

PIERRE GOULET

**UTILISATION DE LA SIMULATION DU FLUX
D'UNE SCIERIE POUR DÉTERMINER LES GAINS
EN PRODUCTIVITÉ ASSOCIÉS AU TRIAGE DES
TIGES PAR DIMENSIONS**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences du bois
pour l'obtention du grade de maître en sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORÊT
FACULTÉ DE FORESTERIE ET GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2007

Résumé

Une scierie présente souvent une grande variabilité du niveau de production journalier. Une partie de cette fluctuation est causée par la variation de la dimension de la matière première. Cette variation engendre des problèmes importants de flux du bois. Pensons notamment aux surcharges de pièces à certains centres-machines, alors que d'autres manquent de matériel. Cela occasionne une sous-utilisation du potentiel des équipements de sciage et résulte en une perte de productivité.

Certaines scieries ont implanté des méthodes de triage en forêt selon la dimension des tiges. Les tiges sont séparées en deux ou trois catégories de diamètres. Elles sont empilées séparément dans la cour à bois de la scierie. La scierie est ensuite alimentée en utilisant les empilements en alternance. Cela permet d'exercer un certain contrôle sur la façon dont le bois entre dans la scierie. Toutefois, les gains éventuels de cette façon d'opérer n'ont jamais été documentés ou évalués clairement. Comme le tri des tiges engendre des coûts supplémentaires, il apparaît important d'établir s'il y a un gain de productivité pour la scierie, afin d'évaluer la rentabilité globale de cette opération de triage. L'objectif principal de ce projet est donc d'évaluer les éventuels bénéfices associés à l'utilisation d'une matière première triée selon ses dimensions.

Le logiciel QUEST, un simulateur de procédés manufacturiers par événements discrets, a été configuré pour représenter les aspects concernant le flux des pièces d'une scierie. Auparavant, le logiciel Optitek, un simulateur de débitage, a été mis à contribution pour obtenir des solutions de débitage, propres à la scierie étudiée, pour 255 billes échantillons scannées.

Le design de la scierie a été recréé dans le logiciel QUEST. Les vitesses d'avance des convoyeurs et les vitesses d'alimentation des équipements ont été incluses ainsi que les différentes options de cheminement des pièces dans la scierie. L'efficacité des équipements a été considérée en incorporant la fréquence et la durée des arrêts par machine. De plus, des efforts ont été mis afin de bien cerner et de reproduire, dans le modèle, les décisions

humaines ayant une influence sur le flux des pièces. Un modèle de flux représentant la situation actuelle de la scierie a ainsi été obtenu.

Le modèle a été ensuite modifié afin d'y inclure une étape de tri des tiges selon trois classes de diamètre à hauteur de souche (DHS). Pour gérer la façon dont le bois des différentes classes de dimension est amenée à la scierie, différents indicateurs de l'état du système de production ont été utilisés à tour de rôle. Ces indicateurs sont : le volume moyen des billes écorcées des cinq dernières minutes, le niveau d'occupation des bacs de classement des billes et le volume moyen des tiges tronçonnées. Pour chacun de ces indicateurs, des bornes ont été établies, par essais et erreurs, en vue d'appliquer des recettes d'alimentation à partir des trois catégories de dimension des tiges.

Le modèle de référence, c'est-à-dire celui où il n'y a aucun tri de la matière première, a été utilisé afin de simuler 65 factions de travail. Les résultats ont ensuite fait l'objet d'analyses statistiques afin de vérifier l'existence d'une relation entre le volume de sciage produit dans une faction de travail et certaines variables explicatives. Des équations, obtenues par analyses de régression multiple, ont été établies afin d'exprimer la productivité de la scierie sous l'angle de la production de sciage brut en volume nominal. Les variables explicatives qui ont été retenues dans ces équations sont le volume des billes sciées et les arrêts au poste d'éboutage. De la même façon, le modèle incluant le tri des tiges en trois classes de dimension a été simulé. Des séries de simulations ont été réalisées pour chacune des trois méthodes de contrôle de l'alimentation. Les résultats ont été analysés par régression multiple et des équations exprimant la production en fonction du volume des billes sciées et des arrêts au poste d'éboutage ont été établies.

En comparant les différentes équations de productivité, et ce au même niveau des variables explicatives, il a été possible de vérifier les gains possibles associés au triage des tiges. Il ressort des résultats que le tri des tiges selon leurs dimensions peut améliorer de façon appréciable la productivité de la scierie. Cependant, la méthode utilisée pour contrôler l'alimentation influence de façon très importante les gains.

Table des Matières

Résumé	ii
Table des Matières	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
Introduction	1
Chapitre 1. Revue de littérature.....	4
1.1 Tri de la matière première	4
1.2 Utilisation de la simulation dans l'analyse de la productivité du procédé de sciage.....	7
Chapitre 2. Méthodologie.....	14
2.1 Modélisation de la variabilité de la dimension de la matière première	14
2.2 Modélisation du procédé de débitage	19
2.3 Représentation de la productivité de la scierie	24
2.3.1 Schéma de la scierie et flux du matériel.....	25
2.3.2 Attributs des billes.....	25
2.3.3 Efficacité des équipements	26
2.3.4 Logique d'opération.....	26
2.3.5 Simulation de la situation actuelle avec le modèle de flux.....	27
2.4 Triage des tiges.....	28
2.4.1 Contrôle par le volume moyen aux écorceuses	29
2.4.2 Contrôle par les proportions de billes dans les bacs.....	32
2.4.3 Contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées	33
Chapitre 3. Résultats et discussion	35
3.1 Définition de la productivité pour le cas de référence.....	35
3.2 Résultats obtenus avec le contrôle par le volume moyen aux écorceuses.....	41
3.3 Résultats obtenus avec le contrôle par les proportions des billes dans les bacs.....	43
3.4 Résultats obtenus avec le contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées.....	44
3.5 Discussion sur les différences d'efficacité entre les méthodes de contrôle.....	46
3.6 Discussion des aspects économiques	51
Conclusion.....	54
Bibliographie.....	57
Annexe 1. Distributions de fréquence des DHS des tiges pour les 64 parcelles échantillons.....	62
Annexe 2. Attributs des 255 billes-types	67

Liste des figures

FIGURE 1.	SCHÉMA ILLUSTRANT LE CHEMINEMENT SUIVI POUR REPRÉSENTER LA MATIÈRE PREMIÈRE.....	18
FIGURE 2.	SCHÉMA DES ÉQUIPEMENTS DE LA SCIERIE ET DU FLOT DU BOIS – PARTIE 1	21
FIGURE 3.	SCHÉMA DES ÉQUIPEMENTS DE LA SCIERIE ET DU FLOT DU BOIS – PARTIE 2	22
FIGURE 4.	EXEMPLE D'UN ÉCRAN DE VISUALISATION DE LA SCIERIE MODÉLISÉE AVEC LE LOGICIEL QUEST.	24
FIGURE 5.	PRODUCTION DE SCIAGE PAR FACTION DE TRAVAIL EN FONCTION DU VOLUME MOYEN DES BILLES SCIÉES.	39
FIGURE 6.	VARIATION DU VOLUME MOYEN DES BILLES SCIÉES PAR FACTION DE TRAVAIL	48

Liste des tableaux

TABLEAU 1.	FRÉQUENCE DES CLASSES DE DHS POUR L'ENSEMBLE DES PARCELLES-ÉCHANTILLONS	17
TABLEAU 2.	RECETTES D'ALIMENTATION DE LA SCIERIE AVEC TIGES TRIÉES	31
TABLEAU 3.	MOYENNE ET ÉCART-TYPE POUR LES STATISTIQUES DE PRODUCTION OBTENUES LORS DE LA SIMULATION DE 65 FACTIONS	35
TABLEAU 4.	COEFFICIENT DE DÉTERMINATION PAR CATÉGORIE D'ARRÊT	40
TABLEAU 5.	COMPARAISON DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LE VOLUME MOYEN, PAR FACTION, DES BILLES SCIÉES POUR LES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LE CONTRÔLE PAR LE VOLUME MOYEN AUX ÉCORCEUSES	43
TABLEAU 6.	COMPARAISON DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LE VOLUME MOYEN, PAR FACTION, DES BILLES SCIÉES POUR LES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LE CONTRÔLE PAR LES PROPORTIONS DES BILLES DANS LES BACS.....	44
TABLEAU 7.	COMPARAISON DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LE VOLUME MOYEN, PAR FACTION, DES BILLES SCIÉES	46
TABLEAU 8.	RÉSUMÉ DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS	47
TABLEAU 9.	DURÉE DE PARCOURS DU BOIS DANS LA SCIERIE	49
TABLEAU 10.	VOLUME MOYEN DES BILLES AUX ÉCORCEUSES MESURÉ À 5 MINUTES D'INTERVALLE.....	50
TABLEAU 11.	HYPOTHÈSES POUR DÉTERMINER LA VALEUR DE LA PRODUCTION ADDITIONNELLE.....	51

Introduction

Contrairement à la plupart des domaines manufacturiers, l'industrie du sciage présente une grande variabilité du niveau de production et cela, à l'intérieur d'une même usine. En effet, d'une faction de travail à l'autre, il n'est pas rare de constater des variations appréciables du volume de sciages produit ou du nombre de billes transformées. Une partie importante de ces variations est attribuable aux bris mécaniques des équipements qui provoquent des arrêts de production. Toutefois, une autre partie, moins connue et souvent mal évaluée, est causée par la variation de la dimension de la matière première. Cette variation de la dimension, souvent due aux diverses provenances des approvisionnements de l'usine, se répercute de façon significative sur les lignes de sciages, puisque le flux des pièces dans une scierie est étroitement relié à la dimension de la matière première.

La difficulté d'obtenir un approvisionnement homogène en ce qui concerne les dimensions peut occasionner des problèmes importants de flux du bois dans la scierie. Pensons notamment aux surcharges de pièces à certains centres-machines, alors que d'autres manquent de matériel. Cela engendre une sous-utilisation du potentiel des équipements de sciage et résulte en une perte de productivité. Actuellement, dans la plupart des scieries canadiennes, il y a peu de contrôle sur la manière dont le bois est amené aux lignes de sciage. Les opérateurs des équipements qui vont chercher la matière première dans la cour à bois reçoivent généralement des consignes simples, qui visent surtout une bonne rotation des inventaires de bois rond. De plus, il arrive quelquefois que des ajustements se fassent durant la production et que l'on cherche à équilibrer la distribution de la dimension de la matière première lorsque des effets négatifs se font sentir. La non-disponibilité d'une matière première triée selon ses dimensions est alors souvent une sérieuse limitation. Par ailleurs, le délai de réaction peut s'avérer assez long avant de rétablir l'équilibre dans l'unité de production.

Ces dernières années, certaines usines de sciage ont implanté des méthodes de triage en forêt selon la dimension des tiges. Lors de l'abattage ou de l'ébranchage, les tiges sont séparées en deux ou trois catégories de diamètres. Bien sûr, il ne s'agit pas là d'un tri

parfait et on doit s'attendre à retrouver un recoupement de diamètre entre les catégories. Lorsque ces tiges sont transportées dans la cour à bois de la scierie, les différentes catégories de tiges sont empilées séparément. Il faut alors, pour maintenir un bon flux du bois dans la scierie, alimenter l'usine en utilisant les empilements en alternance. Cela permet d'exercer un certain contrôle sur la façon dont le bois entre dans la scierie. Il faut comprendre que, dans un contexte d'approvisionnement limité en fibres, le but de cette opération est surtout de transformer le volume de bois plus efficacement. La scierie peut, avec cette méthode, maximiser l'utilisation de ses équipements et scier l'approvisionnement disponible dans un laps de temps plus court.

Les scieries, qui ont mis en place des moyens pour exercer ce genre de contrôle sur leur alimentation en bois, ont apparemment noté des gains non négligeables en productivité. Ces gains n'ont toutefois pas été évalués de façon précise. Comme le tri de la matière première engendre des coûts supplémentaires lors des opérations forestières, il apparaît important de quantifier les gains monétaires reliés à un gain de productivité à la scierie, afin d'évaluer la rentabilité globale de cette opération de triage. L'objectif principal de ce projet est donc d'évaluer, à l'aide d'outils de simulation, les éventuels bénéfices associés à l'utilisation d'une matière première triée selon ses dimensions.

Comme second objectif, ce projet vise à explorer diverses méthodes de gestion et de contrôle de l'alimentation en bois des scieries. En effet, il ne suffit pas de séparer le bois en différentes catégories de diamètres pour obtenir des gains de productivité sur les lignes de sciage. Il faut surtout savoir comment utiliser cet avantage pour contrôler le flux de bois et ainsi augmenter la productivité de l'unité de production. La simulation est, là aussi, mise à contribution pour analyser les différentes façons d'alimenter une scierie avec une matière première triée par dimensions.

L'approche par simulation, au lieu d'une méthodologie impliquant des tests réels en usine, a été retenue pour ce projet principalement parce que la productivité d'une scierie est affectée par un très grand nombre de paramètres et qu'il est plus facile de les contrôler de

cette manière. Parmi ces paramètres, certains, comme le design de la scierie, les méthodes de production et les types de produits fabriqués, varient beaucoup d'une scierie à l'autre. D'autres paramètres, tels que les caractéristiques de la matière première et l'efficacité des équipements, sont très variables dans le temps pour une même unité de production. Il devient donc difficile, voire impossible, lors de différents tests en scierie, de faire varier un seul paramètre tout en gardant tous les autres fixes.

Malgré l'existence d'outils de simulation performants, l'utilisation de la simulation du procédé de sciage qui permet d'évaluer le flux du matériel est peu répandue, tant dans l'industrie, dans les centres de recherches que chez les consultants. Une des principales raisons semble être les quantités impressionnantes de données à récolter et la difficulté de les obtenir. On peut donc considérer comme objectif secondaire au projet la compréhension accrue des différents paramètres nécessaires pour réaliser des simulations du flux dans les scieries et l'importance relative de chacun de ces paramètres sur la fiabilité des résultats obtenus.

Chapitre 1. Revue de littérature

1.1 Tri de la matière première

Contrairement à certaines pratiques européennes, le triage des billes, en Amérique du Nord, a rarement pour objectif de fabriquer des produits particuliers. Dans l'Est du Canada, où il est courant de trier les billes selon leur diamètre après écorçage, le triage est fait avant tout pour maximiser la productivité (Forintek Canada Corp 2001). Depuis plusieurs années, les usines typiques de l'Est du Canada possèdent deux lignes de production. Une première ligne sert à transformer le bois de petite dimension (ligne de petit bois), alors que la seconde est dédiée au débitage du bois de plus forte dimension (ligne de gros bois).

La ligne de petit bois transforme des billes généralement courtes (8 à 10 pieds) et de diamètre au fin bout inférieur à huit pouces. Ces lignes de sciage comprennent souvent des machines équipées de têtes équarrisseuses. Or, ces équipements sont particulièrement productifs lorsqu'ils fonctionnent sur de longues périodes de temps sans changement d'ouverture des têtes. À cet effet, la pratique de tri des billes par classe de diamètre amène des augmentations de productivité, puisque le nombre d'ajustements des scies et des têtes des équarrisseuses s'en trouve réduit (Dobie 1970). Le tri des billes par diamètre permet de débiter des lots de billes qui ont un diamètre semblable de façon continue en minimisant l'espacement entre chaque bille sans avoir à arrêter la ligne de sciage pour ajuster les têtes et/ou les scies (Porter 1972).

La ligne de gros bois, pour sa part, est souvent constituée, au débitage primaire, d'un ensemble qui comprend des têtes équarrisseuses et une scie à rubans jumelés. Cette ligne peut fonctionner comme pour la ligne de petit bois, en mode de débitage par lots de billes ayant un diamètre semblable, si la capacité de triage des billes est suffisante pour séparer chaque patron de débitage dans différentes zones d'accumulation. Si ce n'est pas le cas, le débitage se fera en mode « bille à bille », où le patron de débitage pourra être changé à chacun des billots.

Le concept de classement des billes par diamètre à la scierie semble être d'origine suédoise. Jones (1956) décrit les premiers systèmes utilisés en Suède pour trier les billes. Ces systèmes combinent des mesures manuelles et des contrôles mécaniques ou électroniques. Un opérateur mesure manuellement chaque bille après écorçage et lui appose un code indiquant le diamètre. Ensuite, les billes sont dirigées sur un convoyeur, où un autre opérateur observe le code indiqué et active un levier qui déclenche mécaniquement un déflecteur, ce qui envoie la bille dans la pile de bois correspondante. Dans une variante plus sophistiquée, le second opérateur appuie sur un bouton correspondant au diamètre de la bille qui passe devant lui et le système électronique actionne le mécanisme du déflecteur approprié lorsque la bille arrive vis-à-vis de la bonne pile de bois.

Au début des années 60, en Suède, les systèmes de scannage électronique font leur apparition dans les scieries. Ils servent à mesurer la géométrie de la bille (diamètre et longueur). Cette information est utilisée pour effectuer le mesurage du bois à des fins d'achat et aussi pour séparer les billes par classes de diamètres (Williston 1988). Aujourd'hui, en Scandinavie, la pratique courante est de tronçonner en forêt les arbres en billes de longueur finale. Ces billes sont classées selon leur diamètre au fin bout et amenées à la scierie. Ensuite, la façon typique d'alimenter la scierie est de scier des lots importants de billes de même classe de diamètre avec un patron de débitage unique (Jäppinen, Nylinder 1997).

Du côté nord-américain, J. H. Porter décrit, en 1972, les nouveaux systèmes de l'époque pour le classement des billes. Il mentionne que cette opération consiste à diviser, par catégories de diamètre, les billes arrivant dans la scierie. Bien que l'opération de triage puisse être faite avec une certaine précision par un opérateur qui évalue à l'œil la dimension des billes, le triage des billes par dimensions n'est efficace que lorsque des systèmes de classement mécanique automatique à haute vitesse sont utilisés.

