Sheffi, 2003] McFarlane, D. & Sheffi, Y. (2003), The impact of automatic identification on supply chain operations. *International Journal of Logistics Management*, **14**(1), 1-17.

[McFarlane & al, 2013] McFarlane, D. McFarlane, D.; Giannikas, V.; Wong, A. C. & Harrison, M. (2013), Intelligent products in the supply chain-10 years on. *Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics*, **472**(1), 103-117.

[Meyer & al, 2009] Meyer, G. G.; Främling, K. & Holmström, J. (2009), Intelligent products: A survey. *Computers in Industry*, **60**(3), 137-148.

[Miller & Barrall, 2005] Miller, J. B. & Barrall, G. A. (2005), Explosives detection with nuclear quadrupole resonance-an emerging technology will help to uncover land mines and terrorist bombs. *American scientist*, **93**(1), 50-57.

[Montigny & al, 1990] Montigny, F.; Brondeau, J. & Canet, D. (1990), Analysis of time domain NMR data by standard non-linear least-squares. *Chem. Phys. Lett.*, **170**(1), 175—180.

- **N**

[Nahavandi & Preece, 1994] Nahavandi, S. & Preece, C. (1994), A virtual manufacturing environment with an element of reality. *4th International Conference on Advanced Factory Automation*, 3-5 Octobre, 624—629.

[NF-B 51004, 1985] NF B 51-004. (1985), *Bois – Détermination de l'humidité*. Norme AFNOR.

[NF-B 52001, 1998] NF B 52-001. (1998), *Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues*. Norme AFNOR.

[NF-EN 1611, 1999] NF EN 1611. (1999), *Bois sciés Classement d'aspect des bois résineux*. Norme AFNOR.

[Nicosia & al, 2002] Nicosia, S.; Pischedda, D. & Parrot, J. (2002), Gérer en continu la production de sciages: LINSET relève le défi. *CTBA info*, **93**(1), 35-39.

- **O**

[Oja, 2000] Oja, J. (2000), Evaluation of knot parameters measured automatically in CT-images of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.). *European Journal of Wood and Wood Products*, **58**(5), 375-379.

[Osterloh & al, 2007] Osterloh, K.; Bücherl, T.; Hasenstab, A.; Rädel, C.; Zscherpel, U.; Meinel, D.; Weidemann, G.; Goebbels, Jü. & Ewert, U. (2007), Fast neutron radiography and tomography of wood as compared to proton based technologies. *Proceedings of DIR 2007- International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, Lyon, France, 25-27 Juin.

- **P**

[PEFC, 2010] PEFC ST 2002:2010.(2010), *Chain of Custody of Forest Based Products*. PEFC.

[Perez-Oramas, 2000] Perez Oramas, O. (2000). *Contribution une méthodologie d'intégration de connaissances pour le traitement d'images. Application à la détection de contours par règles linguistiques floues*. PhD thesis de l'université Henry Poincaré-Nancy1.

[Peterson, 2009] Peterson, M. (2009), *The potential of using log biometrics to track sawmill flow*. Oregon State University.

[Pichler & Oberhuber, 2003] Pichler, P. & Oberhuber, W. (2007), Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, **242**(2-3), 688 – 699.

[Pischedda, 2007] Pischedda, D. (2007), La traçabilité : une des clefs incontournables pour l'avenir. *CTBA info*, **114**(1), 2-7.

- **R**

[Reid & al., 2001] Reid, R.; Stephen, P. & Trust, N. H. (2001), The Farmer's forest: Multipurpose forestry for Australian farmers. *Australian Master Tree Grower Program*.

[Rinnhofer & al, 2003] Rinnhofer, A.; Petutschnigg, A. & Andreu, J. (2003), Internal log scanning for optimizing breakdown. *Computers and electronics in agriculture*, **41**(1-3), 7-21.

- **S**

[Sajdak & Velazquez-Marti, 2012] Sajdak, M. & Velazquez-Marti, B. (2012), Estimation of pruned biomass form dendrometric parameters on urban forests: Case study of Sophora japonica. *Renewable Energy*, **47**(1), 188–193.

