



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

École Nationale Polytechnique
Département de Génie Industriel
SARL Auzia



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Management Industriel

Modèle Stochastique d'Estimation des coûts pour le Pricing en Engineer-To-Order Cas : Production de pièces mécaniques - Auzia

Réalisé par :
GAOUAR Mouna

Encadré par :
Dr HAMRI Okba
Mme NOUAL Nadjwa

Soutenu le 24 Juin 2023, Devant le jury composé de :

Dr ISKANDER ZOUAGHI : ENP - Président
Mme SABIHA NAIT KACI : ENP - Examinatrice

ENP 2023



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

École Nationale Polytechnique
Département de Génie Industriel
SARL Auzia



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Management Industriel

Modèle Stochastique d'Estimation des coûts pour le Pricing en Engineer-To-Order Cas : Production de pièces mécaniques - Auzia

Réalisé par :
GAOUAR Mouna

Encadré par :
Dr HAMRI Okba
Mme NOUAL Nadjwa

Soutenu le 24 Juin 2023, Devant le jury composé de :

Dr ISKANDER ZOUAGHI : ENP - Président
Mme SABIHA NAIT KACI : ENP - Examinatrice

ENP 2023

Dédicace

Je dédie cet humble travail

À mes parents, Hammadi et Nassima, sans qui je ne serai pas là
aujourd'hui. Tout ce que je fais est pour les rendre fiers.

À mon frère Mounir, et ma soeur Manel, dont je suis plus fière que de
moi-même,

À mes trois grand-mères, Fewzia, Saida et Zakia, que j'admire chacune à
sa manière,

À la mémoire de mes deux grand-pères, dont j'espère avoir hérité le
nationalisme,

À mes oncles, mes tantes, mes cousines, mes cousins, à tous les membres
de mon aimante famille,

À la mémoire de tous ceux qui nous ont quitté trop tôt,

À mes chers amis de l'**ENB**, dont je n'expliquerai pas l'acronyme,

À mon comité, pour tous les moments que nous avons vécu ensemble,

À tous mes amis qui n'ont cessé de me soutenir,

À Racim, pour son aide inconditionnelle

À Réglisse et Domino.

- *Mouna*

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes encadrants, Dr **HAMRI Okba** et Mme **NOUAL Nadwja** pour leur aide inestimable et leur patience tout au long de la réalisation de ce projet, mais aussi pour leurs enseignements durant les trois années passées.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Mme **NAIT KACI Sabiha** pour les conseils qu'elle a pu me prodiguer, et pour la pertinence des remarques qu'elle a eu la gentillesse de partager avec moi.

Mes plus sincères remerciements vont à toute l'équipe de SARL Auzia, qui m'a accueilli comme une des leurs, et qui m'a permis d'accomplir ce projet dans des conditions plus qu'agréables.

Je remercie aussi Dr **ZOUAGHI Iskander** d'avoir pris de son temps pour présider le jury de la soutenance de ce travail.

ملخص

أوزيا هي شركة هندسية صناعية تعمل وفقاً لنمط الهندسة وفق الطلب، والذي يطرح اشكالية وضع الأسعار قبل الإنتاج. توجد العديد من تقنيات تقدير التكاليف في الأدبيات الأكاديمية، ولكنها تتكيف مع الشركات التي تعمل في بلدان تمتلك أطر صناعية أكثر تطوراً من تلك التي تجرى فيها دراستنا. يقترح هذا العمل نموذجاً جديداً لتقدير التكاليف في حالة الهندسة وفق الطلب لوضع أسعار المنتجات، من خلال تجميع ثلاث تقنيات تقدير تكاليف كلاسيكية: التقنيات البارامترية وتقنيات التحليل وتكلفة حسب الأنشطة. سنحدد أولاً الإطار النظري ونقدم نموذجاً رياضية لهيكل تكاليف الشركة، مما يتيح تقدير التكلفة الإجمالية للمنتج مع مراعاة التكاليف ذات المبالغ الاعتباطية. نقوم بتقييم هذه التكاليف باستخدام محاكاة مونتسي كارلو، ثم نقوم بتطوير خوارزمية تنفيذ باستخدام معيار BPMN 2.0، سيتم استخدامها تطبيقياً داخل شركة أوزيا. سيتم تجريب هذا النموذج في حالة تقدير تكاليف مروحة ميكانيكية صناعية.

كلمات مفتاحية : تقدير التكلفة، هندسة حسب الطلب، تسعيرة، نموذج اعتباطي، محاكاة مونتسي كارلو

Abstract

Auzia is an industrial engineering company whose Engineer-To-Order (ETO) mode of operation presents the challenge of preparing estimates before production. ETO cost estimation techniques are numerous in the state of the art, but they adapt to companies operating in countries with a more developed industrial fabric than that in which our study takes place. The present work proposes a new ETO cost estimation model for preparing product estimates by positioning itself at the center of three classic cost estimation techniques : parametric techniques, decomposition techniques, and Activity Based Costing. We define the theoretical framework, then we provide a mathematical modeling of a company's cost structure that allows us to estimate the total cost of a product taking into account costs with stochastic amounts. We evaluate these through Monte Carlo simulations, then we develop an implementation algorithm using the BPMN 2.0 standard, which will then serve to deploy the solution within Auzia. This model will be experimentally applied to the cost estimation of a mechanical fan.

Keywords : Cost estimation, Engineer-To-Order, pricing, stochastic model, Monte Carlo simulations.

Résumé

Auzia est une entreprise d'ingénierie industrielle dont le mode de fonctionnement en Engineer-To-Order(ETO) pose le problème de l'élaboration des devis en amont de la production. Les techniques d'estimation des coûts en ETO sont nombreuses dans l'état de l'art, mais ces dernières s'adaptent à des entreprises évoluant dans des pays au tissu industriel plus développé que celui dans lequel se déroule notre étude. Le présent travail propose un nouveau modèle d'estimation des coûts en ETO pour l'élaboration du devis des produits en se positionnant au centre de trois techniques classiques d'estimation des coûts : les techniques paramétriques, les techniques par décomposition et l'Activity Based Costing. Nous définissons le cadre théorique, puis nous donnons une modélisation mathématique de la structure de coûts d'une entreprise permettant d'estimer le coût total d'un produit en prenant en considération des coûts à montants stochastiques. Nous évaluons ces derniers grâce aux simulations de Monte Carlo puis nous élaborons un algorithme d'implantation en utilisant la norme BPMN 2.0, qui nous servira ensuite à déployer la solution au sein de Auzia. Ce modèle sera appliqué expérimentalement à l'estimation des coûts d'une moto soufflante.

Mots clés : Estimation des coûts, Engineer-To-Order, devis, modèle stochastiques, simulations de Monte Carlo.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abbréviations .

Introduction Générale	13
1 État de l'Art	17
1.1 Concepts et généralités autour des structures de coûts	18
1.1.1 Les unités d'oeuvre	18
1.1.2 Typologies classiques des coûts	19
1.1.3 Objectivité du calcul de coûts	20
1.1.4 La marge sur coût	20
1.2 Estimation des coûts en Engineer-To-Order(ETO)	21
1.2.1 Définition de l'Engineer To Order	21
1.2.2 Pénétration de la commande et propriétés	22
1.2.3 Problématique de l'estimation des coûts en Engineer To Order	23
1.2.4 Techniques d'estimation du coût d'un produit	24
1.2.5 Limites des techniques	26
1.3 Méthodes statistiques pour l'estimation des pertes financières	27
1.3.1 La Value-at-Risk (VaR)	27
1.3.2 Méthodes d'estimation de la VaR	28
1.3.3 Comparaison des Méthodes	29
1.3.4 Les méthodes de Monte Carlo	29
2 Analyse de l'existant	33
2.1 Présentation de SARL Auzia	34
2.1.1 Secteurs d'activité	34
2.1.2 Organisation de SARL Auzia	35
2.2 Analyse interne de SARL Auzia	35
2.2.1 Analyse de la stratégie de Maintenance	36
2.2.2 Analyse de la Stratégie de Production	37
2.2.3 Analyse de la stratégie de gestion de la qualité	37
2.2.4 Analyse de la stratégie commerciale	38
2.2.5 Analyse de la stratégie d'achat et approvisionnement	40
2.2.6 Analyse de la stratégie de gestion des ressources humaines	41
2.2.7 Analyse de la stratégie de gestion des finances et comptabilités	42

2.2.8	Analyse de la stratégie de gestion de stock	42
2.3	Analyse externe de SARL Auzia : les 5 Forces de Porter	43
2.3.1	Le pouvoir de négociation des fournisseurs	44
2.3.2	Le pouvoir de négociation des clients	45
2.3.3	La menace des nouveaux entrants	45
2.3.4	La concurrence entre les firmes	47
2.3.5	La menace des produits de substitution	48
2.4	Synthèse du diagnostic	48
2.5	Présentation de la problématique	49
3	Solution proposée : Modèle Stochastique d’Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order	52
3.1	Présentation de la solution	53
3.2	Contexte théorique et pratique de développement	53
3.3	Modélisation mathématique de la structure de coûts	55
3.3.1	Typologie des coûts	56
3.3.2	Analogie entre le calcul des coûts stochastiques et les pertes financières	57
3.3.3	Construction du modèle de coûts	58
3.4	Algorithme d’implantation du modèle	65
3.4.1	Analyse des processus	67
3.4.2	Choix d’une unité d’œuvre	67
3.4.3	Énumération et classement des coûts	68
3.4.4	Formalisation mathématique des coûts	68
3.4.5	Estimation finale	69
3.5	Applications du modèle	69
3.6	Limites du modèle	69
4	Déploiement de la solution au sein de SARL Auzia	71
4.1	Choix de l’unité d’œuvre	72
4.2	Énumération et classement des coûts	72
4.2.1	Coûts du processus de maintenance	72
4.2.2	Coûts du processus de production	75
4.2.3	Coûts du processus de gestion de la qualité	77
4.2.4	Coûts du processus commercial	79
4.2.5	Coûts du processus de gestion des ressources humaines	80
4.2.6	Coûts du processus de finances et comptabilités	80
4.2.7	Coûts du processus de gestion de stock	80
4.2.8	Coûts du processus d’achat et d’approvisionnement	80
4.2.9	Coûts communs aux processus	81
4.2.10	Classement des coûts	82
4.3	Formalisation mathématique des coûts	82
4.3.1	Les unités d’œuvres	83
4.3.2	Coûts variables	83
4.3.3	Coûts fixes	84
4.3.4	Coûts spécifiques	85
4.3.5	Coûts stochastiques	85

Table des matières

4.4	Estimation Finale	92
4.5	Application au cas d'une Moto Soufflante	93
4.5.1	Présentation du cas	93
4.5.2	Calcul à posteriori	94
4.5.3	Utilisation du modèle stochastique d'estimation des coûts	95
4.5.4	Discussion des résultats	97
4.5.5	Prix proposé	97
4.6	Potentiel d'économies d'échelle internes	98
4.6.1	Mise en oeuvre du modèle	99
4.6.2	Résultats et interprétation	99
4.7	Interfaçage et utilisation en entreprise	101
	Conclusion générale et perspectives	102
	Bibliographie	108
	Annexes	109
	A Processus de SARL Auzia	110
	B Simulations et résultats	118
	C Indexation des machines	130

Table des figures

1	Structure du raisonnement inductif suivi	16
1.1	Différentes stratégies Supply Chain et leur point de pénétration	22
1.2	Information sur le coût du produit le long du processus de développement	24
1.3	Classification des techniques d'estimation des coûts d'un produit	24
2.1	Organigramme de SARL Auzia, décembre 2022	35
2.2	Évolution trimestrielle des indices de la production industrielle hors hydrocarbures et de l'industrie manufacturière du secteur public de 2010 à 2021	46
2.3	Matrice SWOT de SARL Auzia	49
2.4	Schéma de la relation entre l'entreprise et son environnement dans le cadre de l'élaboration d'un devis	50
3.1	Positionnement du modèle par rapport aux autres techniques de l'état de l'art	55
3.2	Diagramme de typologie des coûts du modèle	56
3.3	Algorithme d'implantation du modèle stochastique d'estimation des coûts pour le pricing en Engineer-To-Order	66
4.1	Distribution des coûts de Non Qualité renvoyée par la simulation de Monte Carlo pour la Moto Soufflante	96
4.2	Pourcentage de chaque type de coût dans le coût de la moto soufflante	96
4.3	Variation des coûts de SARL Auzia en fonction du volume de production	100
B.1	Code en R pour la simulation de MonteCarlo des coûts de maintenance corrective	119
B.2	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le tour numérique	120
B.3	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le centre de fraisage numérique	121
B.4	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le tour numérique	122
B.5	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur la fraiseuse conventionnelle	123
B.6	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le tour conventionnel	124
B.7	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur la plieuse numérique	125
B.8	Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le poste de soudage	126
B.9	Code en R pour les simulations des coûts stochastiques de non qualité	127
B.10	Code R pour l'estimation du coût de la Moto Soufflante	128
B.11	Code en R d'estimation du potentiel d'économies d'échelles de SARL Auzia	129