Ces systèmes de classement par diamètre sont conçus pour des billes se déplaçant une derrière l'autre selon leur axe longitudinal. Le classement se fait généralement après l'étape d'écorçage. Il est souvent souhaitable que les billes soient amenées dans un espace d'accumulation avant d'être transférées une à une sur la ligne de classement. Cette ligne de classement consiste simplement en un convoyeur qui transporte les billes longitudinalement à travers un système de scannage permettant de mesurer la bille. Un système d'éjection des billes, généralement pneumatique, s'occupe d'envoyer la bille dans le transfert d'accumulation correspondant à la plage associée de diamètre.

Au Québec, le tri par diamètre est devenu populaire lorsque le diamètre moyen des billes à transformer a diminué. À partir de la décennie 1970, bien des scieries québécoises ont amélioré leur rendement en classant les billes d'après leur dimension. Il faut dire que, même si à l'époque le débitage primaire n'était pas automatisé et optimisé, cette façon de faire éliminait ou du moins réduisait les erreurs de jugement de l'opérateur de la scie de tête puisqu'elle réduisait, pour un lot de billes, les différents choix d'ouvertures de scies. (Pnevmaticos et al. 1981).

En ce qui concerne le tri de la matière première en fonction de la qualité, la technologie de la tomographie est de plus en plus étudiée afin d'être appliquée au bois. Les scanners de ce type permettent de visualiser les défauts internes des billes dont, entre autres, les noeuds. Leur application industrielle dans les scieries n'est cependant pas pour demain, puisque cette technologie est très coûteuse et qu'elle n'offre pas encore la productivité requise par les lignes de sciage modernes. En attendant que cette technologie soit implantée dans les usines de sciage, des études, au cours de la dernière décennie, ont cherché à développer des méthodes pour trier les billes avec des scanners optiques conventionnels non seulement au chapitre des dimensions mais aussi sur le plan de la qualité en reliant les caractéristiques externes géométriques des billes à leurs défauts internes (Grace 1993, Jäppinen et Nylinder 1997). À cet égard, la morphologie interne des noeuds, modélisée à partir de mesures externes, est un des aspects intéressants qui a été étudié (Lemieux et al. 2002). L'aspect du tri en fonction de la qualité des billes déborde toutefois le cadre de la présente étude.

Depuis quelques années, au Canada, des opérations de triage du bois sont effectuées dès l'étape de la récolte en forêt. On sépare alors le bois en différents types de produits, selon des critères d'essence et de longueurs de bille. De façon moins répandue, certaines compagnies forestières font également un tri grossier par diamètre de tige ou de bille. Cette tendance s'est accrue avec la venue des systèmes de récolte par bois tronçonnés utilisant des abatteuses multifonctionnelles. Ces machines, qui sont de plus en plus répandues, effectuent directement sur le parterre de coupe de façon successive les opérations d'abattage, d'ébranchage et de tronçonnage des tiges, afin d'obtenir des billes façonnées à leur longueur finale. La séparation en différents produits lors des opérations de récolte comporte un coût additionnel, principalement occasionné par la baisse de productivité des machines, qui doivent ajouter une phase de tri à leur cycle de travail (Gingras 1996).

1.2 Utilisation de la simulation dans l'analyse de la productivité du procédé de sciage

Tel que mentionné précédemment, le tri des billes, par diamètre, à la scierie est une pratique courante dans l'industrie du sciage. Par contre, le tri des tiges par classes de diamètre en vue de les transformer de façon plus productive ne semble pas avoir été une pratique très répandue jusqu'à maintenant. La revue de littérature à ce sujet ne nous a pas permis de trouver des études ayant eu cet objet. Le but de la présente étude étant de quantifier les bénéfices du triage de la matière première sur le plan de l'augmentation de la productivité à la scierie, il a fallu s'intéresser à la façon par laquelle pourraient s'effectuer les comparaisons entre scier du bois non trié et scier du bois trié. L'approche qui semblait la plus prometteuse était d'utiliser la simulation. Les paragraphes suivants traitent donc de l'utilisation d'outils de simulation informatique à des fins d'analyse du procédé de sciage.

La productivité d'une scierie est affectée par un très grand nombre de paramètres. Parmi ceux-ci, il y a le design de la scierie, les caractéristiques de la matière première qui y est débitée, les méthodes de production, les types de produits fabriqués et l'efficacité des équipements. Tous ces paramètres, et en particulier le design de l'unité de production, varient beaucoup d'une scierie à l'autre. Même pour une unité de production donnée, bien

que certains paramètres demeurent fixes, d'autres variables fluctuent dans le temps. Il est donc plutôt ardu, voire impossible, d'établir des équations donnant la productivité à partir d'observations ou de tests ponctuels faits en usine, puisque les données sont prises dans des conditions différentes.

Pour ces raisons, l'approche par simulation des procédés a été retenue pour la présente étude. Ce type de simulation permet de recréer le procédé de débitage en tenant compte des aspects spatio-temporels, c'est-à-dire des notions de mouvement des entités à l'intérieur d'un espace bien défini qu'est la scierie. L'effet des événements aléatoires, tels que les bris d'équipement, est considéré au fur et à mesure que ces événements se produisent. Il est ainsi possible de connaître l'état du système simulé à n'importe quel moment. Il devient alors plus aisé de contrôler les niveaux des paramètres qui définissent le système et de comparer l'effet des variations de ces paramètres.

Il y a, depuis longtemps, dans tous les secteurs manufacturiers, un besoin en outils permettant d'analyser le système de production dans le but d'utiliser de façon optimale les ressources (matérielles, humaines, financières et cognitives). Dans le domaine du sciage, la gestion de la production requiert le maintien d'un équilibre entre plusieurs variables reliées entre elles, telles que la qualité des approvisionnements en matière première, les prix de vente, le personnel, les équipements.

Les différentes techniques d'analyse de systèmes de production (aussi connues sous l'appellation « techniques de recherche opérationnelle ») sont utilisées dans le domaine des industries forestières depuis le milieu des années 1950 (Holmes 1976). Parmi ces techniques, la programmation linéaire (PL) a été largement populaire dans les années 1960 et 1970. La programmation linéaire est un outil purement mathématique qui cherche à maximiser un système d'équations selon certains critères. La première application répertoriée de la PL dans le secteur de la transformation du bois remonte à 1957 pour une usine de contreplaqué (Sampson 1979). Sampson relève les limites majeures des modèles de PL lorsqu'ils sont appliqués à l'étude des procédés de transformation du bois. Il

mentionne l'incapacité d'introduire des événements aléatoires, comme l'ordre d'arrivée des billes et les arrêts de production causés par les pannes des équipements. Il propose d'utiliser un modèle de simulation qui inclut ces aspects aléatoires ainsi que des contraintes de capacité des zones d'accumulation entre les équipements. Son modèle de simulation fonctionne à partir de l'information générée par un modèle de PL. En fait, il sert à vérifier si la solution du modèle de PL n'est pas limitée par des contraintes additionnelles. Une des limites importantes du modèle de Sampson demeure que les résultats de production de sciage proviennent d'hypothèses de rendements fixes moyens par classe de diamètre des billes.

Une autre technique d'analyse, la simulation des systèmes, est utilisée depuis plusieurs années. Avec le temps, elle a gagné en popularité, principalement depuis les années 1980 qui ont vu un développement important des capacités des ordinateurs et l'introduction graduelle de ces derniers dans les usines et les bureaux des responsables de la production. Dans le domaine du sciage, les premiers efforts de simulation ont d'abord porté sur la modélisation du débitage, c'est-à-dire sur la façon de représenter la transformation des billes en différents produits (sciages, copeaux et sciures). Au fil des années, plusieurs modèles informatiques de débitage du bois ont vu le jour et, avec les progrès de l'informatique, ces modèles se sont sans cesse améliorés et raffinés. Parmi ceux-ci, mentionnons le programme « BOF » (Best Opening Face) développé par Hallock et Lewis (1971). Ce programme, populaire dans les milieux universitaires américains des années 1970, présentait le désavantage de se baser sur une représentation de la matière première se limitant à des troncs de cône, ce qui rendait les résultats de rendement en sciage souvent éloignés de la réalité. D'autres modèles ont ensuite utilisé une représentation plus réaliste des billes. Le logiciel SAWSIM, développé par la compagnie HALCO dans les années 1970, est un simulateur de sciage commercial très connu et utilisé au Canada et aux États-Unis. Il utilise une représentation de billes à l'aide de listes de sections elliptiques. Ce simulateur, utilisé par de grandes compagnies forestières et par des consultants dans le domaine du sciage, est reconnu comme un outil adéquat pour bien représenter les méthodes de débitage et fiable dans les résultats obtenus. Dans les années 1990, Forintek, l'institut canadien de recherche sur les produits du bois, a développé un logiciel de simulation du

débitage nommé Optitek (Mongeau et Grondin 1992, Grondin et Drouin 1995). Utilisant aussi des listes de sections elliptiques pour représenter la matière ligneuse, Optitek a innové en prenant une approche plus conviviale qui permet à l'utilisateur une configuration flexible de tous les éléments du débitage (matière première, produits, équipements) tout en ne sacrifiant pas la polyvalence et la précision pour bien représenter le procédé de sciage. Récemment, des ajouts au logiciel ont permis d'intégrer des représentations de la matière première plus proche de la réalité en la définissant avec des sections polygonales concaves provenant de scanners au laser.

Bien d'autres modèles informatiques simulant le débitage du bois ont été créés par différents groupes de chercheurs dans les milieux académiques ou au sein des compagnies de sciage. Cependant, bien que certains d'entre eux fournissent, parmi leurs résultats, un dénombrement de pièces produites par centre-machine, les notions de temps de débitage et de capacité des équipements ne sont pas réellement prises en compte dans ces modèles. On fait face ainsi à des limites importantes lorsqu'on veut utiliser ces modèles de débitage pour analyser le procédé de sciage dans son ensemble. Un exemple typique de ces limitations est la faisabilité d'un patron de débitage qui, en théorie, peut présenter des rendements intéressants mais qui, en pratique, amène une surcharge de pièces à déligner, ce qui a pour effet de nuire à la productivité globale de la scierie. Ce genre de problème peut passer inaperçu si l'on se fie strictement aux résultats des simulations obtenus par un modèle de débitage purement géométrique.

Dans la décennie 70 et les suivantes, un certain nombre de travaux ont porté sur la modélisation du flux des pièces de bois et sur des modèles s'intéressant au design des scieries. Ces modèles incluent une notion de temps et tiennent compte des événements aléatoires qui peuvent survenir durant le procédé, tels que les arrêts de production causés par un bris d'équipement. Aune (1974, 1977) propose un système de simulation servant à l'analyse de la productivité des scieries. Il expose les principes de base de la simulation de flux ainsi que les données, propres aux scieries, requises pour réaliser une simulation. Son modèle comprend deux composantes distinctes, soit un module comprenant la logique du procédé de transformation des billes et un autre qui contient la logique contrôlant la

simulation des évènements dans le temps. Son simulateur, baptisé MILLSIM, utilise le langage GASP II, un langage de simulation par évènements discrets écrits en Fortran. Le chercheur reconnaît à son modèle trois limites importantes reliées à des hypothèses simplificatrices. Premièrement, la représentation de la matière première est simplifiée, car les tiges et les billes sont définies comme des troncs de cône. Deuxièmement, le système de priorité des évènements ne permet pas de diriger le flot des billes selon des conditions dynamiques du système. Par exemple, il n'est pas possible d'envoyer les billes sur une autre ligne de sciage que celle prévue initialement, même si celle-ci est surchargée. Troisièmement, les taux de productivité des équipements sont basés sur des moyennes et ne tiennent pas compte de la réaction à la pression par les opérateurs lors d'une surcharge de travail. On peut ajouter, comme autre limite du modèle, que la simulation du débitage semble se baser sur des hypothèses de base simplifiées, en utilisant des tables fixes de rendement. L'auteur mentionne d'ailleurs que son modèle pourrait être amélioré en utilisant des solutions calculées antérieurement par SAWSIM, afin de tenir compte d'une représentation plus adéquate de la matière première.

Carino et Bowyer (1979) utilisent un modèle faisant appel à une technique d'optimisation mathématique combinée à l'utilisation de la théorie des files d'attente pour s'attaquer à la simulation du flux de matériel. Leur modèle ne contient pas de notion de débitage comme tel. Il ne considère pas les rendements matières en fonction des caractéristiques de la matière première. Le modèle fonctionne plutôt à partir d'objectifs de production fixés par l'utilisateur. Wagner (1983) utilise le langage SLAM, adapté pour la création de modèles à évènements discrets, afin de simuler la production d'une scierie de pins du Sud (Southern yellow pine). À cet effet, il expose une méthodologie pour modéliser une scierie en matière de flux de matériel. Il démontre également les utilisations potentielles d'un tel modèle en tant qu'outil de gestion. La production de sciage est, dans ce cas, fonction de certaines caractéristiques des billes (diamètre, longueur, qualité). La génération de pièces de sciages est déterminée à partir de données tabulées qui proviennent de registres de production de la scierie. Adams (1984), pour sa part, propose DESIM, un modèle servant à la simulation et au design de scieries de feuillus. Ce modèle, qui utilise un langage adapté à la simulation de systèmes (GASP IV), modélise le comportement des équipements et de la circulation du

matériel. Il demeure cependant limité par le simulateur de débitage utilisé, soit celui développé par Airth et Calvert (1973). En effet, ce simulateur, adapté au débitage du bois sur chariot, considère les billes comme des troncs de cônes et demeure imprécis dans ses résultats. Randhawa et al. (1994) ont de leur côté développé un langage de simulation basé sur un environnement de programmation orienté-objet et adapté à la représentation du flux de matériel dans une scierie. La logique du procédé de débitage qui est intégré est fournie par le programme BOF.

Ces différents modèles, bien que répondant à des besoins d'analyse du procédé de débitage, présentent de sérieuses limitations. En effet, les rendements en sciage proviennent soit de tables de rendement moyen par classes de diamètre de billes, soit de fonctions de débitage très simplifiées qui considèrent la matière première comme des troncs de cône. Pour contourner ces lacunes, une approche différente, s'effectuant en deux phases distinctes, a été utilisée par certaines personnes pour simuler le flux de bois dans une scierie. La première phase consiste à obtenir, à l'aide d'un simulateur de débitage, des résultats réalistes et précis sur le plan de la production de pièces pour chaque bille de l'échantillon représentant l'approvisionnement de la scierie. Dans la deuxième phase, un modèle de flux sert à simuler la scierie en tant que système manufacturier en tenant compte des aspects liés à la productivité (capacité des équipements, vitesses, pannes et autres événements aléatoires). Le modèle de flux sert donc à prendre en charge les notions de temps et d'espaces physiques. Il utilise les résultats de débitage obtenus dans la première phase pour générer le bon nombre de pièces à chacun des postes de transformation. Orbay (1984), dans sa thèse de doctorat, se sert de cette approche. Il analyse le rendement en sciages et la productivité d'une scierie de la côte ouest de la Colombie-Britannique avec ce qu'il appelle un modèle hybride de simulation qui combine le simulateur de débitage commercial SAWSIM et FLOWSIM, un modèle de simulation du flux bâti par Orbay. Les résultats des simulations de débitage réalisées avec SAWSIM servent à alimenter le modèle de flux qui, lui, est bâti à l'aide de GPSS (General Purpose Simulation System), un langage de programmation conçu pour les simulations à événements discrets. Le modèle dynamique résultant est nommé FLOWSIM. Pour sa part, Verret (1997) utilise aussi l'approche en deux phases, pour représenter une usine de sciage de bois résineux, en générant d'abord des

solutions de débitage avec le simulateur Optitek. Les solutions obtenues sont ensuite fournies au logiciel de simulation d'évènements discrets SIMAN. Les résultats obtenus semblent satisfaisants et, bien que la scierie représentée soit assez rudimentaire, le principe d'utiliser deux phases y est bien démontré.

À l'heure actuelle, cette approche en deux phases successives apparaît comme étant la meilleure pour modéliser une scierie car il n'y a pas, à notre connaissance, de simulateur qui intégrerait rigoureusement les aspects « débitage » et « flux ». Il est toutefois à se demander s'il y a nécessité de développer de tels simulateurs intégrés puisque la simulation en deux phases permet d'utiliser des modèles très performants dans leur domaine respectif.

Les langages de programmation adaptés à la simulation de flux de matériel ont grandement évolué au cours des deux dernières décennies. En effet, ces langages sont devenus des simulateurs avec des fonctions permettant à l'utilisateur, à l'aide d'interfaces conviviales, de bâtir assez rapidement une représentation du flux de matière de l'unité de production étudiée. Des logiciels comme SIMAN et QUEST, deux logiciels commerciaux de simulation par évènements discrets, offrent une grande flexibilité en permettant à l'utilisateur de modifier les routines et les logiques préétablies pour les adapter à leur situation. Ces logiciels permettent aussi de faire des animations graphiques de plus en plus poussées, ce qui donne la possibilité de voir les entités se déplacer lors de la simulation du système. Ils ont également une panoplie d'outils statistiques pour analyser les résultats des simulations.

Pour la présente étude, l'approche en deux phases a donc été retenue. Le logiciel Optitek a été utilisé pour la simulation du débitage et le logiciel QUEST a été mis à contribution pour la représentation du flux.

Chapitre 2. Méthodologie

L'obtention d'un modèle représentatif de l'unité de production choisie et sensible aux variables affectant la production est primordiale avec l'approche par simulation. Pour ce faire, nous avons choisi un logiciel de simulation de procédés manufacturiers qui porte le nom de QUEST¹. Ce simulateur permet une modélisation de l'unité de production en tenant compte de son design, des capacités des différentes machines et des interactions entre le matériel qui circule et les différentes parties du système de production. QUEST offre une animation graphique en 3D très réaliste, ce qui donne la possibilité de vérifier rapidement et visuellement le fonctionnement du modèle.

Cependant, puisqu'il s'agit d'un simulateur général et adaptable à tout type d'industrie manufacturière, QUEST ne contient aucune logique du procédé de débitage lui-même. Il a donc fallu utiliser le logiciel Optitek, le simulateur de débitage développé par Forintek, pour modéliser le procédé de débitage. Le fonctionnement des logiciels QUEST et Optitek ainsi que leur utilisation dans le cadre de la présente étude sont détaillés plus loin dans cette section.