[Schmitt & al, 2006] Schmitt, E.; Mazaud, C.; Bombardier, V. & Lhoste, P. (2006), A fuzzy reasoning classification method for pattern recognition. *Fuzzy Systems, 2006 IEEE International Conference on*, 1078-1085.

[Schmitt, 2007] Schmitt, E. (2007), *Contribution au Système d'Information d'un Produit "Bois". Appariement automatique de pièces de bois selon des critères de couleur et de texture*. PhD thesis de l'Université Henry Poincaré-Nancy1.

[Schutz, 1990] Schütz, J.-P. Sylviculture 1: Principes d'éducation des forêts. *PPUR Presses Poly-Techniques*, **5**(1).

[Shukal & al, 1996] Shukla, C.; Vazquez, M. & Chen, F. F. (1996), Virtual manufacturing: An overview. *Computers & Industrial Engineering*, **31**(1-2), 79-82.

- **T**

[Tajima, 2007] Tajima, M. (2007), Strategic value of RFID in supply chain management. *Journal of purchasing and supply management*, **13**(4), 261-273.

[Tan & Wang, 2010] Tan, L. and Wang, N. (2010), Future internet: The internet of things. in *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, **5**(1), 376-280.

[Thomas, 2009] Thomas, A. (2009), Rfid et nouvelles technologies de communication ; enjeux économiques incontournables et problèmes d'éthique, in *6ème Conférence Internationale Conception et Production Integrées (CPI'2009)*, FES, Maroc.

[Todoroski & Rönnqvist, 2002] Todoroki, C. & Rönnqvist, M. (2002) Dynamic control of timber production at a sawmill with log sawing optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **17**(1), 79-89.

[Tracilogis, 2013] http://www.tracilogis.uhp-nancy.fr/index.html

[Trouy-Triboulot & Triboulot, 2012] Trouy-Triboulot, M.C. & Triboulot, P. (2012) Matériau bois: Structure et caractéristiques. *Construction, Techniques de l'ingénieur*, **1**(1).

[Tzong-Ming & Tu, 2011] Tzong-Ming, C. & Tu, T.-H.(2009), A fast parametric deformation mechanism for virtual reality applications. *Computers & Industrial Engineering*, **57**(2), 520-538.

- **U**

[Usami & al, 2007] Usami, M.; Tanabe, H.; Sato, A.; Sakama, I.; Maki, Y.; Iwamatsu, T.; Ipposhi, T. & Inoue, Y. (2007), A 0.05 Ã 0.05 mm2 RFID Chip with Easily Scaled-Down ID-Memory. *International Solid-State Circuits Conference 2007 (ISSCC 2007)*, San Francisco, Californie, 11-15 Février, 482-483.

- **V**

[Ventä, 2007] Ventä, O. (2007), Intelligent products and systems. *Technology Theme-Final Report*. VTT, Espoo, 1, 1-304.

[Vollmann & al, 1997] Vollmann, T. E.; Berry, W. L. & Whybark, C. D. (1997), Manufacturing planning and control systems, *APICS (Ed.), McGraw-Hill*.

[Vun & al, 2008] Vun, R.; Hoover, K.; Janowiak, J. & Bhardwaj, M. (2008), Calibration of non-contact ultrasound as an online sensor for wood characterization: Effects of temperature, moisture, and scanning direction. *Applied Physics A*, **90**(1), 191-196.

- **W**

[Wang & al, 2009] Wang, L.; Li, L.; Qi, W. & Yang, H. (2009), Pattern recognition and size determination of internal wood defects based on wavelet neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, **69**(2), 142-148

[Waterhouse, 1993] Waterhouse, J. F. (1993), The ultrasonic testing of paper and board, principles and applications. *Institute of Paper Science and Technology*, Atlanta, Georgia, Juillet.

[Wei & al, 2010] Wei, Q.; Leblon, B. & La Rocque, A. (2011), On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. *Canadian Journal of Forest Research*, **41**(11), 2120-2140.

[Wendling, 2006] Wendling, L. (2006), *De la reconnaissance de symboles graphiques à leur localisation spatiale - quelques contributions*. Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Henri Poincaré-Nancy 1.