Liste des tableaux

1.1	Limites des différentes techniques d'estimation des coûts d'un produit . . .	27
1.2	Précision des techniques d'estimation des coûts	27
1.3	Caractéristiques des différentes méthodes d'estimation des pertes sur portefeuille	29
2.1	Prix d'achat en euros d'une sélection de machines de fabrication mécanique	46
2.2	Tableau comparatif des concurrents principaux de SARL Auzia sur le marché local	47
3.1	Analogie entre le modèle proposé et l'ingénierie financière	58
4.1	Classement des coûts de SARL Auzia	82
4.2	Table des variables aléatoires du nombre de pannes, de leur espérance horaire, et de leur p-value	87
4.3	Loi de distribution des variables de retour client et de retard selon le niveau de complexité	92
4.4	Tableau des heures-machine requises pour la fabrication de la moto soufflante	94
4.5	Calcul des coûts à posteriori de la production de la Moto Soufflante	95
4.6	Coûts spécifiques associés à la moto soufflante	95
4.7	Résultats de simulation du modèle pour le cas de la moto soufflante	96
A.1	Distribution des machines de SARL Auzia entre les ateliers	111
C.1	Indexation des machines de SARL Auzia	131

Liste des acronymes

ABC	Activity Based Costing
BPMN	Business Process Model and Notation
CF	Coût Fixe
CSP	Coût Spécifique
CS	Coût Stochastique
CV	Coût Variable
ETO	Engineer To Order
ISO	International Organization for Standardization
JAT	Juste à Temps
MC	Monte Carlo
NQ	Non Qualité
SARL	Société à Responsabilité Limitée
UO	Unité d'Oeuvre
VaR	Value at Risk

Introduction Générale

Face à l'hypertrophie de son secteur primaire puis tertiaire, l'Algérie s'est vu depuis maintenant quelques années contraintes de s'engager sur la voie de l'industrialisation. Plusieurs efforts économiques et politiques faits dans ce sens ont permis l'apparition d'un nombre important de petites à moyennes entreprises de production dans diverses industries. Néanmoins, ces efforts ne suffisent pas à combler le fossé entre l'industrie algérienne et les compétiteurs internationaux. Cela est dû à plusieurs facteurs, tel qu'un retard scientifique et technologique difficilement rattrapable, des capacités de production limitées, un coût de main d'oeuvre plus élevé... Tous ces facteurs contribuent à l'augmentation des coûts des produits algériens ce qui rend les entreprises algériennes non compétitives sur le marché international, mais aussi sur les marchés locaux déjà accaparés par des multinationales.

Une entreprise produisant régulièrement et ayant assez de liquidité pour maintenir son activité peut être tentée de diminuer ses prix autant que possible, et de continuer à fonctionner au jour le jour, ou de projet en projet. Néanmoins, si l'entreprise n'a pas de visibilité sur sa structure de coûts, une simple fluctuation du marché, une perte financière conséquente, ou une crise (la crise sanitaire par exemple) a de grande chance de les éjecter définitivement du marché. En effet, le revers de la médaille de la diminution des prix est la maîtrise de tous les coûts sans exception, qu'ils soient apparents ou cachés.

La compétitivité des prix à l'internationale est donc conditionnée par le degré de maîtrise des coûts en interne, en plus d'autres facteurs. La maîtrise des coûts en entreprise nécessite donc avant tout la *connaissance* de ces coûts, leur comportement et les dépendances fonctionnelles qui les régissent. Pour cela, plusieurs modèles de calculs de coûts existent, et les plus répandus sont la méthode des coûts complets et l'Activity Based Costing. Ces modèles, bien que donnant de très bons résultats dans nombres d'entreprises restent soumises à des limites théoriques et pratiques qui les rendent peu pertinentes dans certains contextes. En effet, les PME algériennes restent fondamentalement différentes des PME françaises qui utilisent la méthode des coûts complets, ou des PME américaines qui privilégient l'Activity Based Costing. Les cultures d'entreprises, la quantité de données disponibles et le niveau académique des ouvriers étant très différents de ceux en occident, il est difficile d'obtenir des estimations de coûts fiables en utilisant les mêmes modèles.

Dans cette optique, le présent travail vise à proposer un modèle stochastique d'estimation des coûts pour le pricing adéquat des produits industriels en général, et les produits mécaniques en particulier, pour une stratégie de production bien spécifique : le Engineer-To-Order. En effet, les entreprises algériennes qui fonctionnent en ETO capitalisent sur le coeur de métier, et ne se préoccupent que rarement de la gestion scientifique de leurs

activités, ce qui peut s'avérer fatale.

Ce projet a été réalisé au sein SARL Auzia, une entreprise algérienne spécialisée dans l'ingénierie industrielle. Fondée en 2014, elle offre des services d'étude, de fabrication de pièces mécaniques et de chaudronnerie sur mesure. Malgré son engagement dans la recherche et le développement, ainsi que sa maîtrise totale de son domaine d'expertise, l'entreprise rencontre des difficultés dans l'établissement de devis pour ses clients. La réalisation d'un devis, qui inclut le prix de vente du produit, constitue un enjeu majeur pour l'entreprise et ne peut être élaborée sans une connaissance approfondie de ses coûts internes et de la tolérance du marché. Le présent modèle vise à répondre à ce besoin en prenant en compte les contraintes pratiques de l'entreprise, tout en étant confronté aux limites théoriques inhérentes à cette problématique.

Clairement posée, la problématique auquel ce travail tente de répondre s'énonce comme suit : Comment estimer les coûts d'un projet en Engineer-To-Order pour proposer un prix ? Ainsi, le présent travail s'inscrit dans la continuité des efforts de recherche dans le domaine de l'estimation des coûts en ETO en prenant en considération les contraintes générales des PME algériennes et plus particulièrement le cas de SARL Auzia. Pour cela, un modèle mettant à profit différentes techniques paramétriques, par décomposition et d'ABC est proposé.

Ce projet vise à proposer une solution à cette problématique, et dans cette optique, nous structurerons le travail en quatre chapitres principaux : L'état de l'art, l'analyse de l'existant, la solution proposée et le déploiement de la solution au sein de SARL Auzia.

Le chapitre , intitulé "Etat de l'art", sert à construire le cadre conceptuel et théorique de la résolution. Il traitera tout d'abord des notions clés liées aux structures de coût dans la littérature, pour pouvoir appréhender les différents abstractions du projet et soulever les polémiques entourant la notion de coût dans le domaine scientifique. Nous aborderons ensuite le sujet de l'estimation des coûts en Engineer-To-Order, où nous définirons l'ETO, et les problématiques inhérentes à l'estimation des coûts dans ce mode de production. Nous énumérerons ensuite les différentes techniques d'estimation des coûts dans l'état de l'art, et identifierons les limites qui les caractérisent. Nous finirons sur un examen des différentes méthodes statistiques pour l'estimation des pertes financières, qui nous permettront plus bas de faire l'analogie entre des notions de l'ingénierie financière, et les notions définies dans la solution.

Le chapitre 1.3.4 est intitulé "Analyse de l'existant", car il contient une analyse approfondie de l'entreprise et de son environnement. Nous y présenterons SARL Auzia, son activités, et son organisation interne. Nous passerons ensuite à l'environnement externe dans lequel évolue l'entreprise, que nous analyserons à travers le prisme des 5 Forces de Porter. Nous ferons ensuite une analyse interne pour dégager les stratégies et dysfonctionnements de l'entreprise. Le diagnostic sera ensuite synthétisé à travers une matrice SWOT, et nous finirons par exposer la problématique à la lumière des résultats de l'analyse interne et externe de l'entreprise, dégageant ainsi les challenges pratiques qu'elle pose.

La première partie de la résolution se fera dans le chapitre 2.5, intitulé "Solution proposée : Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le Pricing en Engineer-To-Order". Ce chapitre confronte les résultats des deux chapitres précédents, puisqu'il souligne les

limites des modèles de calcul de coûts existants dans l'état de l'art dans le contexte pratique de SARL Auzia identifié par l'analyse de l'existant. Cela nous permettra d'appuyer la nécessité d'un modèle d'estimation des coûts alternatifs que nous positionnerons au centre de trois techniques conventionnelles : l'estimation par décomposition, l'estimation paramétrique et l'ABC. Nous présenterons ainsi la solution proposée, qui est un modèle stochastique d'estimation des coûts, qui sera construit tout au long du chapitre. Ce modèle sera accompagné d'une structure de coût qui lui est propre dont les composantes seront définies formellement. Les concepts clés des structures de coûts définis dans l'état de l'art seront formalisés mathématiquement dans la section de construction du modèle, en utilisant des outils mathématiques classiques et les méthodes statistiques de l'ingénierie financière, notamment les simulations de Monte Carlo. Une fois le modèle complété, un algorithme d'implantation sous format BPMN 2.0 sera proposé, détaillant les étapes à suivre pour le déploiement de la solution en entreprise. D'autres applications potentielles du modèle seront présentées, et le chapitre s'achèvera sur l'identification des limites théoriques et pratiques de la solution.

La seconde partie de résolution, le chapitre 3.6 intitulé "Déploiement de la solution au sein de SARL Auzia", consistera à implanter le modèle au sein de SARL Auzia et d'en démontrer la fiabilité en l'utilisant pour estimer le coût d'une Moto Soufflante réalisée par l'entreprise. Nous suivrons les étapes de l'algorithme précédemment proposé pour traduire mathématiquement les processus de l'entreprise en coûts de différentes natures. Des tests statistiques seront effectués pour s'assurer de la qualité des données d'entrées du modèle, et la structure de coûts de SARL Auzia sera identifiée et dégagée dans le cadre défini par la solution. Nous passerons ensuite à l'estimation du coût de réalisation de la moto soufflante, que nous évaluerons grâce à une simulation du modèle. Nous confronterons les résultats au prix fixé par l'entreprise et nous ferons l'interprétation de ces résultats. Par manque de visibilité sur le prix fixé par le marché, nous proposerons une approche pour fixer le prix final conditionnée par les valeurs potentielles du prix du marché. Nous finirons sur une évaluation du potentiel d'économies d'échelles de l'entreprise en utilisant le modèle, pour confirmer les propos tenus dans le chapitre précédent concernant les applications alternatives potentielles. Nous poserons le cadre théorique permettant de réaliser cette application et nous en interpréterons les résultats.

La dernière partie de ce travail sera consacrée à la conclusion et aux perspectives de ce projet.

Pour résoudre cette problématique, un raisonnement inductif a été suivi. Nous sommes allés des méthodes générales de l'état de l'art, que nous avons confrontées aux réalités pratiques de SARL Auzia à travers une analyse de l'existant. Une fois les limites des techniques de l'état de l'art établie, la solution la plus sensée s'est avérée être le développement d'un nouveau modèle, plus adapté au contexte des PME algériennes tout en restant dans le cadre théorique des recherches scientifiques du domaine. Ce modèle a ensuite été déployé au sein de SARL Auzia, et appliqué à un des projets de l'entreprise, pour en calculer le coût. Ce cheminement, du général au particulier, est une approche en entonnoir clairement identifiable sur la figure 1.

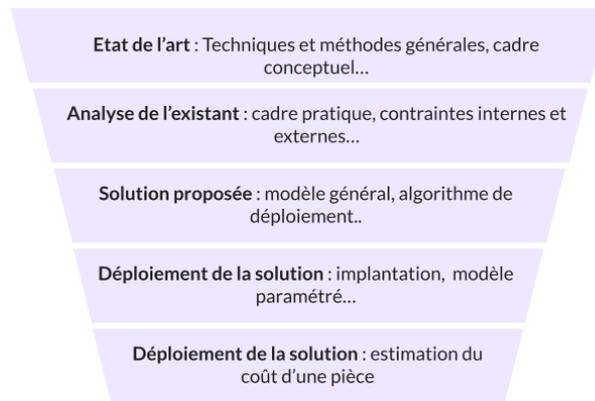


FIG. 1 : Structure du raisonnement inductif suivi

Chapitre 1

État de l'Art

Introduction

Ce chapitre a pour but de poser les fondements théoriques de la solution proposée dans ce travail. En examinant les travaux antérieurs, les recherches pertinentes et les contributions académiques, nous chercherons à dévoiler les principaux concepts liés à notre thème, et cela en trois parties : Concepts et généralités autour des structures de coûts, estimation des coûts en ETO et méthodes statistiques pour l'estimation des pertes financières. Nous finirons ensuite par une conclusion.