2.1 Modélisation de la variabilité de la dimension de la matière première

La scierie ayant servi pour l'étude est la scierie de bois de dimension de la compagnie Abitibi-Consolidated du secteur Outardes, située sur le territoire de Baie-Comeau. La matière première en provenance de la forêt arrive sous deux formes distinctes dans la cour à bois de la scierie. Premièrement, elle se présente sous la forme de tiges entières, qui sont tronçonnées dans un système transversal effectuant le tronçonnage des tiges en billes de longueurs nominales de 16 pieds. La seconde forme que prend la matière première est celle de billes non écorcées, provenant des coupes en forêt faites par les abatteuses

¹ QUEST est un acronyme pour « *QUEuing Event Simulation Tool* »

multifonctionnelles. Puisque la matière première à transformer arrive dans la scierie à la fois sous forme de tiges et de billes, les entités qui se déplacent dans le modèle de flux doivent être, au départ, soit des tiges, soit des billes.

Une des difficultés de l'étude résidait dans l'obtention d'information sur les dimensions de la matière première entrant à la scierie. Dans cette scierie, comme dans beaucoup d'autres scieries nord-américaines, il n'y a pas de système de mesurage des tiges au tronçonnage. Il n'y a pas non plus de système de mesurage pour les billes déjà tronçonnées qui entrent dans l'usine. Les seules données disponibles sont celles mesurées par les scanners après l'écorçage des billes, mais il n'est alors plus possible de faire la distinction entre les billes qui proviennent des tiges et celles qui proviennent des billots tronçonnés.

Il était très important de recréer dans le modèle la variation continue de la dimension des tiges et des billes amenées à la scierie. Cette variation est à la base de l'étude. On cherche en effet à déterminer les conséquences, sur la productivité, de la réduction des écarts de dimensions des billes d'une faction de travail à l'autre ou à l'intérieur d'une même faction, en contrôlant davantage l'alimentation en bois. Pour modéliser cette variation, on ne pouvait pas se baser sur une distribution de fréquence de diamètre des tiges qui représentait une moyenne sur une trop grande période de temps. Par exemple, l'utilisation de distributions de fréquence de diamètres couvrant une période d'un mois ou d'une année n'aurait pas permis de reproduire les effets ponctuels d'une augmentation importante mais momentanée de la grosseur des tiges transformées. Par conséquent, la variabilité de la matière première a été représentée à l'aide de données de mesurage de parcelles-échantillons dans les empilements de la cour à bois destinés à la scierie. Ces données sont constituées de distributions de fréquence des diamètres à hauteur de souche (DHS) des tiges contenues dans chaque parcelle-échantillon.

Ces parcelles servent aux fins d'inventaire des stocks de bois rond dans la cour à bois de l'usine. Des mesures y sont prises régulièrement durant l'année. Soixante-quatre parcelles, totalisant 2 452 tiges, qui proviennent de mesures effectuées par les mesureurs de la scierie

durant les mois précédant l'étude, ont été considérées. Chaque parcelle contient entre 25 et 60 tiges. Nous avons ainsi obtenu soixante-quatre différentes distributions de fréquence de diamètre. Pour représenter la variabilité de la dimension des tiges qui entrent dans la scierie, on prend comme hypothèse que la variabilité qui existe dans les données d'inventaire entre chaque parcelle de la cour à bois est représentative de la variabilité de l'approvisionnement habituel de l'usine. Le tableau 1 donne l'information sur la fréquence de chaque classe de DHS en nombre et en pourcentage pour l'ensemble des parcelles-échantillons. La moyenne de cette distribution représente un diamètre de 19,9 cm. On retrouvera, à l'annexe 1, les distributions détaillées des 64 parcelles. Mentionnons que parmi les 64 parcelles, la classe moyenne de DHS varie entre 16 et 24 cm.

Des mesures sur 152 tiges échantillons, provenant d'études d'arbres, fournissent l'information de base pour représenter l'approvisionnement en tiges sous l'angle des diamètres et de la longueur. Ces études d'arbres, fournies par le service de mesurage de la scierie, ont été réalisées sur des camions choisis aléatoirement parmi les camions livrant des tiges à la scierie lors de leur arrivée. Normalement, selon la procédure interne de la compagnie Abitibi-Consolidated, secteur Outardes, douze tiges échantillons par voyage sont mesurées. Les feuillets de mesurage des études d'arbres procurent de l'information sur l'essence et la classe de diamètre sous écorce à tous les mètres le long de la partie marchande de la tige. La fin de la partie marchande est déterminée selon les normes de mesurage du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec et la partie non marchande est également mesurée jusqu'au bout de la tige.

À partir de ces feuillets de mesurage, il a été possible d'anticiper, pour chacune des 152 tiges échantillons, les résultats du tronçonnage, à savoir le nombre de billes obtenues, la longueur des billes et les diamètres au fin bout et au gros bout des billes. Les diamètres des billes ainsi obtenues sont exprimés par classes de 2 cm. Ces renseignements ont servi à faire le lien avec un lot de billes scannées à la scierie. En effet, afin de travailler avec une représentation de la matière première la plus précise possible, nous avons profité des installations de scannage de la scierie et on a ainsi recueilli les données de mesurage, prises par des scanners 2 axes, sur un lot de 233 billes. Les données recueillies incluent donc la

courbure et permettent une représentation tridimensionnelle de la matière première. Chaque bille est cataloguée selon une catégorie (ou type) définie par sa longueur et par ses classes de diamètre fin bout et gros bout.

Tableau 1. Fréquence des classes de DHS pour l'ensemble des parcelles-échantillons

Classe de DHS (cm)	Nombre de tiges	Proportion en nombre
6	2	0,08 %
8	2	0,08 %
10	85	3,47 %
12	217	8,85 %
14	200	8,16 %
16	241	9,83 %
18	402	16,39 %
20	367	14,97 %
22	286	11,66 %
24	238	9,71 %
26	148	6,04 %
28	111	4,53 %
30	61	2,49 %
32	39	1,59 %
34	20	0,82 %
36	12	0,49 %
38	3	0,12 %
40	9	0,37 %
42	1	0,04 %
44	1	0,04 %
48	7	0,29 %
TOTAL	2 452	100,00 %

Les étapes suivies par le modèle pour représenter la matière première arrivant sous forme de tiges sont décrites ci-après et sont schématisées à la figure 1. Premièrement, une distribution est choisie, au hasard, parmi les 64 distributions de fréquence par classe de DHS provenant des parcelles-échantillons. Il s'agit d'un point de départ. Après chaque période de temps simulé de 240 minutes, une durée qui a été déterminée arbitrairement, on

changera de distribution. La distribution de fréquence sert à déterminer la classe de DHS de chaque tige créée par le modèle. Ensuite, on choisit aléatoirement une des 152 tiges-échantillons pour lesquelles on possède les données de mesurage d'études d'arbres et qui a la même classe de DHS que celle déterminée précédemment. À l'intérieur d'une même classe de DHS, chaque tige-échantillon a des chances égales d'être choisie. L'essence des tiges n'est pas considérée dans le modèle.

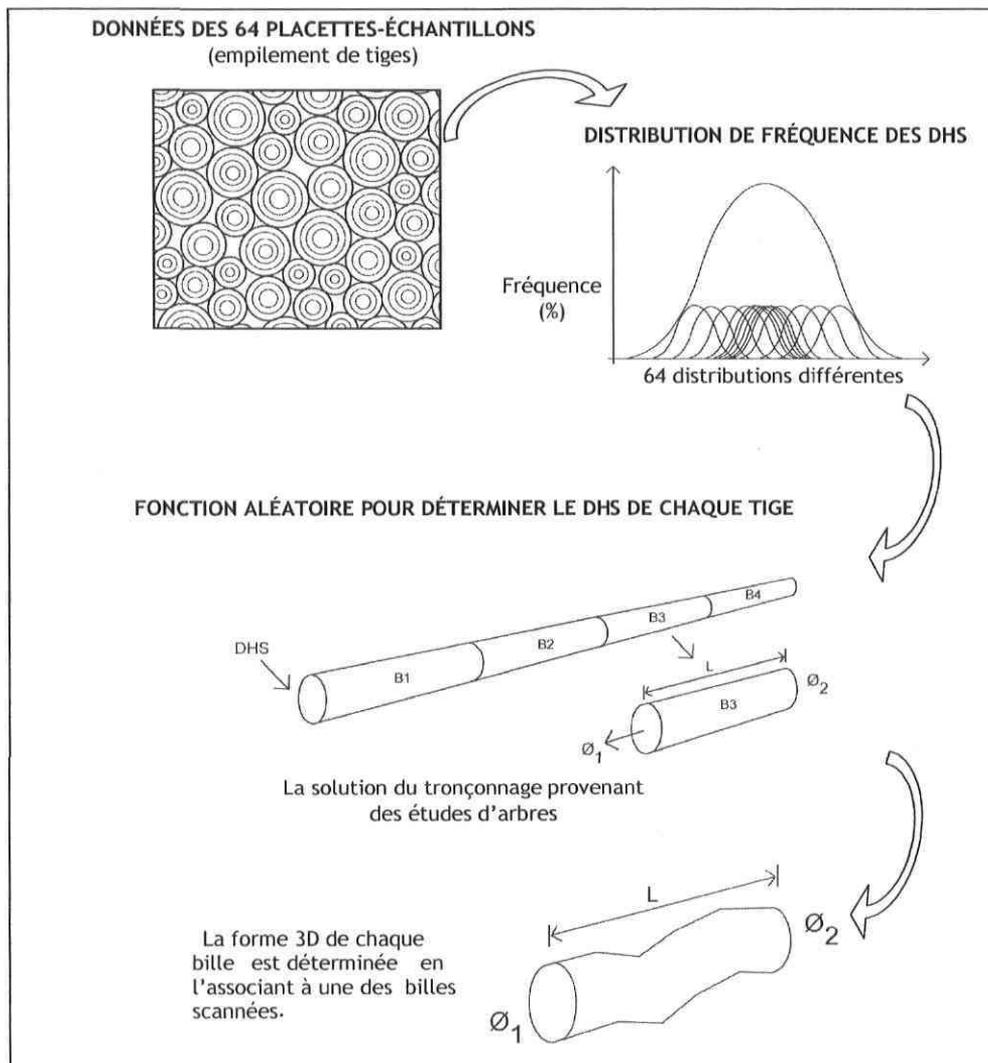


Figure 1. Schéma illustrant le cheminement suivi pour représenter la matière première

Puisqu'on connaît, pour chaque tige-échantillon, la solution de tronçonnage déterminant le nombre et les caractéristiques des billes obtenues, on associe à chaque tige les types de billes correspondantes. On utilise 255 types différents de billes pour couvrir autant les billes qui proviennent du tronçonnage des tiges que celles provenant directement de billes déjà tronçonnées. Ces 255 types de billes correspondent en fait aux 233 billes scannées à la scierie, auxquelles on a ajouté 22 autres billes, récupérées d'une étude antérieure réalisée par l'auteur dans une scierie de la même région. L'ajout de ces billes s'est avéré nécessaire afin de couvrir l'ensemble des catégories de billes. Une solution de débitage a ensuite été obtenue avec le simulateur de débitage pour chacune des 255 billes.

En ce qui a trait à l'arrivée des billes déjà tronçonnées en forêt, il a été possible d'estimer la variation des dimensions en se basant sur des données de distribution de fréquence de diamètre au fin bout des billes. On a utilisé pour cela les données recueillies par l'un des scanners de billes écorcées pour lequel aucune bille provenant du tronçonnage de tiges n'y passait. Les distributions de fréquence de diamètre sont utilisées par le modèle pour déterminer aléatoirement un diamètre fin bout. On y associe ensuite un type de bille parmi les 255 types de bille.

2.2 Modélisation du procédé de débitage

Des données ont été prises à la scierie afin de modéliser, avec le simulateur de débitage Optitek, le procédé de débitage de la scierie. Les données servant d'intrants à Optitek se divisent en trois catégories, à savoir la description de la matière première, la description des produits fabriqués et la description du procédé de débitage. Pour ce qui est de la matière première, tel que nous l'avons mentionné précédemment, elle est modélisée en utilisant directement les données recueillies par les scanners de bille mises sous un format

informatique, propre à Optitek, qui conserve l'intégralité des données fournies par le format du manufacturier.

En ce qui a trait à la description des produits, un fichier est construit avec les dimensions cibles des pièces sciées ainsi que leur dimension nominale correspondante et ce pour toutes les épaisseurs, les largeurs et les longueurs de pièces produites. Des règles de classification sont aussi définies en tenant compte des restrictions de flache que la scierie impose pour chacune des qualités de sciage produites. Une liste de tous les produits existants est ensuite créée en combinant les épaisseurs, largeurs, longueurs et règles de classification. Finalement, une valeur monétaire est ajoutée à chaque produit.

La dernière étape, et non la moindre, de la modélisation avec Optitek est la description du procédé de sciage. Cette étape consiste à représenter les différents postes de transformation que la matière première doit traverser. Les paragraphes suivants fournissent une description détaillée des équipements de sciage et de leur agencement dans l'usine. On s'attarde surtout aux aspects qui affectent les solutions de débitage. Les figures 2 et 3 schématisent les équipements et le flot du bois. Les chiffres entre parenthèses dans la description suivante font référence aux chiffres qui apparaissent sur les schémas.

La scierie a une entrée pour les tiges (1) et deux entrées pour les billots tronçonnés en forêt (2 et 3). Les tiges représentent environ 80 % du volume de bois rond transformé. Elles sont tronçonnées par un système de scies fixes espacées pour produire des billes de 16 pieds de longueur nominale. Chaque bille est ensuite dirigée vers l'une des cinq écorceuses. Il y a trois écorceuses de 17 pouces et deux autres de 24 pouces. À la sortie de chaque écorceuse, un système de scanneur à un axe détermine la destination de chaque bille. Certaines billes, jugées de trop faible dimension, sont dirigées vers l'extérieur (4) de la scierie pour être transformées à l'usine de colombage adjacente. Les autres billes sont envoyées vers l'une des deux lignes de sciage, selon leur diamètre de sélection. Chacune des deux lignes de sciage dispose de cinq bacs de classement.

