

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEUR

D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

D'EBOLOWA

DEPARTEMENT DE D'INGENIERIE

DU BOIS



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TECHNICAL TEACHER

TREINING COLLEGE OF

EBOLOWA

DEPARTMENT OF OF WOOD

ENGINEERING

Filière
MÉTIERS BOIS

**MODELISATION, SIMULATION ET
OPTIMISATION DU RENDEMENT AU SCIAGE
DES BILLES COURBES**

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement

Technique et

Professionnel de 2e grade (DIPET II)

Par : Ricky Marving TAKOUDJOU KAMGAING

Sous la direction de

Pr. Dr. Ing. NJANKOUO Jacques Michel

Maître de conférences à l'Université de

Yaoundé I

NGANDAM FIFEN Berthe

Ingénieur en Valorisation Industrielle des

Produits Forestiers Ligneux

Année Académique : 2019 - 2020



FICHE DE CERTIFICATION DE L'ORIGINALITÉ DU TRAVAIL

Je soussigné, **Ricky Marving TAKOUDJOU KAMGAING**, étudiant à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET) de l'Université de Yaoundé 1 à Ebolowa, matricule 18W405, atteste que le contenu du présent mémoire de fin de formation est le fruit de mes propres travaux effectués au sein de la Société **DINO ET FILS SA (JDF)** à Nkolofoulou dans la région du centre Cameroun sur le thème : « **MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION DU RENDEMENT AU SCIAGE DES BILLES COURBES** ».

Ce travail a été effectué sous l'encadrement technique de **Pr. Dr. Ing. NJANKOUO Jacques Michel** Maître de conférences à l'Université de Yaoundé I et **Mme NGANDAM FIFEN Berthe**, Assistante à la Direction commerciale de JDF.

Ce mémoire est authentique et n'a pas été l'objet d'aucune présentation antérieure pour l'acquisition de quelque grade universitaire que ce soit.

Nom et signature de l'auteur

Ricky Marving TAKOUDJOU KAMGAING

DATE.....

Visa du Directeur de mémoire

Visa du Chef de Département

DATE.....

DATE.....

DEDICACE



REMERCIEMENTS

Je transmets mes sincères remerciements et ma plus vive reconnaissance à l'ensemble des personnes suivantes, sans qui la rédaction de ce mémoire n'aurait pas été possible :

M. TALOM Justin, Président Directeur Général de la société DINO ET FILS qui m'a permis d'effectuer mon stage dans la structure dont il a la charge ;

Pr. NDJAKOMO Salomé, directeur de l'ENSET d'Ebolowa pour le travail qu'elle ne cesse d'abattre pour le bon déroulement de notre formation et sa bienveillance quant à l'écoute de nos préoccupations ;

Pr.Dr.Ing NDJANKOUO Jacques Michel, chef de département pour son encadrement, sa disponibilité à l'égard de mes préoccupations et ses conseils ;

Aux membres de mon jury, Pr. NZESSE Ladislas qui a présidé mon jury de mémoire, **Pr. NJANKOUO Jacques Michel** qui a accepté de rapporter sur mes travaux, **Dr. TIOGUE** qui a accepté d'examiner ce travail afin d'y apporté des éléments d'améliorations ;

Mme NGANDAM FIFEN Berthe, pour son encadrement et son soutien technique ;

M. KOMLA Nestor, pour ses conseils techniques et son apport dans la rédaction de ce mémoire ;

A mes parents, mes petits frères et sœur pour leur soutien et les multiples encouragements porté sans cesse à mon égard ;

Mon Frère KWEKEM Johnny Clint, pour son appui financier, technique et professionnel, ainsi que tous ses encouragements portés à mon égard tout au long de la formation ;

M. NJUAFAC Loris NTELLAH, pour ses conseils techniques et son apport dans la rédaction de ce mémoire ;

Au personnel enseignant et non enseignant de l'ENSET d'Ebolowa pour l'encadrement académique qu'ils m'ont apporté tout au long de notre formation ;

Mlle AVOMO Ruth Clairance, pour ses encouragements et son aide lors de la rédaction de ce mémoire ;

A tous les membres de l'unité de transformation de la société JDF pour leur accueil ;

A mes amis et collègues de l'ENSET pour leur solidarité et leur esprit de partage.

TABLE DES MATIERES

FICHE DE CERTIFICATION DE L'ORIGINALITÉ DU TRAVAIL.....	
DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
LISTE DES ABREVIATIONS	viii
RESUME.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION.....	1
Contexte et justification de l'étude.....	1
Problématique de l'étude.....	1
Objectifs de l'étude	2
Objectif général	2
Objectifs spécifiques	2
Hypothèses de recherche	2
Intérêt de l'étude.....	3
Limite de l'étude	3
Plan du mémoire.....	3
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE.....	4
I.1. Définition de quelques concepts.....	4
I.2. Description du Tali (<i>Erythrophleum ivorense</i>).....	5
I.3. Quelques généralités sur le débitage	5
I.3.1. Etapes du sciage	6
I.3.2. Modes de débitage.....	6
I.4. Généralités sur la modélisation des arbres	9

I.4.1.	Modèle mathématique développé par Bouzinekis et Martin.....	10
I.4.2.	Modèle mathématique développé par R. DANWE, I. BINDZI, L. MEVA'A, B. MBAGNIA.....	12
I.5.	Généralités sur le diagramme ou patron de débitage.....	13
I.5.1.	Etude de la variation au sciage et calcul de la dimension cible	14
I.5.2.	Calcul de la dimension cible	16
I.5.3.	Importance du premier trait de scie.....	18
I.5.4.	Evaluation du défilement linéaire ou conicité.....	18
I.5.5.	Quelques définitions et dimensions nominales relatives aux éléments de structure	19
I.6.	Généralités sur cubage et le rendement matière	21
I.6.1.	Modèle théorique.....	21
I.6.2.	Pratique du cubage commercial des grumes	21
I.6.3.	Cubage des pièces débitées	21
I.6.4.	Rendement matière.....	22
CHAPITRE II :	MATERIEL ET METHODES.....	23
II.1.	Présentation de la structure d'accueil	23
II.1.1.	Localisation de la structure	23
II.1.2.	Opérations réalisées au sein de l'usine.....	24
II.2.	Méthodologie.....	26
II.2.1.	Collecte des données	26
II.2.2.	Traitement des données	30
II.3.	Logiciels de traitement des données	44
CHAPITRE III :	RESULTATS ET DISCUSSION	45
III.1.	Modélisation des billes courbes	45
III.1.1.	Détermination de l'équation de la partie convexe de la bille	46
III.1.2.	Détermination de l'équation de la partie concave de la bille	47

III.2.	Simulation du débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage	52
III.2.1.	Détermination des paramètres de simulation.....	52
III.2.2.	Simulation proprement dite : cas des pièces de grandes longueurs.....	57
III.2.3.	Simulation du débitage des billons après tronçonnage des billes.....	64
III.3.	Cubages et rendement matière du processus de sciage.....	66
CONCLUSION		70
RECOMMANDATIONS.....		71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		72
ANNEXES		74

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Tali (<i>Erythrophleum ivorense</i>)	5
Figure 2 : Les étapes du sciage	6
Figure 3 : Les différents modes de débit	9
Figure 4 : Paramètres mesurés sur chaque arbre	11
Figure 5 : Méthode de détermination des courbes $F_2(x)$ et $F_3(x)$	11
Figure 6 : Paramétrage d'un billon.....	13
Figure 7 : Carte de localisation Administrative de l'unité de transformation de la société DINO ET FILS .SA (JDF) site de Nkolfoulou.....	23
Figure 8 : Scie de tête à ruban (CD10) de l'entreprise.....	24
Figure 9 : Déligneuse multi et mono lame de la scierie de JDF.....	25
Figure 10 : Ebouteuse de type DEWAT	25
Figure 11 : Colisage des avivés.....	26
Figure 12 : Prise des coordonnées des points sur la partie convexe	28
Figure 13 : Prise du diamètre sur la bille	29
Figure 14 : Mesurage des dimensions d'une pièce de bois	30
Figure 15 : Positionnement de la bille numéro 1 sur le chariot de la scie de tête	34
Figure 16 : Positionnement du premier trait de scie	40
Figure 17 : Forme géométrique et processus de valorisation de la dosse	43
Figure 18 : Courbes représentatives de la partie convexe des billes.....	46
Figure 19 : Courbes représentatives de la partie concave des billes	50
Figure 20 : Courbes représentatives du modèle mathématique de la bille numéro 1.....	51
Figure 21: Représentation de la flèche du modèle de la bille numéro 1 en vue 3D.....	53
Figure 22: Equarrissage de la bille N° 1 et dimensions du plateau centrale	57
Figure 23: Les types de dosses et plateau du modèle de la bille N° 1 en 3D.....	58
Figure 24 : Diagramme de débitage de la bille N° 1 pour des pièces de section 38 × 60mm	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs du facteur Z en fonction des pièces sous dimensionnées	17
Tableau 2 : Dimensions standardisées relatives aux éléments de structure	20
Tableau 3 : Données secondaires collectées par objectifs spécifiques	27
Tableau 4 : Coordonnées des points de la partie convexe et paramètres des bille	45
Tableau 5 : Coefficients des courbes $F_1(x)$ de la partie convexe des billes	47
Tableau 6 : Coordonnées du point I de $F_1(x)$ et des points E,F et G de la partie concave des billes.....	48
Tableau 7 : Coefficients des courbes $F_2(x)$ de la partie concave des billes	49
Tableau 8 : Paramètres de simulation	52
Tableau 9 : Moyennes et écarts types des épaisseurs present par pièce	54
Tableau 10 : Moyennes et écarts types des largeurs present par pièce.....	55
Tableau 11 : Dimensions cibles vertes brut et critique à 12% d'humidité final	56
Tableau 12 : Position du premier trait de scie et dimensions du plateau central de la bille ...	58
Tableau 13 : Nombre de pièces en épaisseur et en largeur sur le plateau principal.....	59
Tableau 14 : Nombre de pièce de longueur maximale obtenue dans le plateau principal selon la section des avivés à produire	60
Tableau 15 : Hauteurs des dosses et longueurs maximales de pièces.....	60
Tableau 16 : Nombre de pièces de section 38×60 mm issues du débitage des dosses de la bille numéro 1	61
Tableau 17 : Paramètres de simulation pour le débitage des billons	64
Tableau 18 : Nombre de pièces obtenue dans le plateau principal selon la section des avivés à produire.....	65
Tableau 19 : Volumes bruts, débités et rendement matière des billes échantillonnées	66
Tableau 20 : Rendement théorique et réel des billes selon les sections des débités produits. 67	
Tableau 21 : Volume théorique des débités selon les longueurs des pièces	68

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de collecte des paramètres de modélisation	74
Annexe 2 : Fiche de cubage des volumes réels	74
Annexe 3 : Diagrammes de débitage des billes échantillonnées	75
Annexe 4 : Equarrissage des billons constituant chaque bille	76

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR	: Agence Française de Normalisation
ANOR	: Agence de Normalisation Camerounaise
ATIBT	: Association Technique Internationale des Bois Tropicaux
CIFOR	: Center for International Forestry Research
CIRAD	: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CIRIS	: Centre International pour la Recherche et l'innovation Scientifique
ENSET	: Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique
FAO	: <i>Food and Agricultural Organisation</i> /Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
JDF	: DINO ET FILS
PIB	: Produit Intérieur Brut

RESUME

Les industries camerounaises de première transformation du bois en particulier celles du sciage sont caractérisées par un faible rendement estimé à moins de 30%. Suite au plan d'industrialisation du secteur bois adopté en 2012, la réduction des pertes de matière considérable engendrées par le sciage du bois dans nos industries de transformation est l'une des problématiques majeures pour l'instauration d'une transformation plus poussée. Celle-ci soulève un problème d'optimisation de la production, qui passe par la planification du sciage à travers des simulations par patrons de débitage et par l'usage de modèles numériques. Afin d'apporter un axe de solution, la présente étude portant sur « la modélisation et la simulation du débitage des billes courbes », a été réalisée au sein de l'unité de transformation du bois de la société DINO ET FILS SA située à Nkolfoulou, dans la région du Centre Cameroun. L'objectif principal était d'optimiser le rendement au sciage des billes présentant un défaut de courbure par des méthodes de modélisation et de simulation. Plus spécifiquement il s'agissait de modéliser une bille courbe ; simuler son débitage par l'usage de patrons de débitage et évaluer l'impact de cette méthode sur le rendement matière. Inspirées de la méthodologie de travail de Bouzinekis et Martin les données collectées sur un échantillon de 12 billes de Tali (*Erythrophleum ivorense*) ont permis d'établir un modèle mathématique basé sur l'usage de parabole pour représenter la bille. Les modèles obtenus ont permis de simuler de manière automatique le débitage des billes. Après conception des modèles numériques des billes, traitement des données, une analyse des résultats a permis d'établir les conclusions suivantes : la simulation à travers les diagrammes de débitage entraîne une augmentation du rendement de plus 16 % en moyenne ; le rendement matière dans le cas du sciage des pièces de longueurs plus petites est toujours plus grand que celui obtenu dans le cas des produits utilisant leurs longueurs totales (longueur maximale). En comparant uniquement les débités obtenus dans le plateau central, le volume obtenu après tronçonnage de la bille est pratiquement le double (1,1 à 1,63 fois) de celui obtenu sur toute la longueur. Ce coefficient diminue lorsque l'on considère les produits issus des dosses. Pour un même diamètre fin au bout des billes, le nombre de pièces de longueur maximale est fortement influencé par la flèche, il croit en sens opposé à celle-ci. Toutefois, cette méthode de modélisation présente des limites car elle ne modélise parfaitement que les billes présentant une courbure totale du tronc, et tient compte d'un seul défaut de courbure à la fois.

Mots clés : Modélisation, Diagramme de débitage, Optimisation, Rendement

ABSTRACT

The Cameroonian primary wood processing industries, in particular those of sawing, are characterized by a low yield estimated at less than 30%. Following the industrialization plan for the wood sector adopted in 2012, the reduction in material losses caused by sawing wood in our processing industries is one of the major issues for the establishment of further processing. This raises a problem of optimizing production, which involves planning sawing through simulations with debit patterns and using digital models. In order to provide a solution, this study on "modeling and simulating the cutting of curved logs" was carried out within the wood processing unit of the company DINO ET FILS SA located in Nkolfoulou, in the Center Region Cameroon. The main objective was to optimize the sawing performance of logs with a curvature defect by modeling and simulation methods. More specifically it was a question of modeling a curved ball; simulate its debitage by the use of debitage patterns and evaluate the impact of this method on the material yield. Inspired by the working methodology of Bouzinekis and Martin, data collected on a sample of 12 Tali beads (*Erythrophleum ivorense*) made it possible to establish a mathematical model based on the use of a parabola to represent the ball. The models obtained made it possible to automatically simulate the cutting of the logs. After designing the digital models of the logs and processing the data, an analysis of the results made it possible to establish the following conclusions: the simulation through the cutting diagrams leads to an increase in yield of more than 16% on average; the material yield in the case of sawing pieces of shorter lengths is always greater than that obtained in the case of products using their total lengths (maximum length). By comparing only, the flow rates obtained in the central plate, the volume obtained after cutting the ball is practically double (1.1 to 1.63 times) that obtained over the entire length. This coefficient decreases when we consider the products from the records. For the same end diameter, the number of pieces of maximum length is strongly influenced by the arrow, it grows in the opposite direction to it. However, this modeling method has limits because it only perfectly models logs with a total curvature of the trunk, and takes into account only one defect in curvature at a time.

Keywords: Modeling, Debit diagram, Optimization, Yield

INTRODUCTION

Contexte et justification de l'étude

La filière bois industriel est considérée aujourd'hui comme une filière cruciale dont la stabilité et le développement contribuent à l'équilibre macroéconomique du pays. Depuis l'interdiction partielle d'exportation de grumes imposée en 1999 par le Gouvernement camerounais, on observe une industrialisation croissante de la filière bois et une baisse significative des exportations de grumes, en revanche, une forte progression de volume de bois transformé. De 2008 à 2011 le sous-secteur bois industriel a créé une valeur ajoutée moyenne de 168,75 milliards de F CFA par an, soit une contribution au PIB de 1,5 % (Center for International Forestry Research [CIFORD], 2013). Néanmoins le rendement matière au sein des industries de première transformation du bois au Cameroun reste très bas.

Dans un souci d'amélioration de la compétitivité de son industrie forestière, la problématique d'instauration d'une transformation locale plus poussée des bois fait l'objet d'abondantes discussions et de plusieurs initiatives, au niveau national et sous régional. Suite au plan d'industrialisation du secteur bois adopté en 2012, il est évident qu'une thématique traitant d'une approche mathématique pour l'optimisation du rendement, fondée sur la modélisation et la simulation du sciage à travers les diagrammes ou patrons de débitage soit la bienvenue. Cette thématique visant à l'amélioration du rendement au sciage des billes fera l'objet de cette étude.

Problématique de l'étude

Moins de 50% du bois qui entre en usine ressort sous forme de produits finis (Cerutti, Mbongo, & Vandenhoute, 2015 ; Laporte, 2019). La perte de matières premières dans les industries de sciage atteint des proportions élevées (Danwe, Bindzi, Meva'a, & Mbagnia, 2009) ce qui influence négativement sur le rendement matière des unités de transformation.

L'industrie de la première transformation du bois, et en particulier celle du sciage, pourrait être qualifiée d'entreprises « à faible valeur ajoutée » car plus le ratio de volume produits/matière consommé est important, et plus l'entreprise peut être rentable (Simonin, 2010).

La méthode de sciage sans planification régulièrement utilisée dans nos scieries date des années 1970, tandis que de nos jours des études menées par des laboratoires canadiens tels que FPInnovations ont démontré que l'usage de logiciels d'optimisation comme Optitek permettant la modélisation 3D de la grume grâce aux informations reçues de capteurs et de générer automatiquement les patrons de débitage sont incontournables (Lajoie, 2015). Lors du sciage,

le manque de patrons de débitage a pour conséquence une imprécision sur le nombre de pièces à extraire sur chaque bille. Ceci soulève un problème d'optimisation de la production, qui passe par la planification du sciage à travers des simulations par patrons de débitage par l'usage de modèles numériques

Afin de trouver des perspectives d'amélioration du rendement matière adapté au cadre de nos unités de transformation, cette étude a été mise sur pied. Pouvant être mis en œuvre par des techniciens ayant la qualification requise, elle se propose d'exécuter l'optimisation du sciage des billes courbes par modélisation et création de patrons de débitage.

Objectifs de l'étude

Objectif général

Cette étude vise globalement à optimiser le rendement au sciage des billes présentant un défaut de courbure par des méthodes de modélisation et de simulation.

Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre notre objectif général nous nous sommes fixés un ensemble de lignes directrices donc les principaux axes sont centrés autour des objectifs suivants :

- Modéliser une bille courbe ;
- Simuler le débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage ;
- Evaluer l'impact de l'usage du patron de débitage sur le rendement par rapport aux méthodes classiques.

Hypothèses de recherche

Afin de pouvoir mener à bien cette étude certaines hypothèses ou axes de recherche ont été formulées :

- Les billes courbes peuvent être modélisées par des paraboles de par leurs formes ;
- Les pertes exclusives de matière issues du débitage des billes courbes sont dues à l'absence d'un modèle mathématique permettant la conception de patrons de débitage ;

Intérêt de l'étude

L'intérêt de cette étude réside se situe à trois niveaux :

- Sur le plan professionnel : elle permettra de rehausser le rendement au sciage des billes courbes en réduisant les pertes de matière au sein des unités de transformation du bois et favoriser une transformation plus poussée au sein de nos scieries à travers la planification du sciage ;
- Sur le plan scientifique : elle contribuera à la recherche sur l'élaboration et la simulation du débitage numérique par l'usage de modèles mathématiques et patrons de débitage ;
- Sur le plan pédagogique : elle servira de référence aux enseignants pour la formation des élèves et étudiants dans les enseignements concernant le diagnostic de la qualité du sciage et la pratique du débitage.

Limite de l'étude

Elle a été réalisée uniquement sur des arbres présentant une courbure uniquement. Les arbres présentant une inflexion (double courbure) n'ont pas été pris en compte. L'absence d'un logiciel métier pour la modélisation 3D, la simulation du débitage a rendu difficile l'obtention de certains profils.

Plan du mémoire

Le mémoire ainsi rédigé est constitué :

- D'une introduction dans laquelle est présenté le contexte dans lequel s'est réalisé cette étude, les problèmes et la problématique soulevés ainsi que les objectifs et l'intérêt que revêt cette étude ;
- D'un chapitre I portant sur la revue de la littérature et présentant les différents aspects ayant déjà été évoqués sur la même thématique que la présente étude ;
- D'un chapitre II portant sur le matériel et méthodes utilisés lors de la réalisation de ce travail ;
- D'un chapitre III portant sur les résultats et discussion où sont présentés et discutés l'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude ;
- D'une conclusion récapitulant l'ensemble du travail effectué ainsi que les suggestions et des recommandations faites aux différents acteurs de ce domaine.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1. Définition de quelques concepts

Bois d'œuvre : Bois utilisé pour la construction des charpentes, des maisons et pour la fabrication d'une multitude d'autres produits souvent reliés à la construction et à la rénovation résidentielle (Minlo, 2019).

Cubage : C'est une opération consistant à évaluer le volume d'une grume ou d'une pièce de bois, grâce à différents paramètres mesurés sur celles-ci. Cette opération de mesurage porte le nom de Toise (Massenet, 2006).