1.1 Concepts et généralités autour des structures de coûts

La connaissance de la structure de coûts est cruciale lorsqu'il s'agit de déterminer les prix de vente et d'établir une stratégie de tarification solide pour une entreprise. En comprenant en détail les coûts associés à la production, à la prestation de services ou à la fabrication de produits, une entreprise peut fixer des prix qui couvrent les dépenses engagées et garantissent la rentabilité.

Définition 1.1

La **structure de coûts** constitue une synthèse des dépenses engendrées par les activités, processus et fonctions d'une entreprise. Son objectif est de regrouper de manière systématique et méthodique les dépenses selon leur nature, leur fonction ou leur affectation, afin de fournir une présentation précise de l'allocation des ressources financières sur une période spécifique ou dans le cadre d'un objectif défini.

1.1.1 Les unités d'oeuvre

La notion d'unité d'oeuvre est une notion incontournable dans le calcul de coûts. Apparue pour la première fois en 1939, elle reste encore aujourd'hui d'actualité et très utilisée dans des méthodes analytiques telles que l'Activity Based Costing (ABC) ou la méthode des coûts complets.

Définition 1.2

Une **unité d'oeuvre** est une mesure utilisée pour quantifier le travail effectué dans le cadre d'une activité donnée. Elle est utilisée pour évaluer la productivité et la rentabilité d'un processus ou d'une production[1].

Le choix d'une unité d'oeuvre est régi par plusieurs contraintes, telles que la pertinence et la mesurabilité. Plus précisément, une UO doit[1] :

- Caractériser l'activité : le montant des charges doit nécessairement varier en fonction des UO.
- Permettre une imputation : c'est-à-dire permettre l'imputation des charges et leur répartition le plus objectivement possible.

Néanmoins, on cherche maintenant à remplacer les UO de la comptabilité classique par la notion de **cost Driver**.

Définition 1.3

Un **Cost Driver** est un événement dont l'occurrence explique le mieux possible la consommation de charges par l'activité correspondante, au-delà d'une simple corrélation.

On retrouvera cette notion particulièrement dans la comptabilité de gestion. Les critères de sélection restent encore très proches de ceux des UO [2] :

- L'existence d'une relation directe entre les coûts et le cost driver.
- Doit être identifiable et compréhensible.

Ces notions sont des notions clés pour la compréhension des différentes approches de calcul de coûts.

1.1.2 Typologies classiques des coûts

Il existe plusieurs typologies différentes. « Il y a autant de types de coûts que d'utilisations possibles. Chaque type de coût est défini par trois caractéristiques : son objet, son contenu et le moment auquel est fait le calcul » [3].

Dans ce travail, nous n'établirons pas une liste exhaustive des taxonomies possibles, mais nous mentionnerons les plus couramment utilisées.

Définition 1.4

Les **coût fixes** ou **structurels** sont des coûts liés à l'existence de l'entreprise et qui correspondent à chaque période de calcul à une capacité de production déterminée [4].

Définition 1.5

Le **coût variable** est constitué de toutes les charges qui varient avec le volume d'activité de l'entreprise [4].

Définition 1.6

Le **coût complet** correspond à l'affectation de l'ensemble des charges d'exploitation sur les unités d'œuvres qui caractérisent les produits définitifs de l'activité étudiée [5].

Définition 1.7

Les **coûts partiels** résultent de l'affectation d'une partie des charges sur des activités intermédiaires ou définitives [5].

Définition 1.8

Un **coût direct** est un coût que l'on peut affecter immédiatement à l'objet de coût, c'est-à-dire sans avoir besoin d'établir des calculs intermédiaires [1].

Définition 1.9

Un **coût indirect** correspond à un coût qui n'est pas immédiatement lié à l'objet de coût.

Il sera nécessaire de réaliser des calculs intermédiaires et de choisir des clés de répartition pour établir une relation entre le coût et l'objet de coût[1].

1.1.3 Objectivité du calcul de coûts

« Le coût d'un bien n'existe pas »[4].

Dans l'estimation des coûts d'un bien, les différentes méthodes s'intéressent principalement à la logique de répartition des coûts fixes ou indirects selon la typologie choisie. En effet, des notions telles que les costs drivers ou les UO existent pour ça [1] puisqu'elles permettent une répartition "objective" de ces coûts. On parlera donc d'**imputation** des coûts. Ces coûts ne sont pas inhérents au produit, mais l'entreprise est dans l'obligation de couvrir ces coûts là, et doit donc les répartir.

Définition 1.10

L'imputation rationnelle est une méthode qui consiste à variabiliser les charges fixes incorporées aux coûts en fonction du niveau de production ou d'activité[5].

La méthode de l'imputation rationnelle des coûts fixes est une instance des efforts de recherche et d'innovation engagés pour proposer un cadre scientifique objectif à la répartition de coûts fixes. Pour d'autres typologies de coûts, les coûts directs et indirects par exemple, nous aurons la méthode des centres d'analyse[1].

Il n'en est pas moins que le choix entre ces deux modèles est souvent une décision arbitraire, et que l'existence de différentes manières de calculer le coût d'un même produit, et les différents résultats renvoyés par ces modèles pourtant déterministes soulèvent la question suivante : Le coût d'un bien existe-t-il ?

« Un coût ne peut être défini que si l'on opère des choix sur l'étendue de l'espace physique concerné, la nature des dépenses que l'on choisira de recenser, la période de temps sur laquelle l'attention sera portée » (C. Riveline, 1973). Le coût n'existe donc pas avant l'instant de sa définition, et la subjectivité[6] des méthodes de calcul (et plus exactement d'imputation) complique encore la tâche d'une comparaison ou d'une définition subjective.

Néanmoins, il est possible de contourner ce paradoxe[7], et pour cela dans ce travail nous tenterons de proposer une **estimation** qui permette une tarification rationnelle.

1.1.4 La marge sur coût

Un élément important du prix final est la marge. En effet, toute entreprise cherche à maximiser sa marge de plusieurs manières, notamment en diminuant ses coûts, puisque par définition une fois le prix fixé, une diminution des coûts entraîne une augmentation de la marge.

Définition 1.11

On appelle marge toute différence entre un prix de vente et un coût.

Le modèle proposé s'intéresse à l'estimation des coûts avec pour but final le pricing,

ce qui nous renvoie à l'application d'une marge sur coût. Celle-ci dépend principalement de l'environnement externe de l'entreprise, même si certains paramètres influent sur cette dernière.

En interne la marge dépend de la stratégie de l'entreprise, qui peut accepter d'avoir une marge minimale durant une certaine période de pénétration de marché ou de lancement de produit. Néanmoins, ces stratégies elles-mêmes dépendent de l'environnement extérieur qui pousse l'entreprise à adopter certaines stratégies plutôt que d'autres.

En externe la marge ne dépend que de l'**élasticité prix de la demande**, puisque l'entreprise par définition souhaiterait augmenter sa marge au maximum.

Définition 1.12

L'élasticité prix de la demande est une mesure de la sensibilité de la quantité demandée d'un bien aux variations du prix de ce bien. Elle est notée $\varepsilon_{P/Q}$.

Pour un prix P et une quantité demandée Q d'un bien indivisible, l'élasticité prix de ce bien sera définie comme suit :

$$\varepsilon_{P/Q} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta P}{P}} \quad (1.1)$$

L'élasticité indique le pourcentage de variation de la quantité demandée lorsque le prix varie de 1%.

Une méthode simple pour fixer la marge serait d'augmenter le prix au-delà du coût final jusqu'à atteindre une limite optimale de quantité demandée. Le choix de la marge s'inscrit donc dans l'approche que l'entreprise fait au marché, mais aussi dans les limites de ses capacités de production.

Fixer une marge demande donc souvent une étude approfondie du marché ciblé.

1.2 Estimation des coûts en Engineer-To-Order(ETO)

L'estimation des coûts est un enjeu clé dans les entreprises qui fonctionnent en Engineer to Order. Dans ce domaine, chaque projet est unique, avec des exigences spécifiques qui nécessitent des solutions sur mesure, ce qui rend l'estimation particulièrement complexe.

1.2.1 Définition de l'Engineer To Order

Définition 1.13

*L'ingénierie à la commande, plus communément connue sous l'appellation de **Engineer to Order** est une stratégie de production dans laquelle les produits sont conçus,*

développés et construits selon les spécifications du client à partir du moment où la commande est reçue[8].

Les entreprises ETO travaillent généralement sur des projets uniques et sur mesure qui nécessitent un haut niveau de personnalisation et d'expertise en ingénierie.

Le processus ETO englobe[9] :

1. Une phase non-physique qui comprend la soumission d'une offre, l'ingénierie, la conception et la planification.
2. Une phase physique qui comprend la fabrication, l'assemblage, l'installation et la mise en service.
3. Des processus de soutien tels que les ressources humaines, la qualité, les finances et la comptabilité.

Ces trois phases sont interconnectées et nécessitent une coordination étroite pour assurer la réussite du projet.

1.2.2 Pénétration de la commande et propriétés

L'ETO peut aussi être défini selon le point de pénétration de la commande. Celui-ci est défini comme le point de la supply chain que la commande client pénètre[10]. Il distingue les processus gérés selon les prévisions des processus gérés selon les commandes. La figure 1.1 permet de visualiser la différence entre les différentes stratégies selon leur point de pénétration de la commande.

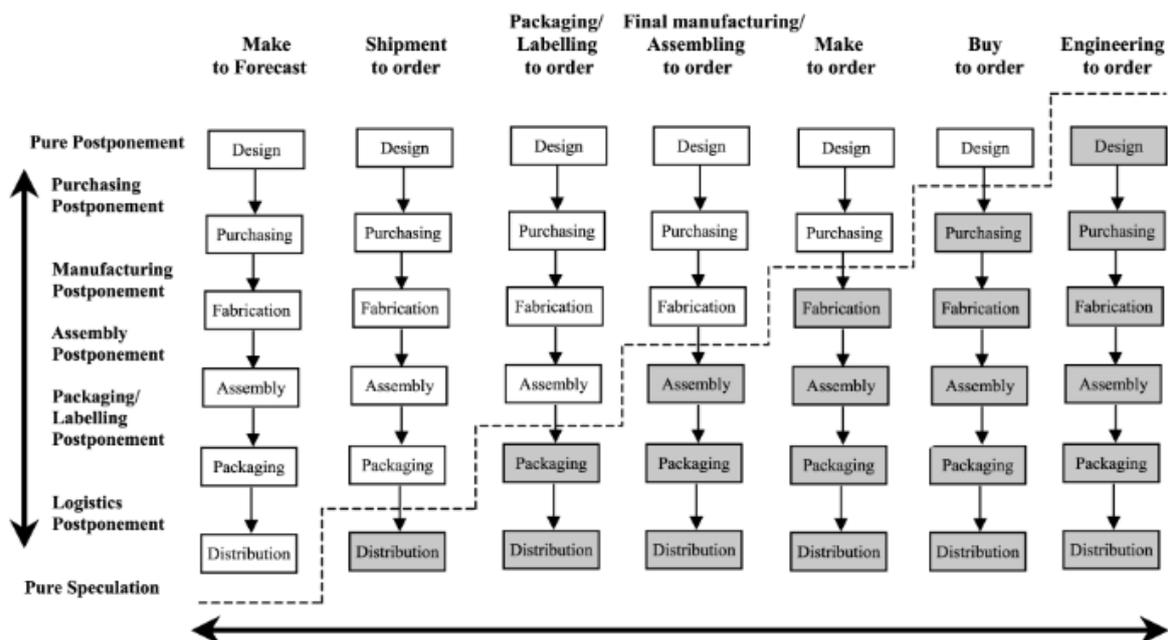


FIG. 1.1 : Différentes stratégies Supply Chain et leur point de pénétration[11]

On voit donc que le Engineer to Order se trouve à l'extrême de l'axe de pénétration de la commande, c'est-à-dire que tout le processus de production ne se déclenche qu'à l'arrivée de la commande. Cela explique les propriétés suivantes :

- Un haut degré de personnalisation[11].
- Une sensibilité accrue aux variations de la demande[9].
- Une gestion agile des processus[11].
- Une grande sensibilité face aux risques[8].
- Un lead-time relativement long[12].