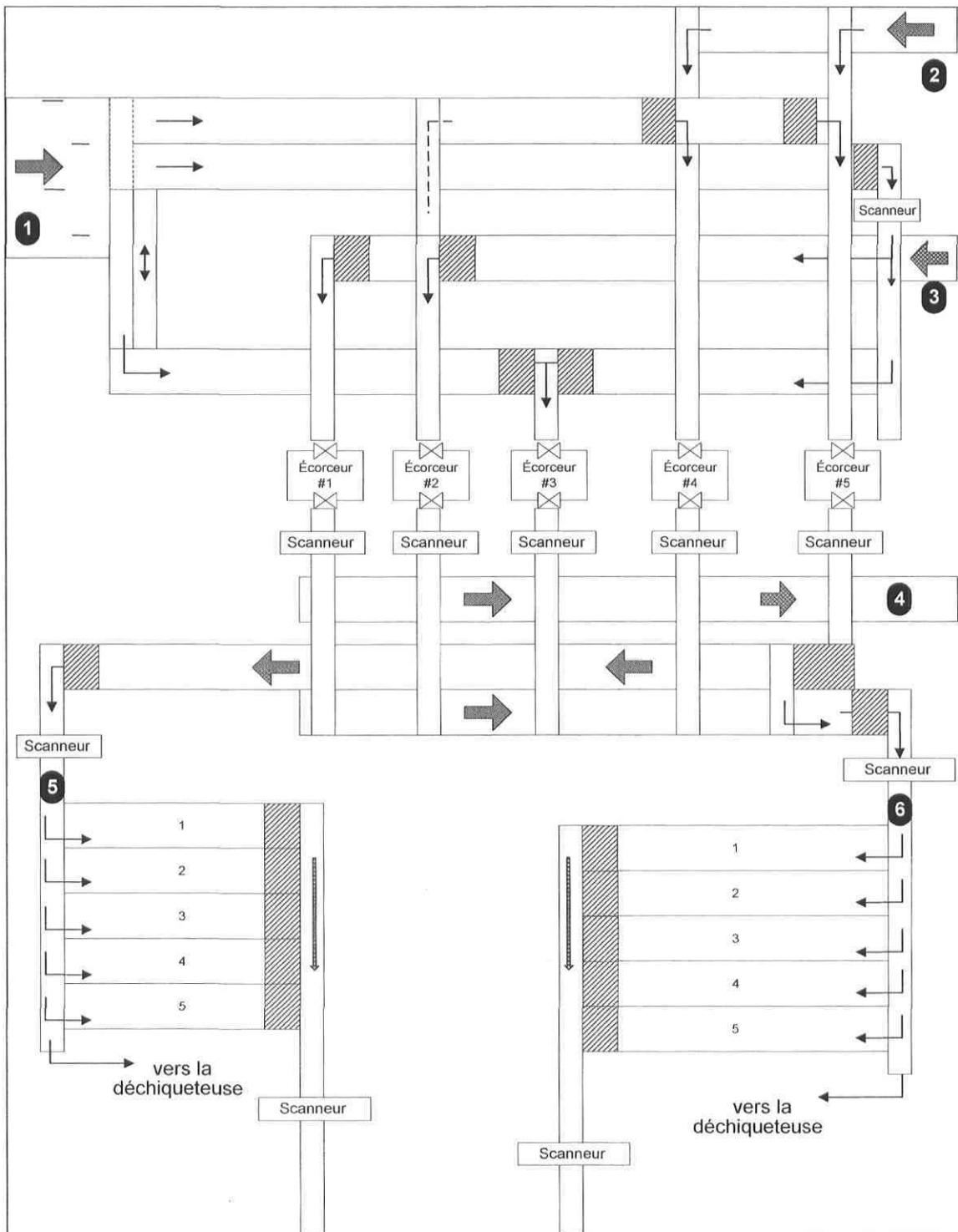


Figure 2. Schéma des équipements de la scierie et du flot du bois – partie 1

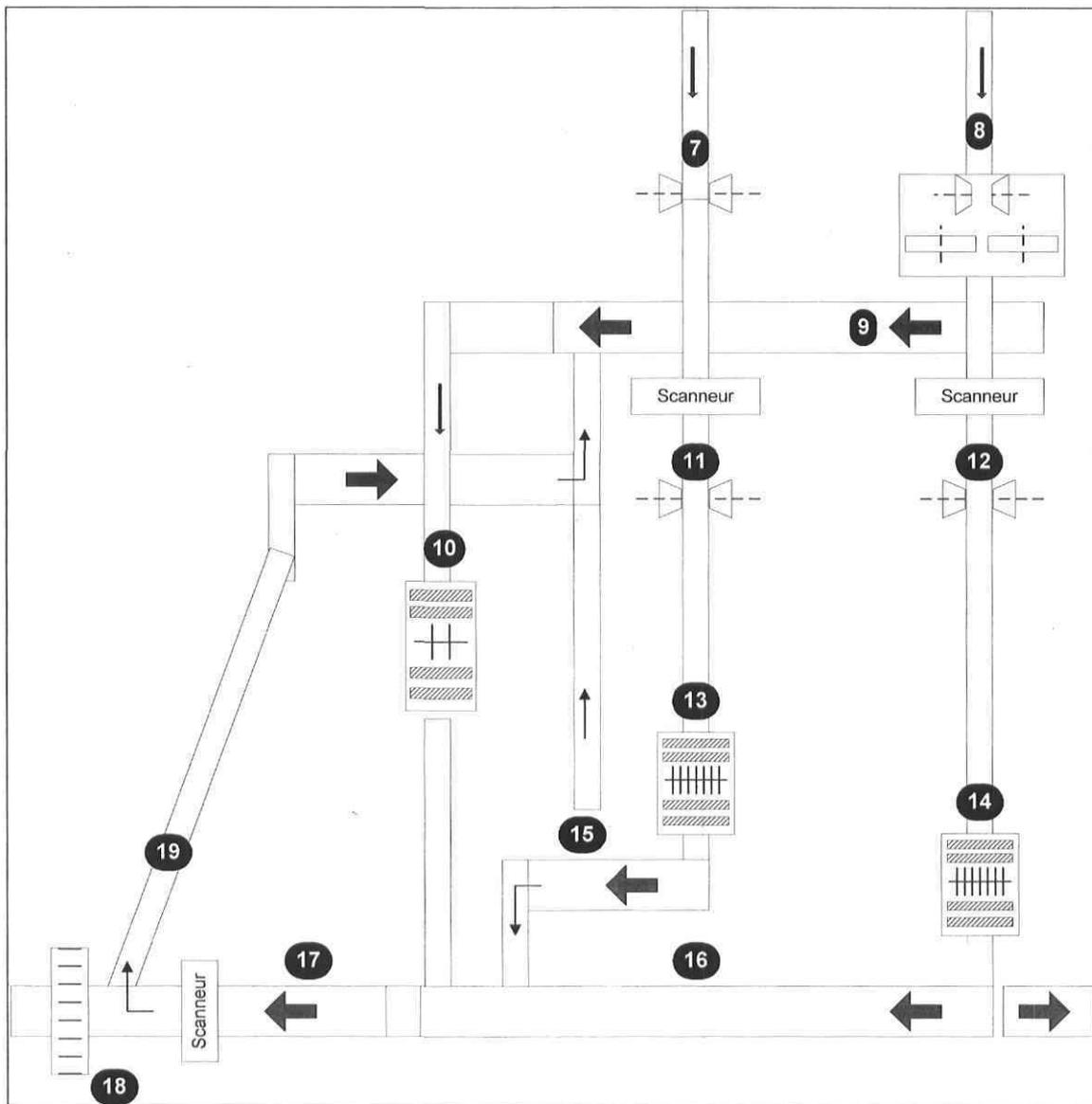


Figure 3. Schéma des équipements de la scierie et du flot du bois – partie 2

Auparavant, les billes passent sous un scanner qui permet au système de classement de les diriger dans l'un des bacs. Pour la ligne de petit bois (5), surnommée ligne R2 par le personnel de la scierie, les billes sont classées par patron de débitage tandis que, pour la ligne de gros bois (6), appelée aussi ligne R1, le classement se fait selon le diamètre.

La ligne de petit bois est équipée d'une équarrisseuse (7) suivie d'une autre équarrisseuse (11), puis d'une débiteuse à scies multiples (13). Elle transforme les billes ayant un

diamètre qui varie approximativement entre 3 et 6 pouces au fin bout. À la sortie de la débiteuse, un opérateur (15) a la possibilité de jeter, dans un convoyeur à destination de la déchiqueteuse à disque, les pièces jugées impropres à faire des sciages. Il peut aussi faire des retours vers la déligneuse. Sur la ligne de gros bois, on retrouve une équarrisseuse suivie d'une scie à rubans jumelés (8). Les dosses tombent sur un transfert (9) et sont dirigées vers la déligneuse-refendeuse (10). Les plateaux passent dans une autre équarrisseuse (12), puis s'en vont dans une débiteuse à scies multiples (14). Le long du transfert qui récolte les pièces de la débiteuse, un opérateur (16) rejette les pièces impropres à faire des sciages.

Les pièces des deux lignes de sciage passent devant deux opérateurs (17) qui identifient les pièces contenant de la carie et celles dont l'essence est le sapin. Avant d'arriver à l'ébouteuse optimisée (18), les pièces passent sous un scanneur qui soutient la décision d'éboutage. Les pièces nécessitant un délignage ou une refente tombent par une trappe afin d'être acheminées par un convoyeur de retour (19) vers la déligneuse-refendeuse.

La validation du modèle Optitek s'est faite, premièrement, en comparant les rendements en sciages et la distribution des produits obtenus grâce au modèle avec les données de production moyenne de la scierie pour la dernière année. De plus, la majeure partie du lot de billes scannées pour l'étude a été débitée réellement dans la scierie et il a été ainsi possible de valider que le modèle Optitek représentait bien le procédé de sciage de l'usine. À cet effet, des écarts d'environ 1% seulement étaient observés entre les prédictions du modèle et la réalité. Le modèle de débitage résultant sert à établir la quantité de pièces produites à chaque étape du procédé. Il est ainsi possible de connaître le cheminement de la matière première dans la scierie à partir du tronçonnage jusqu'au tri des pièces après éboutage.

2.3 Représentation de la productivité de la scierie

Un modèle de flux des bois dans la scierie a ensuite été réalisé avec le logiciel QUEST afin de représenter la productivité de la scierie, c'est-à-dire afin de tenir compte des aspects de temps et mouvements qui ne sont pas traités par la modélisation du débitage avec le simulateur Optitek. Le modèle résultant, au-delà de l'animation graphique en trois dimensions que le logiciel QUEST donne (voir figure 4), permet de considérer une multitude d'aspects qui affecte la productivité. Pour réaliser ce modèle, la cueillette de beaucoup d'information a été nécessaire afin de bien représenter les différents aspects stochastiques du procédé de sciage. Les principaux points pris en compte sont détaillés dans les paragraphes suivants.

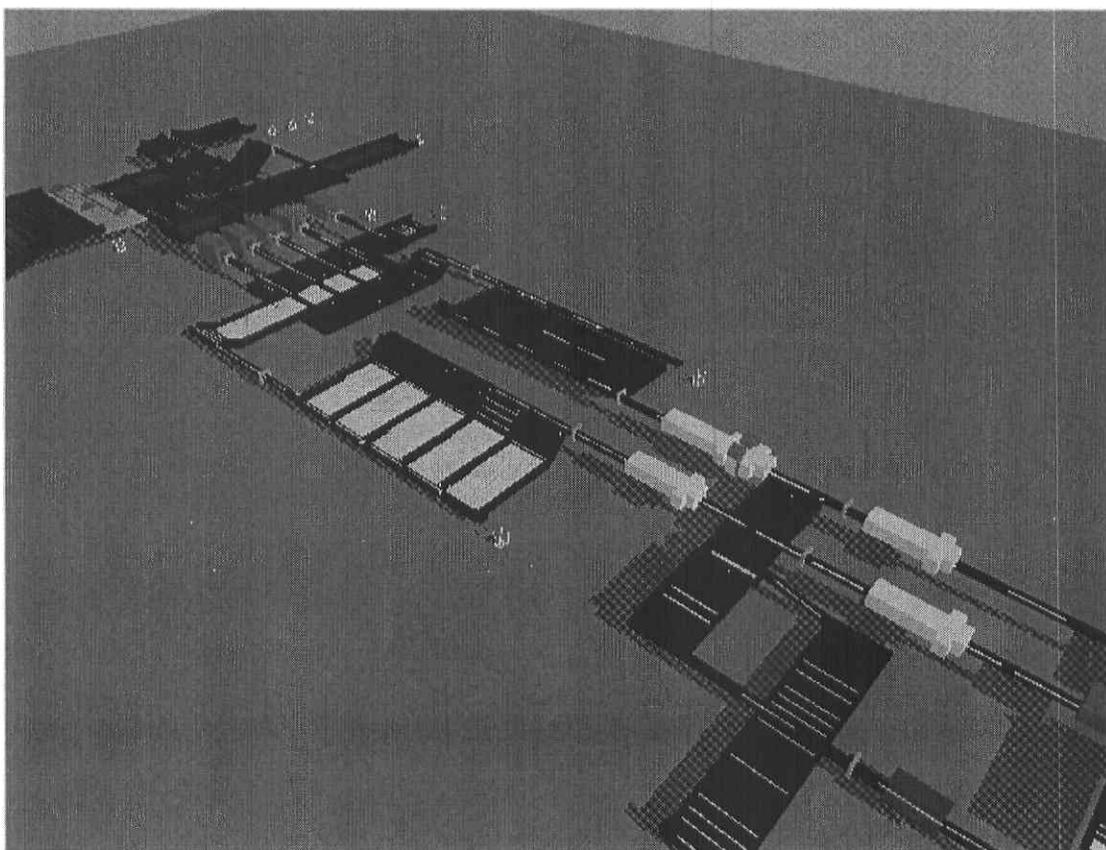


Figure 4. Exemple d'un écran de visualisation de la scierie modélisée avec le logiciel QUEST.

2.3.1 Schéma de la scierie et flux du matériel

Dans un premier temps, le design de la scierie a été recréé dans le logiciel QUEST en y représentant les équipements de sciage et leur position relative les uns par rapport aux autres. Le schéma de la scierie, tel que nous l'avons décrit dans les figures 2 et 3, est ainsi représenté, à l'échelle, en ajoutant des convoyeurs entre les machines. Par la suite, la logique de déplacement des pièces a été incluse en mettant les bonnes vitesses aux convoyeurs et aux systèmes d'alimentation des machines. Les différentes options de cheminement des pièces de bois lors de leur parcours dans la scierie ont été programmées. Étant donné que ces options de cheminement varient selon le type de pièces (exemple: les dosses sont dirigées vers une déligneuse-refendeuse), il a fallu définir dans le modèle chaque type de pièces circulant dans la scierie.

2.3.2 Attributs des billes

Dans plusieurs cas, les décisions affectant la direction des pièces sont prises à la suite des mesures fournies par des scanners. Ces derniers sont donc considérés dans le modèle et leur fonctionnement est relié aux attributs prédéterminés de chaque bille ou de chaque pièce. Lorsqu'une bille ou une pièce de bois passe dans un scanner, le modèle vérifie si elle possède un attribut précis répondant à une condition particulière. Par exemple, le modèle peut vérifier si le diamètre au fin bout d'une bille passant dans un scanner est plus petit que 3 pouces et diriger cette bille au rejet si c'est le cas. Les attributs associés à chaque bille sont: diamètre mesuré à différents endroits correspondant au diamètre de sélection des scanners, longueur de la bille, nombre de pièces produites à chaque centre-machine ainsi que leur cheminement et volume de la bille. Les simulations préalables réalisées avec le modèle de débitage construit avec Optitek ont permis de constituer les attributs des billes. On retrouve à l'annexe 2 le détail de ces attributs pour chacune des 255 billes-types utilisées dans l'étude.

2.3.3 Efficacité des équipements

À partir de l'historique des arrêts de production de l'entreprise, il a été possible de représenter dans le modèle la fréquence et la durée des arrêts. Le registre des arrêts de production fourni par la scierie contient de l'information détaillée, de telle sorte qu'il a été possible de constituer des fréquences d'arrêt pour chaque pièce d'équipement. Bien que la cause de chaque arrêt soit regroupée dans le registre, dans l'un des trois groupes « causes mécaniques », « causes électriques » ou « causes opérationnelles », le modèle de flux ne fait pas la distinction entre les types d'arrêt. Les arrêts dans le modèle n'incluent pas les pertes de production causées par un manque de pièces à transformer, puisque ce type d'arrêt est géré directement par le simulateur. Les arrêts causés par le blocage d'un équipement en aval d'un poste de travail sont aussi pris en compte par le simulateur.

Les données fournies par l'entreprise ne concernaient que les arrêts de plus de deux minutes. Pour représenter les arrêts de courte durée, qui reviennent fréquemment et qui sont propres au fonctionnement inhérent de chaque centre-machine, des études de temps et mouvement ont été réalisées. Ces arrêts de courte durée sont appelés délais de production. Les études de temps et de mouvement ont permis d'analyser le comportement détaillé de chaque poste de travail et de modéliser ces délais.

2.3.4 Logique d'opération

Bien des aspects du procédé de débitage, incluant certaines décisions humaines, varient selon la dynamique des événements ou de l'état du système de production. Ainsi, dans le modèle de flux, il a fallu porter une attention particulière aux différentes décisions humaines qui affectent le cheminement des pièces dans la scierie. L'alimentation des lignes de sciage, effectuée par l'opérateur de chaque ligne, a été analysée. Il s'agit d'un élément ayant une grande influence sur la dynamique du procédé. À cet égard, les opérateurs exercent un certain contrôle sur le flux des bois dans la scierie. L'observation des méthodes de travail des opérateurs nous a permis de fixer des règles de décision concernant le choix des bacs d'alimentation. Essentiellement, ce choix dans la séquence des bacs dépend de la

quantité de billes dans chaque bac et de l'état général de l'usine au chapitre du flux des pièces aux différentes machines.

2.3.5 Simulation de la situation actuelle avec le modèle de flux

Sans faire de validation exhaustive du modèle de flux, nous avons toutefois demandé à des membres du personnel de la scierie de vérifier certains aspects du modèle pour s'assurer qu'il correspondait dans son ensemble à la réalité. Une attention particulière a été portée sur les résultats relatifs au volume de sciage produit par faction de travail, car il s'agit de l'indicateur principal utilisé dans l'étude pour évaluer les gains de productivité. Le nombre de billes transformées par faction aux différentes machines a aussi été un critère de validation. Comme il sera explicité au chapitre 3, à la section 3.1, le modèle, bien qu'il ait tendance à surestimer les niveaux de production de la scierie, est assez proche de la réalité pour servir dans le cadre de notre étude.

Nous avons donc obtenu un modèle satisfaisant, capable de représenter assez fidèlement la scierie actuelle. Nous appelons « modèle de référence » ce modèle, car il servira comme base de comparaison pour les différents scénarios qui impliquent un triage des tiges. Tel que nous l'avons mentionné auparavant, l'approche par simulation permet d'analyser le système de production qu'est la scierie, en gardant la plupart des paramètres fixes. Cette approche assure notamment que les performances du débitage demeurent les mêmes entre chaque cas étudié. On contrôle aussi l'approvisionnement en matière première de la scierie afin qu'il soit semblable d'une simulation à l'autre. Toutefois, puisqu'on cherche à recréer les aspects dynamiques et stochastiques du procédé de sciage, certains paramètres doivent varier, comme c'est le cas dans le système réel. Ainsi, comme nous l'avons expliqué précédemment, l'arrivée de la matière première et les arrêts de production sont modélisés pour refléter un comportement aléatoire.

En contrepartie, parce que nous utilisons des fonctions aléatoires, il faut un nombre important de répétitions des simulations afin d'obtenir des résultats qui peuvent être

comparés directement entre eux. En effet, les résultats de productivité seront biaisés si, par exemple, la durée des arrêts à une machine est significativement différente entre les essais, puisque la baisse ou la hausse de productivité ne sera pas attribuable uniquement au traitement de triage de la matière première. C'est pourquoi, après avoir réalisé des séries de simulations, nous avons établi, à partir de régressions multiples, des équations mathématiques qui expriment la productivité de la scierie en fonction des deux principales variables qui influencent la productivité et sur lesquelles nous avons un certain contrôle. Ces deux variables sont le volume moyen des billes et les arrêts de production. Les équations obtenues serviront lors de la comparaison des différents scénarios de contrôle de l'alimentation.

2.4 Triage des tiges

Le modèle de flux de la scierie a par la suite été modifié afin d'y inclure une étape de tri de la matière première. Les mêmes distributions de fréquence par diamètre que celles utilisées dans le modèle de référence sont utilisées. On s'assure ainsi de travailler avec une source d'approvisionnement comparable. Une séparation des tiges en trois catégories de dimension a été effectuée dans le modèle. Différentes méthodes pour gérer l'alimentation de la scierie à partir de ce matériel trié ont été évaluées. Les paragraphes suivants expliquent dans le détail ces différentes méthodes.

Puisque la scierie est alimentée majoritairement avec des tiges en longueur (environ 80 % du volume transformé), nous n'avons considéré que le tri des tiges dans nos analyses. L'alimentation avec les billes tronçonnées en forêt se fait de la même manière dans toutes les simulations effectuées, c'est-à-dire avec des billes qui ne sont pas triées par dimension. Un module pour trier les tiges selon leurs dimensions a été ajouté au modèle de référence. Le but était de représenter une façon réaliste de trier la matière première et ensuite d'établir des méthodes pour contrôler l'alimentation de la scierie à partir de cette matière première triée. Nous avons supposé qu'un tri serait effectué lors des opérations forestières en séparant les tiges selon trois catégories de diamètre à la souche (DHS). Dans cette optique,

les camions qui transportent le bois de la forêt à la scierie seraient chargés de façon à pouvoir séparer efficacement leur chargement dans la cour à bois de la scierie, selon trois catégories d'empilement correspondant au tri en forêt.