Diagramme ou patron de débitage : c'est une simulation du sciage théorique d'une bille afin de déterminer le maximum de débités pouvant être extrait en respectant les différents modes de débit proposés, les dimensions nominales commandées et en associant les surcotes correspondantes.

Optimisation du débitage : est un procédé qui consiste à détecter et à analyser les caractéristiques d'une bille de bois en vue d'exécuter le programme de coupe qui produira des débits de valeur maximale selon les critères de choix retenus (Minlo, 2019).

Rendement matière : Rapport entre le volume de débités obtenus sur le volume total de la bille (Keller, & Heurtematte, 1967).

Scierie : c'est l'installation complète de l'usine où s'effectue le sciage [9].

Simulation numérique : c'est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film vidéo (Simulation, 2020).

Trait de scie : est le sillon formé dans le bois par le passage des arêtes tranchantes des dents de scie (Dalois, 1990).

I.2. Description du Tali (*Erythrophleum ivorense*)

De son nom scientifique *Erythrophleum ivorense*, le Tali est une essence de bois tropical de la famille des Caesalpiniaceae dont l'arbre sur pied possède un fût de forme cylindrique et souvent quelques empâtements à la base (fig. 1). Son bois a un duramen de couleur jaune orangé à brun rougeâtre qui peut foncer à l'exposition du soleil. Son aubier est bien distinct avec une épaisseur variant entre 3 et 6 cm. On l'utilise essentiellement pour faire des lames de terrasse ou de la lambourde car il est naturellement imputrescible. Il convient également pour la réalisation de parquet soumis à un fort trafic grâce à sa densité. C'est un bois à contrefil accusé d'une densité moyenne de 0,91 ; très durable vis-à-vis des champignons et des insectes. Il est non imprégnable et peut être employé sans traitement en contact avec le sol ou l'eau douce. Son séchage est relativement lent avec un risque élevé de déformation et d'apparition de gerces ou fentes. C'est un bois très dur donc le sciage nécessite des lames à carbure de tungstène à denture stellitée ; son bois possède un retrait total au sciage de 5,1% et 8,4% respectivement dans le sens radial et dans le sens tangentiel. Le point de saturation des fibres (PSF) du Tali est situé à 26% (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement [CIRAD, 2011).



Figure 1 : Tali (*Erythrophleum ivorense*), (Takoudjou, 2020)

I.3. Quelques généralités sur le débitage

De tous les bois transformés, le bois scié est le plus simple, le plus facile à produire et celui dont l'utilisation remonte le plus loin dans l'histoire. Il représente environ les deux tiers du total mondial de bois ronds transformés (Dalois, 1990).

I.3.1. Etapes du sciage

Le sciage s'effectue en une série d'étapes successives que l'on peut regrouper en quatre phases (fig. 2) : la préparation des billes, le premier débit, le second débit et la préparation des avivés

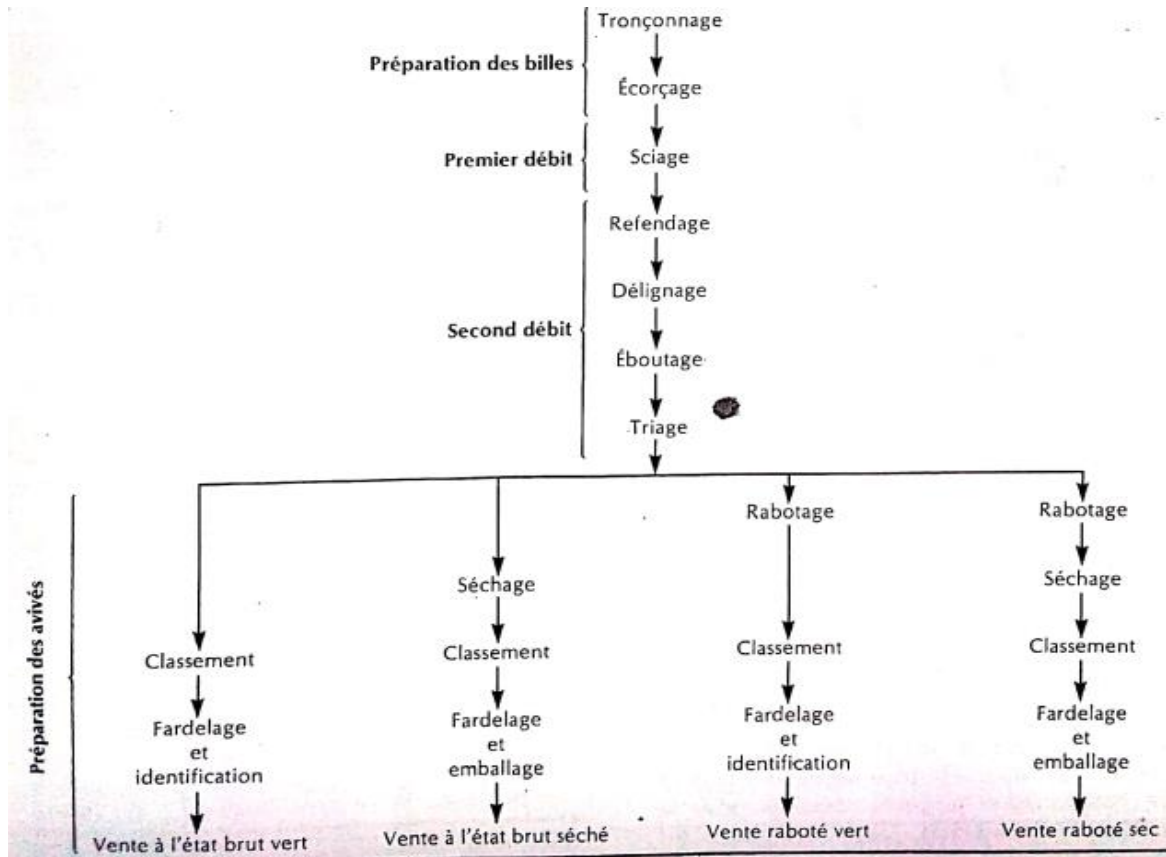


Figure 2 : Les étapes du sciage (Deschênes, 1986)

I.3.2. Modes de débitage

Selon la méthode de débitage (cf. fig. 3, p. 9), on obtient le débit en plot, le débit en plot modifié, le débit sur dosse, le débit sur faux quartier dit débit moreau, le débit sur quartier dit hollandais, débit sur maille, le débit cantibey et le débit colonial. De tous ces débits, les plus pratiqués dans nos scieries sont : le débit en plot, le débit en plot modifié, le débit sur dosse dit débit autour ou par retournement et le débit sur faux quartier dit débit moreau (Deschênes, 1986).

1.3.2.1. Débit en plot

Le sciage en plot consiste à débiter une bille en plateaux par une série de traits parallèles sans lui enlever de dosses. Après le sciage on peut reconstituer la bille à partir des pièces pour obtenir un plot. Ce type de débit, bien qu'étant le plus utilisé dans nos scieries, des études démontrent qu'on aurait avantage à l'utiliser lors du débitage de billes courtes (2,50 m et moins) destinées à la production des bois d'ébénisterie (cas du Canada), (Deschênes, 1986).

Le débitage est très facile et très rapide car on n'a pas à retourner les billes à chaque trait de scie. Successivement : on griffe la bille sur le chariot de la scie, le petit bout est mis en avant afin que la lame attaque la bille sur sa plus petite hauteur ; on place la bille sur le chariot de tel sorte que le côté convexe soit au-dessus et l'axe de la bille dans l'axe de la scie (Keller, & Heurtematte, 1967).

Le débit en plot permet la reconstitution des motifs du bois lors du laminage.

1.3.2.2. Débit en plot modifié

Le débit en plot modifié consiste à enlever deux dosses sur deux côtés opposés de la bille. Par la suite, on enlève un certain nombre d'avivés parallèlement aux plateaux créés par l'enlèvement des dosses. Le plateau central est finalement débité par une série de traits perpendiculaires aux surfaces déjà créées.

Le débit en plot modifié est une méthode de sciage rapide qui permet une séparation des bois de cœur et d'aubier. La méthode peut être utilisée lors du débitage de billes de petit diamètre (15 cm et moins) sur des chaînes de production entièrement automatisées (Deschênes, 1986).

Ce débit exige par contre un positionnement parfait de la bille lors de la première coupe sans quoi le rendement du sciage peut diminuer.

Le débit en plot modifié est la méthode la plus couramment utilisée pour le débitage des bois résineux de moyen et de petit diamètre. Cette méthode est également recommandée pour le sciage de bois feuillus de qualité inférieure (Deschênes, 1986).

Une étude du laboratoire des produits forestiers de l'Est Canada sur le débitage du peuplier faux-tremble a démontré que cette méthode est supérieure aux méthodes de sciage en plot et sur dosse ; elle donne un meilleur rendement en planches de qualité (Deschênes, 1986).

I.3.2.3. Débit sur dosse ou débit autour ou par retournement

Le débit sur dosse commence par l'enlèvement de dosses sur quatre faces de la bille, à angle droit. Les quatre dosses enlevées, le débitage se poursuit par le prélèvement d'un avivé sur chaque plat déjà créé, la bille pivotant de 90° à chaque coupe. Lorsque tout le bois d'aubier a été enlevé, la partie centrale est débitée par une série de traits parallèles les uns aux autres. (Deschênes, 1986).

Cette méthode permet la meilleure séparation du bois d'aubier du bois de cœur, maximisant ainsi le rendement en bois clair. Le débitage est toutefois plus long puisqu'il faut repositionner la bille après le sciage de chacun des avivés.

Le sciage sur dosse convient très bien aux essences de bois feuillus et résineux destinés à la production de bois d'ébénisterie.

I.3.2.4. Débit sur faux quartier dit débit moreau

La première opération de ce débit est assez simple, car elle consiste à découper la bille en quatre parties par des traits de scie perpendiculaires qui se croisent au cœur. Dans le cas de billes à cœur excentré, les quartiers sont inévitablement d'inégale importance. Les courbes ne sont pas admises. Pour la seconde opération, il faut reprendre les quartiers séparément en prélevant un avivé sur chaque plat déjà créé, la bille pivotant de 90° à chaque coupe. Ce mode de débit donne le meilleur rendement matière sur quartiers, mais présente deux inconvénients : la manutention des quartiers avec le matériel classique actuel est assez importante, chaque trait de scie nécessite un retournement du quartier ; il n'est pas adapté aux essences pour lesquelles les contraintes de croissance sont élevées car, au moment du découpage de la bille en quatre parties, les quartiers se déforment (Dalois, 1990).

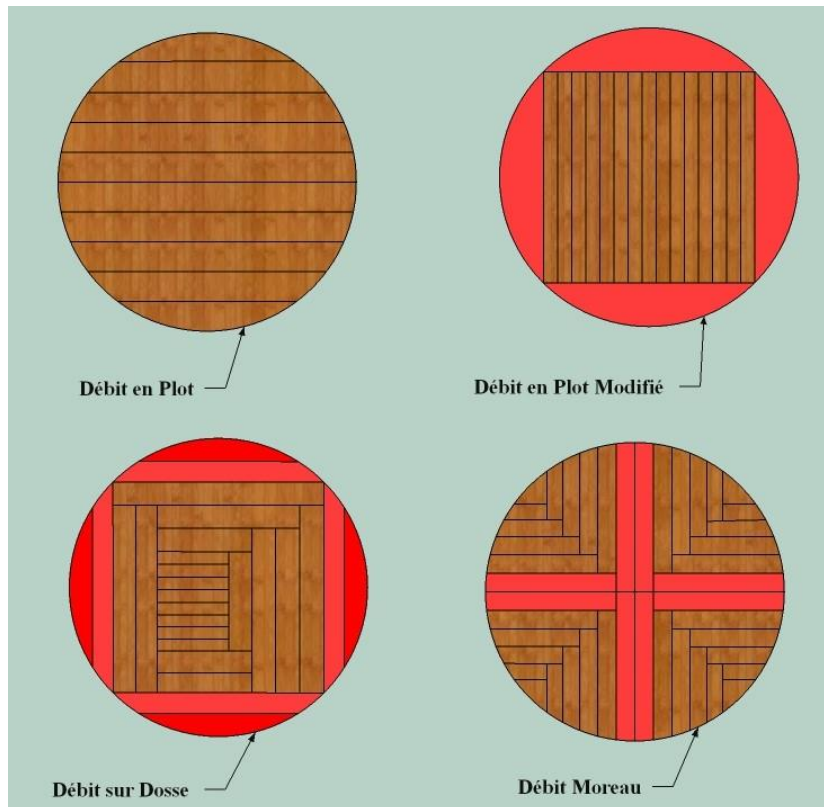


Figure 3 : Les différents modes de débit (Takoudjou, 2020)

I.4. Généralités sur la modélisation des arbres

La perte de matières premières dans les industries de sciage atteint parfois des proportions élevées. Plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre pour réduire les pertes matières et améliorer le rendement, défini comme le rapport entre la production des débités et le volume total de la bille. Parmi celles-ci, la réalisation de modèles mathématique représentant la bille est l'une des plus prometteuses car la réalisation d'un meilleur profit dans l'industrie du sciage est fortement dépendante du modèle mathématique de représentation de la bille lors du débitage (Danwe & al, 2009).

Une bonne connaissance de la géométrie de la bille de bois, des stratégies de débitage, de la quantification et du classement des débités est d'un apport énorme en vue de l'automatisation des opérations dans une scierie par l'intermédiaire de modèle numérique des bois à sciés. Elle commence par une acquisition des données relatives à la bille qui sera débitée. Ces données servent alors à caractériser la géométrie externe de la bille et à créer une représentation géométrique de celle-ci. Le débitage de cette bille est ensuite simulé, autant de fois que

nécessaire pour déterminer la meilleure stratégie, en fonction de laquelle les outils de positionnement et de débitage seront ajustés (Bouzinakis & Martin, 1986).

Deux méthodes de modélisation de la forme des billes sont en général considérées dans la littérature scientifique (Danwe & *al*, 2009) :

- La "méthode des sections" qui représente une bille réelle à travers une superposition de ses sections transversales, et dans ce cas, un grand nombre de sections est alors en général nécessaire ;
- La méthode analytique qui permet de représenter la bille par une ou plusieurs fonctions pour caractériser les troncs de cône. La fidélité de cette forme de modélisation dépend de la méthode d'interpolation choisie.

Au lieu de se baser sur des fonctions d'interpolation quelque peu intuitives, certains chercheurs ont mené des études empiriques pour déterminer des formes typiques de billes, afin de pouvoir caractériser ces formes à partir des mesures classiques effectuées sur celles-ci et proposer des profils typiques de bille. Leurs travaux ont montré que les formes de billes généralement rencontrées vont du néloïde (base de la bille de pied), au paraboloïde (portion centrale de la bille), et au cône (pour le sommet de la bille). Dans la plupart de ces travaux, les sections transversales sont représentées par des cercles ou des ellipses régulières (Danwe & *al*, 2009). Plusieurs modèles de défilement fondés sur étude de la diminution en diamètre de l'arbre de la base vers le sommet tel que : le modèle à exposant variable de Kozak (1988), le modèle polynomial segmenté de Max et Burkhart (1976), sont largement exploités dans la modélisation de la géométrie de l'arbre pour l'estimation de son volume réel en vue du débitage. Outre ces modèles de défilement, quelques études sur le développement de modèles mathématiques permettant de représenter la forme extérieure des arbres et de simuler leur débitage, en vue de l'optimisation du rendement matière ont été menées.

I.4.1. Modèle mathématique développé par Bouzinakis et Martin

Ici une simulation du sciage des grumes de pin maritime avait été développée afin d'étudier l'influence du défaut de verticalité (courbure) sur le rendement volumique et financier après avoir modélisé la forme des arbres. Le modèle mathématique utilisé compte tenu de la forme particulière des arbres échantillonnés fut celle d'une fonction polynomiale de second degré.

Pour chaque arbre du sous-échantillon, on disposait des coordonnées de quatre points de la partie convexe et les dimensions de deux billons (fig. 4) qui sont déjà tirés (longueur du billon, deux diamètres perpendiculaires à chaque extrémité). Toutes les dimensions sont exprimées en centimètre (cm).

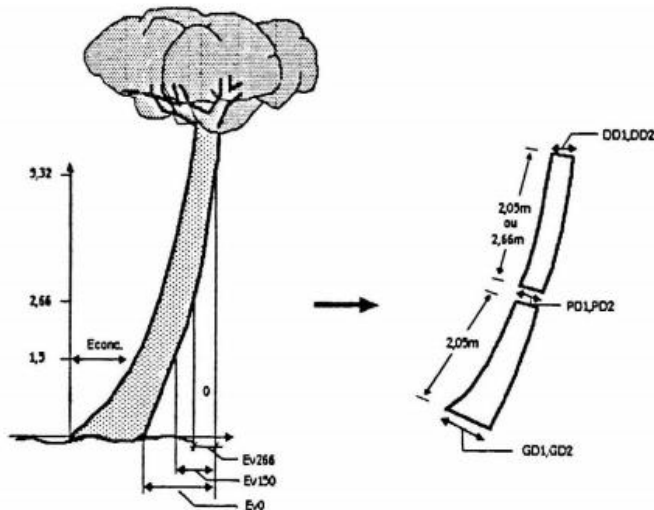


Figure 4 : Paramètres mesurés sur chaque arbre (Bouzinakis & Martin, 1986)

A partir de ces données, on détermine la courbe qui passe par ces quatre points et dont l'équation est de la forme :

$$F_1(x) = A_1x^2 + B_1x + C_1 \quad (\text{Éq. 1})$$

A l'aide des valeurs des longueurs des deux billons, on détermine les extrémités de ceux-ci sur le côté convexe (points PB (1) et PC (1)). On mène les normales aux tangentes qui passent par ces trois points (extrémités des billons) et à l'aide de trois diamètres perpendiculaires, on trouve les coordonnées de trois points du milieu géométrique (PA (2), PB (2), et PC (2)) et les trois points de la partie concave de l'arbre (PA (3), PB (3) et PC (3)), (fig. 5).

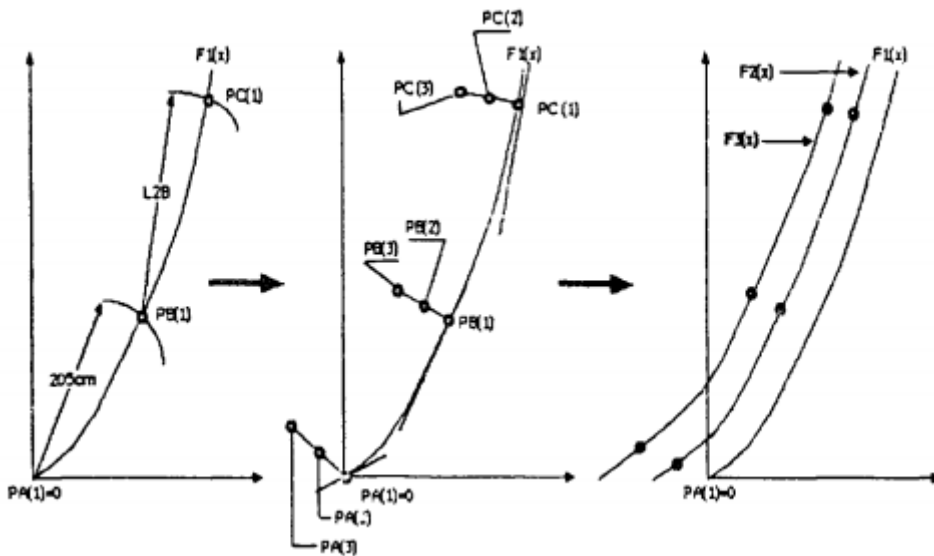


Figure 5 : Méthode de détermination des courbes $F_2(x)$ et $F_3(x)$ (Bouzinakis & Martin, 1986)

D'où les équations :

$$F_2(x) = A_2x^2 + B_2x + C_2 \text{ (Éq. 2)}$$

$$F_3(x) = A_3x^2 + B_3x + C_3 \text{ (Éq. 3)}$$

Où $F_2(x)$ est l'équation de la ligne médiane et $F_3(x)$ l'équation de la partie concave. Les relations $F_1(x)$, $F_2(x)$ et $F_3(x)$ fournissent une représentation de la grume, la section en tout point étant assimilée à un cercle.

Après avoir déterminé la forme réelle des arbres à partir des valeurs mesurées définie par deux fonctions paraboliques, un programme d'optimisation de celles-ci a été développé. Le logiciel détermine la section des produits principaux que l'on peut placer dans différentes partitions de la grume et les dimensions des sous-produits tirés des dosses.

Le principal inconvénient de cette méthode est le suivant : la courbe $F_1(x)$ ainsi que les courbes $F_2(x)$ et $F_3(x)$ passent par définition par les points parfaitement définis jusqu'au niveau 4 - 4,5 m. Au-delà, on est obligé d'extrapoler jusqu'au niveau de 6 m.

I.4.2. Modèle mathématique développé par R. DANWE, I. BINDZI, L. MEVA'A, B. MBAGNIA

Le modèle mathématique obtenu ici est basé sur une représentation de la bille par un ensemble de surfaces, à génératrices droites à section circulaire ou elliptique. La bille est subdivisée en billons pouvant être approximés par des primitives. Ainsi, pour une bille droite, une unique primitive est suffisante, alors que pour une bille courbe plusieurs primitives seront utilisées. La discrétisation pourra être contrôlée par la variation de pente d'une génératrice de la bille. N'importe quelle bille peut être représentée par une superposition des primitives, sans nécessairement avoir à considérer des paraboloides ou des néloïdes, surfaces qui n'autorisent d'ailleurs pas à contrôler le profil de la bille localement (Danwe & al, 2009).