1.2.3 Problématique de l'estimation des coûts en Engineer To Order

L'un des problèmes les plus difficiles auxquels les entreprises ETO (Engineer to Order) sont confrontées concerne l'établissement d'estimations de coûts précises lors des phases d'ingénierie préliminaire ou lors de la phase conceptuelle d'un nouveau produit personnalisé. En effet, lors du processus d'appel d'offres ou des étapes préliminaires de développement, la plupart des décisions cruciales concernant la faisabilité technique et financière sont prises.

Une fois qu'une demande est reçue de la part d'un client, il est nécessaire d'établir une estimation des coûts en se basant sur les spécifications et les exigences à satisfaire, souvent sans référence aux projets précédents. Cette estimation des coûts soutiendra la proposition à soumettre au client dans le cadre du processus d'appel d'offres. Une fois que cette proposition est acceptée et qu'une commande ou un contrat est émis, il devient difficile, voire impossible, de modifier les termes originaux. Le coût doit alors être estimé avec une grande précision, même si toutes les informations ne sont alors pas encore disponibles[13]. A des fins de budgétisation ou de tarification, il est donc nécessaire d'estimer les coûts en amont et de manière précise.

Or, il est très compliqué de faire cela, car la fiabilité des estimations dépend de l'information disponible. La figure 1.2 montre qualitativement la dépendance entre la disponibilité de l'information, et l'avancement dans le développement du produit, et nous savons que plus nous avons de l'information, plus l'estimation sera fiable. Néanmoins, il n'est pas toujours possible d'attendre que l'information soit disponible, comme expliqué plus haut, d'où l'intérêt de développer des méthodes plus fiables d'estimation des coûts en amont.

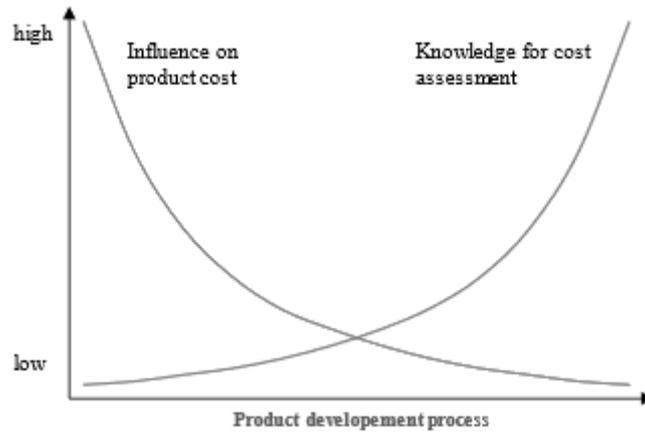


FIG. 1.2 : Information sur le coût du produit le long du processus de développement[14]

1.2.4 Techniques d'estimation du coût d'un produit

Étant donné l'importance accordée à la fiabilité de l'estimation de coûts, plusieurs techniques sont proposées dans la littérature. Niazi *et al.*[15] propose une classification de ces techniques en techniques **qualitatives** et techniques **quantitatives**. La première englobe ensuite des techniques intuitives et des techniques analogiques, tandis que la seconde comprend des techniques paramétriques et des techniques analytiques. Celles-ci sont résumées sur la figure 1.3.

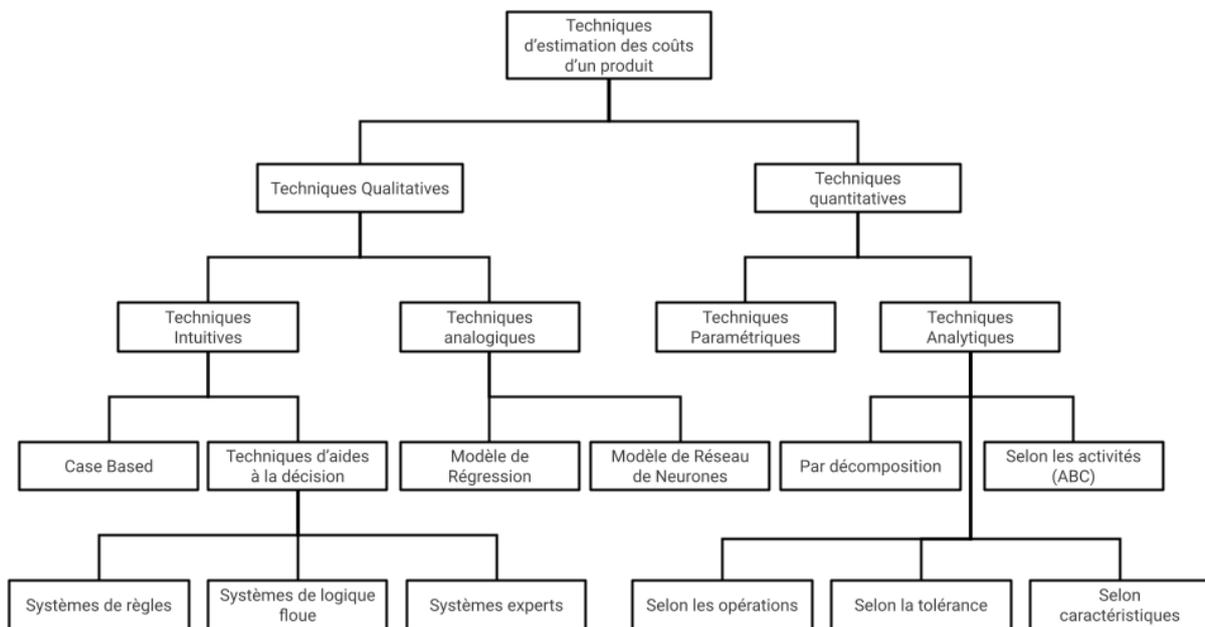


FIG. 1.3 : Classification des techniques d'estimation des coûts d'un produit, adaptée de Niazi *et al*[15]

Nous expliquerons brièvement dans ce qui va suivre les distinctions entre ces différentes techniques, leurs avantages et leurs limites.

Techniques Qualitatives

Les techniques qualitatives d'estimation des coûts se basent principalement sur une analyse comparative du produit dont on cherche à estimer le coût, avec des produits ayant été produits précédemment, pour repérer des éléments similaires dans le nouveau produit[15]. Ces similitudes permettent d'utiliser des données passées relatives aux produits précédents dans l'estimation des coûts du nouveau produit.

1. **Techniques intuitives** : Les techniques intuitives se basent sur des expériences de fabrication passées[16]. Les connaissances d'un expert du domaine sont systématiquement utilisées pour générer des estimations de coûts pour des composantes et des assemblages. Les connaissances peuvent être stockées sous forme de règles, d'arbres de décision ou autre dans une base de données pour améliorer la prise de décision de l'utilisateur final. Il existe deux catégories de techniques intuitives :
 - (1) **Case-Based Methodology** : ou méthodologie du cas par cas, utilise les informations contenues dans des conceptions précédentes en adaptant les données d'un cas passé au nouveau produit en cours de développement.
 - (2) **Techniques d'aide à la décision** : ces techniques traitent de l'élaboration de systèmes d'aide à l'estimation d'un coût à plusieurs étapes du processus, en incorporant les connaissances issues d'experts du domaine. On y retrouve généralement des modèles d'intelligence artificielle, notamment les *systèmes de règles* (données dans la base de données, et contraintes de production dans la base de connaissances). Cela inclue aussi les *systèmes de logique floue*, et les *systèmes experts*.
2. **Techniques analogiques** : Ces techniques emploient des critères de similarité basés sur des données historiques de coûts pour des produits dont le coût est connu[16]. Des méthodes largement utilisées dans ce cas sont les *modèles de Régression* et les *réseaux de neurones*.

Techniques Quantitatives

Les techniques quantitatives d'estimation du coût d'un nouveau produit se basent sur une analyse détaillée du produit, de ses caractéristiques et des processus de production qui y correspondent[15]. Les coûts sont alors soit calculés en utilisant une fonction de certaines variables ou une somme d'éléments unitaires représentant différentes ressources.

1. **Techniques paramétriques** : les modèles paramétriques sont dérivées de la méthode statistiques. Ils reposent sur l'écriture du coût comme une fonction des variables qui le composent. Ces techniques sont particulièrement utiles lorsque les facteurs de coûts sont facilement identifiables[17]. Ces techniques sont particulièrement utilisées dans l'estimation de coût des procédés de fabrication additive [16], ce qui pousse à l'élaboration de plusieurs modèles selon les circonstances, les procédés et les paramètres identifiés [18]-[20].

2. **Techniques analytiques** : cette approche nécessite la décomposition d'un produit en unités élémentaires qui représentent différentes ressources consommées durant un cycle de production[16]. Ces techniques peuvent être classées en plusieurs sous-catégories :

- Selon les opérations : cette approche permet l'estimation des coûts de production en sommant les coûts associés au temps nécessaire à la réalisation des opérations de production. Elle requiert la connaissance des temps d'opération, des temps non-productifs et des temps de mise en oeuvre.
- Par la décomposition : cette méthode estime le coût total de production en faisant la somme de tous les coûts associés au cycle de production, incluant les coûts du matériel utilisé et toutes les charges indirectes. Cette méthode nécessite des informations détaillées au sujet des ressources consommées, incluant les données sur l'approvisionnement et la maintenance.
- Selon la tolérance : la tolérance signifie ici la tolérance sur les fonctionnalités du produit. Cette méthode propose de construire des modèles d'optimisation pour un coût minimal sous contrainte de qualité et de lead time.
- Selon les caractéristiques : cette méthode consiste à identifier les caractéristiques d'un produit qui sont liées aux coûts et à déterminer le montant associé à la réalisation de chaque caractéristique. Des recherches considérables ont été menées pour déterminer et quantifier les caractéristiques d'un produit qui sont liées au coût total de ce dernier. Ces caractéristiques peuvent être liées à la conception (comme le type de matériau utilisé pour un produit spécifique, les détails géométriques, etc.) ou orientées vers les processus, c'est-à-dire un processus particulier requis pour la fabrication du produit, par exemple l'usinage, la coulée, l'injection, etc.
- Selon les activités (ABC) : cette méthode, d'abord apparue en 1988, proposée par Cooper et Kaplan[21], suggère de calculer les coûts induits par la réalisation des activités nécessaires à la production. Cette technique a donné naissance à plusieurs modèles hybrides, notamment le Time Driven Activity Based Costing [22]. Cette méthode propose de n'utiliser qu'un seul inducteur de coût, le temps.

1.2.5 Limites des techniques

Ces techniques ont chacune des limites qui leur sont propres, ce qui rend certaines plus adaptées à des situations que d'autres. Le tableau 1.1 donne un aperçu non-exhaustif des limites générales de chaque technique. Après mise en contexte, il est possible de soulever d'autres limites plus relatives, nous ferons cela dans le chapitre 2.5.

Technique d'estimation des coûts d'un produit			Limites de la technique
Qualitative	Intuitive	Case Based	Dépend des cas passés et de la connaissance de l'expert
		Systèmes d'aide à la décision	Dépend des connaissances de l'expert Nécessite des modèles informatiques complexes Estimation des produits complexes laborieuse
	Analogique	Modèles de régression	Limité aux dépendances linéaires Réalité complexe (covariances, variables qualitatives...)
		Réseaux de Neurones	Boîte Noire Totalement dépendant de la donnée Coût de déploiement élevé
Quantitative	Paramétrique		Inefficace quand les inducteurs de coûts sont indéfinissables
	Analytique	Selon opérations	Nécessite la connaissance des détails des opérations (temps de mise en oeuvre etc)
		Par décomposition	Nécessite des connaissances détaillées des coûts des ressources consommées
		Selon tolérance	Nécessite une connaissance approfondie des limites de tolérances des fonctions du produit par rapport à sa conception
		Selon les caractéristiques	Difficulté à estimer les coûts de caractéristiques complexes Nécessite la connaissance au préalable du coût de certaines caractéristiques
	Selon les activités (ABC)	Fiabilité dépend de l'estimation du temps d'exécution l'activité nécessite du lead time dans le développement initial du produit Inefficace lorsque la consommation des ressources est commune à deux activités ou plus[23]	

TAB. 1.1 : Limites des différentes techniques d'estimation des coûts d'un produit adapté de Niazi *et al*[15]

Dans le contexte de l'ETO, on peut aussi classer les différentes techniques selon leur précision. Le tableau 1.2 donne une estimation de la précision pour différentes classes de techniques.

Technique	Précision
Intuitive	-30% à +50%
Analogique	-14% à +30%
Paramétrique	-14% à +30%
Analytique	-5% à +15%

TAB. 1.2 : Précision des techniques d'estimation des coûts, adapté de [14]

En résumé, il n'existe pas de technique parfaite, mais plutôt des techniques plus adaptées que d'autres à certains contextes.