Dans le modèle avec les tiges triées par dimension, les tiges sont encore générées à partir des distributions de fréquence provenant de parcelles-échantillons (tel qu'expliqué à la section 2.1). Toutefois, elles sont ensuite séparées en trois empilements, selon leur classe de DHS. Différentes limites de séparation entre les trois empilements ont été préalablement testées et les limites suivantes ont finalement été retenues. L'empilement de bois de faible dimension comprend les tiges de classe de DHS de 14 cm et moins. L'empilement de bois de dimension moyenne contient les tiges qui dont le DHS se situe entre 16 et 26 cm, tandis que les tiges qui ont un DHS égal ou supérieur à 28 cm se retrouvent dans l'empilement de bois de forte dimension.

Pour gérer la façon dont le bois des différents empilements est amené à la scierie, nous avons utilisé, à tour de rôle, différents indicateurs de l'état du système de production qui nous semblaient les plus pertinents. Nous avons d'abord choisi le *volume moyen des billes après écorçage* sur une période de temps déterminée par essais et erreurs. Par la suite, d'autres méthodes de contrôle de l'alimentation de la scierie ont été appliquées, à savoir une qui se base sur le *niveau d'occupation des bacs de classement des billes* et une autre basée sur le *volume moyen des tiges au tronçonnage*.

2.4.1 Contrôle par le volume moyen aux écorceuses

Pour appliquer cette méthode, des bornes de volumes moyens « normaux » sont fixées. Aussi longtemps que le volume moyen des billes à la sortie de l'ensemble des cinq écorceuses demeure à l'intérieur de ces bornes, les tiges sont amenées à la scierie, selon une recette dite « de base ». Cette recette de base vise à prendre de façon successive du bois dans chacun des trois empilements selon une proportion qui reflète la distribution à long

terme de l'approvisionnement. À intervalle régulier, le volume moyen des billes écorcées depuis la dernière vérification est calculé. Si ce volume est en dehors de la plage fixée par les bornes, la recette d'alimentation est changée. Il y a une recette qui vise à amener davantage de bois de plus forte dimension si le volume moyen descend sous la borne inférieure. Il y a également une recette qui sert à diminuer la dimension du bois amené à la scierie si le volume moyen observé aux écorceuses devient plus élevé que la borne supérieure.

Cette méthode de contrôle de l'alimentation a l'avantage d'être relativement facile à implanter, car la majeure partie des scieries possèdent déjà un système de mesurage après l'écorçage. Il suffit alors de recueillir l'information pertinente qui permet de suivre l'évolution du volume moyen des billes et de prendre une décision quant à la recette d'alimentation.

Dans notre étude, les paramètres servant à déterminer la recette d'alimentation qui peuvent être modifiés sont les suivants:

- Les bornes inférieures et supérieures de l'intervalle du volume moyen des billes écorcées pour la recette de base.
- L'intervalle de temps entre chaque vérification du volume moyen à partir de laquelle une décision est prise sur le choix de la recette.
- Les proportions des quantités prises dans chaque empilement pour chacune des trois recettes. Cela correspond aux indications qui seraient fournies à l'opérateur qui amène les tiges à la scierie.

Plusieurs simulations exploratoires ont été faites afin de vérifier les effets de ces paramètres. Les valeurs choisies devaient permettre de ne pas créer à la longue d'accumulation importante dans l'un ou l'autre des trois empilements. Autrement dit, on devait respecter l'approvisionnement à long terme de l'usine. Finalement, les valeurs suivantes ont été utilisées. L'intervalle que peut prendre le volume moyen des billes

écorcées pour que la recette de base s'applique se situe entre 85 et 110 dm³. L'analyse du volume moyen se fait à une fréquence de cinq minutes. Il y a une mise à zéro des données après chaque analyse, de sorte que la décision du choix de recette se prend sur la période de cinq minutes qui vient de s'écouler. Quant aux recettes elles-mêmes, elles figurent au tableau 2.

Tableau 2. Recettes d'alimentation de la scierie avec tiges triées

Nom de la recette	Recette de base	Pour augmenter la quantité de petit bois	Pour augmenter la quantité de gros bois
Quantité prise dans l'empilement de petit bois	1	3	0
Quantité prise dans l'empilement de bois moyen	7	1	1
Quantité prise dans l'empilement de gros bois	1	0	3

Les recettes sont appliquées comme des instructions données à l'opérateur de la machinerie qui apporte les tiges de la cour à bois jusqu'à proximité de la chargeuse fixe postée à l'entrée du tronçonnage. Ainsi, pour la recette de base, l'opérateur amène un chargement de tiges du lot de petit bois, puis il prend sept voyages consécutifs dans l'empilement de bois moyen pour compléter le cycle avec un chargement provenant de l'empilement de tiges de forte dimension. Il recommence ensuite ce cycle jusqu'à ce que la recette soit changée à la suite de l'analyse du volume moyen aux écorceuses. On peut imaginer, pour implanter réellement une telle méthode dans la scierie, un système d'affichage électronique situé à l'extérieur qui indique la recette à utiliser.

Après une simulation avec les modèles en utilisant cette méthode, une analyse statistique par régression multiple, faite avec le logiciel SPSS, cherchera à savoir quelle relation, si

elle existe, il y a entre le volume de sciage produit dans une faction de travail, le volume moyen des billes sciées et la durée des arrêts.

2.4.2 Contrôle par les proportions de billes dans les bacs

Une seconde méthode pour gérer l'alimentation en tiges a été évaluée en utilisant les proportions des billes dans les bacs de classement situés avant les lignes de sciage. Dans ce cas, on cherche à maintenir un équilibre dans la répartition des billes entre les lignes de sciage. Le triage des tiges dans la cour à bois en trois types d'empilement demeure inchangé. Il y a encore trois recettes d'alimentation: une recette de base, une recette qui vise à amener davantage de bois de forte dimension et une recette qui sert à diminuer la dimension du bois. Ces recettes sont les mêmes que celles utilisées pour la méthode de contrôle par le volume moyen aux écorceuses, soit celles que l'on retrouve au tableau 2.

La recette de base est utilisée tant que la quantité de billes dans les bacs des deux lignes de sciage respecte certaines proportions. Une limite inférieure et une limite supérieure sont fixées pour la proportion que peut représenter le nombre total de billes de chaque ligne sur l'ensemble des billes des deux lignes. Lorsqu'une de ces limites est dépassée, on change la recette en vue d'augmenter ou de diminuer cette proportion, selon le cas. D'autres conditions sont posées sur les proportions de chaque bac à l'intérieur de chacune des lignes de sciage. Ainsi, sur la ligne de gros bois, on cherche à ne pas dépasser un certain niveau pour la proportion des deux bacs qui contiennent les plus gros diamètres de billes. De même, sur la ligne de petit bois, il y a une limite inférieure fixée pour la proportion de billes totalisées par les deux bacs contenant les plus petits diamètres. On cherche ainsi à corriger les situations extrêmes où il y a un fort déséquilibre dans les dimensions du bois.

En pratique, en usine, cela implique la présence d'un système capable de suivre dans le temps la quantité de billes présentes dans chaque bac de classement. On peut penser à un système qui comptabiliserait les billes allant dans chaque bac à partir de l'information des classeurs de billes. Un autre élément d'un tel système devrait compter les billes qui sortent

de chaque bac. On aurait ainsi, en tout temps, la quantité de billes présentes dans chacun des bacs.

L'avantage de cette méthode de contrôle réside dans le fait qu'on peut tenir compte des fluctuations du flot des billes causées par les arrêts de production. Par exemple, si la ligne de petit bois est en arrêt prolongé, il y a de bonnes chances que les bacs de classement de cette ligne atteignent un niveau important. Si l'arrêt dure assez longtemps, il se pourrait que la capacité maximale d'un des bacs soit atteinte, causant ainsi l'arrêt complet de la ligne de classement. Cependant, en forçant l'alimentation avec une matière première de plus grande dimension, on pourrait espérer, dans cet exemple, retarder le moment de cet arrêt. En suivant le niveau des bacs, il est ainsi possible de contrôler, en plus de la fluctuation causée par la variabilité de la matière première, celle causée par les déséquilibres entre les lignes de sciage provoqués par les arrêts de production.

Après avoir modifié le modèle de flot en introduisant la nouvelle méthode de contrôle d'alimentation de la scierie, des simulations ont été lancées. Les résultats ont été analysés afin d'établir une relation entre le volume de sciage obtenu et les variables explicatives que sont les arrêts de production et le volume moyen des billes sciées sur les deux lignes de production.

2.4.3 Contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées

Une troisième méthode de contrôle a été évaluée. Elle consiste à faire un suivi sur le volume moyen des tiges tronçonnées et à se baser sur ce dernier pour appliquer une des trois recettes d'alimentation. Selon le même principe que les méthodes précédentes, une recette de base est appliquée lorsque le volume moyen se situe à l'intérieur de bornes fixées pour obtenir un flot homogène dans la scierie. Après expérimentation, les valeurs de 170 et 190 dm³ ont été choisies respectivement comme bornes inférieures et supérieures. Le volume moyen des tiges est considéré de deux manières dans l'algorithme qui détermine le choix de la recette. La priorité est d'abord accordée au volume moyen cumulé depuis le

début de la faction courante, afin que ce dernier se situe entre 170 et 190 dm³ marchand. Par ailleurs, on veille à ce que le volume moyen des dernières 15 minutes se situe aussi entre 170 et 190 dm³. Cependant, on permet qu'il soit momentanément en dehors de la plage fixée par ces bornes lorsqu'on cherche à augmenter ou diminuer le volume moyen de la faction. La vérification du volume moyen se fait à un intervalle de cinq minutes.

D'un point de vue pratique, l'emploi de cette méthode nécessite un moyen de mesurage des tiges lors du tronçonnage. Les usines qui n'ont pas de système d'optimisation du tronçonnage n'ont généralement pas l'information sur le volume des tiges tronçonnées. Cependant, il est envisageable qu'un système rudimentaire associant un volume estimé à partir du diamètre au gros bout et de la longueur des tiges soit capable de fournir une information adéquate, car le degré de précision des mesures serait alors suffisant pour les besoins de la méthode de contrôle.

Chapitre 3. Résultats et discussion

3.1 Définition de la productivité pour le cas de référence

Le modèle de référence, c'est-à-dire celui où il n'y a aucun tri de la matière première, a été utilisé afin de simuler plusieurs factions de travail de l'usine. Des résultats pour 65 factions de travail ont ainsi été obtenus. À la fin de chaque faction simulée, le modèle enregistrait certaines statistiques de production. On retrouve au tableau 3 les principales statistiques de production retenues avec les valeurs moyennes ainsi que les écarts-types pour l'ensemble des 65 factions de travail. Rappelons que les appellations ligne R1 et ligne R2 désignent respectivement la ligne de gros bois et la ligne de petit bois. On doit faire la distinction entre les statistiques qui concernent les billes écorcées, celles qui concernent les billes dirigées vers une des deux lignes et celles qui concernent les billes effectivement sciées sur une des lignes. La première catégorie inclut toutes les billes qui sortent des écorceuses avant le triage. La seconde regroupe les billes écorcées qui sont envoyées vers le système de classement d'une des deux lignes de sciage. La dernière catégorie comprend les billes qui sont effectivement débitées, ce qui correspond aux billes de la catégorie précédente, auxquelles on retranche les billes impropres au sciage. Ces dernières sont dirigées directement à la déchiqueteuse à disque.

Tableau 3. *Moyenne et écart-type pour les statistiques de production obtenues lors de la simulation de 65 factions*

Statistique de production	Moyenne des 65 factions	Écart- type
Matière première		
nombre de tiges tronçonnées	5523	618
volume marchand des tiges tronçonnées (m ³)	1019	147
volume moyen par tige (dm ³)	188	40
nombre de billes tronçonnées en forêt	3220	555
volume de billes tronçonnées en forêt (m ³)	352	61
volume moyen des billes tronçonnées en forêt (dm ³)	109	1

Statistique de production	Moyenne des 65 factions	Écart- type
Écorçage et classement des billes		
nombre de billes écorcées	14854	929
volume des billes écorcées (m ³)	1483	136
volume moyen des billes écorcées (dm ³)	100	9
nombre de billes dirigées vers l'usine de colombage	1648	341
nombre de billes dirigées vers la ligne R1	4336	682
nombre de billes dirigées vers la ligne R2	8750	812
nombre de billes sciées sur la ligne R1	4344	631
nombre de billes sciées sur la ligne R2	7682	763
volume de billes dirigées vers l'usine de colombage (m ³)	56	11
volume de billes sciées sur la ligne R1 (m ³)	775	145
volume de billes sciées sur la ligne R2 (m ³)	625	48
volume moyen des billes sciées (lignes R1 et R2) (dm ³)	117	9
Production		
nombre de pièces rejetées par l'opérateur, ligne R1	69	12
nombre de pièces rejetées par l'opérateur, ligne R2	820	76
nombre de pièces rejetées à l'ébouteuse	984	124
nombre de pièces retournées au délignage par l'ébouteuse	3997	325
nombre de pièces produites à l'ébouteuse	29352	2373
volume de sciage produit à l'ébouteuse (pmp)	307309	33960
rendement en sciage (pmp/m ³)	219	6
Arrêts de production		
tous les arrêts (minutes)	93	46
arrêts sur les lignes R1 et R2 (minutes)	27	11
arrêts à l'éboutage seulement (minutes)	28	22

À la suite de nos observations, la question de savoir si les résultats obtenus par simulation avec le modèle sont semblables à la réalité se pose naturellement. Nous aurions aimé répondre par l'affirmative. Cependant, en regardant les statistiques de production de la scierie sur une période de 39 semaines, nous constatons que le modèle de simulation surestime beaucoup le volume de sciage produit à l'ébouteuse. En effet, le modèle présente une production moyenne de 307 000 pmp par faction de travail, tel qu'il est indiqué au tableau 3, tandis que les statistiques de production montrent une production moyenne de l'ordre de 240 000 pmp, soit une différence de 28 %. Comment expliquer une telle différence? Il semble que le rendement en sciage réel de la scierie soit beaucoup plus faible que le rendement obtenu durant notre test de validation. Les statistiques de production de la scierie affichent un rendement de 184 pmp/m³ contre un rendement simulé de 217 pmp/m³, ce qui représente un écart de près de 20 %. Cet écart peut s'expliquer

principalement par les nombreuses interventions humaines dans le procédé, qui viennent détourner le procédé normal. Il est très difficile de modéliser des comportements humains, surtout lorsque ceux-ci sont changeants dans le temps, ce qui est le cas ici. D'ailleurs, le faible rendement en sciage de l'usine, considérablement plus faible que la moyenne de l'industrie, est un indicateur de problèmes importants.

Toutefois, les rendements obtenus par simulation ne sont pas du tout irréalistes. Au contraire, ils représentent un niveau de performance qui, d'une part, a été atteint durant le test de validation et qui, d'autre part, a été atteint par la scierie durant la période de 39 semaines pour lesquelles nous avons des statistiques. En effet, la production maximale pour une faction de travail à l'ébouteuse pour cette période est d'environ 330 000 pmp. Puisqu'une majeure partie de la différence de 28 % entre la production réelle et la production simulée est expliquée par la modélisation du procédé de débitage, le modèle de flux proprement dit n'est donc pas si éloigné de la réalité. D'autant plus que l'écart-type des volumes de sciage produits à l'ébouteuse pour les 65 factions obtenues par simulation se situe à 34 000 pmp, tandis que celui observé en réalité est d'à peu près 37 000 pmp. En calculant les coefficients de variation ($cv = \text{écart-type} / \text{moyenne}$), on obtient des valeurs de 15 % pour les statistiques réelles de production et de 11 % pour les résultats de simulation. On peut donc en conclure que même si les moyennes sont assez éloignées, la dispersion des résultats est semblable, ce qui tend à démontrer que le modèle de flux représente bien la variation du procédé.

Les résultats ont ensuite fait l'objet d'analyses statistiques, à l'aide du logiciel SPSS, afin de vérifier l'existence d'une relation entre le volume de sciage produit dans une faction de travail et les deux variables explicatives que sont le volume moyen des billes et les arrêts de production. Le but est de déterminer, à partir des résultats des simulations, une équation relativement simple qui explique adéquatement les variations de la production d'une faction à l'autre. En ayant une équation pour la situation sans tri des tiges et une autre pour chaque scénario avec tri, il est possible de comparer plus justement les deux situations en contrôlant le niveau des variables clés. Ces équations, obtenues par analyses de régression

multiple, sont appelées dans ce texte « équations de production ». Elles servent à exprimer la productivité de la scierie sous l'angle de la production de sciage brut en volume nominal.

Le cheminement qui permet de constituer une équation de production valable, tant sur le plan pratique que sur le plan statistique, est élaboré dans les paragraphes suivants. Comme nous l'avons mentionné au chapitre 2, le volume des billes et les arrêts de production sont les deux variables qui influencent directement les niveaux de productivité de la scierie. Ces deux variables sont étudiées à tour de rôle, afin de bien comprendre leur influence. On présente ensuite un modèle qui intègre ces deux variables.

La première variable explicative analysée est le volume des billes sciées. Il est en effet logique de penser que la dimension des billes affecte directement la production. Puisque le procédé de sciage se déroule selon une cadence à peu près constante, le fait de débiter une bille qui produit quatre pièces prend généralement le même temps que de débiter une autre bille plus petite ne produisant que deux pièces. Il est vrai que, dans certains cas, il peut y avoir une diminution de la vitesse d'alimentation lors du débitage des billes de fortes dimensions. Toutefois, cette diminution de vitesse est largement compensée par la production accrue de sciage qui résulte de ces billes.

La figure 5 illustre la relation, obtenue à partir des résultats des simulations, entre le volume de sciage produit en pmp pour une faction de travail et le volume moyen des billes sciées sur les deux lignes de sciage durant la faction. La relation obtenue par régression linéaire simple confirme que plus le volume des billes est grand, plus le volume de sciage sera élevé. Une droite de régression linéaire a été tracée. On obtient, par exemple, un gain de 23 % en production si l'on augmente le volume moyen des billes de 20 %. Le coefficient de détermination est de 0,69, ce qui revient à dire que près de 70 % de la variation du volume nominal de sciage est expliquée par la variation du volume moyen des billes. Il est à noter que d'autres courbes de tendance non linéaires ont été essayées, mais elles ne présentaient pas un R^2 significativement plus élevé.