- **Z**

[Zadeh, 1965] Zadeh, L. A. (1965), Fuzzy sets. *Information and control* , 8(3), 338-353

[Zhang & Cai, 2008] Zhang, Y. & Cai, L. (2008), Impact of heating speed on permeability of sub-alpine fir. *Wood Science and Technology*, **42**(3), 241-250.

***

# AUTRES REFERENCES

# Liste des publications

- **Revues internationales avec comité de lecture**

Jover, J.; Bombardier, V. & Thomas, A., (2011), Wood mass marking: Interests and prospects. *International Journal in Production Research*, (Re soumis après modification)

Jover, J.; Thomas, A. & Bombardier, V. (2013), Virtualisation de la qualité esthétique d'un produit bois avant sciage. *Journal Européen des Systèmes Automatisé*. (Soumis)

Jover, J.; Aissani, S.; Guendouz, L.; Thomas, A. & Canet. (2014), NQR Detection of Sodium Nitrite Recrystallized in Wood. *Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials*, 77-86. D. Apih, T.; Rameev, B.; Mozzhukhin, G. & Barras, J. (Eds.) Springer Netherlands . DOI: 10.1007/978-94-007-7265-6_7.

- **Conférences internationales avec comité de lecture**

Jover, J.; Thomas, A.; Leban, J. & Canet, D. (2010), Pertinence of new communicating material paradigm: A first step towards wood mass marking journal of physics: conference series. *New achievements in materials and environmental sciences (names2010)*, 416, 200-208.

Jover, J.; Thomas, A. & Bombardier, V. (2011), Marquage du bois dans la masse : intérêts et perspectives, *9$^{eim}$ Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2011)*, St Sauveur, Canada, 12-14 Octobre.

Jover, J.; Thomas, A. & Bombardier, V. (2013), Wood piece quality evaluation using Choquet integral and fuzzy merging. *5th international Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications (FCTA2013)*, Vilamoura, Algarve, Portugal, 20-22 Septembre.

Jover, J.; Almecija, B.; Bombardier, B.; Charpentier, P. & Thomas, A. (2013), 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.

**Brevet**

Jover, J.; Bombardier, V.; Thomas, A. & Canet, D. (2013) Marquage du bois dans la masse par imprégnation d'une solution de produits chimiques utilisés comme identifiant et identifiés par résonance quadrupolaire nucléaire 2013. Brevet Français. (Soumis)

**Journée nationales de Groupes de Recherches Nationaux**

Jover, J.; Thomas, A. & Bombardier, V. (2013), Virtualisation de la qualité esthétique de produits bois. *5èmes Journées Doctorales & Journées Nationales du GDR MACS (JD - JN MACS)*, Strasbourg, France, 11-12 Juillet.

Jover, J. ; Bombardier, V.; Thomas, A. & Canet, D. (2012). Contribution à la réduction des pertes d'informations dans l'industrie du bois. *Journées Nationales du GDR Bois*, Montpellier, France, 26-28 Novembre.

***

# Liste des figures

Figure 1 : La filière bois (Source : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche)..... - 3 -
Figure 2 : Optimisation du tronçonnage des grumes..... - 4 -
Figure 3 : Impact du vent sur un pin ..... - 5 -
Figure 4 : Processus métier de la sylviculture mis en relation avec les informations capitalisables dans ce métier ..... - 7 -
Figure 5 : Processus métier de l'exploitation forestière mise en relation avec les informations capitalisables dans ce métier ..... - 9 -
Figure 6: Exemple de plans de coupe (schémas de sciage) a) un schéma de sciage réalisable avec une ligne ruban b) un schéma de sciage réalisable en canter (sciage en plot) .... - 12 -
Figure 7: Processus métier des scieries mise en relation avec les informations capitalisables dans ce métier..... - 14 -
Figure 8: Trois singularités : (a) nœud sain, (b) nœud noir et (c) poche de résine. ..... - 15 -
Figure 9: Processus de production générique de la seconde transformation..... - 18 -
Figure 10: Schématisation du processus de transformation du bois ..... - 20 -
Figure 11 : Informations cumulables pour un produit dans l'industrie du bois avec et sans traçabilité..... - 21 -
Figure 12 : Mise en évidence des liens existant entre les produits physiques et leur identification. Chaque rectangle représente une existence (physique en bleu, informatique en rouge) d'un objet..... - 23 -
Figure 13 : Les différents types de traçabilité [Dupuy, 2004]..... - 25 -
Figure 14 : Les différents niveaux de fusion..... - 29 -
Figure 15: Utilisation de la position des nœuds pour identifier les objets en scierie. A droite: utilisation pour les grumes, à gauche : utilisation pour les produits bois [Flodin & al, 2007]..... - 31 -
Figure 16 : Vue microscopique d'un bois de feuillus (gauche) et de résineux (droite)..... - 49 -
Figure 17: Principe de la RQN (extrait de [Ferrari, 2008])..... - 51 -