1.3 Méthodes statistiques pour l'estimation des pertes financières

Les pertes financières sont au centre des préoccupations de toute les entreprises, car elles peuvent mettre en danger l'existence même de cette dernière.

Souvent incertaines et dues à un nombre de variables parfois infini, les pertes financières sont assimilées à des risques et évaluées en utilisant divers formalismes mathématiques.

1.3.1 La Value-at-Risk (VaR)

Une notion importante dans l'estimation des pertes du portefeuille d'une entreprise ou d'une industrie est la Value at Risk, ou VaR.

Définition 1.14

La Value-at-Risk (VaR) est une mesure statistique des pertes financières d'un portefeuille sur un horizon temporel donné avec une probabilité donnée[24].

Cette variable est une agrégation des pertes engendrées par différents facteurs de risque. Elle estime les pertes potentielles lorsque le portefeuille est soumis à des conditions normales du marché, ces dernières représentant les facteurs de risque, qui peuvent être définis ou considérés comme des boîtes noires, selon la technique.

1.3.2 Méthodes d'estimation de la VaR

La VaR est un outil incontournable de l'ingénierie financière, puisqu'il exprime en unités monétaires les risques sur portefeuille encourus. Néanmoins, cela reste une mesure statistique qui doit donc être estimée de manière fiable et aussi peu complexe que possible. Trois méthodes sont utilisées pour cela.

La simulation historique

L'approche de simulation historique consiste à utiliser les variations passées des taux et des prix de marché pour estimer les bénéfices et les pertes potentielles futures d'un portefeuille. On construit ainsi une distribution des bénéfices et des pertes en prenant en compte les variations réelles des facteurs de marché observées sur une période donnée (par exemple, des jours). L'utilisation des données historiques réelles pour calculer les bénéfices et les pertes est la caractéristique principale de cette méthode.

Une fois que les bénéfices et les pertes estimés pour chaque période ont été calculés, on peut déterminer la distribution des bénéfices et des pertes ainsi que la VaR, qui représente la perte dépassée seulement 5% du temps. Cette approche offre l'avantage de ne pas nécessiter de nombreuses hypothèses sur les distributions statistiques des facteurs de marché, ce qui la rend plus pratique et moins contraignante sur le plan théorique[25].

La méthode Delta-Normale

La méthode Delta-Normale est une méthode très communément utilisée dans l'estimation des risques financiers. Elle approxime le changement de la valeur du portefeuille en utilisant la dérivée d'ordre un, ou delta, de la fonction de valeur du portefeuille par rapport aux facteurs de risque.

Dans cette méthode, on suppose que tous les rendements des actifs suivent une distribution normale. Comme le rendement du portefeuille est une combinaison linéaire de variables normales, il est lui aussi normalement distribué. Cette méthode consiste à remonter dans le temps, par exemple sur les cinq dernières années, et à calculer les variances et les corrélations pour tous les facteurs de risque. Le risque du portefeuille est ensuite généré par une combinaison d'expositions linéaires à de nombreux facteurs supposés être normalement distribués, ainsi que par la prévision de la matrice de covariance.

La simulation de Monte Carlo

De nombreux problèmes d'ingénierie financière portent sur l'estimation de certaines grandeurs, tel que l'évaluation des titres dérivés, le calcul des sensibilités aux prix, l'évaluation des risques de portefeuille etc. Ces valeurs peuvent souvent s'écrire sous forme d'**espérance** d'une variable aléatoire complexe dont le comportement est modélisé comme un processus stochastique. Cela rend particulièrement pertinente l'utilisation des méthodes de Monte Carlo.

Cette approche repose sur l'identification des distributions des paramètres de risque, puis la simulation numérique de leur comportement.

1.3.3 Comparaison des Méthodes

Il n'existe pas de meilleure méthode au sens absolu du terme, mais il est possible de sélectionner une de ces méthodes selon le contexte dans lequel elle sera déployée.

Le tableau 1.3 regroupe les comportements caractéristiques de ces trois méthodes dans plusieurs contextes.

Historique	Delta Normale	Monte Carlo
Simple à implémenter	Simple à implémenter	Implémentation complexe
Réagit bien avec les non-linéarités et les distributions non-Normales	Nécessite des hypothèses de linéarité et de normalité	Réagit bien avec tout type de distributions
Nécessite une grande quantité de données historiques	Assez pour vérifier les hypothèses	Assez pour distinguer les distributions des paramètres
Résultats fiables si l'environnement n'a pas changé	Résultats fiables si les données sont linéaires et normalement distribuées	Résultats dépendent de la qualité des distributions d'entrée, donc modulables
S'adapte mal aux larges portefeuilles à la structure complexe	Dépend de la source de complexité de la structure (variance ou distributions etc)	Temps de calcul indépendant du nombre de variables

TAB. 1.3 : Caractéristiques des différentes méthodes d'estimation des pertes sur portefeuille adapté de [25]-[27]

1.3.4 Les méthodes de Monte Carlo

Les méthodes de Monte Carlo sont des méthodes de simulation permettant d'approcher des quantités en simulant des variables aléatoires. Il n'existe pas une simulation unique de Monte Carlo applicables à tous les problèmes mais la majorité des simulations suivent le schéma suivant[28] :

1. **Construction du modèle statique** : Chaque simulation de Monte Carlo débute par le développement d'un modèle déterministe qui ressemble étroitement au scénario réel.
2. **Identification des lois de distribution des entrées** : étant donné que les risques proviennent de la nature stochastique des variables d'entrée, le modèle nécessite d'identifier les lois de distribution des variables d'entrée. Cette étape nécessite des données historiques sur les variables d'entrée. Il existe des procédures statistiques standard pour identifier les distributions d'entrée, comme les tests d'hypothèses par exemple.
3. **Génération des variables aléatoires** : Une fois que les distributions des variables d'entrée ont été identifiées, un ensemble de nombres aléatoires (également appelés variables aléatoires ou échantillons aléatoires) est généré à partir de ces distributions. Chaque ensemble est utilisé dans le modèle déterministe pour obtenir un ensemble de valeurs de sortie. Ce processus est répété en générant plusieurs ensembles de nombres aléatoires, un pour chaque distribution d'entrée, afin de collecter différents ensembles de valeurs de sortie possibles. Cette étape constitue l'essence même de la simulation de Monte Carlo.
4. **Analyse des résultats et prise de décision** : Une fois que l'échantillon des valeurs de sortie a été collecté à partir de la simulation, une analyse statistique est effectuée sur ces valeurs. Cette étape permet alors de prendre des décisions informées et scientifiques.

Principe de la méthode

Le principe de fonctionnement des méthodes de Monte Carlo repose sur l'échantillonnage aléatoire et la modélisation statistique pour imiter le comportement de systèmes complexes[29]. Supposons que l'on souhaite connaître la valeur d'une certaine quantité δ . La première étape de la méthode consiste à écrire le problème sous la forme d'une espérance :

$$\delta = \mathbb{E}[f(X)], \quad (1.2)$$

Avec :

- f : fonction donnée.
- X : variable aléatoire dont la distribution est connue.

La méthode de Monte Carlo nous dit donc de remplacer l'espérance par une moyenne empirique sur un grand nombre d'échantillons aléatoires :

$$\delta \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(X_i) \quad (1.3)$$

où :

- X_1, X_2, \dots, X_N : échantillons aléatoires indépendants de X .

L'exactitude de l'estimation dépend du nombre d'échantillons N utilisés. En règle générale, plus N est élevé, plus l'estimation sera précise. Cependant, il est important de noter que le coût de la simulation augmente également proportionnellement à N , ce qui peut restreindre la taille des problèmes pouvant être traités par la méthode de Monte Carlo. Par conséquent, il est essentiel de trouver un compromis entre la précision de l'estimation et les contraintes de coût lors de l'application de cette méthode dans des problèmes réels.

Convergence de la méthode

La convergence de la méthode Monte Carlo est assurée par la *Loi forte des grands nombres*[30] :

Théorème 1.1

Soit $(X_n)_{n \geq 0}$ une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, à valeurs dans \mathbb{R}^d ($d \in \mathbb{N}^$). On suppose que $E(|X_1|) < +\infty$. Alors*

$$\frac{X_1 + \dots + X_n}{n} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} E(X) \quad (1.4)$$

Cette loi exprime le fait que les caractéristiques d'un échantillon aléatoire se rapprochent des caractéristiques statistiques de la population (ensemble d'individus ou d'éléments) lorsque la taille de l'échantillon augmente à l'infini.

Si les méthodes déterministes sont efficaces pour les problèmes réguliers de très petites dimensions, les méthodes de Monte Carlo les surpassent et sont très compétitives pour les problèmes non-réguliers en grande dimension[31].

Simulation de Monte Carlo dans la gestion des risques financiers

La simulation de Monte Carlo est utilisée dans divers domaines tels que la physique, la biologie, la télécommunication et notamment les finances.

En effet, de nombreux problèmes d'ingénierie financière portent sur l'estimation de certaines grandeurs, tel que l'évaluation des titres dérivés, le calcul des sensibilités aux prix, l'évaluation des risques de portefeuille etc. Ces valeurs peuvent souvent s'écrire sous forme d'**espérance** d'une variable aléatoire complexe dont le comportement est modélisé comme un processus stochastique. Cela rend particulièrement pertinente l'utilisation des méthodes de Monte Carlo.

Par rapport à d'autres méthodes numériques, la simulation de Monte Carlo présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle est facile à utiliser. Dans la plupart des situations, si les processus stochastiques peuvent être simulés, la valeur peut être estimée. Deuxièmement, son taux de convergence ne dépend généralement pas de la dimensionnalité du problème. Par conséquent, il est souvent intéressant d'appliquer la simulation de Monte Carlo à des problèmes de grande dimension [32].

Conclusion

En conclusion, l'examen approfondi de la littérature et des travaux de recherche existants a démontré l'existence de plusieurs techniques d'estimations des coûts en ETO, ainsi que les limites de ces dernières. Nous avons pu explorer les enjeux liés à l'estimation des coûts dans les industries de ce genre, et nous avons identifié certains outils financiers et concepts théoriques indispensables à la compréhension et à la résolution de la problématique.

Néanmoins, il est primordial d'approfondir nos connaissances sur l'estimation des coûts en amont de la production, en mettant l'accent sur les méthodes d'estimation statistique, et la pertinence autant pratique que théorique de cette problématique sera illustré dans le prochain chapitre (1.3.4).

Chapitre 2

Analyse de l'existant

Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la résolution de problématiques rencontrées par SARL Auzia dans son activité d'ingénierie industrielle. Pour cela, le présent chapitre vise à faire une analyse de l'existant, c'est-à-dire de tout élément pertinent qui concerne de près ou de relativement loin l'entreprise. L'objectif de cette analyse est de fournir un contexte solide et concret pour ce travail, en mettant en lumière les dysfonctionnements, l'environnement et les défis auxquels fait face l'entreprise.

Dans un premier temps nous présenterons SARL Auzia, ses secteurs d'activités et son organisation interne. Nous passerons ensuite au contexte externe de l'entreprise. Pour cela, l'outil d'analyse des 5 forces de Porter sera utilisé, pour permettra une évaluation des caractéristiques du marché dans lequel SARL Auzia évolue. Ensuite, nous analyserons en détails les différents processus de l'entreprise que nous aurons définis dans la section concernant l'organisation de l'entreprise. Pour finir, nous passerons à la synthèse des différents éléments de diagnostic. Cette synthèse nous permettra de comprendre les principales lacunes et problématiques auxquelles SARL Auzia est confrontée, fournissant ainsi un point de départ pour ce travail.

Pour conclure, la problématique sera exposée à la lumière des éléments de chapitre, ce qui nous permettra d'en cerner les dimensions pratiques.

2.1 Présentation de SARL Auzia

SARL Auzia est une société spécialisée dans la fabrication , l'usinage, la chaudronnerie des pièces mécaniques de précision et la réalisation de prototype pour tout type de pièce ou machine spéciales, ainsi que la maintenance et la rénovation industrielle. Créée en 2014, cette société compte actuellement 30 employés et autant de postes de travail.

2.1.1 Secteurs d'activité

SARL Auzia agit dans plusieurs secteurs industriels locaux à travers la maintenance des machines industrielles et la fabrication de systèmes mécaniques. Particulièrement, les clients en B-to-B de SARL Auzia se trouvent dans les secteurs :

- Pétroliers.
- Miniers.
- Agroalimentaire.
- Bâtiment et Travaux Publics (cimenterie, Briqueterie...)