Le billon paramétré est mis en équations pour obtenir des primitives. Ainsi, dans le repère OXYZ, pour reconstituer une bille donnée à partir du modèle, on a besoin des données suivantes pour les $n+1$ sections (fig. 6)

- $(n+1)$ pour chacune des valeurs de b'_i , b''_i , X_{oi} , a_i ($i=1$ à $n+1$)
- n valeurs de L_i .

Le présent modèle permet d'approximer diverses formes de sections ainsi que des profils différents de billes. Ce modèle étant destiné à représenter le volume duquel seront extraits les

sciages, une simulation du débitage réalisé sur le présent modèle de bille devrait donner une estimation réaliste du rendement volume des billes

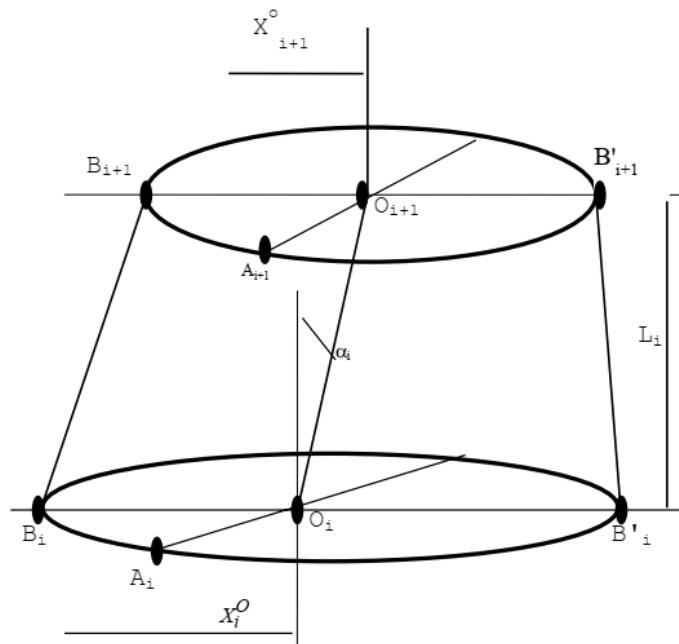


Figure 6 : Paramétrage d'un billon (Danwe & al, 2009).

I.5. Généralités sur le diagramme ou patron de débitage

Il s'agit ici de scier théoriquement une bille en respectant les différents modes de débit proposés, les dimensions nominales commandées et en associant les surcotes correspondantes.

Le diagramme de débitage lors de sa réalisation tient compte des paramètres suivants (Anonyme) :

- La forme de la bille (défauts de conformation générale tels que la conicité, la courbure, la cannelure, le méplat ou forme aplatie de la section, contrefort marqué) ;
- Les dimensions de la bille c'est-à-dire le diamètre fin bout, le diamètre gros bout sous écorce et la longueur ;
- Le type de bois (essence forestière) ;
- Le mode de débit ;
- Les dimensions des débités de la commande (dimension cible) ;
- Il tient compte de certains paramètres physiques tous associés à la dimension cible et la précision au sciage comme la teneur en humidité, le retrait au séchage associé au type de bois, la profondeur de rabotage, la variation combinée liée à la précision au sciage, le facteur de sous dimensionnement.

- Il tient également compte de l'épaisseur du trait de scie qui est directement lié aux caractéristiques de l'outil de coupe (angle d'attaque, type de denture, la voie, épaisseur de la lame, la qualité de l'affûtage).
- La taille de la machinerie ou catégorie de l'unité de transformation de bois donc le type d'installation et la capacité de débitage de l'outil principal de production varient selon qu'elle soit de : 1^{ère} catégorie (supérieur à 5000 m³ grumes/an) ; 2nd catégorie (comprise entre 1000 et 5000 m³ grumes/an) ; 3^{ème} catégorie (inférieure à 1000 m³ grumes/an).

Le plan d'exécution du diagramme de débitage s'effectue selon les étapes suivantes :

- Adopter un mode de débit ;
- Déterminer la dimension cible ;
- Déterminer la position du premier trait de scie ;
- Exécuter le premier débit sur épaisseur ;
- Exécuter le second débit sur largeur (délignage) et sur longueur (éboutage).

I.5.1. Etude de la variation au sciage et calcul de la dimension cible

L'étude de la variation au sciage permet de diagnostiquer les défaillances du système de production et est essentiel pour maximiser la récupération de matière au cours du sciage (Brown, 1986). Les informations obtenues à partir d'un contrôle de dimension est un puissant outil de gestion et de contrôle de la production.

Un enregistrement des performances au sciage du poste de travail doit être conservé lorsque les informations sont utilisées pour ajuster les dimensions cibles. À mesure que les dimensions cibles sont réduites, il devient de plus en plus important d'assurer la précision du sciage.

I.5.1.1. Besoins en équipement

Un seul équipement est obligatoire pour un programme de contrôle de la dimension : un pied à coulisse numérique capable de mesurer le bois d'œuvre en millièmes de centimètres. De plus, l'analyse statistique nécessite une mesure en centimètres ou millimètres.

Des éléments tels que : le mètre à ruban, les jauges de profondeur, les micromètres et calculatrices statistiques et programmables ou les micro-ordinateurs sont également des équipements extrêmement utiles (Brown, 1986).

1.5.1.2. Méthodes de mesure

La façon dont le bois est mesuré dépend des objectifs de gestion et du temps disponible. Le nombre d'informations permettant de caractériser le poste de travail augmente avec le nombre de mesures prises par pièce.

➤ Mesure à un point

Certains programmes de contrôle de la qualité ont été développés à partir de données basées sur une mesure par pièce, mais seules des informations limitées sont obtenues à partir de cette méthode. Tout ce qui peut être déterminé est la plage d'épaisseur dans l'échantillon.

Les meilleurs programmes de contrôle de la qualité utilisent une méthode de mesure en plusieurs points

➤ Mesure à plusieurs points

Une analyse approfondie des données d'un système de mesure en plusieurs points peut fournir de nombreuses informations sur un poste de travail sans aucune analyse statistique. Dans un tel système, chaque planche est mesurée à plus d'un endroit sur sa longueur, de préférence à trois ou quatre points le long d'un bord. La variation de dimensions à l'intérieur des pièces notée S_w ou *within-board standard deviation* est généralement un excellent indicateur de la qualité de coupe de la scie, et la variation entre les pièces ou *between-board standard deviation* (S_b), généralement un excellent indicateur de la performance du circuit matière, peuvent alors être déterminés (Brown, 1986). La mesure en plusieurs points est le seul moyen d'identifier et d'évaluer ces deux sources de variation.

1.5.1.3. Détermination des variations au sciage

Le bois d'œuvre peut varier en épaisseur ou en largeur jusqu'à quelques centimètres ou millimètres, comme c'est le cas lorsqu'une scie serpente, ou aussi peu que quelques millièmes de pouce. L'évaluation de la quantité de variation au cours du processus de sciage est essentielle non seulement pour déterminer la dimension cible brute mais également pour évaluer les performances du poste de travail. Ensemble, S_w et S_b constituent la variation totale du processus ou variation combinée ou *total sawing variation* (S_t).

En règle générale : $S_t \leq 1,20$ mm ; $S_w \leq 0,8$ mm et $S_b \leq 0,9$ mm (Anonyme)

Les trois paramètres permettent de qualifier la Précision au sciage (Anonyme) :

- Si les conditions ci-dessus sont vérifiées alors le sciage est de bonne qualité
- Si $St \leq 0,5$ mm, on parlera d'un sciage parfait ;
- Si $St \geq 1,20$ mm on parlera d'une mauvaise qualité de sciage : l'analyse de S_w et S_b viendra orienter l'origine des défaillances ;
- Si $S_w \geq 0,8$ mm, le problème ou la défaillance est due à l'outil de coupe, il faudra vérifier les angles caractéristiques de l'outil de coupe, la stabilité et la rigidité de l'outil, la vitesse de coupe et la vitesse d'aménagement de la machine
- Si $S_b \geq 0,9$ mm, le problème se situe au niveau de l'ajustement de la machine, positionnement de pièces, au niveau du système d'aménagement, du système de guidage.

I.5.2. Calcul de la dimension cible

La dimension cible : c'est la dimension d'une pièce à la tombée de la scie qui prévoit le retrait au séchage pour l'obtention d'une dimension nominale raisonnable pour une humidité en dessous de 20%.

L'épaisseur ou la largeur brute du bois est ciblée à partir de la dimension finale souhaitée, la profondeur de rabotage (le cas échéant), retrait (si le bois doit être séché), et la variation au sciage. Toute épaisseur ou une largeur supérieure à la dimension cible brute (rugueuse) du bois est « surdimensionnée » (Brown, 1986).

I.5.2.1. Facteurs de la dimension cible

➤ **La dimension nominale**

La dimension nominale d'une pièce de bois est dimension (l'épaisseur ou la largeur) à laquelle le bois sera éventuellement vendu ou cubé, elle correspond aux dimensions du bois à l'état sec à l'air (Keller & Heurtematte, 1967). C'est la base pour régler tous les autres composants.

➤ **La profondeur du rabotage**

À l'exception de la petite quantité de bois qui est « à la scie », presque tout le bois d'œuvre est refait avant d'être vendu ; par conséquent, lors de l'établissement d'une dimension verte approximative, suffisamment de bois doit être ajouté pour permettre le surfacage (rabotage).

➤ **Le retrait**

Après avoir été séché, le bois doit en avoir suffisamment d'épaisseur ou de largeur pour pouvoir être raboté jusqu'à la dimension finale sans se dégrader en raison du saut de rabot ou du sous-dimensionnement. Une quantité d'épaisseur égale à la quantité perdue au séchage doit être ajoutée à la somme des dimensions finales et la profondeur de rabotage.

➤ **Facteur de sous-dimensionnement**

Le facteur de sous-dimensionnement (Z), utilisé dans l'équation pour calculer la dimension cible, est une valeur statistique qui prédit le nombre de planches surfacées qui, par endroits, seront plus petites que la dimension finale souhaitée

Tableau 1: Valeurs du facteur Z en fonction des pièces sous dimensionnées

Pièces sous dimensionnées (%)	Facteur de sous dimensionnement (Z)
0	3,09
1	2,337
2	2,05
3	1,88
4	1,75
5	1,65
10	1,28
15	1,04

(Source : Brown, 1986)

➤ **La variation au sciage**

À mesure que la variation de sciage augmente, l'épaisseur cible doit également augmenter de sorte que le point le plus mince sur le bois soit au moins aussi épais que la taille critique.

Bien que l'écart type (S_w, S_b, S_t) soit utile pour déterminer la dimension de la cible brute, il est actuellement plus utile pour diagnostiquer les problèmes de centre d'usinage et pour identifier rapidement la perte de précision de sciage afin que les actions correctives être pris. Si la taille cible est déterminée par au moyen de statistiques ou d'essais en usine, une fois établie, la précision de sciage doit être maintenue au même niveau ou amélioré au fil du temps.

I.5.2.2. Détermination de la dimension cible critique

La dimension critique (CS) est celle pour laquelle tout le bois provenant de l'usine est scié sans variation d'épaisseur ou de largeur sur toute la longueur d'une planche, ou sans variation d'une planche à l'autre. Elle correspond à la valeur critique en deçà de laquelle la pièce est sous-dimensionnée.

I.5.3. Importance du premier trait de scie

En effet, l'expérience des scieurs et les études sur l'optimisation montrent que le premier trait de scie réalisant le premier découvert a une importance primordiale et conditionne le rendement matière.

Le calcul du placement de ce premier trait étant réalisé, on simule ensuite le débit des plateaux que l'on peut placer dans le noyau en utilisant successivement les différentes largeurs et en tenant compte de ce que l'on peut tirer des dosses.

I.5.4. Evaluation du défilement linéaire ou conicité

Le défilement ou coefficient de décroissance métrique (d_{ef}), correspond au nombre moyen de centimètres dont la circonférence ou le diamètre diminue par mètre de hauteur, depuis la mesure à 1,30 m jusqu'à celle prise à mi-hauteur totale (Clément, 1989). Il est donné par le rapport :

$$d_{ef} = \frac{C_{1,30} - C_m}{\frac{H}{2} - 1,30} \quad (\text{Éq. 4})$$

Où $C_{1,30}$ = Circonférence à 1,30 m en cm, C_m = Circonférence à mi-hauteur en cm, H = hauteur de l'arbre en m.

Selon les règles ATIBT de classement des rondins (1982), la notion de défilement est identique à celle de la conicité. La conicité se ramène à l'angle que font les fibres extérieures avec l'axe de la tige, elle est donnée par la relation :

$$d_{ef} = \frac{D_g - D_f}{L} \quad (\text{Éq. 5})$$

Où L est la longueur de la grume. Le défilement est généralement calculé en cm/m.

Le défilement permet d'évaluer la longueur exacte de la partie flacheuse à certaines pièces de bois dans le cas bille ne présentant pas un défaut de courbure

I.5.5. Quelques définitions et dimensions nominales relatives aux éléments de structure

➤ La dosse

Selon Keller & Heurtematte, (1967) c'est une chute de sciage comportant une face plane, le reste de la surface étant constitué par la partie externe de la grume, avec ou sans écorce (la flache). Elle est obtenue lors du sciage des parties externes d'un tronc d'arbre, c'est la partie qu'il faut enlever à un bois rond pour l'équarrissage à vive arête. La contre-dosse est le plateau situé sous la dosse.

➤ Les lambourdes

Elles sont des pièces en bois rectangulaire obtenu par sciage, de longueur et section différentes suivant l'usage auquel elles sont destinées (Lambourde, 2020). Elles servent essentiellement de support aux planchers, qu'il s'agisse de parquets d'intérieur, d'extérieur, de terrasses en bois, pourtours de piscine et autres décorations.

➤ Les madriers et bastaings

Un madrier et un bastaing sont tous les deux des matériaux utilisés pour les gros travaux de menuiserie et de construction de maisons, et particulièrement pour ceux relatifs à la construction de charpentes et de planchers (Creti & al, 2015). Il s'agit de pièces de bois sciées en tronçons rectangulaires, épaisses, avec des arêtes vives, qui diffèrent par leur taille et par le poids qu'elles peuvent supporter.

➤ Les lattes ou liteaux

Un liteau est un produit rectangulaire du sciage du bois qui a une épaisseur entre 18 et 30 mm et une largeur entre 35 et 40 mm (Creti & al, 2015). Il est cloué ou vissé sur les éléments composant la charpente (en général sur les chevrons) et est destinée à recevoir le ou les matériaux de couverture (tôles, tuiles en terre cuite ou béton, ardoises, bardeau en bois).

Tableau 2 : Dimensions standardisées relatives aux éléments de structure

Ep/ Larg	27	40	60	70	100	120	150	160	180	200	230	250	300	350	400	
16	LL	LL		×	V											
19			×	×	×	×	×	×	×	×						
22				×	×	×	×	×	×	×						
28	LL	LL			×	×	P		×	P	×	P		P	P	
32			×	×	×	×	×	×	×	×	×		PE	P	P	
38		L	L	L	O	O	O		×	PE	O			P	P	
50				C	×	×	B	×	×	×	×					
60				C	×		×	B	B							
75		DC		C	C		×		×	M	M					
100					PP				×	×	M					
120						PP										
150							PP									
200										PP						
230											PP					
LL	Lattes ou liteaux							PE	Planche échafaudage							
V	Voliges							P	Planche							
L	Lambourdes							O	Ossature							
C	Chevrons							PP	Poteaux-Poutres							
B	Bastaing							DC	Demi-chevron							
M	Madrier							×	Autres dimensions conventionnelles							

(Source : Creti et al, 2015)

I.6. Généralités sur cubage et le rendement matière

I.6.1. Modèle théorique

Une grume, entière ou en partie, peut être assimilée approximativement aux diverses géométriques suivantes (Massenet, 2006) :

$$\text{Le cylindre : } V = \frac{\pi d_0^2 h}{4} \quad (\text{Éq.6})$$

$$\text{Le parabololoïde : } V = \frac{\pi h(d_0^2 + d_8^2)}{4} \quad (\text{Éq.7})$$

$$\text{Le tronc de cône : } V = \frac{\pi h(d_0^2 + d_0 \cdot d_s + d_8^2)}{12} \quad (\text{Éq.8})$$

$$\text{Le néloïde : } V = \frac{\pi h(d_0^2 + d_0^{\frac{2}{3}} \cdot d_s^{\frac{1}{3}} + d_0^{\frac{1}{3}} \cdot d_s^{\frac{2}{3}} + d_8^2)}{12} \quad (\text{Éq.9})$$

Où, V = volume en m^3 , d_0 et d_s représente respectivement les diamètres gros bout et fin bout de la grume donnés en cm.

I.6.2. Pratique du cubage commercial des grumes

Le cubage des arbres en grumes consiste en l'estimation du volume sur ou sous écorce, après ébranchage et recoupe de la flèche. L'opération de mesurage d'une pièce de bois s'appelle le toisé. La formule de cubage commercial actuellement en vigueur au Cameroun est celle du diamètre moyen dérivant de formule de HUBERT adoptée par la norme française N.F. B. 53-020 (A.F.N.O.R.) [17].

I.6.3. Cubage des pièces débitées

Les pièces de bois débitées possèdent généralement des arêtes vives parallèles deux à deux et à angle droit d'où leur nom d'avivés. Ils sont semblables à des parallélépipèdes rectangles donc Le volume exprimé en m^3 s'obtient par la relation entre la longueur, la largeur et l'épaisseur du produit, suivant la formule mathématique suivante :

$$V = L \times l \times e \quad (\text{Éq. 10})$$

Où V exprime le volume (m^3), L représente la longueur, l la largeur et e l'épaisseur (autrement appelée la hauteur). Toutes ces mesures sont exprimées en mètres.

I.6.4. Rendement matière

Le rendement matière est donnée par le rapport entre le volume des débités et le volume brut de la bille ayant servi à la production des dits débités. On ne tient pas compte, pour le calcul du rendement, de la surépaisseur des sciages à l'état vert, mais seulement des épaisseurs commerciales à l'état sec à l'air (taux d'humidité du bois à 18%). Le rendement en planche débitées sur plot est assez élevé lorsque le défilement est peu important. Lorsque la bille est fortement conique, dite « en pain de sucre », le rendement est bas (Keller & Heurtematte, 1967).

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

II.1. Présentation de la structure d'accueil

II.1.1. Localisation de la structure

Notre étude a été menée du 10 avril au 10 mai 2020 dans la scierie de la société DINO & FILS. En effet, le siège social de la société DINO & FILS est situé entre 03 55'16'' et 03 55'19'' latitude ; 011 35'13'' et 011 35'17'' longitude à Nkolfoulou, dans l'arrondissement de Soa, Département de la Mefou et Afamba, Région du Centre Cameroun. Elle compte deux unités de transformation du bois, l'une à Nkolfoulou et l'autre à Abong-Mbang (Figure 5). Le site de Nkolfoulou est situé à environ 1 Km de la route principale D46 SOA-Yaoundé tandis que l'entrée du site d'Abong-Mbang est située à environ 1 Km avant le centre-ville.

CARTE DE LOCALISATION DE LA SOCIETE DINO & FILS DANS LA COMMUNE DE SOA

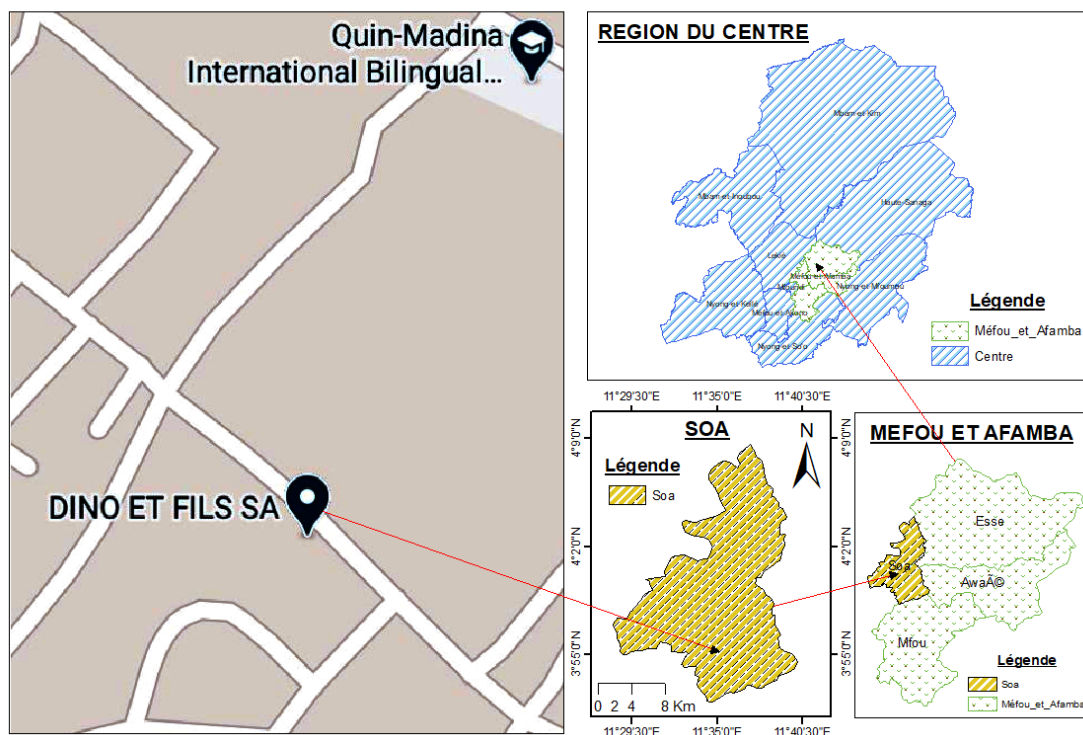


Figure 7 : Carte de localisation Administrative de l'unité de transformation de la société DINO ET FILS .SA (JDF) site de Nkolfoulou (Takoudjou, 2020)

II.1.2. Opérations réalisées au sein de l'usine

A l'arrivée des grumes au parc de rupture de la scierie, les billes sont réceptionnées (étalées et cubées) et préparées pour la scie de tête (tronçonnées en billons). Ensuite chaque billon est envoyé à la scie de tête (CD10) à l'aide d'un tracteur à fourche.