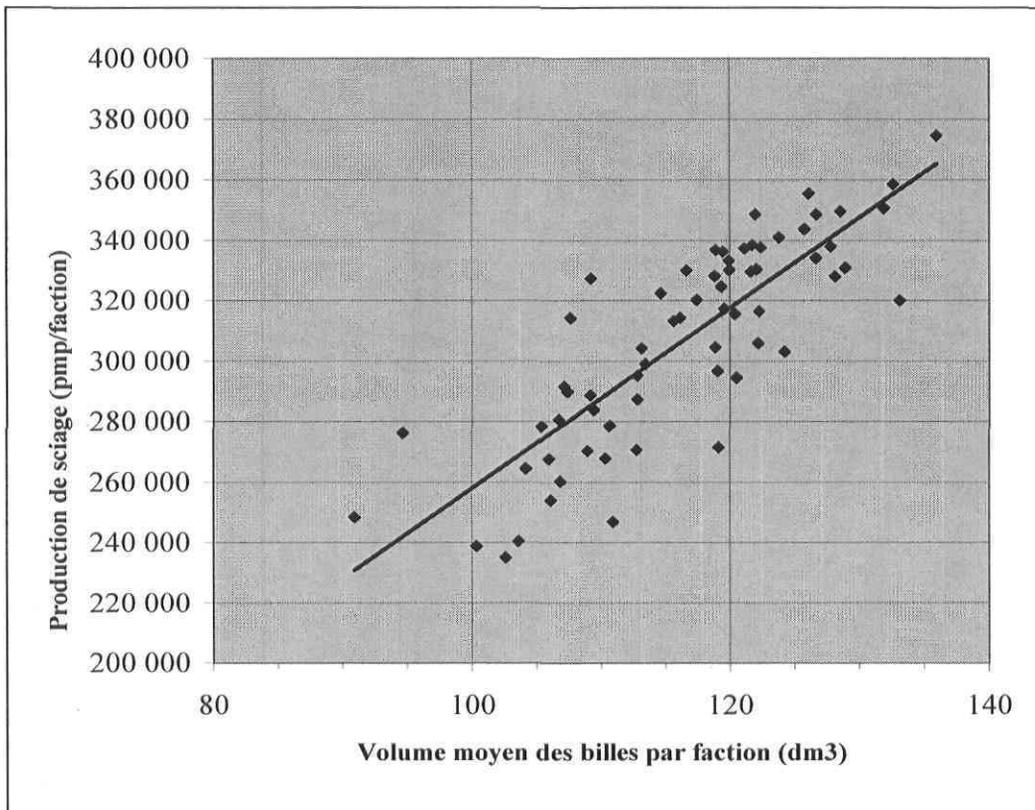


Figure 5. *Production de sciage par faction de travail en fonction du volume moyen des billes sciées.*

L'autre facteur explicatif important de la productivité d'une usine est évidemment la durée des arrêts de production. La durée totale des arrêts, pour chaque secteur de la scierie et pour chaque faction simulée, a été compilée, de sorte qu'il est possible d'analyser la relation entre ces arrêts et la production de sciage. Il faut cependant déterminer quelle catégorie d'arrêts a le plus d'effet. Il n'est pas dit que la somme des arrêts de tous les postes de travail offre la meilleure corrélation avec la production de sciage. En effet, les conséquences de chaque arrêt ne sont pas additives puisque, par exemple, un arrêt de 10 minutes à la déligneuse peut n'avoir aucune influence sur la production si l'ébouteuse ne manque pas de pièces durant cette période et si la capacité d'accumulation en amont de la déligneuse est suffisante pour ne causer aucun arrêt des lignes de sciage.

Le tableau 4 donne les coefficients de détermination (R^2) obtenus lors d'analyses de régression entre la production de sciage et les différentes catégories d'arrêt. La catégorie « lignes de sciage » comprend tous les arrêts survenus sur les lignes de sciage, c'est-à-dire entre les machines de tête et la sortie des débiteuses à scies multiples. La catégorie « ligne d'éboutage » inclut, non seulement les arrêts de l'ébouteuse, mais aussi tous ceux survenus en amont jusqu'au démêleur de pièces ainsi qu'en aval jusqu'au classeur de pièces, en incluant ce dernier. On remarque que la somme de tous les arrêts présente le plus faible R^2 , soit 0,01.

Cela démontre bien que les arrêts de certains équipements n'affectent que très peu la productivité dans son ensemble. Les arrêts qui ont le plus d'importance sont ceux qui surviennent sur la ligne d'éboutage. Ils expliquent 20 % de la variation de la production. Cette constatation vient confirmer un aspect connu, à savoir que l'éboutage constitue pour cette scierie le goulot d'étranglement de la production, comme dans plusieurs scieries d'ailleurs. L'ajout des arrêts des deux lignes de sciage n'améliore pas le coefficient de détermination. Pour la suite des analyses de cette étude, nous avons donc choisi de n'utiliser que les arrêts de la ligne d'éboutage pour établir les équations de production.

Tableau 4. Coefficient de détermination par catégorie d'arrêt

Catégorie d'arrêt	Proportion des arrêts totaux	Coefficient R^2 avec le volume de production
Lignes de sciage	29,7 %	0,03
Ligne d'éboutage	30,7 %	0,20
Lignes de sciage + éboutage	60,4 %	0,20
Tous les arrêts	100,0 %	0,01

À la lumière de ces analyses de régression simple, il est naturel de conclure qu'un bon modèle statistique pour décrire la production de la scierie devrait combiner à la fois le volume moyen des billes et les arrêts de la ligne d'éboutage. Une analyse de régression multiple a donc été réalisée en utilisant cette fois ces deux variables comme variables

explicatives. Le modèle obtenu affiche un R^2 de 0,85. Il est significatif à un niveau de confiance de 95 %. L'équation obtenue est:

$$P = 2903 * V - 611 * A - 13692$$

Où P est le volume nominal, en pmp, produit durant la faction de travail.

V est le volume moyen des billes sciées, en dm^3 , durant la faction.

A est la durée, en minutes, des arrêts totaux à l'éboutage durant la faction.

Cette équation sert à calculer, pour la situation de référence où il n'y a aucun tri des tiges, le niveau de production de la scierie pour des niveaux fixes des deux variables explicatives V et A. Les résultats obtenus avec les différentes simulations de triage des tiges sont alors comparables sur une même base. Les valeurs des variables explicatives sont fixées à $V = 120 \text{ dm}^3$ pour le volume moyen des billes sciées et à $A = 28$ minutes pour la durée des arrêts. Ces valeurs ont été jugées, par la direction de la scierie, comme représentatives de la situation moyenne réelle à long terme. En utilisant ces valeurs dans l'équation de production, on calcule un niveau de production de 317 600 pmp par faction. Pour avoir une idée de la précision de ce résultat, on calcule un intervalle de confiance, pour P, à un niveau de 95 % et on obtient l'intervalle 314 200 à 321 100 pmp.

3.2 Résultats obtenus avec le contrôle par le volume moyen aux écorceuses

Les résultats obtenus avec la méthode du contrôle de l'alimentation de la scierie par le volume moyen des écorceuses sont les suivants. Premièrement, comme pour le cas de référence, une analyse de régression multiple a permis de vérifier la relation qui existe entre le volume de sciage produit dans une faction de travail, le volume moyen des billes sciées et la durée des arrêts sur la ligne d'éboutage. L'analyse faite avec le logiciel SPSS permet d'obtenir un modèle de régression affichant un R^2 de 0,70 et significatif à un niveau de confiance de 95 %.

L'équation obtenue est:

$$P = 946 \cdot V - 607 \cdot A + 236046$$

Où P est le volume nominal, en pmp, produit durant la faction de travail.

V est le volume moyen des billes sciées, en dm^3 , durant la faction.

A est la durée, en minutes, des arrêts totaux à l'éboutage durant la faction.

Afin de comparer l'effet du triage sur la productivité de la scierie, on se sert de l'équation ci-dessus en prenant les mêmes valeurs que dans le cas de référence, soit 120 dm^3 pour le volume moyen des billes sciées et 28 minutes pour la durée des arrêts. On obtient ainsi par l'équation de régression une valeur prédite de volume de sciage d'environ 332 600 pmp par faction de travail. Puisqu'on a utilisé les mêmes valeurs pour les variables explicatives dans l'équation de production de la situation sans triage, on peut comparer les deux situations. Le tri des tiges, combiné à un contrôle de l'alimentation basé sur le volume moyen aux écorceuses, permet de passer d'une production moyenne de 317 600 pmp par faction à une production de 332 600 pmp, soit un gain de 15 000 pmp par faction, ou 4,7 % d'augmentation en production de sciage. Pour s'assurer de la précision de ce résultat, on détermine un intervalle de confiance à un niveau de 95 % pour le volume de sciage de la situation avec triage. Ainsi, nous obtenons 328 800 pmp comme borne inférieure de l'intervalle et 336 400 pmp comme borne supérieure. Puisque ces valeurs ne recourent pas l'intervalle calculé pour le volume de production de la situation de référence, nous concluons que l'écart est significatif entre les deux situations.

Le tri des tiges permet d'avoir une alimentation plus homogène et plus constante tout au long de chaque faction. La matière première est la même, mais son arrivée dans la scierie est mieux répartie et n'est donc pas laissée au seul hasard. Les résultats, présentés au tableau 5, démontrent que les volumes moyens observés pour chaque faction offrent un écart-type beaucoup plus faible pour la situation avec tri que pour la situation de référence. Bien que les moyennes soient semblables d'une situation à l'autre, l'écart-type et l'étendue des mesures pour la situation avec triage sont plus que deux fois plus faibles. La diminution

de l'étendue des mesures démontre que le triage allié à une gestion de l'alimentation permet d'éliminer les situations extrêmes où l'on se retrouve avec du très petit bois ou au contraire avec du bois de fortes dimensions.

Tableau 5. *Comparaison des statistiques descriptives sur le volume moyen, par faction, des billes sciées pour les résultats obtenus avec le contrôle par le volume moyen aux écorceuses*

	Simulations de référence	Triage des tiges, contrôle par le volume moyen aux écorceuses
Moyenne (dm ³)	117	115
Étendue des mesures	45 (91 à 136)	20 (107 à 127)
Écart-type	9,4	4,4

3.3 Résultats obtenus avec le contrôle par les proportions des billes dans les bacs

À partir des résultats des simulations effectuées avec le modèle modifié pour tenir compte d'un contrôle de l'alimentation à l'aide des proportions des bacs de triage, une analyse de régression a permis de trouver l'équation suivante:

$$P = 1843 * V - 661 * A + 125947$$

Où P est le volume nominal, en pmp, produit durant la faction de travail.

V est le volume moyen des billes sciées, en dm³, durant la faction.

A est la durée, en minutes, des arrêts totaux à l'éboutage durant la faction.

Comme précédemment, à titre de comparaison, nous utilisons les valeurs de 120 dm³ comme volume moyen des billes et 28 minutes comme temps moyen des arrêts à l'éboutage. On obtient alors un volume nominal de production de 328 600 pmp par faction de travail. L'intervalle de confiance à un niveau de 95 % donne une étendue de valeurs entre 324 000 et 333 200 pmp. En comparaison au cas de référence sans aucun tri, où le volume de production est de 317 600 pmp, le gain est de l'ordre de 3,5 %. Étant donné que

les intervalles de confiance de chaque situation ne se recoupent pas, on peut affirmer que le gain obtenu est significatif.

La méthode de contrôle par les proportions des billes dans les bacs permet, tout comme la méthode précédente, d'avoir une alimentation plus homogène et plus constante lorsqu'on compare une faction à une autre. Les résultats démontrent que les volumes moyens observés pour chaque faction offrent un écart-type beaucoup plus faible pour la situation avec tri que pour la situation de référence. Tel qu'il est indiqué dans le tableau 6, l'écart-type et l'étendue des mesures pour la situation avec triage sont approximativement trois fois plus faibles que pour la situation de référence.

Tableau 6. *Comparaison des statistiques descriptives sur le volume moyen, par faction, des billes sciées pour les résultats obtenus avec le contrôle par les proportions des billes dans les bacs*

	Simulations de référence	Triage des tiges, contrôle par les proportions des billes dans les bacs de triage
Moyenne (dm ³)	117	122
Étendue des mesures	45 (91 à 136)	15 (113 à 128)
Écart-type	9,4	3,2

3.4 Résultats obtenus avec le contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées

Les résultats des simulations effectuées à partir du modèle adapté pour refléter un contrôle de l'alimentation par le volume moyen des tiges tronçonnées ont été compilés. Une régression linéaire a permis de calculer une relation qui associe la production de sciage au volume moyen des billes sciées et à la durée des arrêts à l'éboutage. Le modèle présente un R² de 0,63. L'équation de production suivante a été obtenue:

$$P = 1969 * V - 568 * A + 100228$$

- Où P est le volume nominal, en pmp, produit durant la faction de travail
V est le volume moyen des billes sciées, en dm^3 , durant la faction
A est la durée, en minutes, des arrêts totaux à l'éboutage durant la faction.

En remplaçant les variables par les valeurs moyennes utilisées précédemment ($V = 120 \text{ dm}^3$ et $A = 28$ minutes), on a un niveau de production de 320 600 pmp par faction. Puisque la production de sciage de la situation de référence est de 317 600 pmp par faction, on obtient un gain de 0,9 %. Cependant, si l'on tient compte de l'intervalle de confiance associé à cette valeur, qui est de 317 000 à 324 300 pmp, on ne peut pas conclure qu'il y a un gain significatif de production avec la méthode proposée.

À priori, on aurait pu croire que cette méthode donnerait de bons résultats, car elle a l'avantage de contrôler plus directement le flot des bois. En effet, si le bois entrant à la scierie présente une tendance qui est hors des limites fixées, la situation est détectée plus tôt dans le procédé ce qui permet de corriger rapidement l'équilibre. Cependant, les résultats obtenus ne permettent pas de conclure qu'il s'agit d'une méthode adéquate pour contrôler l'alimentation de la scierie. Il semble que d'autres facteurs viennent contrecarrer les avantages attendus. Nous y reviendrons plus loin.

Toutefois, comme les deux méthodes précédentes, la méthode de contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées permet de diminuer la variation de la dimension des tiges sur l'ensemble de chaque faction de travail, comme on peut le voir dans le tableau 7. Les volumes moyens observés pour chaque faction offrent un écart-type beaucoup plus faible pour la situation avec tri que pour la situation de référence, passant de 9,4 à 4,3. L'étendue des mesures est aussi grandement réduite, passant de 45 pour les simulations de référence à 25 pour la situation avec triage.

Tableau 7. Comparaison des statistiques descriptives sur le volume moyen, par faction, des billes sciées

	Simulations de référence	Triage des tiges, contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées
Moyenne (dm ³)	117	120
Étendue des mesures	45 (91 à 136)	25 (107 à 132)
Écart-type	9,4	4,3

3.5 Discussion sur les différences d'efficacité entre les méthodes de contrôle

Le tableau 8 est un résumé des principaux résultats des analyses précédentes. On y retrouve l'augmentation du niveau de production par rapport à la situation de référence ainsi que l'écart-type du volume moyen par faction des billes sciées. Il ressort de ces résultats que le tri des tiges selon leurs dimensions peut améliorer de façon appréciable la productivité. Cependant, la méthode utilisée pour contrôler l'alimentation a une influence très importante. La gestion de l'alimentation en utilisant le volume moyen des billes écorcées a donné les meilleurs résultats, avec un gain de 4,7 % de volume de sciage produit par faction. Au second rang, c'est le contrôle basé sur les proportions de billes dans les bacs de classement qui a offert le meilleur gain, avec une augmentation de 3,5 %. L'autre méthode évaluée, celle impliquant le volume moyen des tiges tronçonnées, n'a pas résulté en des améliorations significatives.

Chacune des méthodes a cependant contribué à diminuer la variation, d'une faction à l'autre, du volume moyen des billes transformées. Les écarts-types, calculés pour les simulations avec triage, ont diminué de plus de la moitié et même réduit d'un facteur 3 dans un des cas. Le triage de la matière première amène donc plus de régularité dans l'approvisionnement de la scierie. Pour illustrer ce fait, la figure 6, à partir des résultats obtenus avec la méthode de contrôle par volume moyen aux écorceuses, compare la variation du volume moyen des

billes, à chaque faction de travail, entre une situation où la matière première n'est pas triée et une situation où un tri selon les dimensions des tiges a été fait.

Tableau 8. Résumé des résultats des simulations

Scénarios	Gain en production	Écart-type du volume moyen
	de sciage (%)	par faction des billes sciées (dm ³)
Sans triage – Référence	--	9,4
Avec tri – Contrôle par volume moyen aux écorceuses	4,7 %	4,4
Avec tri – Contrôle par la proportion dans les bacs	3,5 %	3,2
Avec tri – Contrôle par le volume moyen au tronçonnage	0,9 % ¹	4,3

¹ Non-significatif

Certains avantages, bien que non considérés dans la présente étude parce que difficilement quantifiables, découlent de cette amélioration de la régularité et sont susceptibles d'augmenter davantage les gains calculés. En effet, il n'est pas rare que les opérateurs en scierie aient tendance à dévier de leur comportement normal lorsque arrivent des déséquilibres dans les dimensions de la matière première. Par exemple, des opérateurs peuvent être portés à modifier un patron de débitage afin de générer moins de pièces à la déligneuse si cette dernière est surchargée. Un autre exemple de l'effet d'un flux irrégulier dans une scierie est le plus grand nombre de pièces rejetées lors du tri par les opérateurs à la sortie des débiteuses à scies multiples, afin de désengorger rapidement le système. Ce genre de comportement, qui a une influence négative sur les rendements, n'a pas pu être représenté dans le modèle. En effet, il s'agit de situations très variables qui proviennent de

circule dans le modèle, la durée de son parcours dans la scierie en tout point. Pour la méthode de contrôle par le volume moyen aux écorceuses, on constate qu'en moyenne, il faut 27,3 minutes pour que le bois soit transporté du début du procédé jusqu'aux écorceuses. Par contre, pour la méthode de contrôle par les proportions de billes dans les bacs, ce temps de réaction passe à 36,4 minutes, puisque le bois prend 9,1 minutes supplémentaires en moyenne pour arriver aux bacs. Cela pourrait expliquer l'efficacité plus faible de cette méthode.