Auzia propose aussi ses services en B-to-C à des particuliers qui auraient besoin de pièces de rechange pour leurs moyens de locomotion (voiture, moto, scooter...) ou toute autre pièce mécanique à fabriquer ou à réparer.

Les marchés que peut cibler Auzia sont très divers, de par la diversification des biens et services que l'entreprise propose. L'entreprise peut intervenir dans la chaîne de valeur de tout organisme (entreprise privée, institut de recherche, organisme gouvernemental...) possédant du matériel industriel ou souhaitant en acquérir. Ce matériel industriel génère un besoin de maintenance, et donc une demande en pièces de rechanges.

Auzia propose donc ces services particulièrement aux entreprises locales dans les secteurs primaires et secondaires, qui incluent des industries de machinerie lourde ayant tout intérêt à optimiser leurs achats en recherchant un fournisseur de pièces de rechange local.

2.1.2 Organisation de SARL Auzia

L'organisation de l'entreprise s'articule autour du coeur de métier, avec une place importante de l'étude d'ingénierie et de qualité au centre des processus. L'organigramme de l'entreprise apparaît sur la figure 2.1. Les processus de chaque élément de l'organigramme sont présentés en annexe 4.7.

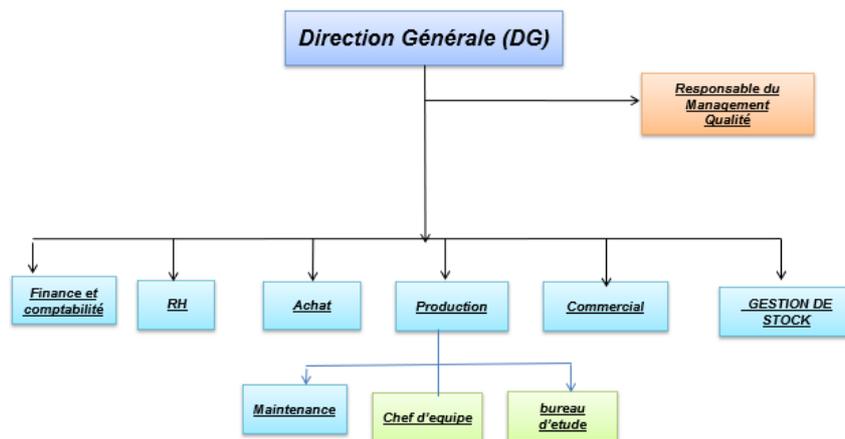


FIG. 2.1 : Organigramme de SARL Auzia, décembre 2022

L'entreprise fonctionne en mode projet, tel que les processus connexes sont construits autour du processus de production, pour permettre la réalisation de produits de qualité.

2.2 Analyse interne de SARL Auzia

Dans cette partie, nous analyserons les manquements des différents processus de l'entreprise, pour pouvoir ensuite synthétiser un diagnostic interne et éventuellement externe. L'objectif de cette section est d'obtenir une vision claire et objective des processus actuels, afin de pouvoir formuler des mesures correctives ciblées et des actions d'amélioration qui permettront à la SARL Auzia de renforcer son efficacité, sa productivité et sa compétitivité sur le marché.

2.2.1 Analyse de la stratégie de Maintenance

L'activité de maintenance est centralisée et le plus souvent **internalisée**. En effet, deux types d'opérations de maintenance sont effectués : la maintenance préventive et la maintenance curative.

La maintenance préventive est effectuée par les opérateurs même des machines, quand à la curative elle est opérée par le responsable de maintenance parfois accompagné des ingénieurs ou des opérateurs. Il n'y a que très peu de cas recensés d'interventions externes à l'entreprise.

La maintenance préventive concerne les opérations suivantes :

1. Le nettoyage total.
2. Le nettoyage partiel
3. La vidange moteur.
4. La maintenance des glissières.
5. Le graissage.
6. Le changement des filtres, des lames etc
7. La lubrification.

Un des problèmes majeurs identifiés concernant la planification de la maintenance préventive est l'absence de prévision de la consommation en pièces de rechange ou en consommables. Il y a certes un plan de maintenance préventive mais les approvisionnements en ressources nécessaires se font uniquement lorsque le besoin se manifeste, et non de manière anticipée.

Cette approche réactive présente des conséquences négatives sur la gestion de la maintenance de l'entreprise Auzia. Tout d'abord, l'absence de prévisions de consommation en pièces de rechange et en consommables rend difficile le suivi précis de la consommation des ressources nécessaires à l'activité. Sans la capacité de calculer les écarts entre les quantités réelles utilisées et les prévisions, il devient impossible de repérer les éventuels dysfonctionnements ou de mettre en place des actions correctives.

De plus, le fait d'approvisionner les ressources uniquement lorsque le besoin se manifeste entraîne des retards potentiels dans la disponibilité des pièces de rechange ou des consommables. Cela peut avoir un impact direct sur la disponibilité et la fiabilité des équipements, conduisant à des temps d'arrêt imprévus et à des interruptions coûteuses de la production. L'absence de prévision de consommation en amont ne permet pas d'anticiper les besoins en ressources et de planifier les approvisionnements de manière optimale.

La maintenance corrective quant à elle survient après une défaillance du système. Pour avoir une meilleure visibilité sur l'activité de maintenance curative, des **arbres de défaillance** ont été élaborés pour les machines aux pannes les plus fréquentes et les plus coûteuses.

2.2.2 Analyse de la Stratégie de Production

En analysant les processus régissant l'entreprise, il est possible d'identifier clairement la stratégie de production adoptée, qui n'est autre que le **Engineer To Order**, et cela pour les raisons suivantes :

- La conception du produit ne se fait qu'une fois la commande passée.
- La plupart des matériaux utilisés dans la production sont commandés après que le client ait passé sa commande auprès du service commercial, ce n'est donc pas du Assemble-To-Order.
- Les commandes sont totalement personnalisées, chaque client peut émettre ses propres exigences.

Cette stratégie en ETO permet de répondre à une large gamme de commandes et de contribuer à la diversification des activités de l'entreprise, mais cela allonge considérablement le **time-to-market** pour des raisons que nous verrons dans la section 2.2.4.

Il n'y a pas non plus de stratégie d'ordonnancement ou de planification de la production, car l'entreprise n'a pas de visibilité sur la demande ou sur les commandes potentielles. Cela empêche par exemple la répartition des charges, et on retrouve que certaines machines, telles que les fraiseuses conventionnelles, fonctionnent en permanence, tandis que d'autres restent des mois à l'arrêt.

2.2.3 Analyse de la stratégie de gestion de la qualité

La politique de qualité de SARL Auzia met l'accent sur la satisfaction client, même si cela signifie la perte de profit pour l'entreprise. En effet, l'entreprise s'engage à proposer un produit de qualité, et même lorsque des pertes en interne surviennent, le produit ne quitte pas les ateliers de production avant d'être rectifié.

Cette stratégie implique de grandes dépenses dans les moyens de détection et de préventions de la non qualité. Cela se traduit dans le cas d'Auzia par l'achat d'outils de mesure tels que les pieds à coulisse, les jauges de profondeur etc, mais aussi par la certification ISO 9001.

Néanmoins, la certification ISO 9001 ne suffit pas pour la prévention, puisque malgré cela le taux de projets subissant des erreurs de fabrication est supérieur à $\frac{1}{5}$. Ces erreurs, même si elles ne sont pas communiquées en externe, causent du préjudice à l'entreprise en interne. En effet, pour chaque projet une certaine quantité de matière première est commandée et en cas de non qualité celle-ci est perdue. Il faut donc relancer la commande ce qui induit des coûts supplémentaires et un allongement des délais. En plus de cela, les non-conformités peuvent endommager les moyens de production, par exemple une mauvaise programmation des machines de fabrication assistée par ordinateur peut endommager les outils de coupe.

2.2.4 Analyse de la stratégie commerciale

Le département commercial est un département clé pour une entreprise en plein essor tel que SARL Auzia. Étant donné que celle-ci n'est que très peu connue sur le marché, il est impératif d'avoir un processus commercial performant, or ce n'est actuellement pas le cas. En effet, le département commercial souffre de plusieurs dysfonctionnements dont pâtit tout le reste de l'entreprise. En effet, un manque de clients se répercute sur toutes les activités, puisque l'entreprise fonctionne en ETO. Cela signifie que sans client, pas de production.

Les principaux dysfonctionnements identifiés au niveau du processus commercial sont les suivants :

1. **Absence de stratégie marketing** : Le département commercial de l'entreprise n'a pas mis en place de stratégie de marketing clairement définie. L'absence de direction et de vision stratégique en matière de marketing limite la capacité de l'entreprise à attirer et à cibler efficacement de nouveaux clients. Il est essentiel de développer une stratégie de marketing solide pour identifier les segments de marché pertinents, définir des objectifs clairs et élaborer des plans d'action concrets. Or, cela ne se fait pas au niveau de Auzia.
2. **Absence de procédure pour aller au-devant du client** : Le département commercial ne dispose pas d'une procédure structurée pour prospecter et solliciter activement les clients potentiels. Cette approche passive laisse l'entreprise dépendre uniquement de la demande existante, ce qui limite les opportunités de croissance.
3. **Mauvais pricing des produits** : le département commercial est responsable de l'élaboration et l'envoi des devis une fois qu'un projet est jugé réalisable par le bureau d'étude. Or, actuellement le département n'a aucune méthode scientifique pour évaluer en amont le coût des pièces commandées. Il arrive qu'une pièce ait un prix connu sur le marché et que l'entreprise puisse proposer un devis en faisant du benchmarking, mais le plus souvent cela n'est pas possible car les commandes sont hautement personnalisées. De plus, le benchmarking donne lieu à des prix biaisés puisque pour un même produit deux entreprises différentes supporteront des charges différentes, ce qui explique un prix final différent, chose qui ne se reflète pas dans un pricing reposant sur le benchmarking. Cette absence de méthode de calcul du prix optimal des devis est extrêmement dangereuse pour la pérennité de l'entreprise, puisque souvent cette dernière va produire à perte sans même s'en rendre compte, en voulant concurrencer à tort des entreprises qui font de la production de masse du produit alors que Auzia fait du engineer to order. De plus, les délais de réponse aux clients s'en trouvent allongés vu que le pricing se fait parfois par tâtonnement, ce qui peut causer de l'insatisfaction du côté des clients et même la perte de marchés.

Les problèmes impactent négativement la rentabilité et la compétitivité de l'entreprise des manières suivantes :

1. **Dépendance excessive à la demande passive** : l'entreprise se trouve dans une position réactive plutôt que proactive. Elle attend que les clients viennent à elle

plutôt que de prendre des mesures pour aller au-devant des clients potentiels et créer des opportunités commerciales. Cette approche passive peut entraîner une stagnation des ventes et une perte de parts de marché.

2. **Perte des parts de marché face aux concurrents** : En raison de l'absence de stratégie de marketing proactive, de campagnes planifiées et d'une approche limitée envers les clients potentiels, Auzia a perdu des parts de marché face à ses concurrents. La concurrence, tant sur le marché local qu'international, a su tirer parti d'initiatives marketing plus agressives pour attirer les clients et remporter de nouvelles affaires. Cette situation met Auzia dans une position défavorable, réduisant sa part de marché et sa visibilité sur le marché.
3. **Inactivité prolongée** : En raison de la dépendance excessive à la demande passive, il arrive que l'entreprise passe plus d'un mois sans recevoir de commandes, entraînant des périodes d'inactivité prolongées. Cette situation est préjudiciable à la rentabilité et à la viabilité de l'entreprise, car elle entraîne une utilisation inefficace des ressources et des coûts fixes qui ne sont pas compensés par des ventes régulières. Il est crucial de mettre en place des stratégies de stimulation de la demande et de diversification des sources de revenus pour atténuer ce problème.
4. **Perte de rentabilité** : Sans une méthodologie de pricing solide, il est probable qu'Auzia sous-estime ou surestime les coûts réels de production. Dans les deux cas, l'entreprise risque de perdre en rentabilité. Si les coûts sont sous-estimés, l'entreprise peut se retrouver à produire à perte ou avec une marge bénéficiaire insuffisante pour couvrir les coûts. À l'inverse, si les coûts sont surestimés, l'entreprise risque de perdre des opportunités commerciales car elle proposera des prix non compétitifs.
5. **Perte de part de marchés** : L'absence d'une méthodologie de pricing adéquate peut également conduire à la perte de parts de marché au profit de concurrents. Si les prix proposés par Auzia sont incohérents ou non compétitifs par rapport à ceux de ses concurrents, les clients potentiels peuvent être incités à se tourner vers d'autres fournisseurs. Cela peut entraîner une diminution des commandes et une perte de revenus pour Auzia.
6. **Détérioration de l'image de marque** : Une mauvaise méthodologie de pricing peut nuire à l'image de marque d'Auzia. Si les clients perçoivent des incohérences ou des fluctuations excessives dans les prix proposés, cela peut ébranler leur confiance dans l'entreprise. Une image de marque négative peut rendre plus difficile la fidélisation des clients existants et l'acquisition de nouveaux clients.
7. **Difficultés de gestion financière** : Une méthodologie de pricing inadéquate rend la gestion financière de l'entreprise plus complexe. Sans une estimation précise des coûts et des marges bénéficiaires, il devient difficile de planifier et de contrôler efficacement les finances de l'entreprise. Cela peut entraîner des problèmes de trésorerie, une mauvaise allocation des ressources et une incapacité à prendre des décisions financières éclairées.