Figure 18 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un spin 1 soumis à la seule interaction quadrupolaire. A gauche : cas général ($\eta \neq 0$). A droite : tenseur de gradient de champ électrique de symétrie axiale ..... - 52 -
Figure 19 : Fréquences de résonance de l'azote-14 pour différents composés azotés. Mise en relation des gammes de fréquence (haut) avec les fréquences de résonance (bas) ..... - 53 -
Figure 20. Schéma électronique de la sonde RQN ..... - 53 -
Figure 21. Fonctionnement de l'appareillage RQN ..... - 54 -
Figure 22 : Spectre de référence de $NaNO_2$ pour une quantité de 3,29g. 512 fids ont été accumulés puis traités par transformée de Fourier ..... - 57 -
Figure 23 : Spectre de référence du HMT pour une quantité de 1,893g. 512 fids ont été accumulés puis traités par transformée de Fourier ..... - 58 -
Figure 24 : Cuve permettant la mise sous vide des échantillons ..... - 60 -
Figure 25 : Schéma du montage d'imprégnation sous vide/pression ..... - 60 -
Figure 26 : Distinction entre eau libre et eau liée ainsi que leur impact sur le bois (Extrait du CNDB) ..... - 61 -
Figure 27 : Protocoles expérimentaux ..... - 62 -
Figure 28 : Courbes de nutation en RQN. En bleu : $\eta=0$. En noir : $\eta \neq 0$ ..... - 65 -
Figure 29 : Spectre RQN du nitrite de sodium. En noir : échantillon test de nitrite de sodium, 8 scans. En rouge : nitrite de sodium imprégné dans un échantillon, 40 000 scans.... - 66 -
Figure 30 : Impulsion rf (4.6MHz) visualisée grâce à une petite bobine de détection positionnée dans la sonde RQN à la place de l'échantillon. A gauche : impulsion de 10µs (correspondant au premier maximum du signal) pour une puissance de 175W. A droite : impulsion de 100µs (correspondant au premier maximum du signal) pour une puissance de 3W ..... - 66 -
Figure 31 : Spectre RQN ( $^{14}N$) de $NaNO_2$ à 4 .64Hz. A gauche : avec une puissance de sortie de l'émetteur de 175W et une durée d'impulsion de 10µs. A droite : avec une puissance de sortie de l'émetteur de 3W et une durée d'impulsion de100µs. Afin de mettre en évidence les défauts de la ligne de base, on a procédé à 4000 accumulations et appliqué le même traitement aux deux expériences. Fenêtre spectrale : 40kHz. La largeur du pic à mi-hauteur est de l'ordre de 130Hz.On remarquera les déformations de la ligne de base dans le spectre de gauche ..... - 67 -
Figure 32 : Influence du « Left shift » sur le spectre RQN (obtenu après transformée de Fourier du fid). A gauche : spectre brut. A droite : application d'un décalage à gauche de 2 points sur le fid ..... - 68 -

Figure 33 : Influence de la multiplication exponentielle sur l'allure du spectre. A gauche: spectre résultant d'un fid non traité. A droite : spectre résultant d'un fid traité avec une multiplication exponentielle de 50Hz.On notera que l'élargissement du pic (dans le spectre de droite) reste très acceptable ..... - 69 -