II.1.2.1. Le sciage premier débit

La CD10 (fig. 8) effectue la mise en épaisseur des pièces suivant les prescriptions du contrat, en débitant les billons en plot. Seuls les billons destinés à être débités en des dimensions standards sont envoyés à la CD10. La scierie dispose de deux scie mobiles (LUCAS MILL) pour effectuer une partie importante du sciage des billons pour l'obtention de débités aux dimensions fixes.



Figure 8 : Scie de tête à ruban (CD10) de l'entreprise (Takoudjou, 2020)

II.1.2.2. Le sciage second débit

➤ Le délignage

Pour les contrats dans lesquelles les largeurs ne sont pas fixes, la mise en largeur est effectuée à la déligneuse. La déligneuse (fig. 9) est équipée d'une scie circulaire mobile qui effectue la mise aux largeurs standards prescrites par le contrat. Lorsque les spécifications du contrat exigent des pièces de largeurs identiques les plateaux sont transportés à l'aide d'un chariot élévateur pour la multi-lame.



Figure 9 : Déligneuse multi et mono lame de la scierie de JDF (Takoudjou, 2020)

➤ **L'éboutage**

Les pièces mises en largeurs par la déligneuse ou par la multi-lame sont transportées par les chariots élévateurs à l'ébouteuse (fig. 10) pour la mise en longueur des pièces et l'élimination des défauts de bouts.



Figure 10 : Ebouteuse de type DEWAT (Takoudjou, 2020)

➤ **La préparation des avivés**

Les pièces mises en longueurs sont ensuite transportées au parc débit pour la formation des colis (fig. 11) et le marquage.



Figure 11 : Colisage des avivés (Takoudjou, 2020)

II.2. Méthodologie

Il est important de noter que plusieurs facteurs influent sur la production dans une scierie : les machines, le personnel, la qualité de matières premières, l'organisation du travail. Dans cette étude, nous regarderons uniquement la géométrie et les stratégies de débitage.

La démarche entreprise dans le cadre de cette étude comporte trois grandes phases : la Modélisation d'une bille courbe, la simulation du débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage et le cubage pour le calcul du rendement matière dans le but d'évaluer l'impact de l'usage du patron de débitage sur celui-ci.

II.2.1. Collecte des données

II.2.1.1. Données secondaires

Elles sont constituées des ouvrages, des articles, des rapports de mémoires et documents électroniques à caractère scientifiques relatifs aux l'études antérieures sur la même thématique. Le tableau III présente leur répartition par objectifs spécifiques visés :

Tableau 3 : Données secondaires collectées par objectifs spécifiques

<p>Objectifs spécifiques</p>	<p>Modéliser une bille courbe</p>	<p>Simuler le débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage</p>	<p>Evaluer l'impact de l'usage du patron de débitage sur le rendement</p>
<p>Données secondaires</p>	<p>Informations tirés des documents scientifiques relatifs à modélisations géométrique des arbres.</p>	<p>Informations tirés des documents scientifiques relatifs à l'optimisation du sciage et la dimension cible des débités dans les scieries.</p>	<p>Informations tirés des documents scientifiques relatifs rendement matière en scierie.</p>

II.2.1.2. Données primaires

Modélisation d'une bille courbe

La collecte des données repose principalement ici sur : la taille de l'échantillon, la prise des paramètres de modélisation et des paramètres dendrométrique de la bille.

➤ Taille de l'échantillon

L'échantillon choisit pour cette étude est composée de 12 billes regroupées en 02 classes de diamètres. Les 12 billes ont été débitées durant la période de l'étude. Les billes présentant un point d'inflexion (double courbure) sont exclues.

➤ Prise des paramètres de modélisation

Chaque arbre après avoir été numéroté, a été mesuré à trois distances (0 m, 1,50 m et 3 m) pour obtenir leur défaut de courbure (côté convexe) par rapport à la verticale à une hauteur de 6 m. Ces arbres devaient manifester une seule courbure et être considérés comme étant constitués de deux billons d'une longueur de 3 m destiné à être scié.

Pour chaque bille les coordonnées de quatre points de la partie convexe ont été déterminés dans un repère cartésien XOY dont l'axe des ordonnées est confondu avec la verticale (fig. 12). Les

coordonnées de chaque point ont été prises, l'abscisse étant donnée par l'écart par rapport à la verticale et l'ordonnée par la hauteur de mesure correspondante.

Les valeurs prises sont tel que :

- La mesure à 0 m soit considérée comme le point de départ situé à l'une des extrémités de la bille suivant position de la courbure ;
- La seconde mesure soit effectuée à 1,50 m de l'extrémité du billon le moins linéaire ;
- La troisième mesure soit effectuée à mi-longueur sur la verticale (3 m).

Le matériel de collecte de données utilisé ici était constitué : d'une fiche de collecte de données, d'un stylo à bille, d'un fil à plomb, d'une équerre, d'un décimètre et d'un ruban métrique métallique.

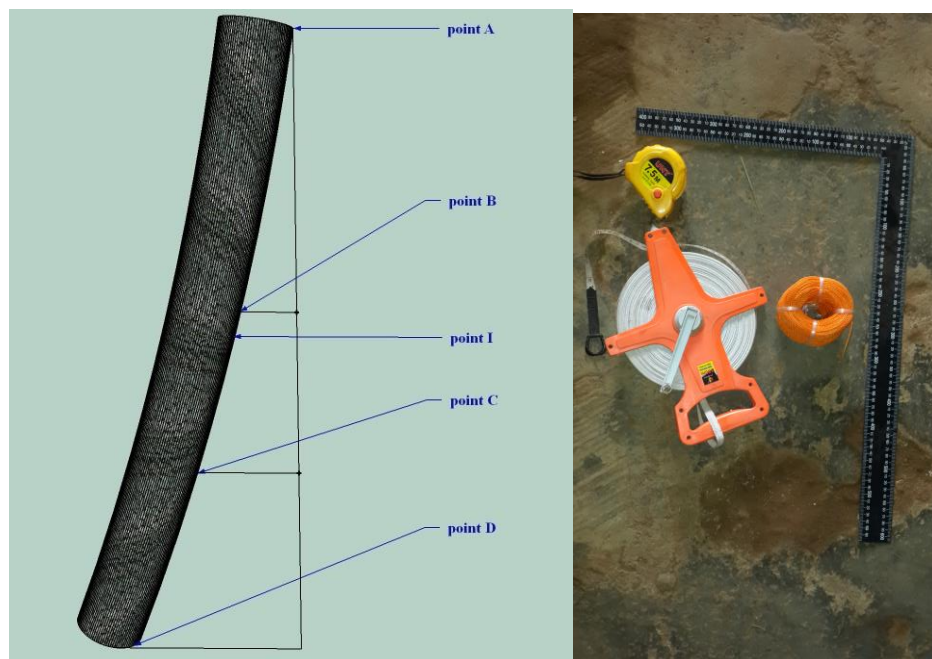


Figure 12 : Prise des coordonnées des points sur la partie convexe (Takoudjou, 2020)

- **Prise des paramètres dendrométriques des billes**
 - ❖ Mesurage de la longueur

À l'aide d'un double décimètre, nous avons effectué la mesure de la longueur des billes (plus petite distance qui sépare les sections extrêmes de celle-ci) composant notre échantillon (fig. 13). Les valeurs obtenues étaient consignées dans une fiche de cubage. L'unité utilisée ici est le mètre sur décimètres couverts.

❖ Mesurage des diamètres

Les diamètres ont été mesurés en croix à chaque bout de telle sorte que les traits se rejoignent au centre de la section du bout mesuré en étant le plus perpendiculaire possible (fig. 13). Le diamètre considéré à chaque bout est obtenu par la moyenne des deux diamètres en croix. La prise de diamètre s'est faite sous aubier à l'aide d'un ruban métrique et enregistré en centimètre couvert dans la fiche de cubage.



Figure 13 : Prise du diamètre sur la bille (Takoudjou, 2020)

Simulation du débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage

Les données utilisées ici proviennent essentiellement des informations fournies par les modèles mathématiques des billes (flèche, diamètre de la plus haute section et position par rapport au fin bout) et du mesurage des dimensions des débités. Le matériel utilisé ici est un ordinateur muni du logiciel de modélisation 3D SKETCHUP PRO 2015.

Pour le mesurage des dimensions des débités, les trois dimensions de chaque pièce de bois sciée (longueur, largeur et épaisseur) ont été prises. Afin d'évaluer la précision au sciage par l'étude des variations dimensionnelles, le mesurage est tel que :

- Deux longueurs sont prises par pièce ;
- Trois épaisseurs sont mesurées à égale distance sur chaque rive de la pièce dans le sens longitudinal ;
- Trois largeurs sont mesurées à égale distance sur la face de la pièce et dans le sens longitudinal.

La mesure est effectuée à l'aide d'un ruban métrique métallique pour dimensions supérieures à 15 cm et d'un pied à coulisse à vernier de 150 mm (fig. 14) pour dimensions inférieures ou égale à 15 cm.

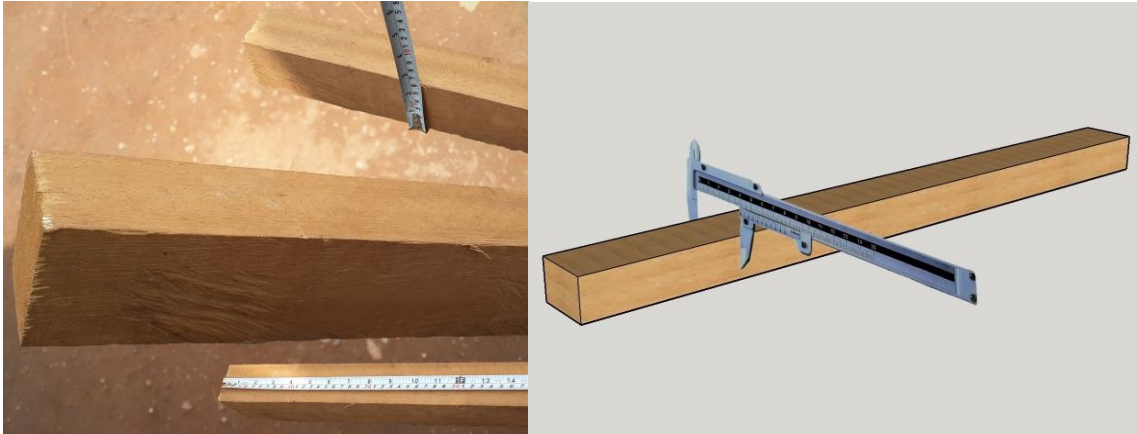


Figure 14 : Mesurage des dimensions d'une pièce de bois (Takoudjou, 2020)

Evaluation de l'impact de l'usage du patron de débitage sur le rendement

Les données utilisées ici proviennent essentiellement des informations fournies par la simulation (nombre de pièces), le bon de commande et les paramètres précédemment collectés sur les avisés pour l'étude de la précision au sciage (longueur, largeur et épaisseur). Le matériel utilisé ici est constitué d'un ordinateur muni du logiciel Microsoft EXCEL 2016, une fiche de cubage, un mètre à ruban métallique de 5 mètres, un pied à coulisse.

II.2.2. Traitement des données

II.2.2.1. Modélisation d'une bille courbe

Deux méthodes de modélisation de la forme des billes sont en général considérées dans la littérature scientifique : la méthode des sections et la méthode analytique. Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé la méthode analytique consistant à représenter la bille par une ou plusieurs fonctions pour caractériser les troncs de cône.

Choix du modèle

Le modèle développé ici utilise des équations analytiques pour la représentation de la forme externe d'une bille dont les données recueillies et décrivant celle-ci peuvent être compatibles avec celles que génèrent les capteurs à axes multiples. Les bille courbes ayant en général la forme d'une parabole, nous avons opté ici pour la modélisation de la bille par deux fonctions du second degré dont l'une représente la partie convexe de la bille et l'autre la partie concave (Bouzinakis & Martin, 1986). Elles sont données respectivement par les formules générales suivantes :

$$F_1(x) = A_1x^2 + B_1x + C_1 \quad (\text{Éq. 1})$$

Où $F_1(x)$ est l'équation de la partie convexe ; A_1, B_1 et C_1 sont les coefficients réels à déterminer.

$$F_2(x) = A_2x^2 + B_2x + C_2 \quad (\text{Éq. 2})$$

Où $F_2(x)$ est l'équation de la partie concave ; A_2, B_2 et C_2 sont les coefficients réels à déterminer.

Détermination des coefficients A_1, B_1 et C_1 de la partie convexe de la bille

A partir des coordonnées des quatre points $A \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix}$, $B \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix}$, $C \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \end{pmatrix}$ et $D \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \end{pmatrix}$ prises sur la bille et du logiciel de traitement Microsoft EXCEL 2016, nous avons construit le nuage de point et déterminer l'équation de la courbe du polynôme de second degré qui approche le mieux ces quatre points.

Détermination des coefficients A_2, B_2 et C_2 de la partie concave de la bille

A l'aide de valeur des longueurs des billons (donnée en centimètre), on détermine selon un système d'équation les coordonnées du point $I \begin{pmatrix} x_I \\ y_I \end{pmatrix}$. Le point I est situé à 3 m de l'une des extrémités la plus courbe $A \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix}$ ou $D \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \end{pmatrix}$ des billons sur le côté convexe. Le système obtenu est de la forme :

$$\begin{cases} (x_I - x_D)^2 + (y_I - y_D)^2 = 300^2 \\ F_1(x) = A_1x^2 + B_1x + C_1 \end{cases} \quad (S_1)$$

Où 300 est la longueur du billon en cm et $F_1(x)$ est l'équation de la partie convexe.

La résolution du système (S_1) conduit à une équation de degré 4 de la forme :

$$Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + E = 0 \quad (\text{Éq. 11})$$

Suivant les contraintes une seule valeur de x correspond à l'abscisse du point I .

On mène les normales aux tangentes qui passent par les trois points A, I, D et à l'aide des trois diamètres perpendiculaires, on obtient des systèmes d'équations permettant de trouver les coordonnées de trois points $E \begin{pmatrix} x_E \\ y_E \end{pmatrix}$, $F \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \end{pmatrix}$ et $G \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \end{pmatrix}$ de la partie concave de la bille. Ces systèmes sont obtenus par les relations suivantes :

➤ Détermination des coordonnées de E :

$$\begin{cases} (x_E - x_I)^2 + (y_E - y_I)^2 = D_{3m}^2 \\ T_I(x): y = ax + b \end{cases} (S_2)$$

$$\begin{cases} a = -\frac{1}{F'_1(x_I)} \\ b = y - ax \end{cases}$$

D_{3m} = diamètre pris à trois mètres d'une des extrémités de la bille ; $T_I(x)$ est l'équation de la tangente au point I , a son coefficient directeur et b son ordonnée à l'origine.

➤ Détermination des coordonnées de F :

$$\begin{cases} (x_F - x_D)^2 + (y_F - y_D)^2 = D_g^2 \\ T_D(x): y = ax + b \end{cases} (S_3)$$

$$\begin{cases} a = -\frac{1}{F'_1(x_D)} \\ b = y - ax \end{cases}$$

D_g = diamètre gros bout de la bille ; $T_D(x)$ est l'équation de la tangente au point D ; a son coefficient directeur et b son ordonnée à l'origine.

➤ Détermination des coordonnées de G :

$$\begin{cases} (x_G - x_A)^2 + (y_G - y_A)^2 = D_f^2 \\ T_A(x): y = ax + b \end{cases} (S_4)$$

$$\begin{cases} a = -\frac{1}{F'_1(x_A)} \\ b = y - ax \end{cases}$$

D_f = diamètre fin bout de la bille ; $T_A(x)$ est l'équation de la tangente au point A ; a son coefficient directeur et b son ordonnée à l'origine.

La résolution de chacun des systèmes (S_2) , (S_3) et (S_4) permet l'obtention respectif des coordonnées des points E, F et G appartenant à la courbe de la fonction $F_2(x)$.

Les coefficients A_2, B_2 et C_2 de la fonction $F_2(x)$ sont alors déterminés par la résolution du (S_5) suivant :

$$\begin{cases} x_E^2 A_2 + x_E B_2 + C_2 = y_E \\ x_F^2 A_2 + x_F B_2 + C_2 = y_F \\ x_G^2 A_2 + x_G B_2 + C_2 = y_G \end{cases} (S_5)$$

Les relations $F_1(x)$ et $F_2(x)$ fournissent une représentation de la grume, la section en tout point étant assimilée à un cercle.

II.2.2.2. Simulation du débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage

La simulation du débitage effectuée dans le cadre de cette étude est fondée sur la conception de diagramme de débitage selon un mode de débit par plots modifiés, constaté comme le mode de débit le plus répandu au sein des unités de transformations de bois de moyennes et petites capacités et le second mode de débitage (après le plot) le plus répandu au sein des unités de grandes capacités de production.

Positionnement de la bille sur le plateau du chariot de la scie de tête

Les billes réelles sont placées telles que le plan XOY (contenant les verticales de mesures) considéré précédemment soit parallèle au plan de coupe (Keller & Heurtematte, 1967). Cette bille est posée sur le plateau du chariot de forme plan pouvant être modéliser par l'équation de la droite (FG) qu'elle contient (Fig. 15).

Afin de déterminer la section contenant les produits ayant la longueur maximale de chaque billon, nous avons effectué de façon mathématique et avec précision le calcul de la flèche (MN) présentée par la bille ainsi que sa position par rapport à l'une des extrémités de la bille (cf. Fig. 21, p.53).

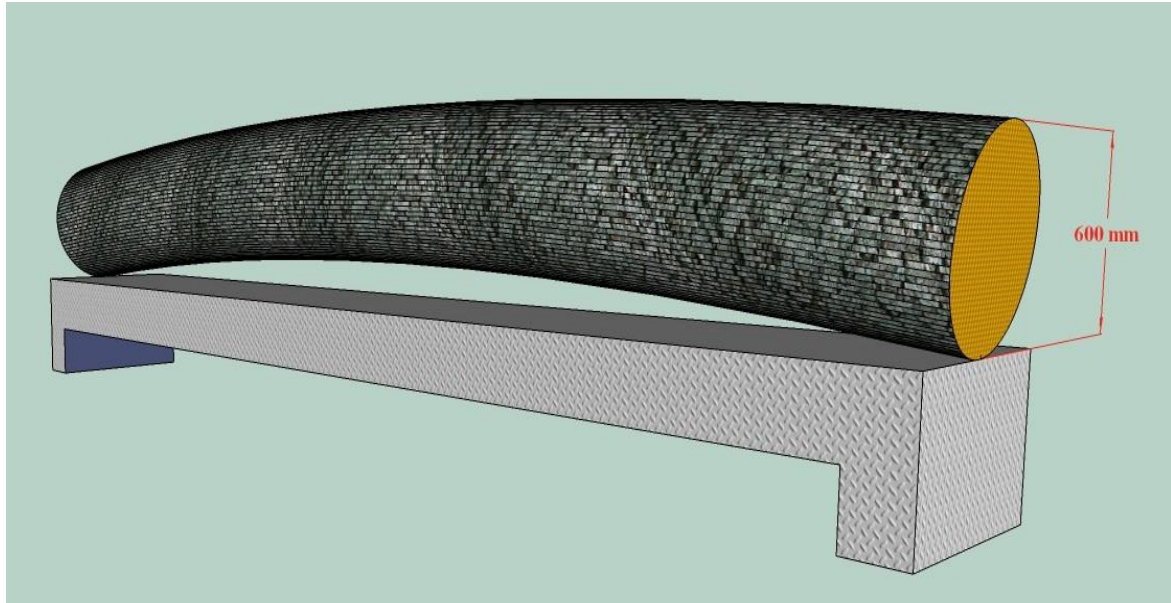


Figure 15 : Positionnement de la bille numéro 1 sur le chariot de la scie de tête (Takoudjou R., 2020)

Détermination des paramètres de simulation

La simulation passe par la détermination au préalable de quelques paramètres à savoir :

- ❖ La flèche (MN) ;
- ❖ Le diamètre (HN) de la section la plus haute de la bille sur le banc de sciage ;
- ❖ La distance (GM) séparant la section de diamètre HN du fin bout ;
- ❖ La dimension cible ;

a) Détermination de la flèche

Ce calcul se fonde sur les constats suivants :

- La longueur totale de la bille modélisée ne représente qu'une restriction de la courbe des fonctions de second degré (partie concave et convexe) permettant sa représentation ;
- Les extrémums de ces fonctions ne correspondent pas forcément à la flèche de la bille modélisée ;

Partant de ces deux constats, il est plus qu'évident de trouver une autre formule que celle de la dérivée de la fonction de la partie concave (partie en contact direct avec le plateau du chariot) afin de déterminer l'abscisse du point le plus haut de cette fonction.