Tableau 9. Durée de parcours du bois dans la scierie

Description de la distance à parcourir	Durée (minute)	Durée cumulative (minute)
Du pont d'alimentation à la tronçonneuse	8,5	8,5
De la tronçonneuse aux écorceuses	18,8	27,3
Des écorceuses aux bacs de classement	9,1	36,4
Attente dans les bacs avant sciage	23,1	59,5

La piètre performance de la méthode de contrôle par le volume des tiges tronçonnées ne peut cependant pas être expliquée par cet aspect, puisque le délai de réaction (8,5 minutes) est le plus faible parmi les méthodes. Quelques hypothèses peuvent toutefois être avancées en guise d'explication: la mauvaise performance de cette méthode est peut-être liée au mode d'approvisionnement de l'usine étudiée. En effet, cette méthode comporte l'inconvénient de se baser uniquement sur les tiges pour gérer l'alimentation, alors qu'il y a 20 % de la matière première qui entre dans la scierie directement sous forme de billes sans passer par le tronçonnage.

Par ailleurs, les paramètres utilisés pour gérer le choix des recettes d'alimentation (voir section 2.4.3) ne sont peut-être pas optimaux. Par exemple, il est fort possible que les bornes inférieures et supérieures de volume moyen des tiges servant aux changements de recettes soient trop rapprochées, ce qui induit une variation non désirable dans le procédé.

Le tableau 10, qui affiche les volumes moyens aux écorceuses compilés à des intervalles de cinq minutes pour les différentes méthodes de contrôle, vient appuyer cette hypothèse. On y constate que, même si l'écart-type du volume moyen par faction a été réduit par l'application du triage de tiges, l'écart-type du volume moyen mesuré de façon plus instantanée n'a pas diminué et a même augmenté considérablement dans certains cas. Les écarts-types les plus élevés correspondent aux méthodes de tri les moins efficaces. Ainsi, l'écart-type pour la méthode de contrôle par le volume moyen aux écorceuses est semblable à celui de la situation de référence, avec 23 dm³ contre 21 dm³, alors qu'il passe à 27 dm³ pour le contrôle par la proportion des bacs, puis à 33 dm³ pour le contrôle par le volume à la tronçonneuse.

Tableau 10. Volume moyen des billes aux écorceuses mesuré à 5 minutes d'intervalle

Scénarios	Volume moyen des billes aux écorceuses (dm ³)	Écart-type du volume moyen (dm ³)
Sans triage – Référence	103	21
Avec tri – Contrôle par volume moyen aux écorceuses	99	23
Avec tri – Contrôle par la proportion dans les bacs	109	27
Avec tri – Contrôle par le volume moyen au tronçonnage	102	33

3.6 Discussion des aspects économiques

Pour donner un aperçu des gains monétaires associés aux gains en productivité trouvés, nous avons considéré comme hypothèse une valeur de 120 \$ par Mpmp additionnel de sciage que le tri des tiges permet de produire. Le tableau 11 détaille les éléments ayant servi à déterminer cette valeur. On tient compte uniquement des coûts qui s'appliquent directement à la production supplémentaire, soit les coûts de séchage, de rabotage et des coûts de matière première. Les autres coûts de production, tel que le coût de sciage, sont considérés fixes puisque, bien qu'un plus grand volume de billes soit transformé, les mêmes ressources humaines et matérielles que pour la situation sans triage sont en cause. En effet, dans la même unité de temps, par faction, on transforme plus efficacement la matière première et on génère un plus grand volume de production. Les coûts utilisés proviennent des registres de la compagnie.

Tableau 11. Hypothèses pour déterminer la valeur de la production additionnelle

Prix de vente	455 \$/Mpmp
- Coûts de séchage	- 24 \$/Mpmp
- Coûts de rabotage	- 31 \$/Mpmp
- Coûts de matière première	- 280 \$/Mpmp
= Gain sur le Mpmp additionnel	= 120 \$/Mpmp

Cependant, le triage par dimension des tiges implique aussi des coûts additionnels afin de séparer en trois catégories les approvisionnements de la scierie. L'approche qui nous semble la plus prometteuse est d'effectuer ce tri lors des opérations de récolte en forêt. Des études de FERIC² sur le sujet ont démontré que, dans le cas des méthodes par arbres en longueur, le tri des tiges selon trois catégories par l'ébrancheuse occasionnait une perte en productivité de l'ordre de 15% par rapport à une situation où aucun tri n'était fait. Cette baisse de productivité correspondait à une augmentation des coûts de 0,81 \$/m³. Considérant un ajustement pour actualiser cette valeur ainsi que la possibilité qu'il y ait

² Gingras, J.-F. 1996. Le coût de séparation des produits pendant la récolte. FERIC, fiche technique FT-245, 12 p.

d'autres coûts reliés à la gestion de la cour à bois, nous avons retenu comme hypothèse un coût supplémentaire de récolte de 1,00 \$/m³. En utilisant les hypothèses de coûts et de revenus citées précédemment et en considérant une augmentation de la productivité de la scierie de 4,7 %, tel que nous l'avons démontré dans notre étude, nous obtenons les gains économiques suivants. Pour une scierie qui transforme 500 000 m³ de bois rond annuellement, dont 80 % est trié selon ses dimensions, avec un rendement en sciage de 250 pmp/m³, le gain net global d'utiliser une matière première triée serait de l'ordre de 300 000 \$ par année.

Dans l'optique d'évaluer le potentiel et l'intérêt du tri de la matière première pour l'ensemble de l'industrie du sciage, on doit considérer certains points afin d'élargir les conclusions de cette étude. Premièrement, à bien des égards, les gains obtenus dans cette étude peuvent être considérés très conservateurs. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, le matériel trié lors des simulations ne compte pas pour 100 % de l'approvisionnement de la scierie étudiée, puisque seules les tiges, et non les billes qui représentent 20 %, étaient triées. Une scierie, qui aurait la totalité de son approvisionnement sous forme de tiges, devrait donc obtenir des gains en productivité plus élevés. De plus, rappelons que la variation de la dimension de la matière première était dans notre modèle un peu plus faible que celle documentée dans les statistiques de la compagnie. Il faut dire qu'au départ, cette variation est plus faible, selon toutes vraisemblances, pour la scierie étudiée que celle que l'on retrouve en général dans l'industrie du sciage car, à cette usine, les plus petites tiges sont sélectionnées et mises de côté pour alimenter la scierie de colombage adjacente. On peut donc supposer qu'une scierie plus typique aurait davantage de gains à contrôler son alimentation avec une matière première triée.

Par ailleurs, il est bien connu que le design de la scierie a une incidence directe sur sa productivité. Un des paramètres importants qui affecte le flot de la matière dans une scierie est sans aucun doute la présence ou non de bacs de classement de billes avant les lignes de sciage. Et lorsqu'ils sont présents, le nombre de ces bacs influence les performances de la scierie car les bacs de classement offrent des zones importantes d'accumulation qui permettent de fournir les lignes de sciage lors d'arrêts des équipements en amont, de stocker

des billes lors d'arrêts des lignes de sciage et, jusqu'à un certain point, de compenser pour les éventuels déséquilibres dans la dimension des billes. Il aurait donc été intéressant, pour compléter notre étude, de vérifier ce que seraient les gains en productivité associés au triage des tiges si la scierie ne possédait pas de bacs. Plusieurs scieries ont, en effet, pas ou peu de bacs d'accumulation après la zone d'écorçage. Avec le logiciel de flux, il aurait été possible de modifier le design de la scierie en enlevant les bacs et d'établir un nouveau cas de référence sans tri de la matière première. Ce cas de référence aurait pu être, par la suite, comparé avec une situation de tri des tiges en utilisant, par exemple, la méthode de contrôle se basant sur le volume moyen aux écorceuses. Voilà un sujet intéressant pour de prochaines études !

En conclusion à cette section sur les résultats, nous pouvons dire que le triage des tiges, accompagné d'une méthode adéquate de contrôle de l'alimentation, permet de faire des gains importants de productivité car cela régularise la dimension des bois débités circulant dans la scierie. Pour avoir une évaluation précise de ces gains pour une scierie particulière, il faudra cependant faire une étude de cas en utilisant les paramètres propres à la scierie en question.

Conclusion

L'objectif principal de ce projet était de déterminer s'il existe des bénéfices à trier les tiges par dimensions, en vue d'alimenter une scierie de façon plus productive. Pour réaliser cette étude, une approche par simulation a été utilisée. Une scierie québécoise a été choisie pour y faire le projet. Le logiciel QUEST, un simulateur de procédés manufacturiers par événements discrets, a été configuré pour représenter les aspects concernant le flux des pièces de cette scierie. Auparavant, le logiciel Optitek, un simulateur de débitage, a été mis à contribution pour obtenir des solutions de débitage, propres à la scierie étudiée, pour 255 billes échantillons scannées.

Le design de la scierie a été recréé dans le logiciel QUEST. Les vitesses d'avance des convoyeurs et les vitesses d'alimentation des équipements ont été incluses ainsi que les différentes options de cheminement des pièces dans la scierie. L'efficacité des équipements a été considérée en incorporant la fréquence et la durée des arrêts par machine. De plus, des efforts ont été mis afin de bien cerner et de reproduire, dans le modèle, les décisions humaines ayant une influence sur le flux des pièces. On pense surtout à l'alimentation des lignes de sciage à partir des bacs de classement des billes écorcées. Un modèle de flux représentant la situation actuelle de la scierie a ainsi été obtenu. Bien que ce modèle n'ait pas été validé de façon exhaustive, il a été jugé par des membres du personnel de la scierie, comme correspondant bien à la réalité, principalement en ce qui concerne le nombre de billes transformées aux différentes machines et les volumes de sciage produits par faction de travail. Les outils de simulation choisis se sont avérés tout à fait adéquats pour modéliser la complexité du flux des bois dans la scierie. En effet, le simulateur de débitage Optitek permet d'obtenir des solutions de débitage très réalistes tandis que le logiciel de simulation du flux QUEST offre beaucoup de flexibilité dans son langage de programmation.

Par la suite, le modèle a été modifié afin d'y inclure une étape de tri des tiges selon trois classes de diamètre à hauteur de souche (DHS). La première classe est celle des tiges de faible diamètre et comprend les tiges de classe de DHS de 14 cm et moins. La seconde

classe, celle des tiges de dimension moyenne, contient les tiges dont le DHS se situe entre 16 et 26 cm. La troisième classe, celle des tiges de forte dimension, inclut les tiges de DHS égal ou supérieur à 28 cm. Pour gérer la façon dont le bois des différentes classes de dimension est amené à la scierie, différents indicateurs de l'état du système de production ont été utilisés. Ces indicateurs sont : le volume moyen des billes écorcées des cinq dernières minutes; le niveau d'occupation des bacs de classement des billes; et le volume moyen des tiges tronçonnées. Pour chacun de ces indicateurs, des bornes ont été établies, par essais et erreurs, en vue d'appliquer des recettes d'alimentation à partir des trois catégories de dimension des tiges.

Le modèle de référence, c'est-à-dire celui où il n'y a aucun tri de la matière première, a été utilisé afin de simuler 65 factions de travail. Les résultats ont ensuite fait l'objet d'analyses statistiques afin de vérifier l'existence d'une relation entre le volume de sciage produit dans une faction de travail et certaines variables explicatives. Des équations, obtenues par analyses de régression multiple, ont été établies afin d'exprimer la productivité de la scierie sous l'angle de la production de sciage brut en volume nominal. Les variables explicatives qui ont été retenues dans ces équations sont le volume des billes sciées et les arrêts au poste d'éboutage. De la même façon, le modèle incluant le tri des tiges en trois classes de dimension a été simulé. Des séries de simulations ont été réalisées pour chacune des trois méthodes de contrôle de l'alimentation. Les résultats ont été analysés par régression multiple et des équations exprimant la production en fonction du volume des billes sciées et des arrêts au poste d'éboutage ont aussi été établies.

En comparant les différentes équations de productivité, et ce au même niveau des variables explicatives, on peut affirmer qu'il y a des bénéfices importants lorsqu'on utilise une matière première triée par dimensions en comparaison à une situation où la matière première ne subit aucun tri préalable. Cependant, la méthode utilisée pour contrôler l'alimentation a une influence très importante sur les gains. En effet, dans le meilleur des cas, nous avons obtenu un gain de 4,7 % avec la méthode de contrôle basée sur le volume moyen des billes écorcées. La méthode utilisant le contrôle par le niveau d'occupation des bacs de classement des billes a, pour sa part, amené un gain de 3,5%. Par contre, la

méthode de contrôle par le volume moyen des tiges tronçonnées n'a généré aucun gain significatif. Cela démontre qu'il ne suffit pas de trier la matière première ; il faut aussi gérer efficacement la façon dont cette matière première est alimentée dans la scierie. Pour faire une bonne gestion du flux, il est essentiel de définir une variable qui se révèle un bon indicateur de l'état du système. Il faut être en mesure de suivre cette variable en continu dans le temps et de fixer des balises qui permettent de prendre les bonnes décisions quant aux dimensions des tiges à entrer dans la scierie.

Finalement, nous avons cherché à savoir si le tri des tiges par dimensions était une opération rentable pour une scierie. D'une part, nous avons fixé que la production additionnelle de sciages avait une valeur, nette de coûts, de 120\$/Mpmp. Pour ce faire, nous avons posés des hypothèses réalistes sur les prix de vente et les coûts, basées sur les données réelles de la scierie au moment de l'étude. D'autre part, pour statuer sur les coûts supplémentaires engendrés par l'ajout d'opérations de triage lors de la récolte en forêt, nous sommes basés sur les données disponibles. Nous avons ainsi établi que le coût de triage étaient d'environ 1,00\$/m³. Avec ces données, nous avons ainsi pu démontrer qu'une scierie qui transforme annuellement 500 000 m³ de bois, dont 80% est trié selon ses dimensions peut atteindre un gain net de l'ordre de 300 000 \$ par année en utilisant une matière première triée.

Il demeure que la rentabilité globale du triage par dimensions de la matière première reste à établir avec plus de précision pour chaque unité de production visée. Non seulement les hypothèses des coûts engendrés par le triage doivent être calculés selon les méthodes de récolte propres à chaque entreprise mais également les gains de productivité de chaque scierie seront différents. En effet, le design de chaque scierie a une incidence directe sur sa productivité et sur la façon qu'elle réagira lorsqu'elle transformera une matière première triée.

Bibliographie

Adams, E. L., 1984.

DESIM: A system for designing and simulating hardwood sawmill systems. USDA Forest Service, General Technical Report NE-89.

Airth, J.M. et W.W. Calvert, 1973.

Simulation of log sawing by computer. Computing and applied statistics directorate, Environment Canada, Ottawa, ON.

Aune, J.E., 1974.

System simulation: a technique for sawmill productivity analyses and designs, Forestry Chronicle, 50 (2), 66-69.

Aune, J.E., 1977.

Computerized sawmill design: Model versus reality. Proceedings of the fifth wood machining seminar, University of California, forest Products Laboratory, Richmond, California.

Carino, H.F. et J.L. Bowyer, 1979.

New tool for solving materials flow problems: a computer-based model for maximizing output at minimum cost. Forest Products Journal, 29 (10), 84-90.

Dobie, J., 1970.

Advantages of log sorting for chipper headrigs. Forest Products Journal, 20 (1), 19-24.

Gingras, J.-F., 1996.

Le coût de séparation des produits pendant la récolte. Institut canadien de recherches en génie forestier. Fiche technique FT-245. 12 p.

Grace, L.A., 1993.

Exploring the potential of using optical log scanners for predicting lumber grade. Forest Products Journal, 43 (10), 45-50.

Grondin, F. et N. Drouin, 1995.

Nouveau modèle de simulation de sciage, Rapport technique projet 3345K341, Forintek Canada Corp.

Hallock, H. et D.W. Lewis, 1971.

Increase softwood dimension yield from small logs – Best Opening Face, USDA Forest Service Research Paper FPL-166.

Holmes, S., 1976.

Introduction to operations research as applied in forest products industries. Forest Products Journal, 26 (1), 17-22.

Forintek Canada Corp, 2001.

Bois de sciage et produits à valeur ajoutée, Ottawa, Industrie Canada, p. 28, coll. « Carte routière technologique ».

Jäppinen, A., M. Nylinder, 1997.

Automatic sorting of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) sawlogs by grade. Holz als Roh und Werkstoff, 55 (5), 301-305.

Jones, D.S., 1956.

Swedish frame saws. *Australian Timber Journal*, 22 (5), 484-498, 563.

Lemieux, H., M. Beaudoin, S.Y. Zhang et F. Grondin, 2002.

Improving structural lumber quality in a sample of *Picea mariana* logs sawn according to the knots. *Wood and Fiber Science*, 34 (2), 266-275.

Mongeau, J.P. et M. Grondin, 1992.

Un nouveau modèle de simulation du débitage. Rapport technique projet 3343K388, Forintek Canada Corp.

Orbay, L., 1984.

Computer simulation of overseas product manufacturing potentials of a redesigned multipass headrig mill in coastal British Columbia. Thèse de Doctorat. Department of Forestry. University of British Columbia. Vancouver (BC).

Pnevmaticos, S.M., Y. Corneau et R.C. Kerr, 1981.

Rendement et productivité dans la transformation de troncs entiers de résineux. Laboratoire de L'Est. Rapport 507F. 13 p.

Porter, J.H., 1972.

Some new ideas in small log sorting and control systems. *Canadian Forest Industries*, 92 (10), 32-34, 36, 37.

Randhawa, S.U., C.C. Brunner, J.W. Funck et G. Zhang, 1994.