Figure 34 : A gauche : Partie réelle après transformée de Fourier, « pic d'absorption ». A droite : partie imaginaire après transformée de Fourier, « pic de dispersion » ..... - 69 -

Figure 35 : Spectre expérimental (en bleu) et théorique (en rouge) obtenu par la méthode NLLS. Le décalage vertical est introduit manuellement pour des raisons de lisibilité - 71 -

Figure 36 : Premiers spectres du nitrite de sodium introduit dans du bois. (En noir, le spectre de l'échantillon de référence de nitrite de sodium avec 8 scans; en bleu, le spectre du nitrite de sodium « neuf » dans le bois avec 40 000 scans ; en rouge, le spectre du nitrite de sodium « ancien » dans le bois avec 40 000 scans ..... - 72 -

Figure 37 : Spectres RQN de l'azote-14 d'échantillons de différentes essences de bois imprégnés avec du $NaNO_2$. A droite : séchage à l'air libre ; à gauche : séchage au séchoir ..... - 75 -

Figure 38 : Spectres RQN de l'azote-14 du $NaNO_2$ à 4.64MHz dans du Sapin. En haut: imprégnation sous vide. En bas : Imprégnation par vide/pression à 15bars. A gauche : séchage à l'air libre, A droite : séchage au séchoir ..... - 77 -

Figure 39 : Influence du mode de séchage sur la cristallisation des molécules et l'humidité du bois ..... - 78 -

Figure 40 : Spectre à 3.305MHz d'échantillons imprégnés avec du HMT. En haut : échantillons imprégnés sous vide. En bas : échantillons imprégnés sous pression. A gauche : séchage à l'air libre. A droite : séchage au séchoir ..... - 79 -

Figure 41 : Spectre du HMT et du $NaNO_2$ après recristallisation d'une solution contenant un mélange des deux produits ..... - 81 -

Figure 42 : Spectre RQN de l'azote-14 du $NaNO_2$ et du HMT dans un échantillon de sapin ayant été imprégné par une solution aqueuse contenant un mélange de $NaNO_2$ et HMT, puis séché selon le protocole P1 ..... - 81 -

Figure 43 : Spectres RQN de l'azote -14 du $NaNO_2$ imprégné dans du Sapin suivant le protocole P1. A gauche : spectres non traités (en bleu). A droite : spectres traités superposés aux spectres de gauche par la méthode NLLS (en rouge) ..... - 85 -

Figure 44 : Processus d'identification du code relatif à un marquage ..... - 87 -

Figure 45 : Constellation des états possibles pour les solutions de codage envisagées ..... - 88 -

Figure 46 : Détermination du code correspondant à un marquage dans le cas où les lettres de ce dernier peuvent prendre n-état ..... - 89 -
Figure 47 :Informations cumulables pour un produit dans l'industrie du bois avec et sans traçabilité. La courbe rouge présente les gains engageables en mettant en œuvre le marquage dans la masse pour l'identification de la parcelle d'origine ..... - 91 -
Figure 48 : Nomenclature divergente de l'industrie du bois avec pour chaque niveau le code servant de référence produit ..... - 92 -
Figure 49 : Les trois approches permettant d'estimer la production dans les scieries ..... - 98 -
Figure 50 : Images de différents systèmes d'acquisition (a : laser +caméra ; b : caméra thermique, c : micro-ondes, d : ultra-sons, e : IRM, f : rayon-X) ..... - 101 -
Figure 51 : Principe de la tomographie (Computed Tomography ou CT) ..... - 101 -
Figure 52 : Détails des trois approches permettant d'anticiper la production ..... - 105 -
Figure 53 : Processus de sciage virtuel : exemple du délignage (cas du bois)..... - 106 -
Figure 54 : Représentation en 3D du PV extrait après l'opération de sciage virtuel ..... - 107 -
Figure 55: Comparaison de deux vues des faces principales d'une planche (en couleur : obtenue grâce à une caméra - en niveau de gris : obtenue par sciage virtuel) ..... - 108 -
Figure 56 : Variations sur le positionnement du plan de coupe par rapport au billon (en rouge le plan de coupe et son repère et en jaune celui du billon)..... - 110 -
Figure 57 : Chaîne d'acquisition et de traitement des images pour l'extraction des singularités et la caractérisation des produits avec un système d'observation ou un opérateur ... - 112 -
Figure 58 : Segmentation des images des produits virtuels sur la base de la donnée de densité. Sur l'image du haut ; en violet : une fente, en jaune, du bois de cœur, en orange, des attaques d'insectes, en vert un nœud. Sur l'image du bas ; En bleu : les régions d'intérêt de faible densité ; En rouge : les régions d'intérêt de forte densité (par rapport au bois sain) ..... - 113 -
Figure 59 : Représentation du système et du caractère monodimensionnel de la décision- 115 -
Figure 60 : Représentation d'une classification et du caractère multidimensionnel de la décision..... - 116 -
Figure 61: Processus de détermination des caractéristiques subjectives du bois ..... - 118 -
Figure 62 : Processus de détermination de la qualité virtuelle par estimation des produits avant usinage..... - 119 -
Figure 63: Influence des critères X et Y sur les valeurs de l'intégrale de Choquet pour des valeurs de $u_t$=0.75 et $u_c$=0.09, avec les capacités obtenues sous la contrainte E (a), les contraintes E et S (b) et les contraintes E, S et I (c) ..... - 127 -