En considérant un point $M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ et un point $N \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$ évoluant respectivement sur la droite (FG) et sur la courbe de la fonction F_2 de la partie concave d'équations respectives :

$$\begin{cases} y = ax + b \\ Y = A_2X^2 + B_2X + C_2 \end{cases}; \text{ avec } a = \frac{y_G - y_F}{x_G - x_F}$$

Avec a = coefficient directeur de la droite (FG)

Une distance entre les deux points est donnée par la formule :

$$D^2 = (X - x)^2 + (Y - y)^2 \quad (\text{Éq. 12})$$

X, x, Y et y étant des variables, un extrémum (maximum ou minimum) de D est obtenu lorsque :

$$DdD = (X - x)(dX - dx) + (Y - y)(dY - dy) = 0 \quad (\text{Math on line, 2005})$$

Avec dX, dx, dY et dy étant les dérivées partielles de D par rapport à X, x, Y et y

Avec les contraintes des équations de la droite (FG) et de la fonction F_2 , on obtient dY et dy :

$$\begin{cases} dy = adx \\ dY = 2A_2XdX + B_2dX \end{cases}$$

En remplaçant on a : $(X - x)(dX - dx) + (Y - y)[dX(2A_2X + B_2) - adx] = 0$

En regroupant les éléments possédant dX et dx entre eux on a :

$$dX[X - x + (Y - y)(2A_2X + B_2)] - dx[X - x + (Y - y)(a)] = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} X - x + (Y - y)(2A_2X + B_2) = 0 \\ X - x + (Y - y)(a) = 0 \end{cases}$$

On obtient ainsi le système de 4 équations à 4 inconnues $(X, Y, x$ et $y)$ suivant :

$$\begin{cases} X - x + (Y - y)(2A_2X + B_2) = 0 \\ X - x + (Y - y)(a) = 0 \\ A_2X^2 + B_2X - Y + C_2 = 0 \\ ax - y + b = 0 \end{cases} \quad (S_6)$$

$$\Rightarrow X = \frac{a - B_2}{2A_2}$$

La résolution du système (S_6) permet d'obtenir les coordonnées des points M et N nécessaire pour le calcul de la flèche MN suivant la formule :

$$MN = \sqrt{(x_N - x_M)^2 + (y_N - y_M)^2}, \text{ avec } MN \text{ en cm} \quad (\text{Éq.13})$$

b) Détermination du diamètre (HN) de la section la plus haute de la bille sur le banc de sciage

➤ Calcul des coordonnées du point *H*

Le point *H* ici représente l'intersection entre la droite (MN) et la courbe de la fonction de la partie convexe de la grume. Ses coordonnées sont ainsi obtenues par la résolution du système (S₆) suivant :

$$\begin{cases} F_1(x) = A_1x^2 + B_1x + C_1 \\ y = ax + b \end{cases}; \text{ avec } a = \frac{y_M - y_N}{x_M - x_N} \quad (S_7)$$

Avec *a* = coefficient directeur de la droite (MN)

Calcul de la distance *HN*

Elle est donnée par la relation :

$$HN = \sqrt{(x_N - x_H)^2 + (y_N - y_H)^2}; \text{ avec } HN \text{ en cm} \quad (\text{Éq.14})$$

➤ Position de la section de diamètre *HN* par rapport au fin bout

Cette position correspond simplement à la distance *GM* tel que :

$$GM = \sqrt{(x_M - x_G)^2 + (y_M - y_G)^2}; \text{ avec } GM \text{ en cm} \quad (\text{Éq.15})$$

c) Détermination de la dimension cible des pièces à débités

La détermination de la dimension cible brute passe par le calcul des variations au cours du processus de sciage.

➤ Etude des variations au sciage

Les variations caractérisant la précision au sciage sont :

❖ La variation à l'intérieur d'une pièce ou écart type intra-pièce (*S_w*) : elle représente La variation d'épaisseur ou de largeur le long d'une même pièce de bois. Elle se calcul par la formule suivante (Brown, 1986) :

$$S_w = \sqrt{\bar{S}^2} \quad (\text{Éq. 16})$$

Avec :

$$\bar{S}^2 = \frac{1}{m} \sum S^2$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$\bar{S}^2 =$ la moyenne des écarts – types au carré de l'épaisseur ou de la largeur

$S =$ écart – type de l'épaisseur ou de la largeur par pièce de bois

$n =$ nombre de mesure de l'épaisseur ou de la largeur effectuée par pièce de bois

$m =$ le nombre de pièces de bois mesurées

$x_i =$ épaisseur ou largeur mesurée

$\bar{X} =$ épaisseur ou largeur moyenne par pièce de bois

- ❖ La variation entre les pièces ou écart type inter-pièce (S_b) : elle représente la variation d'épaisseur ou de largeur d'une pièce de bois à la suivante. Elle se calcul par la formule suivante (Brown, 1986) :

$$S_b = \sqrt{S_{\bar{X}}^2 - \frac{S_w^2}{n}} \quad (\text{Éq. 17})$$

Avec :

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{X}_i - \bar{\bar{X}})^2}$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i$$

$S_{\bar{X}} =$ écart – type des épaisseurs ou des largeurs moyennes des pièces de bois

$\bar{\bar{X}} =$ épaisseur ou largeur moyenne globale des pièce de bois mesurées

- ❖ La variation total du processus ou écart type du processus total ou variation combinée (S_t). Elle se calcul par à la formule (Brown, 1986) :

$$S_t = \sqrt{S_w^2 + S_b^2} \quad (\text{Éq. 18})$$

Avec S_t , S_w et S_b données en mm

- Calcul des dimensions cibles

Après la détermination de la variation du processus total dont dépend la dimension cible brute (T), celle-ci est calculée grâce à la formule suivante (Brown, 1986) :

$$T = \frac{F + P}{1 - \frac{R_h}{100}} + (Z \times S_t) \quad (\text{Éq. 19})$$

Avec :

$$R_h = \frac{PSF - h}{PSF} \times \frac{R_t}{100}$$

T = dimension cible verte (rugueuse) de la pièce en mm

F = dimension final ou dimension nominale de la pièce en mm

Z = facteur de sous dimensionnement

P = profondeur de rabotage

R_h = retrait de l'essence dans le sens sciée jusqu'à l'humidité h

S_t = variations combinée en mm

R_t = retrait total de l'essence dans le sens scié

PSF = point de saturation des fibres

Une fois la valeur de la dimension cible verte de la pièce obtenue, il est nécessaire de déterminer la valeur minimale critique de celle-ci. Elle est donnée par la relation (Brown, 1986) :

$$CS = \frac{F + P}{1 - \frac{R_{th}}{100}} \quad (\text{Éq. 20})$$

Où CS = dimension cible critique (mm)

Dans le cadre de cette étude les lambourdes furent choisies comme types d'avivés à obtenir car elles représentent la majorité des sciages en bois lourds (Tali, Azobé ...) produits au sein de nos scieries. Pour le calcul des dimensions cible nous avons pris la valeur $Z = 1,65$ pour un seuil de précision de 95%.

Sachant que les lambourdes sont utilisées à l'état sec pour un seuil d'humidité de 12% utilisé comme référence internationale des bois sec fut considéré pour les dimensions nominales.

Simulation proprement dite

Elle débute par une représentation en projection orthogonale des diamètres des trois sections composant la bille (section gros bout, fin bout et la plus haute) en vue de déterminer la partie centrale contenant les produits de plus grande longueur qu'on pourra tirer. Cette partie représente la zone d'intersection des cercles (cf. Fig. 22, p. 57).

Une fois cette partie identifiée, la simulation du débitage s'effectue en trois étapes successives à savoir :

- Equarrissage de la bille : ici il faut déterminer la position du premier trait de scie nécessaire pour obtenir un équarris ;
- La valorisation de l'équarris : elle consiste à déterminer le nombre de pièces pour être extrait de celui-ci ;
- La valorisation des dosses : elle passe par le calcul du défilement linéaire ou conicité de la bille et la longueur de la flache (dosse).

a) Détermination de la position du premier trait de scie

En effet, l'expérience des scieurs et les études sur l'optimisation montrent que le premier trait de scie réalisant le premier découvert a une importance primordiale et conditionne le rendement matière (Bouzinakis & Martin, 1986).

Le calcul de la position (x) de ce premier trait s'effectue par la méthode de Pythagore tel que décrit ci-dessous (Fig. 16) :

$$r_f = \frac{D_f}{2} = x + y$$

$$\text{Or, d'après Pythagore : } y = \sqrt{\frac{D_f^2}{4} - \frac{l_c^2}{4}}$$

$$\Rightarrow x = \frac{D_f}{2} - \sqrt{\frac{D_f^2 - l_c^2}{4}} \quad (\text{Éq. 21})$$

Vu que le mode de débitage par plots modifiés nécessite un équarrissage des billes, la formule pour l'obtention du premier trait de scie devient :

$$\text{on a d'après Pythagore,} \quad l_c = 2r_f^2 \Rightarrow l_c = \frac{\sqrt{2}}{2} D_f \quad (\text{Éq. 22})$$

$$\text{en remplaçant } l_c \text{ on obtient,} \quad x = \frac{D_f}{2} - \sqrt{\frac{D_f^2}{8}}$$

$$\Rightarrow x = \frac{D_f}{2} - \frac{D_f \sqrt{2}}{4}$$

$$\Rightarrow x = \frac{D_f(2 - \sqrt{2})}{4} \quad (\text{Éq. 23})$$

Où x = position du trait de scie en cm, r_f = le rayon fin bout en cm, D_f = diamètre fin bout en cm et l_c = largeur cible en cm.

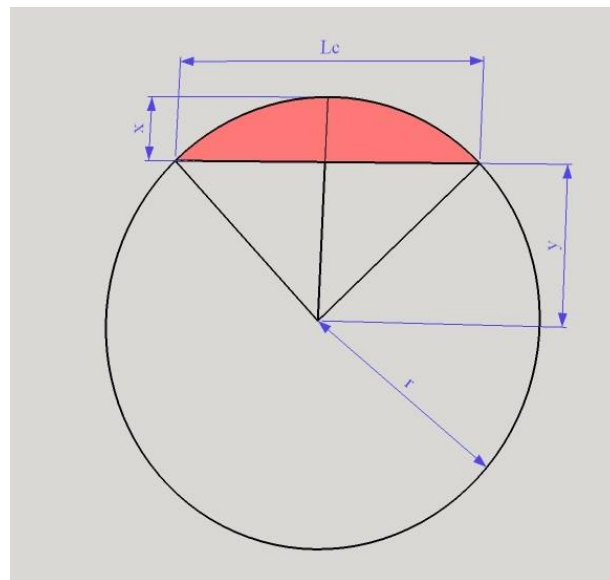


Figure 16 : Positionnement du premier trait de scie (Takoudjou, 2020)

b) Calcul du nombre de pièces

Une fois le débit fixé et la position du trait de scie déterminée, on simule ensuite le débit des plateaux que l'on peut placer dans le noyau en utilisant successivement les différentes largeurs et en tenant compte de ce que l'on peut tirer des dosses. Le nombre de pièces à obtenir sur une bille est fortement influencé par les dimensions de ces pièces. Cherchant à extraire de chaque bille le maximum de débités commerciaux, on a à résoudre le problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser } S_T = \sum_{i=1}^N n_{\lambda_i} S_i, \quad \text{sous la contrainte :} \\ \sum_{i=1}^N n_{\lambda_i} S_i - S_T \leq 0, \quad \text{avec } S_T = \text{section droite de la bille, (Danwe et al, 2009)} \\ S_i = \text{section droite de l'avivé } i \text{ tel que} \\ S_i = l_c \times e_c, \quad l_c \text{ et } e_c \text{ étant les dimensions cibles des avivés} \end{array} \right.$$

Ici deux cas de figure se présente :

- 1^{er} cas : obtention des pièces de longueur maximal
- 2^e cas : obtention par tronçonnage des produits de plus petites longueurs

Le nombre de pièces obtenue sur un plateau est donné par la formule :

$$n = \frac{l_p}{l_c + e_T} \quad (\text{Éq. 24})$$

Dans le cas où le plateau possède une forte section, on calcul également le nombre de pièces sur la deuxième dimension du plateau :

$$n = \frac{e_p}{e_c + e_T} \quad (\text{Éq. 25})$$

n = nombre de pièces ; l_p = largeur du plateau centrale de la bille en (cm) ; e_p = épaisseur du plateau (cm), e_T = épaisseur du trait de scie.

c) Valorisation des dosses

L'opération ici consiste à déterminer le nombre et le type de débitées pouvant être extraites des dosses selon les dimensions cibles des avivés de la commande (Fig.17). Cette valorisation des dosses passe par la détermination de paramètres tels que les hauteurs des dosses, la longueur exacte de la partie flacheuse à certaines pièces de bois (longueur de la demi-dosse) et la longueur maximale des sciages issus de la dosse (position du trait de travers). Les relations permettant d'obtenir ces paramètres sont les suivantes :

- ❖ Calcul des hauteurs de la dosse supérieure :

$$h = x \text{ (au fin bout)} \quad (\text{Éq. 26})$$

$$h = D_{3m} + MN + x - D_f \text{ (au de la plus haute section)} \quad (\text{Éq. 27})$$

$$h = D_g - D_f + x \text{ (au gros bout)} \quad (\text{Éq. 28})$$

- ❖ Calcul des hauteurs de la dosse inférieure :

$$h = D_f - (x + l_p) \quad (\text{Éq. 29})$$

- ❖ Calcul de la longueur de la flache pour les demi-dosses inférieures et supérieures (L_f):

$$L_f = GM \text{ (côté fin bout)} \quad (\text{Éq. 30})$$

$$L_f = L - GM \text{ (côté gros bout)} \quad (\text{Éq. 31})$$

- ❖ Calcul de la longueur maximal (L_m) de la pièce pouvant être extrait de la dosse

$$\tan \theta = \frac{h}{L_f} = \frac{e_c + e_T}{y} \text{ et } L_m = L_f - y$$

$$\Rightarrow L_m = L_f \times \left(1 - \frac{e_c + e_T}{h}\right);$$

Avec : h en (cm) ; L_f en (cm) ; L_m en (cm) ; e_c = épaisseur cible de la pièce en (cm) ; l_p = largeur du plateau centrale de la bille en (cm), e_T = épaisseur du trait de scie.

Sachant que la hauteur de la dosse diminue de $(e_c + e_T)$ à chaque fois que l'on réitère l'opération (fig. 16), on obtient par récurrence la relation suivante :

$$L_{m_i} = (L_{f_{i-1}} - e_T) \times \left(1 - \frac{e_c + e_T}{h - (i-1)(e_c + e_T)}\right), \text{ avec } i \geq 1 \text{ et } L_{m_i} > 0 \quad (\text{Éq. 32})$$

Où L_{m_i} = longueur maximale de la $i^{nième}$ pièce enlevée et $L_{f_{i-1}}$ = longueur de la flache à l'ordre $i - 1$.

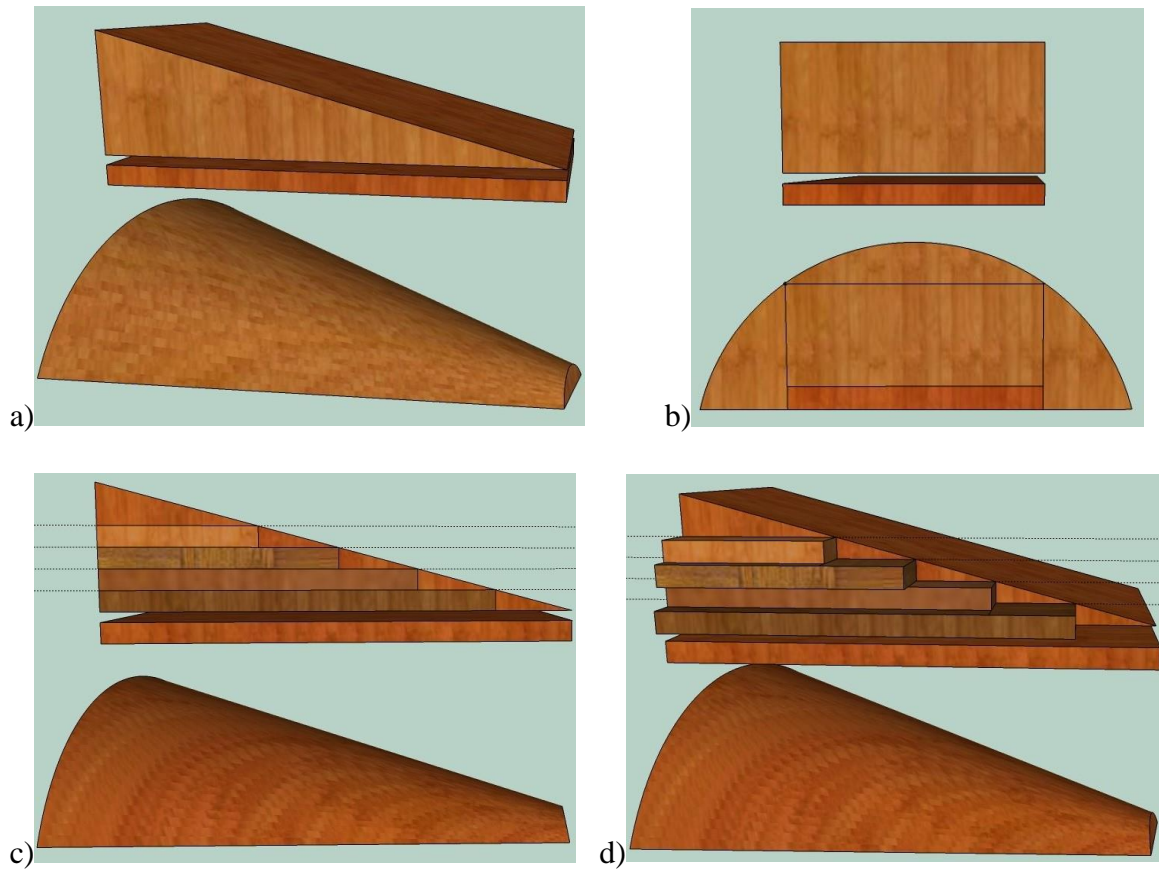


Figure 17 : Forme géométrique et processus de valorisation de la dosse (Takoudjou, 2020)

II.2.2.3. Evaluation de l'impact de l'usage du patron de débitage sur le rendement

Calcul du rendement matière théorique et réel des bille

Il est déterminé par la formule suivante :

$$r = \frac{V_d}{V_b} \times 100 \left\{ \begin{array}{l} r = \text{rendement matière en \%} \\ V_d = \text{volume des débités en m}^3 \\ V_b = \text{volume brut de la bille en m}^3 \end{array} \right. \quad (\text{Éq. 33})$$

Cubage des billes

En ce qui concerne le calcul des volumes, la formule qui a été utilisée dans le cadre de cette étude fut celle du Cameroun assimilant l'arbre à un cylindre de diamètre moyen encore appelé formule du diamètre moyen ou formule du cubage commercial des grumes.

Le volume de la bille est ainsi calculé par la formule :

$$V = \frac{\pi}{4} \times D_m^2 \times L \left\{ \begin{array}{l} V = \text{volume en } m^3 \\ D_m = \text{diamètre moyen en cm} \\ L = \text{longueur en m} \end{array} \right. \quad (\text{Éq. 34})$$

$$D_m = \left(\frac{D_g + D_f}{2} \right) \left\{ \begin{array}{l} D_g = \text{diamètre gros bout en cm} \\ D_f = \text{diamètre fin bout en cm} \end{array} \right.$$

Cubage des colis d'avivés

Deux formules de cubage ont été utilisées ici selon la largeur des pièces qui compose le colis :

- Pour les colis contenant des pièces de largeur fixe :

$$V_c = n \times V \left\{ \begin{array}{l} V_c = \text{volume du colis en } m^3 \\ n = \text{nombre de pièce} \\ V = \text{volume d'une pièce en } m^3 \end{array} \right. \quad (\text{Éq. 35})$$

$$V = \frac{L \times l \times e}{1000000} \left\{ \begin{array}{l} V = \text{volume d'une pièce en } m^3 \\ L = \text{longueur en m} \\ l = \text{largeur en mm} \\ e = \text{épaisseur en mm} \end{array} \right. \quad (\text{Éq. 36})$$

- Pour les colis contenant des pièces de largeur variable :

$$V_c = \frac{L \times e}{1000000} \times \sum_{i=1}^n l_i \quad (\text{Éq. 37})$$

II.3. Logiciels de traitement des données

Le traitement des différentes données pour l'obtention des résultats a été rendu possible grâce aux logiciels MATLAB R 2017b, SKETCHUP PRO 2015 et MICROSOFT EXCEL 2016.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

Suite à la collecte et l'analyse des données récupérées sur le terrain, les logiciels Excel et SPSS ont permis de compiler les données afin d'obtenir les différents résultats qui seront présentés dans ce chapitre.

III.1. Modélisation des billes courbes

Suite à une compilation des données des arbres collectés au sein du parc à bille de la scierie de la société DINO ET FILS .SA (JDF). Le tableau 4 présente les différents paramètres de modélisation collectés sur les 12 billes composant l'échantillon.

Tableau 4 : Coordonnées des points de la partie convexe et paramètres des bille

N° de la bille	Dg (cm)	Df (cm)	D3m (cm)	L (cm)	A		B		C		D	
					x	y	x	y	x	y	x	y
01	60	53	55	610	0	600	-51	300	-84	150	-127	0
02	62	47	50	610	0	600	-50	300	-79	150	-113	0
03	68	63	64	630	0	600	-45	300	-74	150	-111	0
04	68	63	66	620	0	600	-49	300	-77	150	-116	0
05	60	53	57	610	0	600	-41	300	-70	150	-112	0
06	63	53	56	620	0	600	-48	300	-77	150	-115	0
07	68	66	66	610	0	600	-39	300	-66	150	-95	0
08	68	60	65	610	0	600	-53	300	-83	150	-117	0
09	65	58	63	620	0	600	-46	300	-77	150	-120	0
10	68	61	66	620	0	600	-47	300	-81	150	-130	0
11	73	60	64	620	0	600	-39	300	-64	150	-117	0
12	79	66	68	620	0	600	-41	300	-72	150	-111	0

L'écart maximal à la verticale obtenu ici est de 130 cm et les billes composant l'échantillon sont majoritairement dans la classe de diamètre 60 – 70.