A discrete-event object-oriented modeling environment for sawmill simulation. *Simulation*, 64 (2), 119-130.

Sampson, G. R., 1979.

Effects of oversimplification inherent in LP models of primary wood processing operations. *Forest Products Journal*, 29 (5), 23-27.

Verret, D., 1997.

Modélisation du flux des bois dans les usines de sciage. Thèse de Maîtrise. Département de mathématiques et de statistique. Université Laval. Sainte-Foy. QC.

Wagner, F.G. et F.W. Taylor, 1983.

SPSM: a southern pine sawmill model. *Forest Products Journal*, 33 (4), 37-43.

Williston, E.M., 1988.

Lumber manufacturing: the design and operation of sawmills and planer mills. Miller Freeman Publications, San Francisco, 471 p.

ANNEXES

Annexe 1. Distributions de fréquence des DHS des tiges pour les 64 parcelles échantillons

Annexe 2. Attributs des 255 billes-types

#bille	Patron de débitage	Diametre 1 (po)	Diametre 2 (po)	Longueur (po)	Dosse	Dosse-rejet	pièces	pièces rejet	reman
1	10	2,0	2,0	30,00	0	0	0	0	0
2	10	2,0	2,0	72,00	0	0	0	0	0
3	9	9,9	10,4	196,80	2	0	4	1	0
4	1	3,0	3,8	196,80	0	0	0	0	1
5	10	2,5	2,4	157,44	0	0	0	1	0
6	1	3,2	3,4	196,80	0	0	1	1	0
7	1	3,0	3,1	196,80	0	0	0	1	1
8	1	3,3	3,3	196,80	0	0	0	0	1
9	3	4,7	5,6	196,80	0	0	2	0	0
10	10	2,8	2,6	153,50	0	0	0	1	0
11	10	3,0	3,0	164,92	0	0	0	1	0
12	3	4,6	4,9	196,80	0	0	1	0	0
13	10	2,6	3,1	196,80	0	0	0	1	0
14	10	3,1	2,8	144,06	0	0	0	1	0
15	9	15,0	16,0	196,80	2	0	5	0	0
16	8	9,1	9,0	196,80	1	0	3	0	1
17	10	3,0	2,8	149,57	0	0	0	1	0
18	10	3,1	2,7	127,13	0	0	0	1	0
19	1	3,1	3,5	196,80	0	0	1	0	0
20	10	3,0	3,1	172,79	0	0	0	1	0
21	1	4,0	3,9	156,26	0	0	1	0	1
22	1	3,5	2,8	131,46	0	0	1	0	1
23	8	9,2	9,4	196,01	1	0	4	0	0
24	8	8,8	9,1	196,80	1	0	3	0	1
25	8	9,0	9,4	196,80	1	0	4	0	0
26	8	9,4	9,6	196,80	1	0	4	0	0
27	8	8,9	9,1	192,86	1	0	3	0	0
28	9	9,0	9,1	194,83	1	1	4	0	1
29	7	7,5	7,6	196,80	0	0	3	0	0
30	7	7,2	7,3	196,80	0	0	3	0	0
31	6	6,9	6,8	196,80	0	0	3	0	0
32	6	6,5	7,0	196,80	0	0	3	0	0
33	7	7,1	7,0	197,98	0	0	1	0	2
34	6	6,7	6,9	196,80	0	0	2	0	1
35	7	7,3	7,4	196,01	0	0	3	0	0
36	7	8,1	8,3	196,01	0	0	3	0	0
37	6	6,6	6,7	196,80	0	0	2	0	1
38	6	6,6	6,8	196,01	0	0	3	0	0
39	7	7,4	7,7	199,95	0	0	2	0	1
40	7	6,9	7,4	194,04	0	0	1	0	2
41	7	6,8	7,1	196,80	0	0	2	0	1
42	6	6,6	6,7	196,01	0	0	3	0	0
43	7	6,9	7,0	196,01	0	0	1	0	2
44	6	6,5	7,1	196,80	0	0	2	0	0
45	7	6,9	6,9	196,01	0	0	1	0	2
46	7	7,0	7,0	196,01	0	0	1	0	2
47	7	7,0	7,5	197,98	0	0	1	0	2

#bille	Patron de débitage	Diametre 1 (po)	Diametre 2 (po)	Longueur (po)	Dosse	Dosse-rejet	pièces	pièces rejet	reman
48	7	8,1	8,1	196,80	0	0	2	0	0
49	7	6,9	7,0	196,01	0	0	2	0	1
50	6	6,6	6,6	196,01	0	0	3	0	0
51	7	7,5	7,7	196,80	0	0	2	0	1
52	7	6,6	7,0	196,80	0	0	2	0	1
53	7	7,0	7,2	196,01	0	0	2	1	0
54	7	6,8	7,1	196,01	0	0	3	0	0
55	7	7,5	7,7	196,80	0	0	3	0	0
56	7	7,1	7,3	197,98	0	0	2	0	1
57	7	8,0	8,5	196,80	0	0	3	0	0
58	7	8,0	8,6	196,80	0	0	3	0	1
59	7	7,9	8,1	194,83	0	0	3	0	0
60	7	7,4	7,6	196,80	0	0	3	0	0
61	7	8,5	8,7	196,80	0	0	4	0	0
62	7	7,8	8,1	196,01	0	0	3	0	0
63	7	8,1	8,3	196,80	0	0	4	0	0
64	7	8,1	8,6	196,80	0	0	3	0	1
65	7	8,0	8,2	196,80	0	0	3	0	0
66	7	7,6	8,1	196,80	0	0	3	0	0
67	7	7,5	7,9	196,80	0	0	3	0	0
68	6	5,8	6,3	197,98	0	0	2	0	0
69	6	6,1	6,6	196,01	0	0	2	0	1
70	6	6,2	6,3	196,80	0	0	3	0	0
71	6	6,0	6,3	196,01	0	0	2	0	0
72	6	6,8	6,7	194,83	0	0	2	0	0
73	6	5,8	6,1	196,80	0	0	3	0	0
74	6	6,0	6,1	196,01	0	0	2	0	0
75	6	6,2	6,2	190,11	0	0	2	0	1
76	6	6,0	6,2	197,98	0	0	2	0	0
77	6	5,4	5,7	197,98	0	0	2	0	1
78	6	5,8	6,1	196,80	0	0	2	0	1
79	6	6,0	6,3	196,80	0	0	2	0	0
80	6	6,3	6,7	196,80	0	0	2	0	1
81	6	6,3	6,5	196,80	0	0	2	0	0
82	6	6,5	6,7	196,80	0	0	2	0	0
83	6	6,2	6,4	196,80	0	0	2	1	0
84	6	6,1	6,5	196,01	0	0	3	0	0
85	6	5,9	6,2	196,01	0	0	2	0	1
86	6	6,7	6,9	194,83	0	0	2	0	1
87	6	6,2	6,4	196,01	0	0	3	0	0
88	6	6,2	6,5	196,01	0	0	3	0	0
89	6	6,9	7,0	196,80	0	0	3	0	0
90	6	6,5	6,6	196,01	0	0	3	0	0
91	8	8,4	9,0	196,01	1	0	4	0	0
92	7	8,6	8,6	197,98	0	0	3	0	1
93	8	9,2	9,4	196,01	1	0	2	0	2
94	8	8,9	9,2	196,80	1	0	4	0	0

#bille	Patron de débitage	Diametre 1 (po)	Diametre 2 (po)	Longueur (po)	Dosse	Dosse-rejet	pièces	pièces rejet	reman
95	8	9,3	9,5	196,80	1	0	2	0	1
96	8	9,0	9,0	196,80	1	0	3	0	1
97	8	9,0	9,4	196,80	1	0	4	0	0
98	8	8,9	9,3	196,01	1	0	4	0	0
99	7	8,6	8,7	196,01	0	0	3	0	1
100	8	8,9	9,3	194,83	1	0	4	0	0
101	8	9,1	9,4	198,77	1	0	4	0	0
102	8	9,2	9,2	196,01	1	0	3	0	1
103	8	9,0	9,0	196,80	1	0	4	0	0
104	8	8,8	9,0	196,80	1	0	3	0	0
105	9	10,0	10,0	196,80	2	0	5	0	0
106	8	9,8	10,1	196,80	1	0	4	0	0
107	9	10,9	11,0	196,80	2	0	5	0	0
108	9	9,8	10,1	196,80	1	1	5	0	0
109	9	11,1	11,7	196,80	2	0	5	0	0
110	9	10,6	10,9	196,80	2	0	5	0	0
111	9	10,9	11,0	196,80	2	0	5	0	0
112	9	10,4	10,4	196,01	2	0	5	0	0
113	9	11,4	11,8	194,83	2	0	4	0	1
114	9	11,4	12,4	203,10	2	0	5	0	0
115	6	6,2	6,4	197,98	0	0	2	0	0
116	7	6,9	7,6	175,94	0	0	2	0	0
117	7	7,0	7,1	196,01	0	0	2	0	1
118	7	7,5	7,5	196,80	0	0	3	0	0
119	7	7,0	7,6	196,80	0	0	2	0	1
120	7	7,7	8,2	201,92	0	0	2	0	1
121	7	6,9	7,1	199,95	0	0	2	0	1
122	7	7,0	7,2	197,98	0	0	3	0	0
123	7	7,0	7,2	196,80	0	0	2	0	1
124	7	6,8	7,0	196,80	0	0	2	0	1
125	7	7,4	7,5	197,98	0	0	3	0	0
126	7	7,1	7,5	196,80	0	0	3	0	0
127	6	6,4	7,1	196,80	0	0	2	0	0
128	7	6,9	7,2	196,80	0	0	2	0	0
129	7	7,4	7,6	196,80	0	0	1	0	1
130	7	7,0	7,3	196,80	0	0	3	0	0
131	7	7,3	7,5	196,80	0	0	2	0	0
132	7	6,9	7,3	197,98	0	0	2	0	1
133	7	7,7	8,3	194,83	0	0	3	0	0
134	7	7,1	7,2	196,80	0	0	3	0	0
135	7	7,2	7,5	196,01	0	0	2	0	1
136	4	5,5	6,3	196,80	0	0	2	0	1
137	3	4,8	5,2	196,01	0	0	2	0	0
138	3	5,0	5,4	198,77	0	0	2	0	0
139	10	2,8	3,3	196,01	0	0	0	1	0
140	1	3,6	3,6	144,06	0	0	0	0	2
141	3	5,3	5,7	196,80	0	0	2	0	0

#bille	Patron de débitage	Diametre 1 (po)	Diametre 2 (po)	Longueur (po)	Dosse	Dosse-rejet	pièces	pièces rejet	reman
142	3	4,6	5,0	197,98	0	0	1	0	0
143	1	5,2	3,1	123,98	0	0	1	0	0
144	3	6,3	6,6	196,80	0	0	1	1	0
145	3	5,0	5,1	194,04	0	0	2	0	0
146	3	4,6	4,8	196,80	0	0	1	0	1
147	3	4,6	5,0	196,80	0	0	1	0	1
148	3	4,7	4,3	144,06	0	0	2	0	0
149	4	5,4	5,7	196,80	0	0	1	0	0
150	4	5,0	5,5	196,01	0	0	2	0	1
151	10	4,5	4,8	194,83	0	0	0	1	0
152	3	5,0	5,3	197,98	0	0	2	0	0
153	3	5,0	5,7	194,83	0	0	2	0	0
154	3	4,9	5,0	196,01	0	0	2	0	0
155	3	4,3	4,8	194,04	0	0	1	0	1
156	4	5,2	5,3	197,98	0	0	2	0	0
157	10	2,6	2,2	142,88	0	0	0	1	0
158	3	5,0	5,3	175,15	0	0	2	0	0
159	1	2,9	2,8	170,04	0	0	1	1	0
160	3	5,0	5,2	198,77	0	0	2	0	0
161	3	4,7	5,0	196,01	0	0	1	0	1
162	4	5,2	5,8	196,80	0	0	1	0	1
163	1	3,7	3,4	122,02	0	0	0	1	0
164	4	5,0	5,2	196,80	0	0	1	0	0
165	3	5,7	5,9	194,04	0	0	2	0	0
166	3	5,6	5,8	196,80	0	0	1	1	0
167	5	6,2	6,6	194,04	0	0	3	0	0
168	3	5,0	5,3	196,80	0	0	2	0	0
169	4	5,0	5,4	196,80	0	0	2	0	0
170	4	5,3	5,5	196,80	0	0	1	0	1
171	3	5,2	5,3	196,80	0	0	2	0	0
172	3	4,5	4,8	196,01	0	0	2	0	0
173	3	4,8	5,0	197,98	0	0	2	0	0
174	3	5,4	5,7	194,04	0	0	0	0	1
175	1	6,8	6,5	185,78	0	0	1	0	1
176	3	5,0	5,2	196,01	0	0	2	0	0
177	3	4,6	4,6	164,13	0	0	1	0	1
178	3	5,6	5,7	196,80	0	0	2	0	0
179	4	5,8	6,1	196,80	0	0	2	0	0
180	4	5,9	6,1	196,80	0	0	2	0	1
181	1	2,9	3,1	196,01	0	0	0	0	1
182	1	3,9	4,1	196,80	0	0	1	1	0
183	5	6,3	6,9	194,83	0	0	3	0	0
184	3	4,5	5,0	199,95	0	0	2	0	0
185	1	3,9	4,6	181,84	0	0	0	0	1
186	3	5,5	5,7	194,83	0	0	1	1	0
187	4	5,6	5,7	196,80	0	0	2	0	1
188	4	5,8	6,1	196,80	0	0	2	0	0

#bille	Patron de débitage	Diametre 1 (po)	Diametre 2 (po)	Longueur (po)	Dosse	Dosse-rejet	pièces	pièces rejet	reman
189	1	3,7	3,8	190,11	0	0	1	0	1
190	1	3,3	3,5	183,02	0	0	0	1	0
191	3	5,5	5,6	190,90	0	0	2	0	0
192	3	4,9	5,3	196,01	0	0	1	0	1
193	3	5,5	5,7	194,04	0	0	2	0	0
194	3	4,7	5,1	194,83	0	0	2	0	0
195	3	5,4	5,5	192,86	0	0	2	0	0
196	3	4,8	5,1	197,98	0	0	1	1	0
197	3	6,1	6,3	196,80	0	0	2	0	0
198	3	4,5	4,6	194,83	0	0	1	0	1
199	3	4,9	5,0	177,91	0	0	1	0	1
200	4	5,2	5,6	196,80	0	0	2	0	0
201	10	3,0	3,3	194,04	0	0	0	1	0
202	3	4,6	4,7	194,83	0	0	1	0	1
203	3	4,6	4,6	194,83	0	0	2	0	0
204	3	5,5	5,0	148,78	0	0	2	0	0
205	1	3,8	4,2	194,83	0	0	1	0	0
206	10	2,5	2,6	153,90	0	0	0	1	0
207	4	5,8	6,1	196,80	0	0	2	0	0
208	4	5,2	5,4	194,83	0	0	0	1	1
209	1	3,4	3,5	192,86	0	0	1	1	0
210	1	3,0	2,7	120,05	0	0	0	1	0
211	1	3,9	3,9	166,89	0	0	1	0	0
212	10	2,3	2,3	157,83	0	0	0	1	0
213	3	4,3	4,5	196,01	0	0	2	0	0
214	1	4,5	4,6	194,83	0	0	1	0	1
215	1	4,9	5,0	168,85	0	0	1	0	1
216	1	3,8	3,9	194,04	0	0	1	0	1
217	3	4,6	4,9	196,01	0	0	1	0	1
218	3	4,7	5,0	196,01	0	0	2	0	0
219	3	4,8	4,9	198,77	0	0	2	0	0
220	3	4,6	5,0	194,83	0	0	0	0	1
221	3	4,6	4,8	196,01	0	0	2	0	0
222	3	4,5	4,6	194,83	0	0	1	0	1
223	4	5,3	5,7	196,80	0	0	2	0	1
224	1	4,4	4,4	153,90	0	0	0	0	1
225	10	4,3	4,5	192,86	0	0	0	1	0
226	1	3,9	4,3	194,04	0	0	0	2	0
227	5	6,0	6,3	198,77	0	0	3	0	0
228	1	4,2	4,4	194,83	0	0	1	0	1
229	3	4,3	4,6	196,80	0	0	2	0	0
230	3	4,6	4,9	194,83	0	0	2	0	0
231	3	5,8	6,0	196,01	0	0	1	0	0
232	3	4,5	4,9	197,98	0	0	1	1	0
233	3	5,3	5,7	196,80	0	0	2	0	0
234	1	4,6	4,9	194,83	0	0	1	0	1
235	10	2,7	2,1	129,10	0	0	0	1	0

#bille	Patron de débitage	Diametre 1 (po)	Diametre 2 (po)	Longueur (po)	Dosse	Dosse-rejet	pièces	pièces rejet	reman
236	1	4,3	4,7	196,01	0	0	0	1	1
237	3	5,3	5,1	151,14	0	0	1	0	0
238	10	4,3	4,3	170,04	0	0	0	2	0
239	1	4,5	4,6	170,04	0	0	0	0	1
240	1	4,6	4,9	196,01	0	0	0	0	1
241	10	4,4	4,6	192,08	0	0	0	1	0
242	4	5,0	5,2	194,83	0	0	2	0	0
243	3	4,7	5,0	196,01	0	0	1	0	1
244	1	3,0	2,7	122,02	0	0	0	0	2
245	3	5,8	5,9	197,98	0	0	1	0	1
246	1	4,2	4,6	196,01	0	0	0	0	1
247	3	4,6	5,1	196,01	0	0	1	0	1
248	5	6,6	6,8	192,08	0	0	2	0	1
249	3	4,6	4,2	181,84	0	0	0	1	1
250	1	3,5	3,5	148,78	0	0	0	0	2
251	4	5,5	5,8	196,80	0	0	2	0	1
252	3	5,1	5,3	199,95	0	0	2	0	0
253	5	5,8	5,9	196,80	0	0	0	1	0
254	3	4,4	5,0	194,83	0	0	1	0	0
255	3	4,4	4,7	196,01	0	0	1	0	0