Figure 64 : Représentation du classement pour les différents opérateurs ..... - 132 -
Figure 65 : Représentation d'une variable linguistique décrivant la qualité esthétique du bois. V : Qualité esthétique, X= [0,1], Tv= {Qualité 4, Qualité 3, Qualité 2, Qualité 1, Qualité 0} ..... - 134 -
Figure 66: Fuzzification des mesures de l'esthétique ..... - 136 -
Figure 67 : Représentation de la référence-produit utilisée dans le cadre de ces travaux. - 138 -
Figure 68 : Processus de génération de la nomenclature virtuelle ..... - 139 -
Figure 69: Nomenclature des produits sciés. Il est possible de retrouver le code de la parcelle (code RQN) ainsi que les références produits (dans les carrés en relief). En vert: les produits dont la demande est satisfaite ; en Jaune: les produits dont la demande n'est pas satisfaite ; en rouge : les produits dont la production est trop importante (création de stock) ..... - 142 -
Figure 70 : Processus de validation de la nomenclature virtuelle ..... - 144 -
Figure 71 : Image d'un rondin ayant servi à la validation ..... - 145 -
Figure 72 : Plan de débit appliqué aux billons ..... - 146 -
Figure 73: Images des patrons des produits virtuels étudiés pour la validation ..... - 146 -
Figure 74 : Informations cumulables pour un produit dans l'industrie du bois avec et sans le Virtual Manufacturing. La courbe rouge présente les gains envisageables en le mettant en œuvre pour l'anticipation de la production ..... - 148 -
Figure 75 : Processus global de la partie de la chaîne logistique bois nous intéressant dans le cadre de ces travaux ..... - 156 -
Figure 76 : Page d'accueil du logiciel ..... - 157 -
Figure 77 : Fenêtre de renseignement des informations sur l'échantillon ..... - 158 -
Figure 78 : Fenêtre de paramétrage de la multiplication exponentielle ..... - 159 -
Figure 79 : Fenêtre de paramétrage du « Left shift » ..... - 159 -
Figure 80 : Spectre et ascenseur permettant de réaliser le phasage ..... - 160 -
Figure 81 : Fenêtre permettant de réaliser l'optimisation par NLLS ..... - 161 -
Figure 82 : Résultat de l'optimisation par la méthode NLLS ..... - 162 -
Figure 83 : Fenêtre permettant l'impression et la sauvegarde des spectres ..... - 163 -
Figure 84 : Page d'accueil du logiciel de sciage virtuel ..... - 165 -
Figure 85: Fenêtre d'importation des images tomographiques ..... - 166 -
Figure 86: Fenêtre de définition des produits ..... - 166 -
Figure 87 : Fenêtre permettant de définir les schémas de sciage ..... - 167 -
Figure 88: Fenêtre présentant les résultats du sciage (Produits Virtuels) ..... - 167 -