III.1.1. Détermination de l'équation de la partie convexe de la bille

Grace au logiciel MICROSOFT EXCEL 2016, les nuages de points ont été construits pour chaque bille à partir des coordonnées des quatre points prient sur chacune d'elles ; ceci a permis de trouver la courbe du polynôme de second degré approchant le mieux chacun des quatre points. Les équations de ces polynômes ont pu ainsi être déterminées. Les coefficients de ces polynômes sont mentionnés dans le tableau 5. La figure 18 présente les courbes de partie convexe des billes.

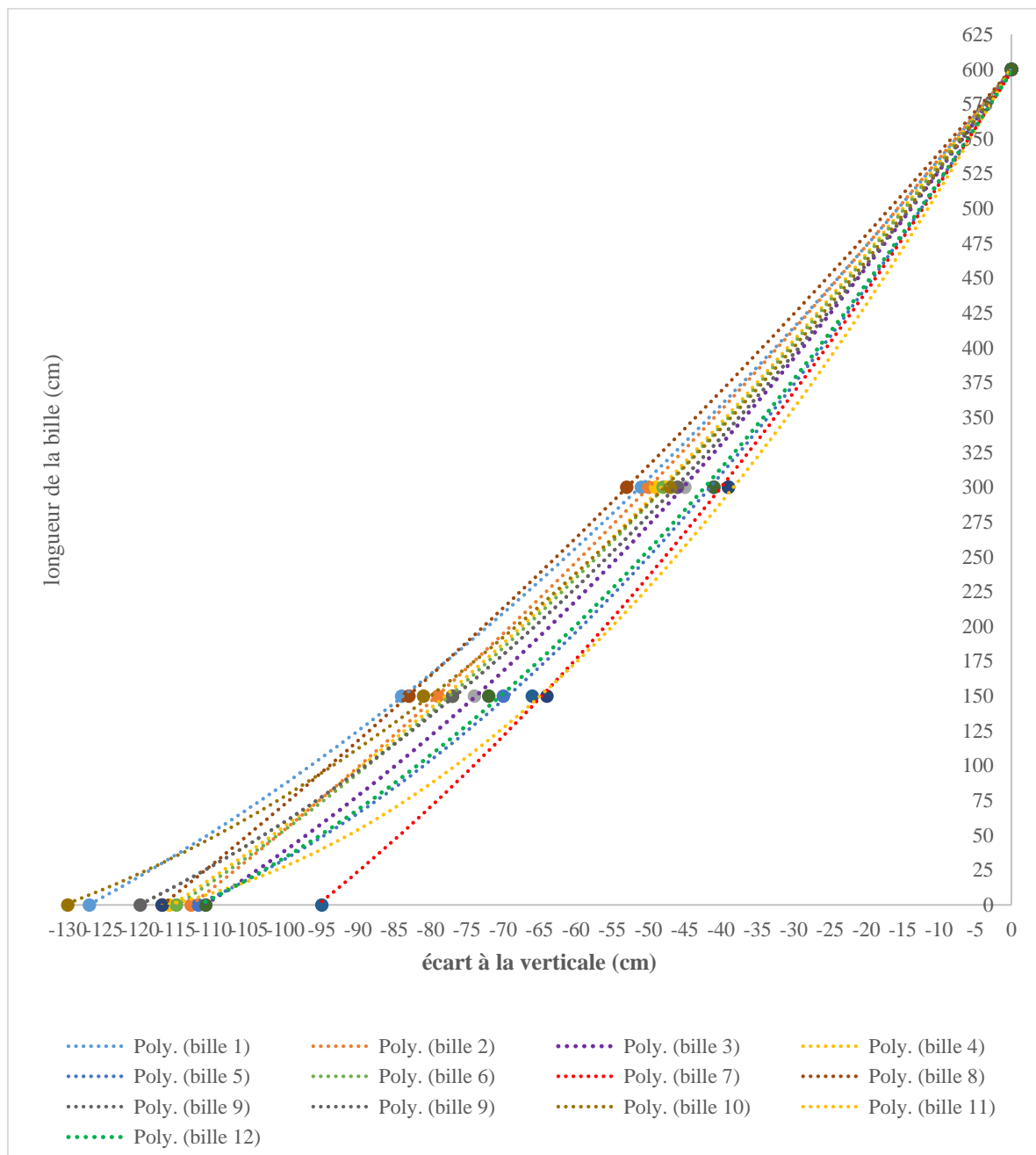


Figure 18 : Courbes représentatives de la partie convexe des billes

Tableau 5 : Coefficients des courbes $F_1(x)$ de la partie convexe des billes

N° de la bille	Coefficients des courbes			Equations de la partie convexe $F_1(x)$
	A_1	B_1	C_1	$A_1x^2 + B_1x + C_1$
01	0,015	6,6264	599,79	$0,015x^2 + 6,6264x + 599,79$
02	0,0111	6,5676	600,1	$0,011x^2 + 6,5676x + 600,1$
03	0,0187	7,4806	599,75	$0,0187x^2 + 7,4806x + 599,75$
04	0,0155	6,9867	600,9	$0,0155x^2 + 6,9867x + 600,9$
05	0,0265	8,3164	599,24	$0,0265x^2 + 8,3164x + 599,24$
06	0,0159	7,0492	600,32	$0,0159x^2 + 7,0492x + 600,32$
07	0,0217	8,3385	598,48	$0,0217x^2 + 8,3385x + 598,48$
08	0,0084	6,1161	600,08	$0,0084x^2 + 6,1161x + 600,08$
09	0,0201	7,408	599,64	$0,0201x^2 + 7,408x + 599,64$
10	0,0202	7,2273	598,95	$0,0202x^2 + 7,2273x + 598,95$
11	0,0347	9,2015	601,27	$0,0347x^2 + 9,2015x + 601,27$
12	0,0246	8,0968	598	$0,0246x^2 + 8,0968x + 598$

III.1.2. Détermination de l'équation de la partie concave de la bille

Ici le travail a consisté à trouver suivant les paramètres de la bille, les coordonnées de trois points appartenant à la fonction $F_2(x)$ afin de trouver son équation.

L'usage du système (S_1) et de l'équation 11 a permis de déterminer les coordonnées du point I situé sur la courbe $F_1(x)$. Les systèmes (S_2), (S_3) et (S_4) ont permis l'obtention respectif des coordonnées des points E, F et G appartenant à la courbe de la fonction $F_2(x)$.

Les résultats des calculs de ces différentes coordonnées de points sont mentionnés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Coordonnées du point I de $F_1(x)$ et des points E,F et G de la partie concave des billes

N° de la bille	I		E		F		G	
	x	y	x	y	x	y	x	y
01			-106,98	301,26	-183,55	20,07	-52,4	607,91
02			-100,25	302,58	-173,33	14,84	-46,47	607,06
03			-109,47	303,95	-176,16	19,55	-62,44	608,37
04			-114,56	304,41	-181,23	19,24	-62,38	608,92
05			-99,05	301,17	-167,4	23,27	-52,63	606,31
06			-104,18	302,72	-175,42	17,85	-52,48	607,45
07			-105,96	304,97	-161,2	15,67	-65,54	607,86
08			-118	305,67	-183,02	15,84	-59,23	609,65
09			-109,83	302,51	-180,56	23,44	-57,43	607,75
10			-114,6	301,57	-190,7	30,68	-60,43	608,34
11			-103,06	299,69	-161,02	40,67	-78,58	608,49
12			-110,58	303,61	-184,93	28,1	-65,51	608,06

Parmi les quatre solutions de l'équation 11, les valeurs retenues pour l'abscisse du point I devaient respecter les contraintes suivantes : $x_D < x_I < 0$ et x_I est un réel. Pour les points E, F et G la contrainte sur l'abscisse est tel que x_E, x_F et x_G soient inférieures à zéro.

Après avoir trouvé les coordonnées des points E, F et G appartenant à la courbe de la fonction $F_2(x)$, les coefficients A_2, B_2 et C_2 sont déterminés par la résolution du système (S_5) à l'aide du logiciel MATLAB R 2017b.

Les résultats obtenus ainsi que les équations de la partie concave $F_2(x)$ correspondante sont mentionnés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Coefficients des courbes $F_2(x)$ de la partie concave des billes

N° de la bille	Coefficients des courbes			Equations de la partie concave $F_2(x)$
	A_1	B_1	C_1	$A_1x^2 + B_1x + C_1$
01	0,0148	7,9833	985,59	$0,0148x^2 + 7,9833x + 985,59$
02	0,0136	7,6558	933,47	$0,0136x^2 + 7,6558x + 933,47$
03	0,0194	9,8113	1145,3	$0,0194x^2 + 9,8113x + 1145,3$
04	0,0131	8,1559	1066,7	$0,0131x^2 + 8,1559x + 1066,7$
05	0,0218	9,8875	1066,2	$0,0218x^2 + 9,8875x + 1066,2$
06	0,0154	8,3095	1001,1	$0,0154x^2 + 8,3095x + 1001,1$
07	0,0236	11,536	1262,8	$0,0236x^2 + 11,536x + 1262,8$
08	0,0058	6,1963	956,39	$0,0058x^2 + 6,1963x + 956,39$
09	0,0153	8,3785	1038,6	$0,0153x^2 + 8,3785x + 1038,6$
10	0,0161	8,4893	1062,4	$0,0161x^2 + 8,4893x + 1062,4$
11	0,0988	30,561	2399,9	$0,0988x^2 + 30,561x + 2399,9$
12	0,0255	11,252	1235,6	$0,0255x^2 + 11,252x + 1235,6$

Certaines équations des polynômes décrivent mal le profil externe de la bille courbe, l'instar de l'équation de la bille N° 11 tableau 7. Ceci montre les limites du modèle de modélisation qui n'est pas adopté pour les billes ayant une courbure partiel prononcée à l'une de ses extrémités. L'analyse des nuages de points montre que la fonction concave de cette bille est mieux décrite par un modèle exponentiel.

La figure 19 ci-dessous présente les courbes de la partie concave à chaque bille.

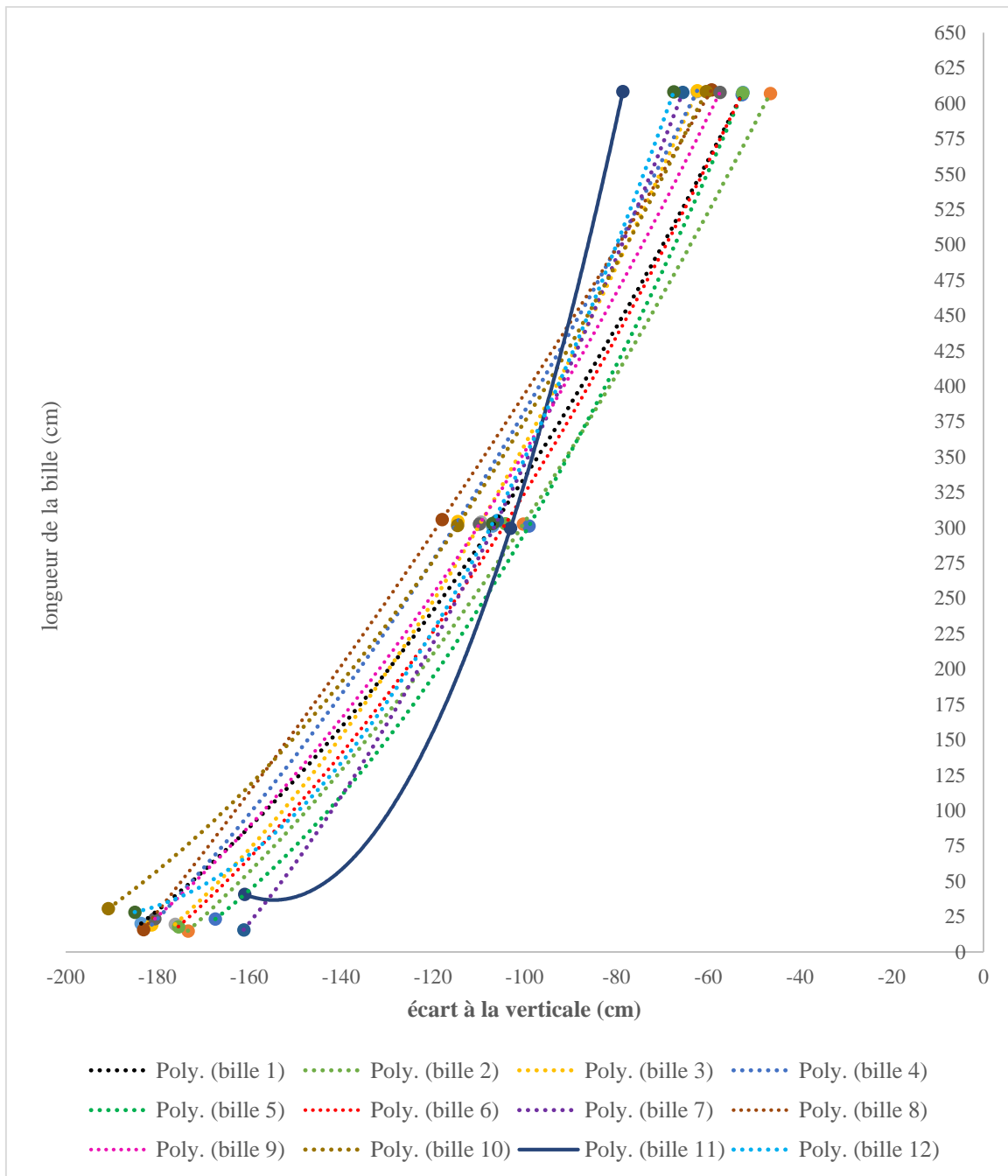


Figure 19 : Courbes représentatives de la partie concave des billes

Sur la figure 19 le polynôme de la bille numéro 11 possède un extrémum qui correspond pas à la forme de la bille au vu des exigences du façonnage et du transport du parc forêt à l'unité de transformation.

Les relations $F_1(x)$ et $F_2(x)$ fournissent une représentation de la bille, la section en tout point étant assimilée à un cercle. La modélisation de la bille numéro 1 par ces deux fonctions est donnée par la figure 20 ci-dessous.

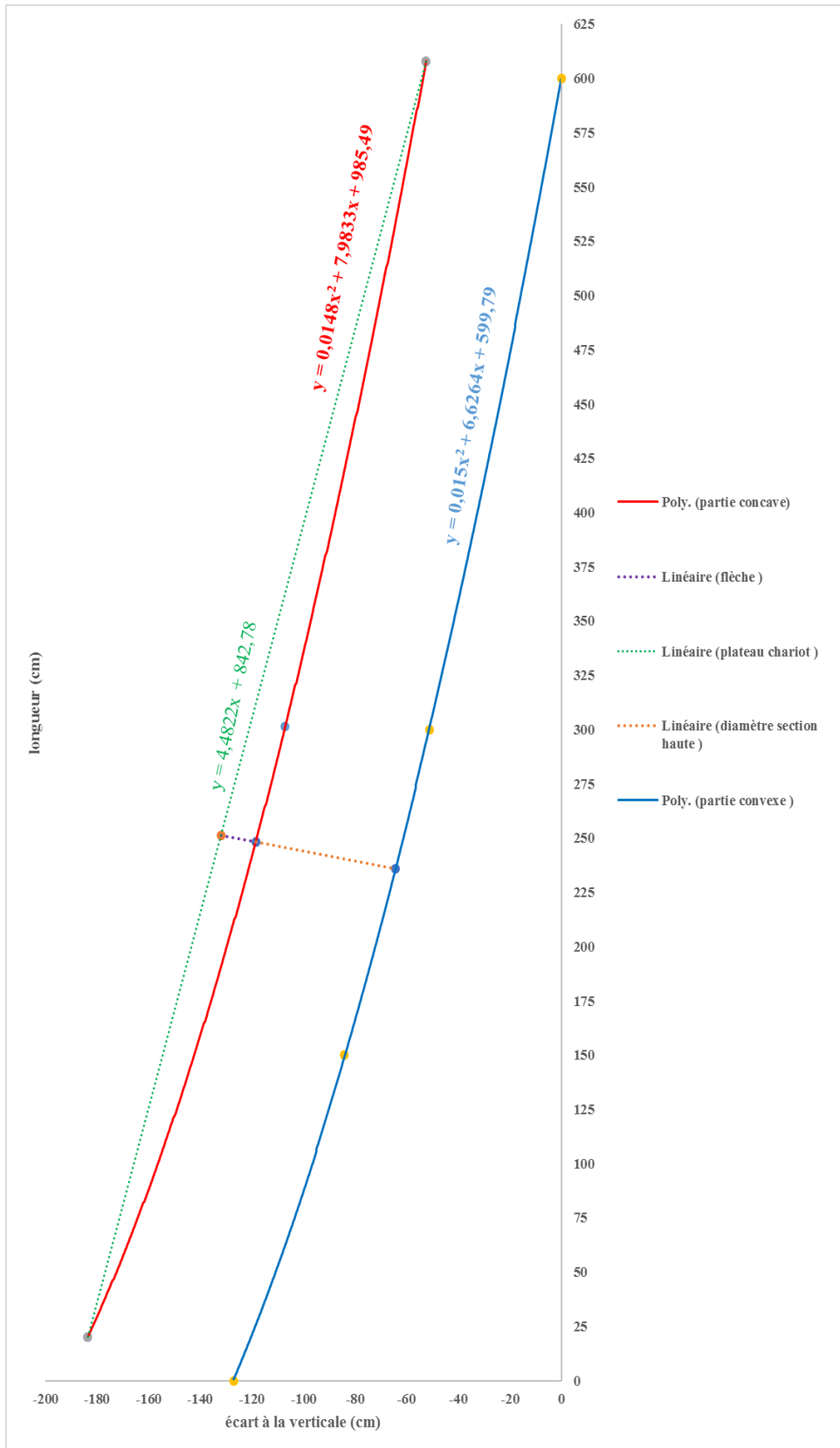


Figure 20 : Courbes représentatives du modèle mathématique de la bille numéro 1

III.2. Simulation du débitage de la bille à travers la conception de diagrammes de débitage

III.2.1. Détermination des paramètres de simulation

III.2.1.1. Calcul de la flèche, du diamètre de la section haute et sa distance du fin bout

Afin d'obtenir les informations nécessaires à la réalisation de modèle 2D de patrons de débitage des différentes billes la flèche, le diamètre et position de la plus haute section ont été déterminés. Le calcul est effectué ici à base des équations du modèle mathématique de la bille, il est donc effectué de façon mathématique et automatique. La résolution du système (S₆) et (S₇) a permis d'obtenir les coordonnées des points M, N et H ; grâce aux équations 13, 14 et 15, les distances MN, NH et GM ont été déterminées. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Paramètres de simulation

N° de la bille	Flèche MN (cm)	Diamètre NH (cm)	Distance au fin bout GM (cm)
01	14	55,4	365,34
02	11,44	51	356
03	11,95	64,33	362,4
04	09,2	66,4	347
05	14	57,8	369,52
06	12	56,62	359
07	8,57	66,1	352,6
08	4,44	65,24	322
09	11,84	63,81	353,44
10	15,24	66,72	365,33
11	-	-	-
12	18,47	68,92	416,6

Dans le tableau 8 ci-contre les paramètres de simulation ne sont pas définies pour la bille numéro 11, ceci est due au fait que sa forme n'est pas modélisable par la méthode décrite tout long de cette étude. Nous constatons ici que la hauteur de la flèche varie entre 4 et 18,47 cm.

La figure 21 ci-dessous présente un modèle 3D réalisé à l'aide du logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SKETCHUP PRO 2015 de la bille numéro 1 créé à base des informations obtenues à partir de son modèle mathématique.

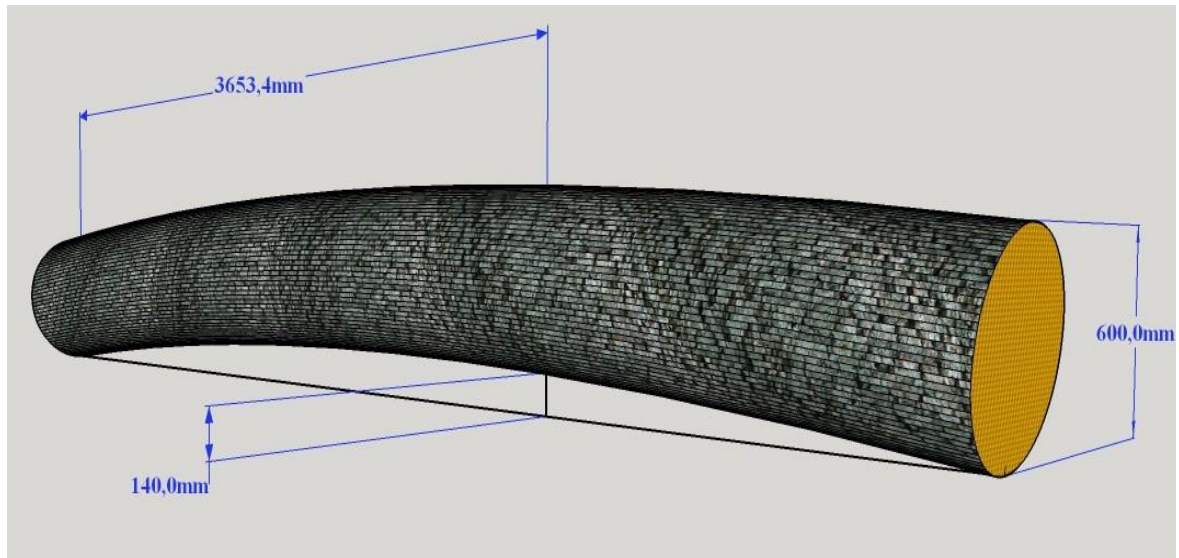


Figure 21: Représentation de la flèche du modèle de la bille numéro 1 en vue 3D (Takoudjou, 2020)

III.2.1.2. Détermination de la dimension cible

Afin de calculer la dimension cible des pièces à débitées, il est indispensable d'évaluer la précision au sciage du circuit d'usinage par le calcul des variations au sciage.