En résumé, il n'y a aucune démarche de croissance ou de promotion de la diversification des produits ou autre émanant de ce département. Les dysfonctionnements du processus commercial représentent des obstacles au développement de SARL Auzia.

2.2.5 Analyse de la stratégie d'achat et approvisionnement

L'industrie Engineer-to-Order (ETO) est un secteur où la personnalisation des produits et la fabrication sur mesure sont au cœur de l'activité. Dans ce contexte, la gestion des achats et de l'approvisionnement revêt une importance capitale. Les entreprises ETO doivent relever le défi de répondre aux besoins spécifiques de chaque projet tout en assurant l'approvisionnement en matières premières, composants et équipements nécessaires à la réalisation des produits sur mesure. Cela nécessite une approche stratégique et rigoureuse, où la planification des achats, la sélection des fournisseurs et la gestion des stocks jouent un rôle clé dans la réussite des projets.

Comme nous le verrons dans la section 2.2.8, l'entreprise fonctionne en juste-à-temps, ce qui rend le performance du processus d'achat capital au bon fonctionnement de tous les autres processus de l'entreprise. En effet, le département commercial ne peut répondre à la demande s'il n'est pas certain que la matière première sera bel et bien acheminée à temps, et de même la production ne pourra être lancée.

1. **Pas de planification des achats** : l'ETO rend les prévisions particulièrement difficile, particulièrement lorsque le département commercial ne fait pas d'études de marché, que les pièces de rechange utilisées dans la maintenance ne sont pas répertoriées etc. Ce manque de données fait que le département achat est incapable d'émettre des prévisions et donc de faire de la gestion scientifique des achats.
2. **Pas de procédure performante de négociation à l'international** : Étant donné que de nombreuses matières premières nécessaires à la production ne sont pas disponibles sur le marché local, SARL Auzia dépend des fournisseurs internationaux. Cependant, il n'y a pas d'effort ni de procédure établis pour construire des relations privilégiées et profitables avec ces fournisseurs. La faible position d'Auzia sur le marché international rend l'entreprise moins attractive pour les fournisseurs, qui peuvent choisir de répondre aux demandes d'autres entreprises plutôt qu'à celles d'Auzia. Cette situation entraîne des difficultés dans la négociation des prix, les conditions d'approvisionnement et la disponibilité des matières premières.
3. **Absence de base de données** : depuis la certification ISO 9001, un réel effort de modernisation a été fait au sein de l'entreprise, mais cela n'empêche pas certaines pratiques de persister. Par exemple il n'y a pas d'historique numérisé des achats, uniquement des versions imprimées et donc inexploitable.

Les conséquences :

1. **Impossibilité de faire de la gestion scientifique des achats** : L'absence d'une base de données centralisée pour enregistrer les informations sur les achats limite

la visibilité et le contrôle sur le processus d'approvisionnement. L'entreprise ne dispose pas d'un accès facile aux données historiques, ce qui rend difficile l'analyse des tendances, la prise de décisions éclairées et l'identification d'opportunités d'amélioration.

2. **Pas de rapport de force avec les fournisseurs internationaux** : l'entreprise n'arrive pas à construire un rapport de force en sa faveur avec les fournisseurs à l'international, ce qui peut engendrer des prix d'achats plus élevés que ceux proposés à la concurrence d'Auzia, une faible priorité qui entraîne des retards de livraison, des problèmes de disponibilité des produits ou un service client insatisfaisant. Les fournisseurs peuvent aussi être réticents à coopérer et à partager des informations, des technologies ou des opportunités d'innovation, ce qui peut limiter la capacité de l'entreprise à rester compétitive sur le marché.
3. **Coûts d'achat élevés** : Le manque de planification des achats et l'absence d'une procédure performante de négociation à l'international peuvent entraîner des coûts élevés pour l'entreprise. Les achats effectués de manière non planifiée peuvent entraîner des commandes urgentes, des achats à des prix plus élevés et des frais d'expédition supplémentaires. De plus, la difficulté à négocier des conditions favorables avec les fournisseurs internationaux peut se traduire par des coûts d'approvisionnement plus élevés.
4. **Risques de pénurie de matière première** : La dépendance à l'approvisionnement international sans procédure de négociation performante peut entraîner des risques de pénurie de matières premières. Si un fournisseur clé décide de ne pas répondre aux demandes d'Auzia en faveur d'autres clients, l'entreprise peut se retrouver confrontée à des difficultés pour obtenir les matières premières nécessaires à sa production.
5. **Retard de production** : L'absence de planification des achats et les délais d'approvisionnement prolongés peuvent entraîner des retards dans la production. Lorsque les matières premières ne sont pas disponibles en temps voulu, les projets peuvent être retardés, ce qui peut avoir un impact négatif sur la satisfaction des clients et la réputation de l'entreprise.

Tous ces dysfonctionnements qui peuvent paraître minimes se transforment en obstacle parfois insurmontables au niveau de la gestion des stocks. En effet, étant donnée la nature juste-à-temps de celle-ci (voir section 2.2.8), des problèmes en amont du stock se répercutent directement sur la satisfaction client.

2.2.6 Analyse de la stratégie de gestion des ressources humaines

La gestion des ressources humaines se fait de manière classique, puisque les ouvriers et le reste des travailleurs sont des employés de l'entreprise, payés au mois quel que soit le rendu. Néanmoins, la grille des salaires dépend grandement des capacités personnelles et de l'implication au travail de chacun. On retrouve par exemple que pour deux ingénieurs occupant des postes similaires, le salaire est extrêmement différent, et cela car l'un fait

preuve de plus d'investissement et de sérieux dans son travail. Il arrive que des primes ou des frais de missions soient proposés, mais les employés savent qu'en travaillant plus, les perspectives de promotions au sein de SARL Auzia existent, ce qui les motive grandement.

Les talents sont aussi entretenus, et il est permis aux employés de manipuler les technologies nouvelles, laissant ainsi le champ libre à leur créativité et à leurs capacités d'apprentissage. Actuellement, Auzia a pour but de proposer deux formations par an pour les employés qui témoigneraient d'un intérêt pour la question ainsi que des prédispositions intellectuelles, techniques ou autre.

Néanmoins, l'entreprise souffre d'un manque de main d'œuvre qualifiée au niveau des fonctions connexes. En effet, dans les départements de gestion, les employés n'ont majoritairement pas été formés dans les activités qu'ils effectuent, ce qui empêche la gestion scientifique. Cela témoigne d'un manquement au niveau de la procédure de recrutement. Les défaillances à signaler à ce niveau sont les suivantes :

1. **Description de poste pas assez précise** : en effet, lorsque l'appel aux candidatures est fait, la description du poste n'est pas effectuée avec soin, ce qui peut décourager des personnes qualifiées et induire en erreur des personnes non qualifiées.
2. **Portée d'offre d'emploi restreinte** : la diffusion des appels à candidature est souvent restreinte et n'atteint pas la population visée. Les offres ne sont parfois communiquées que de bouche à oreille.
3. **Critères de sélection pas claires** : les critères de sélection d'un candidat ne sont pas énumérés et fixés en amont, ce qui rend la sélection parfois arbitraire et peut causer l'embauche de candidats inappropriés.

2.2.7 Analyse de la stratégie de gestion des finances et comptabilités

Le processus de gestion des finances et comptabilités n'est pour SARL Auzia qu'une formalité légale. En effet, l'entreprise se contente de faire le strict minimum comptable exigé par la loi. Le processus de gestion de la comptabilité et des finances est confié à un **prestataire externe**, à qui on ne demande que les bilans nécessaires pour que l'entreprise soit en conformité avec les lois en vigueur.

Cette approche **d'externalisation de l'activité** permet à l'entreprise de se concentrer sur le cœur de métier. Néanmoins, cela limite grandement l'exploitation des informations que l'on peut tirer du comportement des flux financiers. En effet, l'entreprise n'a pas de structure de coûts établie, et n'effectue aucun bilan de comptabilité de gestion. Cela obstrue la vision long terme de l'entreprise en empêchant la planification financière et l'étude des performances.

2.2.8 Analyse de la stratégie de gestion de stock

Le stock de Sarl Auzia contient principalement de la matière première stockée en vrac, en extérieure, et pour certains produits, sur des palettes.

En observant le processus de gestion de stock de SARL Auzia, on peut constater que la stratégie adoptée est une stratégie de **Juste à Temps** mais sa mise en œuvre est sous-optimale. On reconnaît cette stratégie à l'expression du besoin d'approvisionnement. En effet, la matière première est achetée selon les commandes reçues par l'entreprise, il n'y a pas de stock de sécurité ou de niveau de réapprovisionnement, la production et le stock sont ainsi synchronisés et les produits ne sont achetés et stockés que lorsque l'atelier de production exprime un besoin immédiat.

Cette stratégie est adoptée par l'entreprise à cause de la nature ETO de la production et de la variété de matières premières utilisées dans la fabrication de pièces mécaniques, ce qui rend pratiquement impossible de garder un stock de sécurité pour chaque nuance. En effet, l'entreprise n'a pas de visibilité sur les matières dont elle aura besoin, ce qui rend impossibles des stratégies de gestion de stock telles que le stock de cycle ou le stock de sécurité.

Néanmoins, cette stratégie n'est pas exploitée de manière optimale. En effet, le département de gestion des stocks rencontrent d'énormes problèmes liés aux délais de livraison, à la disponibilité des produits, à l'acheminement de l'international au local, à l'incertitude des marchés de l'acier etc, qui découlent principalement des dysfonctionnements expliqués dans la section 2.2.5.

L'incertitude de la demande rend difficile la planification. Il arrive qu'il soit impossible de répondre à une demande à cause de l'indisponibilité de la matière première. Elle peut être absente du marché locale, et l'entreprise doit s'en remettre au marché international, ce qui allonge le temps d'attente et donc le time-to-market des produits, étant donné que le temps d'acheminement de la matière première est incluse dans le time-to-market en ETO.

Commander de la matière première pour un projet en particulier cause aussi des congestions au niveau du stock. En effet, il arrive que la matière ne soit entièrement utilisée dans la réalisation du projet pour lequel elle a été commandée. Ce matériau n'étant pas utile dans d'autres projets, reste entreposé durant des mois, parfois des années, dans l'entreprise, à perdre de la valeur et à générer des coûts de stockage. Cela témoigne d'un vide procédural dans le système de gestion de stock concernant ce genre de cas.

En conclusion, l'analyse du processus de gestion des stocks de SARL Auzia met en évidence une stratégie de Juste à Temps (JAT) adoptée en raison de la nature Engineer to Order (ETO) de la production et de la variété des matières premières utilisées. Cependant, cette stratégie n'est pas pleinement exploitée et présente des problèmes tels que des délais de livraison, des contraintes liées à la disponibilité des produits, des difficultés d'approvisionnement sur le marché local et international, ainsi que des congestions de stock liées à des commandes spécifiques pour des projets particuliers.

2.3 Analyse externe de SARL Auzia : les 5 Forces de Porter

Dans cette partie, nous examinerons le contexte externe de SARL Auzia, afin d'évaluer la position de l'entreprise sur le marché. Pour cela, nous utiliserons le cadre conceptuel des

5 forces de Porter. Développée par le célèbre économiste Michael Porter, cette approche permet d'évaluer les facteurs clés qui influencent la compétitivité d'une entreprise dans son environnement industriel. Ainsi, nous aborderons le pouvoir de négociation des clients, le pouvoir de négociation des fournisseurs, la menace des produits ou services de substitution, l'intensité de la concurrence entre les firmes et la menace des nouveaux entrants.