Figure 89 : Fenêtre permettant de visualiser le produit en 3D ..... - 168 -

***

# Liste des tableaux

Tableau 1: Comparatif des principales solutions de marquage dans l'industrie du bois ..... - 28 -
Tableau 2 : Quelques données sur les propriétés chimiques du $NaNO_2$ ..... - 57 -
Tableau 3: Quelques données sur les propriétés chimiques du HMT ..... - 58 -
Tableau 4 : Imprégnabilité de différentes essences (Norme EN305-02) ..... - 59 -
Tableau 5 : Masses calculées et mesurées sur différents échantillons. Les valeurs d'amplitude sont rapportées à 512 scans. L'échantillon de $NaNO_2$ pur pèse 3,29g et possède une amplitude de 535093 pour 512 scans réalisés. $m_i$ : masse initiale, SI : Séchage initial…… ..... - 83 -
Tableau 6 : Caractérisation des singularités du bois suivant différentes notions [Schmitt, 2007] ..... - 114 -
Tableau 7: Variables utilisées pour l'évaluation de l'impact des singularités ..... - 120 -
Tableau 8: Lot d'apprentissage ..... - 124 -
Tableau 9 : Valeurs des capacités calculées par l'algorithme d'apprentissage (présentées sous la forme de Möbius en annexe E) ..... - 125 -
Tableau 10: Résultats des intégrales de Choquet pour les différentes conditions ..... - 125 -
Tableau 11: Indices de Shapley des critères sous chaque condition ..... - 125 -
Tableau 12: Indices de Murofushi obtenus sous chaque condition ..... - 126 -
Tableau 13: Lot de pièces utilisées pour la comparaison des opérateurs ..... - 131 -
Tableau 14: Résultats et classement des différentes pièces du lot d'essais (CE : classement de l'expert ; QE : qualité esthétique attribuée par l'expert ; dans les parenthèses : mesure de l'esthétique des produits) ..... - 132 -
Tableau 15 : Variables, constantes, contraintes et fonction-coût utilisées ..... - 141 -
Tableau 16 : Extrait des résultats de la détermination des qualités optimales ..... - 142 -
Tableau 17 : Liste des besoins ..... - 172 -
Tableau 18: Liste des Produits Virtuels avec leur qualité virtuelle et optimale ..... - 173 -

***

**Résumé**

La conservation des informations dans les industries dont le processus de transformation est divergent à toujours posé d'important contraintes, et l'industrie du bois n'y manque pas. Les solutions de traçabilité existantes à l'heure actuelle ne permettent pas de conserver ces informations tout au long du cycle de vie du produit bois.

L'objectif de cette thèse est de montrer la faisabilité de deux concepts permettant d'améliorer la conservation de l'information : le paradigme de matière communicante et le paradigme de Virtual Manufacturing. Avec le premier paradigme, il est possible de conserver les informations relatives à l'origine du produit grâce à un marquage chimique introduit dans l'ensemble de la matière que nous identifions par Résonance Quadrupolaire Nucléaire. Dans le deuxième paradigme pour anticipons les caractéristiques biométriques des produits finaux en numérisant la matière et en virtualisant les opérations de transformation. Grâce à cela, il est possible de déterminer, malgré l'imperfection des données et des décisions les caractéristiques des produits.

**Mots Clés**

Pertes d'informations, nomenclature divergente, marquage dans la masse, Résonance quadrupolaire nucléaire, tomographie RX, anticipation production, Virtual Manufacturing, théorie des possibilités.

**Abstract**

Information conservation in the divergent process has always imposed important constraints. In the Wood industry, in which the problem is present, has no solution to conserve information all along the wood life cycle.

This thesis goal is to validate the use of two new paradigms allowing improving the information conservation: the communicating material and the virtual manufacturing. With the first one, the wood material is intrinsically marked with chemical product which can be identify with the Nuclear Quadrupole Resonance and allow conserving the material origin. With the second one, it is possible to anticipate sawmill production by foresee the final product characteristics.

**Key words**

Information loss, Divergent BOM, masse marking, Nuclear Quadrupole resonance, RX Computed tomography (CT), Production foresee, Virtual Manufacturing, Possibility theory.