Au cours de l'étude, deux lots de dix pièces chacune ont été mesurés, les résultats du traitement des données par le logiciel MICROSOFT EXCEL sont mentionnés dans les tableaux 9 et 10 ci-dessous.

Variations au sciage au niveau de la scie de tête

Ici six mesures de l'épaisseur ont été prises par pièce (trois mesures sur chaque bord) dans le sens longitudinal de celle-ci. Les données recueillis sont mentionnées dans le tableau 9

Tableau 9 : Moyennes et écarts types des épaisseurs prisent par pièce

N°	Mesures des épaisseurs (mm)						(\bar{X})	(S)	(S^2)
1	43,18	43,68	43,18	43,42	42,92	43,18	43,26	0,259538	0,06736
2	43,94	43,68	44,2	44,2	43,42	43,94	43,896666	0,303951	0,0923866
3	43,68	43,18	43,42	43,18	42,68	43,18	43,22	0,331058	0,1096
4	42,92	42,42	42,68	42,68	42,68	42,42	42,633333	0,189596	0,0359466
5	43,68	43,42	43,68	43,18	42,92	43,18	43,343333	0,305002	0,0930266
6	42,42	42,68	42,42	42,42	42,68	42,42	42,506666	0,134263	0,0180266
7	42,92	43,18	42,68	42,42	42,92	43,18	42,883333	0,294867	0,0869466
8	43,18	42,92	42,42	42,92	43,18	43,18	42,966666	0,296558	0,0879466
9	42,16	42,68	42,68	42,16	42,42	42,16	42,376666	0,255629	0,0653466
10	43,68	44,2	43,94	43,94	43,68	44,2	43,94	0,232551	0,05408
$\bar{\bar{X}}$							43,102666		
$\overline{S^2}$									0,0710666
$S_{\bar{X}}$							0,5371916		

Le tableau 9 présente les moyennes et les écarts types des épaisseurs prisent par pièce, ainsi que les valeurs de la moyenne des moyennes $\bar{\bar{X}}$, la moyenne des carrés des écarts types $\overline{S^2}$ et l'écart type entre les moyenne $S_{\bar{X}}$ qui sont respectivement **43,1026667**, **0,07106667** et **0,5371916**. Ces trois valeurs nous permettent de calculer les variations suivantes :

- Calcul de la déviation standard intégrée ou écart type intra-pièce (S_w)

$$S_w = \sqrt{0,07106667} = \mathbf{0,266\text{ mm}}$$

La valeur de S_w trouvée est inférieure à 0,8 mm, ce qui signifie qu'il n'y aucune défaillance provenant de l'outil de coupe et les vitesses de coupe.

- Déviation standard entre les pièces ou écart type inter-pièce (S_b)

$$S_b = \sqrt{0,5371916^2 - \frac{0,26^2}{6}} = \mathbf{0,526\text{ mm}}$$

La valeur de S_b trouvée est largement inférieure à 0,9 mm, ce qui signifie qu'il n'y aucune défaillance provenant du réseau d'usinage.

- Déviation standard du processus total ou écart type du processus total ou variations combinée (S_t)

$$S_t = \sqrt{0,35^2 + 0,17^2} = \mathbf{0,59\ mm}$$

La valeur de S_t trouvée est inférieure à 1,2 mm ce qui caractérise une bonne qualité de sciage au niveau de la scie de tête.

Variations au sciage au niveau de la déligneuse

Ici trois mesures de la largeur ont été prises sur la face de chaque pièce et long de celle-ci. Les données recueillies sont mentionnées dans le tableau 10

Tableau 10 : Moyennes et écarts types des largeurs prises par pièce

N° pièce	Mesures largeurs (mm)			(\bar{X})	(S)	(S^2)
1	71,36	71,88	71,36	71,5333333	0,30022214	0,09013333
2	72,14	71,62	72,4	72,0533333	0,39715656	0,15773333
3	71,88	71,36	71,62	71,62	0,26	0,0676
4	71,12	71,62	72,14	71,6266667	0,51003268	0,26013333
5	71,88	71,36	71,12	71,4533333	0,38850139	0,15093333
6	71,62	71,62	71,88	71,7066667	0,15011107	0,02253333
7	71,62	72,4	71,88	71,9666667	0,39715656	0,15773333
8	71,62	71,36	71,88	71,62	0,26	0,0676
9	72,14	72,4	71,62	72,0533333	0,39715656	0,15773333
10	71,88	72,4	72,4	72,2266667	0,30022214	0,09013333
$\bar{\bar{X}}$				71,786		
$\bar{S^2}$						0,12222667
$S_{\bar{X}}$				0,26479808		

Le tableau 10 présente les moyennes et les écarts types des largeurs prises par pièce, ainsi que les valeurs de la moyenne des moyennes $\bar{\bar{X}}$, la moyenne des carrés des écarts types $\bar{S^2}$ et l'écart type entre les moyennes $S_{\bar{X}}$ qui sont respectivement **71,786**, **0,12222667** et **0,26479808**. Ces trois valeurs nous permettent de calculer les variations suivantes :

- Calcul de la déviation standard intégrée ou écart type intra-pièce (S_w)

$$S_w = \sqrt{0,12222667} = \mathbf{0,35\ mm}$$

La valeur de S_w trouvée est inférieure à 0,8 mm, ce qui signifie qu'il n'y a aucune défaillance provenant de l'outil de coupe et les vitesses de coupe.

- Déviation standard entre les pièces ou écart type inter-pièce (S_b)

$$S_b = \sqrt{0,26479808^2 - \frac{0,35^2}{3}} = \mathbf{0,17\ mm}$$

La valeur de S_b trouvée est largement inférieure à 0,9 mm, ce qui signifie qu'il n'y a aucune défaillance provenant du réseau d'usinage.

- Déviation standard du processus total ou écart type du processus total ou variations combinée (S_t)

$$S_t = \sqrt{0,35^2 + 0,17^2} = \mathbf{0,39\ mm}$$

La valeur de S_t trouvée est inférieure à 0,5 mm, ce qui permet d'affirmer que le sciage est parfaitement exécuté au niveau de la déligneuse.

Calcul des dimensions cibles des pièces à produire

Le tableau 11 présente les résultats des dimensions cibles vertes brut et des dimensions cibles critiques calculées pour chaque dimension de la pièce. Les dimensions cibles critiques sont inférieures aux dimensions cibles et représentent la valeur minimale de celles-ci.

Tableau 11 : Dimensions cibles vertes brut et critique à 12% d'humidité final

Dimensions sur la pièce	Dimension nominale (mm)	Dimensions cible verte brut (mm)	Dimension cible verte critique (mm)	Retrait à un taux d'humidité de 12%
Epaisseur	38	40,02	39,06	2,7%
Epaisseur	40	42,08	41,12	2,7%
Epaisseur	42	44,14	43,16	2,7%
Largeur	60	63,48	62,84	4,5%
Largeur	70	73,94	73,30	4,5%

III.2.2. Simulation proprement dite : cas des pièces de grandes longueurs

III.2.2.1. Equarrissage de la bille : Détermination de la position du premier trait de scie de scie

$$x = \frac{53 \times (2 - \sqrt{2})}{4} = 7,76 \text{ cm}$$

D'après ce résultat le premier trait de scie doit être réalisé à 7,76 cm du bon de la grume du côté du fin bout. L'épaisseur de la dosse à enlever est donc de 77,6 mm du côté du fin bout.

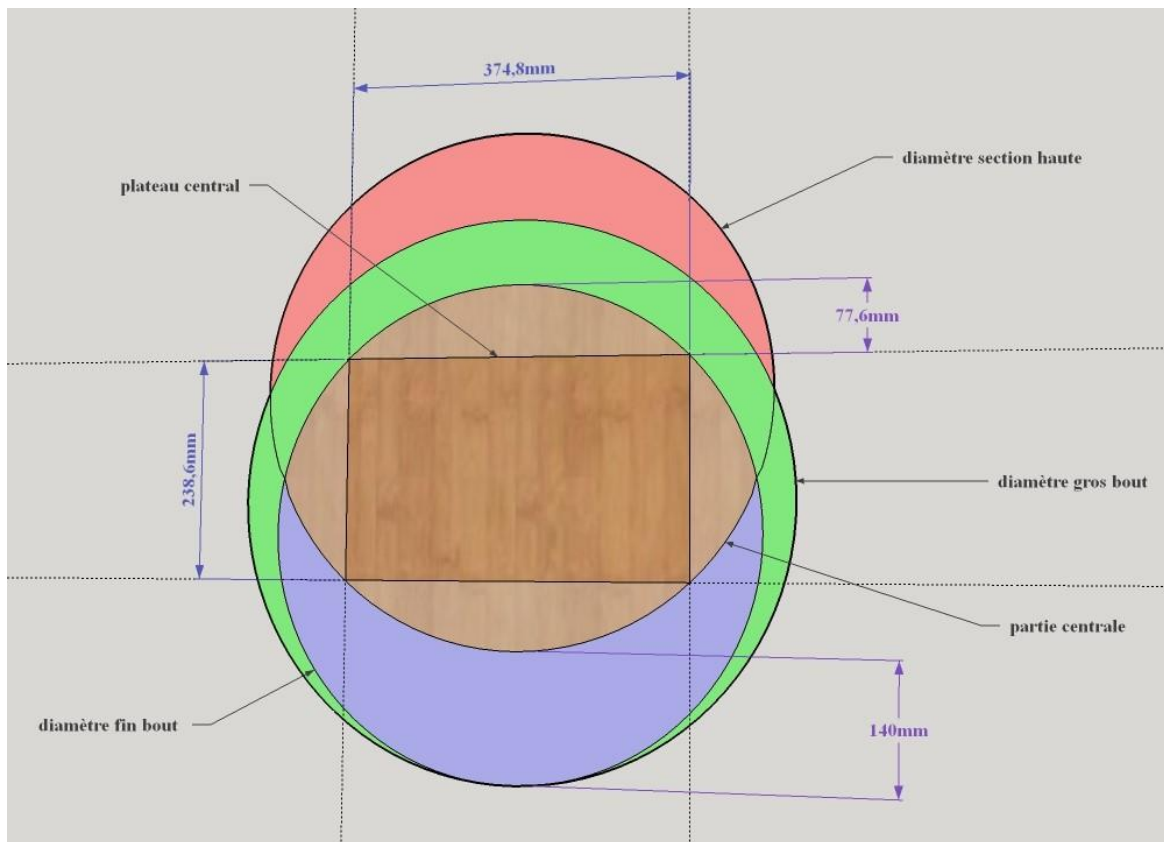


Figure 22: Equarrissage de la bille N° 1 et dimensions du plateau centrale (Takoudjou, 2020)

Sur la figure 22 ci-contre la disposition des différentes sections de la bille numéro 1 est matérialisée par des cercles de trois couleurs : bleu pour la section au fin bout, verte pour la section au gros bout et rouge pour la section la plus haute sur le banc de sciage. La zone d'intersection (partie centrale) permettant d'obtenir les plus grande longueur possible est de couleur marron.

L'équarrissage est effectué dans la partie centrale pour l'obtention d'un plateau central et de quatre dosses : une supérieure, une inférieure et deux de côté (Fig. 23).

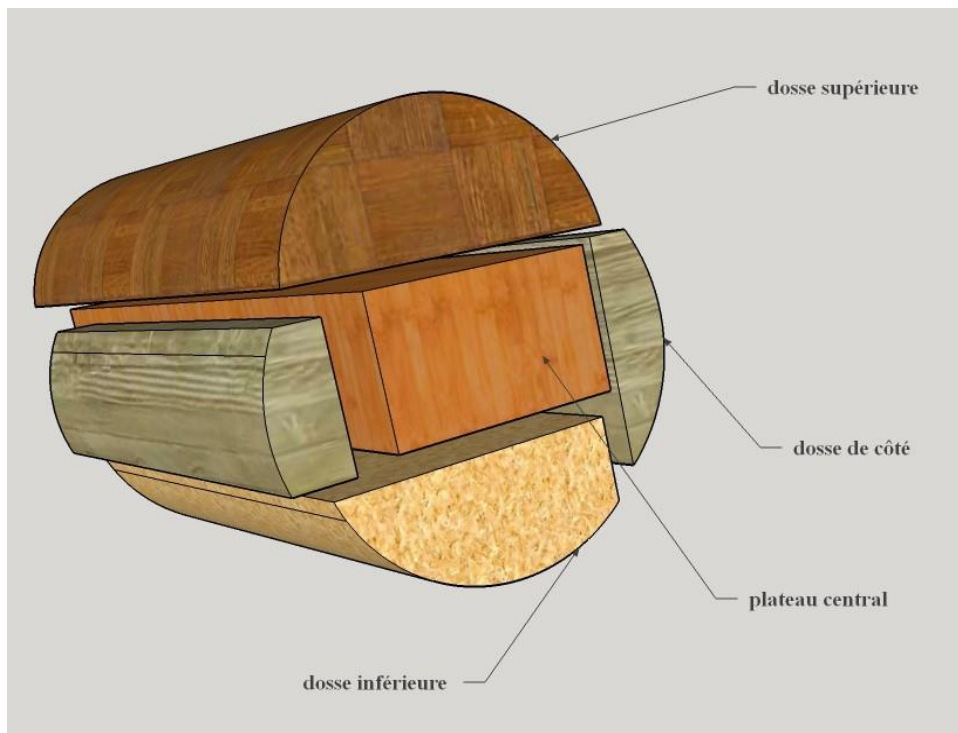


Figure 23: Les types de dosses et plateau du modèle de la bille N° 1 en 3D (Takoudjou R., 2020)

Grâce aux équations 22 et 23, la position des premiers traits de scie de chacune des 12 billes ainsi que les largeurs du plateau central ont été déterminées et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12 : Position du premier trait de scie et dimensions du plateau central de la bille

N° de la bille	D_f	Position du premier trait de scie (cm)	Largeur du plateau Central (cm)	épaisseur du plateau central (cm)	Longueur du plateau Central (cm)
01	53	7,76	37,47	23,86	610
02	47	6,88	33,23	22,67	610
03	63	9,22	44,54	32,8	630
04	63	9,22	44,54	35,5	620
05	53	7,76	37,47	24,32	610
06	53	7,76	37,47	26,15	620
07	66	9,66	46,66	38,03	610

08	60	8,78	42,42	38,9	610
09	58	8,49	41,01	30,19	620
10	61	8,93	43,13	28,9	620
11	60	8,78	42,42	-	620
12	66	9,66	46,66	28,76	620

III.2.2.2. Calcul du nombre de pièces de longueur maximale à extraire du plateau central

Ce calcul fut possible grâce aux équations 24 et 25, les résultats sont donnés dans les tableaux 13 et 14.

Tableau 13 : Nombre de pièces en épaisseur et en largeur sur le plateau principal

N° de la bille	D_f	$N_{l=63,48}$	$N_{l=73,94}$	$N_{e=40,02}$	$N_{e=42,08}$	$N_{e=44,14}$
01	53	5	4	5	5	5
02	47	4	4	5	5	4
03	63	6	5	7	7	6
04	63	6	5	8	7	7
05	53	5	4	5	5	5
06	53	5	4	6	5	5
07	66	7	6	8	8	8
08	60	6	5	9	9	8
09	58	6	5	7	6	6
10	61	6	5	6	6	6
11	60	-	-	-	-	-
12	68	7	6	6	6	6

À travers, les résultats mentionnés dans le tableau 13 on constate que le nombre de pièce obtenue dans le sens de la largeur est fonction du diamètre fin bout de la bille tandis que pour des billes ayant un même diamètre fin bout, le nombre de pièces en épaisseur varie. Ce nombre croit en ses opposé par rapport à la flèche de la bille.

Tableau 14 : Nombre de pièce de longueur maximale obtenue dans le plateau principal selon la section des avivés à produire

N° de bille	D_f	Nombre de débités					
		38×60 mm	38×70 mm	40×60 mm	40×70 mm	42×60 mm	42×70 mm
01	53	25	20	25	20	25	20
02	47	20	20	20	20	16	16
03	63	42	35	42	35	42	30
04	63	48	40	42	35	42	35
05	53	25	20	25	20	25	20
06	53	25	20	25	20	25	20
07	66	56	48	56	48	56	48
08	60	54	45	54	45	48	40
09	58	42	35	36	30	36	30
10	61	36	30	36	30	36	30
11	60	-	-	-	-	-	-
12	68	42	36	42	36	42	36

Les résultats du tableau 14 ci-contre associés avec ceux obtenue lors de la valorisation des dosses, permettent la représentation du patron de débitage de chaque bille suivant la section des avivés à produire (Fig. 24). Plus cette section est petite mieux sont répartis les avivés sur les plateaux.

III.2.2.3. Valorisation des dosses

Le calcul des hauteurs des dosses et des longueurs maximales des pièces issues des dosses a été possible grâce aux équations 26, 27, 28, 29, 30, 31 et 32. Les résultats sont dans le tableau 15.

Tableau 15 : Hauteurs des dosses et longueurs maximales de pièces

Types de dosses	Hauteur au gros bout (cm)	Hauteur à la section haute (cm)	Hauteur au fin bout (cm)	Longueur maximale au gros bout (cm)	Longueur maximale au fin bout (cm)
Dosses supérieure	14,76	24,16	7,76	151	285 et 205
Dosse inférieure	21,38	21,38	7,31	181	273 et 181

Les équations 24 et 25 ont permis le calcul du nombre de pièces obtenue à l'intérieur des dosses

Tableau 16 : Nombre de pièces de section 38 × 60mm issues du débitage des dosses de la bille numéro 1

Longueur (cm)	600	350	250	240	200	180
Dosses supérieures	4	0	1	10	1	0
Dosses inférieures	3	0	1	0	0	2
Dosses de côtés	2	2	0	0	0	0

Les tableaux 15 et 16 ci-dessus présentent respectivement les paramètres nécessaires à la valorisation des dosses et le nombre de pièces issues de celles-ci. Il est a noté que malgré les dimensions plus grandes des dosses inférieures, le nombre de pièces issues de celles-ci représente le quart de celui obtenu dans les dosses supérieures. Ceci est principalement due à la hauteur de la flèche observée sur les billes courbes. Ces résultats différents de ceux de trouvés par Bouzinekis & Martin, (1986) du fait des dimensions des débités obtenus.

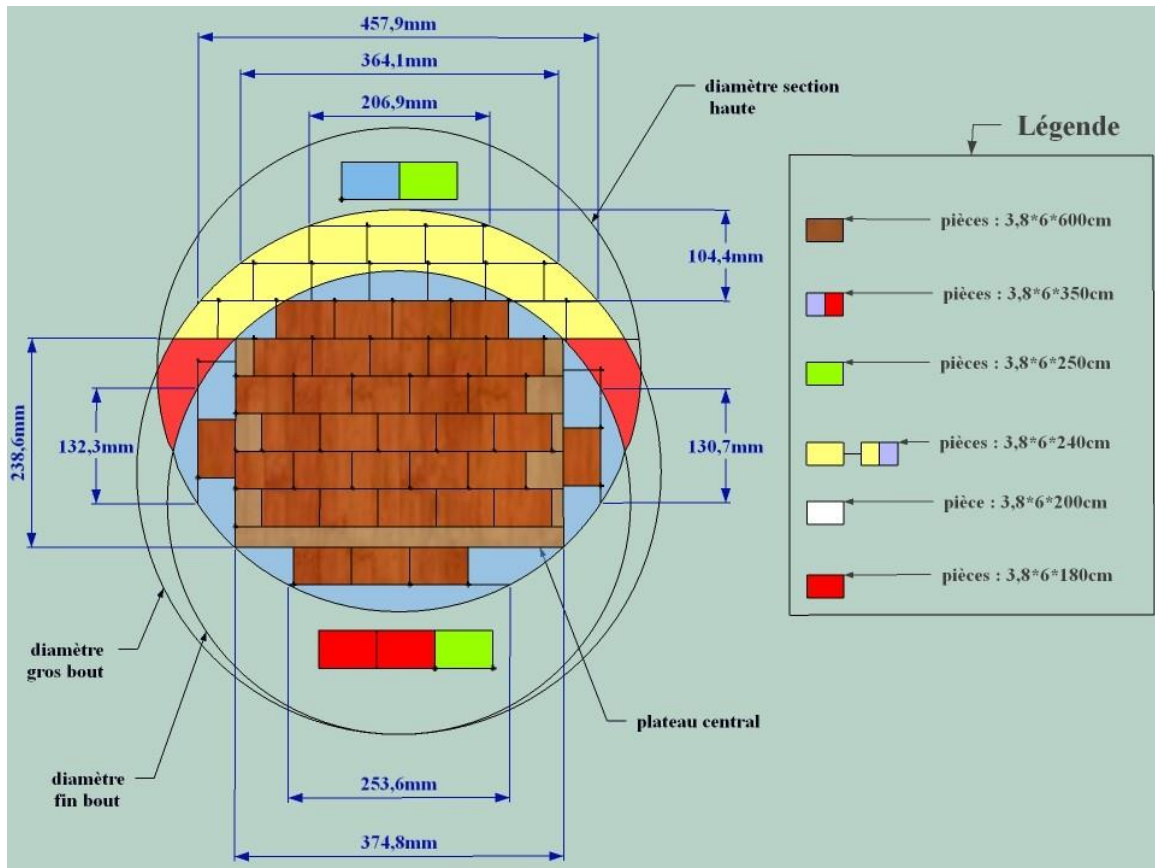


Figure 24 : Diagramme de débitage de la bille N° 1 pour des pièces de section 38 × 60mm (Takoudjou, 2020)

III.2.3. Simulation du débitage des billons après tronçonnage des billes

La méthodologie tel que présente précédemment pour les pièces de longueurs maximales fut utilisée pour l'obtention des résultats pour chacun des deux billons constituant chaque bille. Le tableau 17 ci-contre présente les paramètres de simulation pour le débitage de ces différents billons.

Tableau 17 : Paramètres de simulation pour le débitage des billons

N° de la bille	Flèche MN (cm)		Diamètre NH (cm)		Distance au fin bout GM (cm)		Position du trait de scie (cm)		Longueurs (cm)		Largeur du plateau principal (cm)		Epaisseurs plateau principal (cm)	
	Billon 1	Billon 2	Billon 1	Billon 2	Billon 1	Billon 2	Billon 1	Billon 2	Billon 1	Billon 2	Billon 1	Billon 2	Billon 1	Billon 2
01	4,51	2,9	57,2	54,07	137,02	198,35	8,11	7,76	245	365	391,7	350	374,8	347,9
02	3,45	2,43	55,36	48,34	137,6	191,5	7,47	6,88	254	356	360,6	333,3	334	310,6
03	3,8	2,48	65,7	63,51	135,4	196,67	9,42	9,22	268	362	454,9	445,4	419,5	422
04	2,73	2	67,94	64,77	139,9	185	9,72	9,22	273	347	469,5	445,4	444,9	429
05	4,7	2,83	59,58	55,54	132,54	202,51	8,46	7,76	241	369	408,7	374,8	365,1	351,3
06	3,71	2,5	59,38	54,64	137,16	193,95	8,29	7,76	261	359	400,3	374,8	368,5	352,9
07	2,59	1,81	66,54	66,02	136,15	189,85	9,68	9,66	258	352	467,4	465,8	442,2	450,9
08	1,15	1,03	67,06	62,9	142,66	167	9,55	8,78	288	322	461,3	424,2	453,3	418,6
09	3,56	2,48	65,66	61,14	133,15	191,28	9,34	8,49	267	353	451,1	410,1	419,1	391,2
10	5,05	3,11	68,44	64,11	133,61	199,47	9,77	8,93	255	365	471,8	431,3	424,5	406,1
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	6,7	3,54	72,08	67,2	126,82	215,86	10,1	9,66	2,34	3,86	487,3	466,6	426,2	433,8

- Calcul du nombre de pièces obtenue à l'intérieur du plateau central après tronçonnage

La bille est tronçonnée en deux billons selon les longueurs données par le modèle. Après simulation du débitage des billons, les résultats du tableau 18 ont été obtenus :

Tableau 18 : Nombre de pièces obtenue dans le plateau principal selon la section des avivés à produire

N° de bille	Nombre de débités											
	38×60 mm		38×70 mm		40×60 mm		40×70 mm		42×60 mm		42×70 mm	
	N_f	N_g	N_f	N_g	N_f	N_g	N_f	N_g	N_f	N_g	N_f	N_g
01	40	40	32	40	35	35	28	35	35	35	28	28
02	28	35	28	28	24	35	24	28	24	35	24	40
03	54	54	45	45	54	54	45	45	48	48	40	54
04	54	70	45	60	54	63	45	54	54	63	45	35
05	40	48	32	40	35	48	28	40	35	42	28	35
06	40	48	32	40	35	48	28	40	35	42	28	54
07	70	70	60	60	70	63	60	54	63	63	54	45
08	54	60	45	50	54	60	45	50	48	54	40	40
09	54	54	45	45	48	54	40	45	48	48	40	54
10	54	63	45	54	54	63	45	54	48	63	40	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54
12	70	63	60	54	63	63	54	54	63	63	54	28

Dans le tableau 18, le nombre de pièces obtenu par bille dans le plateau principal représente plus du triple de celui obtenu pour les pièces de longueur maximal. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Bouzinekis & Martin, (1986) où ce nombre était pratiquement le triple. Le tronçonnage réduit ainsi le défaut de courbure et permet une meilleure répartition des pièces sur la section de la bille.

III.3. Cubages et rendement matière du processus de sciage

Suite à la modélisation et la simulation du débitage des billes composant notre échantillon, il était question de mener une étude comparative entre les rendements théoriques fondé sur des simulations par patrons débitage de modèle mathématiques et les rendement actuels des billes échantillonnées au sein de l'usine. Après traitement et analyse des données, les équations 33, 34, 35, 36 et 37 ont permis d'obtenir les résultats présentés dans les tableaux 19 et 20.

Tableau 19 : Volumes bruts, débités et rendement matière des billes échantillonnées

N° bille	Dg (cm)	Df (cm)	L (m)	Volume brut réel (m ³)	Volume débités réel (m ³)	Rendement matière (%)
01	60	53	6,10	1,528	0,520	34,04
02	62	47	6,10	1,422	0,543	38,17
03	68	63	6,30	2,122	0,776	36,59
04	68	63	6,20	2,088	0,913	43,71
05	60	53	6,10	1,529	0,504	32,97
06	63	53	6,20	1,637	0,553	33,79
07	68	66	6,10	2,149	0,917	42,68
08	68	60	6,20	1,99	0,873	43,8
09	65	58	6,20	1,841	0,669	36,35
10	68	61	6,20	2,025	0,589	29,1
11	73	60	6,20	2,152	0,585	27,18
12	79	68	6,10	2,587	0,694	26,84

Le tableau 19 présente les volumes bruts et débités réels des billes constituant l'échantillon ; le rendement matière est inférieur à 30 % pour les billes numéro 10, 11 et 12. Ceci est principalement dues à un défaut de courbure plus accentué chez ces billes.

Tableau 20 : Rendement théorique et réel des billes selon les sections des débités produits

N° bille	Rendement théorique selon la section (%)						$R_{théo}$ Moyen (%)	$R_{réel}$ (%)	Ecart de rendement (%)
	38×60	38×70	40×60	40×70	42×60	42×70			
01	53,97	52,91	52,67	51,12	49,33	48,97	51,49	34,04	17,45
02	56,72	55,7	55,22	55,03	55,92	55,45	55,67	38,17	17,5
03	55,62	55,41	57,33	56,14	55,06	54,41	55,66	36,59	19,07
04	61,23	60,11	60,1	60,01	59,06	59,11	59,94	43,71	16,23
05	51,25	50,72	49,28	42,82	41,03	48,72	47,3	32,97	14,33
06	52,19	51,67	50,73	49,81	48,84	49,67	50,48	33,79	16,69
07	57,94	57,19	56,99	56,69	56,1	55,89	56,8	42,68	14,12
08	50,3	49,22	50,67	50,78	49,61	49,27	49,97	43,8	6,175
09	56,1	56,15	55,36	55,97	54,05	54,17	55,3	36,35	18,95
10	48,02	47,28	46,11	45,65	45,19	44,71	46,16	29,10	17,06
11	-	-	-	-	-	-	-	27,18	-
12	45,61	44,77	43,25	43,57	42,58	42,25	43,67	26,84	16,83

Le tableau 20 ci-contre montre les rendements théoriques obtenus par simulation et les rendements réellement obtenus en scierie. Les rendements théoriques trouvés ici concordent avec ceux obtenus par Bouzinekis & Martin, (1986) qui se situent entre 43,25 % et 57,89 %. L'on constate ici que la simulation à travers les diagrammes de débitage entraîne une augmentation du rendement. Cette augmentation varie entre 6,17 à 19,07 %, avec une moyenne de 16 % quel que soit la section des débités à obtenir. Ces résultats concordent avec ceux de l'étude menée par le laboratoire canadien FPInnovations.CA en 2015 sur les nouvelles technologies de la transformation des bois de qualités inférieures, où les gains moyens les plus considérables de la ligne automatisée par rapport au débitage non optimisé était de 21,3 % et de 23,8 %

Tableau 21 : Volume théorique des débités selon les longueurs des pièces

N° de bille	Volume des débités selon les sections (m ³)											
	38×60 mm		38×70 mm		40×60 mm		40×70 mm		42×60 mm		42×70 mm	
	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂
01	0,342	0,502	0,3192	0,511	0,36	0,462	0,336	0,470	0,378	0,485	0,358	0,494
02	0,273	0,383	0,319	0,402	0,288	0,374	0,336	0,390	0,242	0,393	0,282	0,409
03	0,574	0,739	0,559	0,718	0,605	0,778	0,588	0,756	0,635	0,726	0,529	0,706
04	0,657	0,768	0,638	0,758	0,605	0,767	0,588	0,756	0,635	0,805	0,617	0,794
05	0,342	0,538	0,319	0,511	0,360	0,524	0,336	0,498	0,378	0,520	0,353	0,494
06	0,342	0,547	0,319	0,521	0,360	0,540	0,336	0,515	0,378	0,529	0,353	0,504
07	0,766	0,862	0,766	0,862	0,806	0,867	0,806	0,867	0,847	0,857	0,847	0,857
08	0,739	0,711	0,718	0,692	0,778	0,749	0,756	0,728	0,726	0,703	0,706	0,683
09	0,574	0,677	0,559	0,658	0,518	0,670	0,504	0,651	0,544	0,665	0,53	0,647
10	0,492	0,718	0,479	0,706	0,518	0,756	0,504	0,743	0,544	0,741	0,53	0,729
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,574	0,846	0,574	0,846	0,605	0,832	0,6048	0,832	0,635	0,873	0,635	0,873

Dans le tableau 21 ci-contre, V₁ et V₂ représentent respectivement le volume des débités de longueurs maximales et le volume des débités obtenus après tronçonnage de la bille en deux billons. En ne tenant compte que des débités obtenus dans le plateau central, le volume obtenu après tronçonnage de la bille est pratiquement le double (1,1 à 1,63 fois) de celui obtenue sur toute la longueur. Le rendement matière des produits de longueurs plus petites est toujours plus grand que celui obtenu pour les plus grandes longueurs.

Ces résultats sont légèrement différents de ceux de Bouzinekis & Martin, (1986) qui avait obtenu un rapport de 1/2,8 à 1/3 entre les volumes ceci est principalement due aux différences de dimensions entre les sections des pièces à obtenir et aux combinaisons de pièces de différentes sections sur le même. Néanmoins pour de faibles valeurs de flèches, on aurait intérêt à scier des pièces de longueurs maximales comme le montre les résultats de la bille numéro 8.

CONCLUSION

La présente étude a porté sur la modélisation et la simulation du débitage des billes présentant une courbure au sein de l'unité de transformation de la société DINO ET FILS .SA. Elle avait pour objectif l'optimisation du rendement matière des billes courbes.

Parvenu au terme cette étude, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus suite à la collecte des données sur un échantillon constitué de 12 billes de Tali, d'une longueur moyenne de 6,10 m ont permis de démontrer que La modélisation d'une grume courbe par la méthode des paraboles est certes possible mais présente de nombreuses limites par rapport au types de courbure. Il permet de modéliser uniquement les billes présentant une courbure totale du tronc, et ne tient compte que d'un seul défaut de courbure à la fois.

En comparant uniquement les débités obtenus dans le plateau central, la simulation montre que le volume obtenu après tronçonnage de la bille est pratiquement le double (1,1 à 1,63 fois) de celui obtenue sur toute la longueur. Ce coefficient diminue lorsque l'on considère les produits issus des dosses. Pour un même diamètre fin bout le nombre de pièces de longueur maximal est fortement influencé par la flèche, il croit en sens opposé à celle-ci.

L'analyse des données traitées montre que la simulation à travers les diagrammes de débitage entraîne une augmentation du rendement de plus de 16 % en moyenne ; le rendement matière dans le cas du sciage des pièces de longueurs plus petites est toujours plus grand que celui obtenu dans le cas des produits de longueur maximal.

RECOMMANDATIONS

Au vue de résultats obtenus lors de cette étude menée au sein d'une unité de transformation du bois, nos recommandations les suivantes :

Au niveau des entreprises :

- Instaurer une planification fondée sur la simulation par diagramme de débitage avant le sciage afin de maximiser le nombre de pièces pouvant être extraite de la section de la bille à débitée ;
- Evaluer régulièrement la précision au sciage pour éviter un surdimensionnement des pièces pouvant entrainer une baisse de rendement ;
- Effectuer des modes de débitage qui tiennent compte de caractéristiques de la bille.
- Soutenir et encourager le développement par les étudiants, de thématiques fondée sur la création de modèle mathématiques des billes lors des stages au sein de vos entreprises.

Au niveau du gouvernement :

- Financer des études sur la création de modèle mathématiques des billes et le développement d'application et logiciels de simulation de grumes ;
- Améliorer la formation des jeunes dans le domaine de l'industrie du bois à travers le développement de partenariats entre les établissements d'enseignement et les entreprises pour permettre l'acquisition des compétences pratiques par les élèves.
- Développer des partenariats avec les pays étrangers s'illustrant dans le domaine du bois tel que le Canada afin Instaurer des plateformes numériques permettant l'échange de compétences entre les établissements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ATIBT. (1982). *Les règles ATIBT de classement des rondins tropicaux* ;

Bouzinakis, A., & Martin, P. (1986). Optimisation du sciage du pin maritime : *Annales des sciences forestières*, 43 (3), 365-382. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882388/document> ;

Brown, T.D. (1986). *Lumber size control*. College of Forestry, Oregon State University ;

CIFORD (2013). Étude de l'importance économique et sociale du secteur forestier et faunique au Cameroun : *Rapport final*. MINFOF Cameroun ;

CIRAD, (2011). *Fiches essences tropicales*. TROPIX 7 ;

Cerutti, P. O., Mbongo, M., & Vandehaute, M. (2015). *État du secteur forêts-bois du Cameroun*. FAO ;

Clément, J. (1989). *Memento du forestier tropical* (3è éd). CTFT

Creti, F., Chevreton, J.P., Nkembe, G., Kari, A.B., & Gautier, B. (2015). *Guide de la construction bois au Cameroun*. MINEPAT, Cameroun : T.I ;

Dalois, C. (1990). *Manuel de sciage et d'affûtage*. Avenue de la belle Gabrielle, France : Centre Technique Forestier Tropical ;

Danwe, R., Bindzi, I., Meva'a, L., & Mbagnia, B. (2009). Modélisation géométrique et optimisation de la production dans les industries de premières transformations du bois : *19ème Congrès Français de Mécanique* 1-6
<http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/36521/1314.pdf> ;

Desaulniers, G. (1989). Equation du défilement d'un tronçon : *Fondement du cubage des arbres en vue du débitage* (2è Ed). Ministère de l'énergie et des ressources, Québec ;

Deschênes, H. (1986). *Utilisation et transformation du bois*. Mont-Royal, Québec : Modulo éditeur ;

Keller, R., & Heurtematte, J. (1967). *Sciage du bois*. Paris, France : Delagrave ;

- Kozak, A.** (1988). *A variable exponent taper equation*. Canadian Journal of Forest Research.
- Lajoie, J.** (2015). Nouvelles technologies de transformation pour les billes de bois franc de qualité inférieure. *Technologie de fabrication du bois de sciage*, 1-54. Retrieved from <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/nouvelles-technologies-transformation-billes-qualite-inferieure.pdf> ;
- Laporte, J.** (2019). *Etude de marché pour la commercialisation de produits connexes de l'exploitation forestière et de la transformation en scierie*. ETICWOOD
- Massenet, J.Y.** (2006). *Estimation du volume*. Lycée forestier, Château de Mesnières ;
- Max, T., & Burkhart, H.** (1976). *Segmented polynomial regression applied to taper equations*. Forest Science ;
- McDonald, J.** (2005). *Évaluation des équipements de transformation de billes courtes* ;
- Minlo, L.B.** (2019). *Influence de la géométrie des billes et du mode de débit sur le rendement matière au sciage* (Master's thesis). Université Yaoundé I, Ebolowa ;
- Simonin, G.** (2010). *Amélioration des performances d'outils de coupe pour la première transformation du bois* (Doctoral dissertation). Université Henri Poincaré, Nancy I ;
- Math en ligne.** (2005). *Distance entre deux ellipses*. Retrieved from <http://www.forum-math.ulg.ac.be/viewthread.html>.
- Futura Maison.** (n.d). *Lambourde*. Retrieved Mai 3, 2020 from <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-lambourde-10746/>
- Futura Tech.** (n.d). *Simulation informatique*. Retrieved Mai 3, 2020 from <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-simulation-informatique-11319/>

ANNEXES

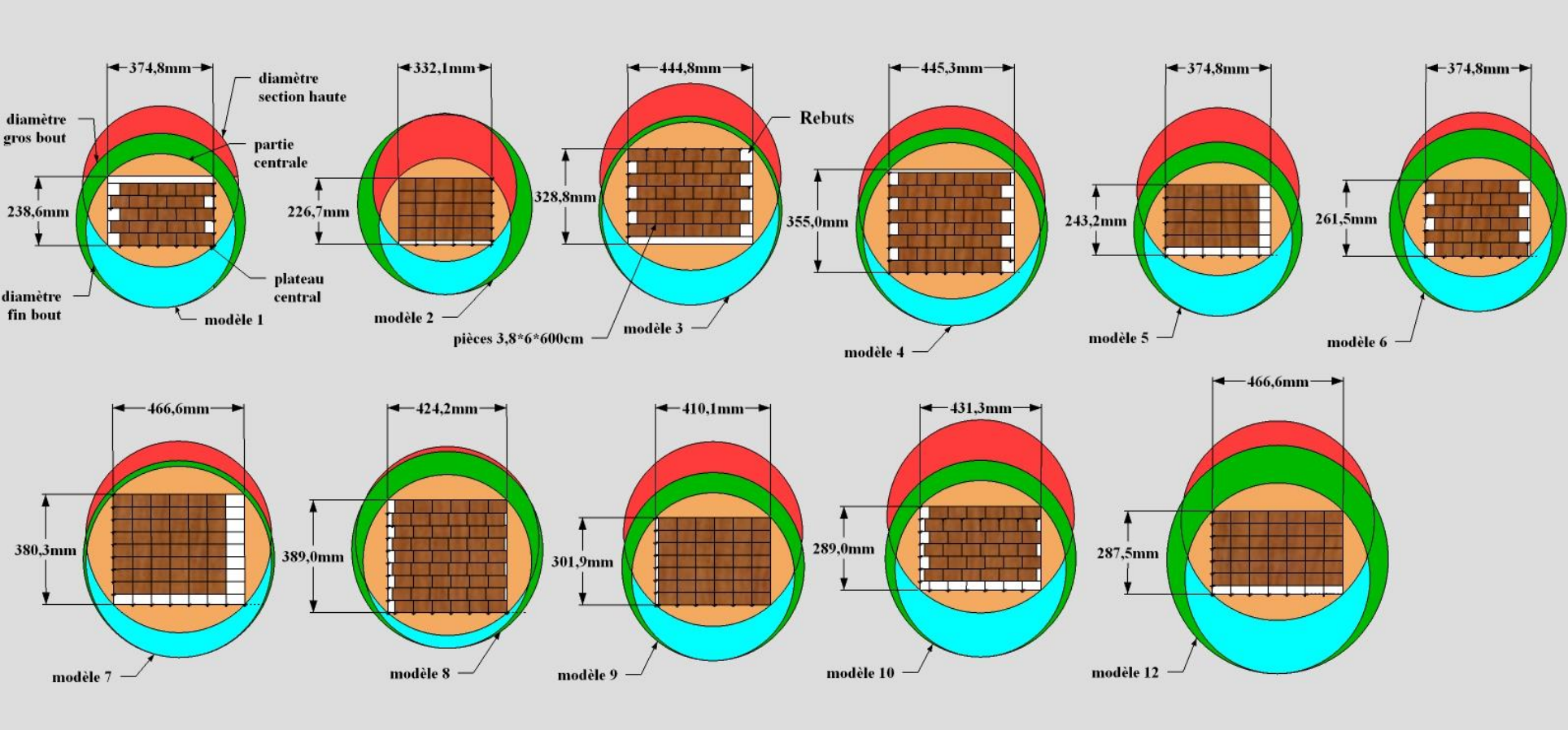
Annexe 1: Fiche de collecte des paramètres de modélisation

N° bille	D _g (cm)	D _f (cm)	D _{3m} (cm)	L (cm)	A	B	C	D
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								

Annexe 2 : Fiche de cubage des volumes réels

N° bille	Cubage des billes				Cubage des débités				
	D _g (cm)	D _f (cm)	L (m)	V (m ³)	Nbre	e (mm)	l (mm)	L (m)	V (m ³)
01									
02									
03									
04									
05									
06									
07									
08									
09									
10									
11									
12									

Annexe 3 : Diagrammes de débitage des billes échantillonnées (Takoudjou, 2020)



Annexe 4 : Equarrissage des billons constituant chaque bille (Takoudjou, 2020)