2.3.1 Le pouvoir de négociation des fournisseurs

Il existe plusieurs typologies de fournisseurs possibles au sein de SARL Auzia. Il est possible de distinguer entre les fournisseurs de matière première, les fournisseurs de consommables, les fournisseurs de machines... Néanmoins, la typologie la plus pertinente pour notre étude est celle séparant les fournisseurs locaux des fournisseurs internationaux.

En effet, la procédure, le risque et le pouvoir de négociation diffèrent notablement entre les fournisseurs locaux et les fournisseurs internationaux, ce qui rend ce cadre de comparaison plus adapté à une étude des forces structurelles.

S'approvisionner chez un fournisseur local comporte moins de risques en terme de délais et de gestion des retours. A l'internationale, les lois d'échange commercial varient, et la livraison est soumise non-seulement au lois mais aussi aux enjeux géopolitiques. La guerre en Ukraine actuellement immobilise l'usine d'Azovstal, qui est au cœur de la supply chain mondiale d'acier. En effet, l'Ukraine en 2020-2021 était le 14ème producteur mondial d'acier et le 5ème exportateur mondial [33]. Ce genre de risques affectent particulièrement les petites usines telle que Auzia, puisque celles-ci n'ont pas la priorité avec les fournisseurs internationaux. La consommation en matière première de SARL Auzia pour un fournisseur international d'acier, de bronze ou autre est souvent négligeable, ce qui en fait un maillon en bas de la liste de priorités.

Néanmoins, en terme t de diversification des catalogues de produit, les fournisseurs locaux sont loin derrière les fournisseurs internationaux. Les machines industrielles pour la plupart ne sont disponibles qu'à l'international. De même pour les alliages complexes à produire, ou les matériaux nobles. L'entreprise est donc très souvent obligée de se tourner vers le marché international, et cette position de faiblesse diminue son pouvoir de négociation.

Pour ce qui est de la qualité, elle n'est pas soumise nécessairement à une dichotomie telle que les fournisseurs locaux soient mauvais par rapport aux internationaux. Cela varie d'un fournisseur à l'autre. Mais les locaux fournissent un avantage de taille, puisque le contrôle qualité peut se faire sur place, et la logistique retour est bien plus simple quand elle ne concerne que le territoire national.

De plus les délais quand il s'agit d'une livraison locale sont bien plus courts, et les coûts de transport sont de même moins élevés.

Enfin, en terme de relations commerciales, le contact est plus simple avec les fournisseurs locaux. En effet, la plupart des employés de SARL Auzia, notamment dans l'approvisionnement ne sont pas anglophones, ce qui freine la communication à l'internationale et entraîne des glissements de fonction au niveau des achats. Il est ainsi presque impossible de maintenir une relation de confiance avec les fournisseurs, car la communication n'est

pas directe et la barrière culturelle est pratiquement insurmontable avec les ressources actuelles de l'entreprise.

2.3.2 Le pouvoir de négociation des clients

Le pouvoir de négociation des clients, également appelé pouvoir de marché des clients, fait référence à la capacité des clients d'une entreprise à influencer les conditions commerciales, telles que les prix, les produits, les délais de livraison et les services, en raison de leur importance et de leur nombre sur le marché.

Actuellement, SARL Auzia propose ses services sur le marché local. Ses clients sont divers, mais l'entreprise cible particulièrement les secteurs primaire et secondaire (voir la section 2.1.1). Le marché de SARL Auzia concerne donc toutes les entreprises de production industrielle, mais aussi d'extraction et de transformation de ressources.

Dans le cas de SARL Auzia, le client a une grande capacité de négociation et un pouvoir important. Cela est dû à la nature de l'entreprise mais aussi aux stratégies adoptées par l'entreprise.

Comme nous le verrons par la suite, Auzia supporte une part importante de coûts fixes, il est donc impérative pour elle de produire. Or, étant une entreprise ETO, elle ne produit et vend qu'à la commande du client, ils sont donc à l'origine du déclenchement de tous les processus clés de l'entreprise. Ne pas recevoir de client durant plus d'un mois, puis recevoir plusieurs commandes urgentes en une semaine fait partie des problématiques que rencontre SARL Auzia. Cette soumission aux fluctuations du marché rend l'entreprise particulièrement sensible aux exigences des clients dans les périodes de sous-production, puisque Auzia n'a aucune visibilité sur la prochaine commande.

De plus, Auzia est une entreprise naissante donc un des objectifs est de se faire connaître sur le marché. Ils ont donc actuellement tout intérêt à satisfaire leur clientèle pour se construire une image de marque. Cela augmente encore le pouvoir de négociation des clients, qui sont ainsi en position d'exiger des délais de livraison court, des prix bas et une qualité élevée.

Néanmoins, bien que l'état actuel de SARL Auzia la met en position de faiblesse par rapport à ses clients, les statistiques nationales montrent que cela n'est pas inhérent au marché mais à l'entreprise elle-même. En effet, selon les rapports de l'Office Nationale des Statistiques, la production industrielle est en augmentation claire, ce qui témoigne d'un besoin en ingénierie industrielle croissant. Pour preuve, la figure 2.2 .

En somme, les clients de SARL Auzia ont un important pouvoir de négociation actuellement, mais cela n'est pas inhérent au marché ciblé par SARL Auzia mais plutôt à sa stratégie de croissance.

2.3.3 La menace des nouveaux entrants

La menace des nouveaux entrants fait référence à la possibilité que de nouvelles entreprises intègrent le marché et fassent baisser la capacité qu'a une entreprise de fixer des prix au-dessus du coût marginal. Cette menace est régulée par les **barrières à l'entrée**,

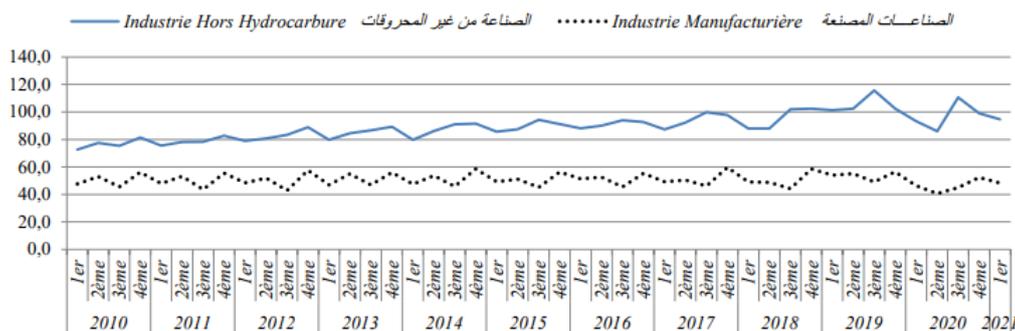


FIG. 2.2 : Évolution trimestrielle des indices de la production industrielle hors hydrocarbures et de l'industrie manufacturière du secteur public de 2010 à 2021[34]

Machine/poste de travail	Prix minimum	Prix maximum
Centre d'usinage	7000	200000
Centre de fraisage vertical	10000	32000
Centre de fraisage horizontal	15000	200000
Presse plieuse mécanique	20000	45000
Presse plieuse hydraulique	12000	38000

TAB. 2.1 : Prix d'achat en euros d'une sélection de machines de fabrication mécanique

qui sont des obstacles à l'entrée (et donc qui empêchent la sortie sans pertes) dans le marché. Dans le cas de SARL Auzia, deux barrières principales sont à mentionner :

Le niveau des investissements requis

Étant donné que les activités de SARL Auzia requièrent l'utilisation de machines industrielles qui ne sont pas fabriquées localement, les coûts d'investissement initial représentent une barrière conséquente. Sans compter les frais de formation des ouvriers, les frais d'installation, de location d'espace etc, le tableau 2.1 comporte quelques machines industrielles de fabrication mécanique et leur fourchette de prix en euro Les sommes sont relativement élevées par rapport au pouvoir d'achat algérien, et l'investissement est donc important à l'entrée.

Économies d'échelle

Les économies d'échelles sont une barrière à l'entrée car elles confrontent les potentiels entrants à un dilemme [35] :

- Entrer avec un volume réduit et supporter des charges élevées.
- Investir massivement pour atteindre une taille minimisant les coûts unitaires et se retrouver soit en forte surcapacité soit faire faillite.

Or, dans l'industrie de fabrication mécanique et d'ingénierie, l'amortissement des machines représente un coût fixe important, ce qui est une indication de présence d'économies

d'échelles.

2.3.4 La concurrence entre les firmes

Dans l'analyse de Porter, la concurrence entre les firmes fait référence à l'intensité de la rivalité entre les entreprises présentes sur le marché. Ici, nous tenterons d'évaluer la concurrence entre Auzia et les autres entreprises de production mécanique.

Tout d'abord, le marché de la production mécanique en Algérie est extrêmement restreint par rapport aux autres industries. En effet, l'indice de production industrielle pour le 3ème trimestre de 2022 pour la fabrication mécanique était de 3 tandis que celui de l'énergie est estimé à 764,1, et celui des produits pharmaceutiques à 133,2 [36]. Sachant que les autres industries utilisent pour la plupart du matériel mécanique, le marché de la fabrication de pièces mécaniques est loin d'être saturé. Néanmoins, Auzia fait face à de nombreux concurrents. Les caractéristiques des concurrents de SARL Auzia sont visibles sur le tableau 2.2.

Nom	Création	Localisation	Visibilité	Chaudronnerie	Maintenance	Etude	Méthode	Métrieologie de pointe
Auzia	2014	Sour El Ghozlane	Faible	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
ATP MESROUK	1981	Blida	Moyenne	Oui	Non	Non	Oui	Non
Construmet/IMetal	1968	Alger	Faible	Oui	Oui	Non	Oui	Non
GMDI	/	Alger	Forte	Oui	Oui	Non	Oui	Non
GMI	1996	Tizi Ouzou	Inexistante	Non	Non	Non	Oui	Non
MIK	1980	Mostaganem	Moyenne	Oui	Oui	Non	Oui	Non
SCOMEQ	2015	Alger	Moyenne	Oui	Non	Non	Oui	Non
Somemi	/	Jijel	Forte	Non	Oui	Non	Oui	Non

TAB. 2.2 : Tableau comparatif des concurrents principaux de SARL Auzia sur le marché local

De gauche à droite : Le nom de l'entreprise, sa date de création, la localisation de son usine/atelier de fabrication, sa visibilité sur les réseaux sociaux et si oui ou non l'entreprise (en plus de la fabrication mécanique) propose des services de chaudronnerie, de maintenance industrielle et d'étude et conception. Les critères de visibilité sur les réseaux sont, dans l'ordre, :

1. Avoir un site internet fonctionnel et moderne.
2. Avoir une page Facebook professionnelle régulièrement mise à jour.
3. Avoir un compte LinkedIn régulièrement mis à jour.
4. Avoir une page Facebook et/ou LinkedIn tout court.

En comparant les dates de création, on remarque que SARL Auzia fait partie des entreprises les plus récentes, ce qui peut expliquer une certaine difficulté à se faire connaître sur le marché. En effet, les anciennes entreprises ont pour la plupart une base établie de clients et une image de marque reconnue sur le marché local. Les plus anciennes telles que ATP et MIK ont aussi eu le temps de développer leurs capacités de production en acquérant nombre de machines performantes.

D'autres entreprises, telles que Somemi ou GMDI investissent plutôt dans la visibilité sur les réseaux sociaux, où ils publient régulièrement leurs projets réussites et autre. Leur stratégie de marketing agressive rendent le marché peu accueillant et difficilement pénétrable pour des entreprises telles que SARL Auzia.

Pour ce qui est de la répartition géographique et donc de l'accès aux canaux de distribution, on peut remarque une importante concentration au centre du pays, avec MIK à l'ouest et Somemi à l'est. Mais celles-ci sont toutes au nord du pays, rendant la concurrence entre elles d'autant plus importante.

Enfin, on peut voir que les activités et services proposés sont similaires, et la concurrence en est donc accrue, particulièrement pour les entreprises ciblant le même segment de marché.

2.3.5 La menace des produits de substitution

Un produit de substitution est un produit ou un service qui peut remplir une fonction similaire ou répondre à un besoin comparable à celui d'un autre produit existant. Il offre une alternative aux consommateurs en termes de caractéristiques, de performances, de prix ou d'autres facteurs clés.

Pour le cas de SARL Auzia, étant donné que les produits demandés sont hautement personnalisés, les produits de substitution qui peuvent représenter une menace ne sont pas des produits de nature différente, mais plutôt de qualité meilleure ou de prix plus bas.

Étant donné la politique de qualité de SARL Auzia, le premier cas n'est pas une menace sur le marché local. L'entreprise étant prête à perdre du profit pour proposer un produit de qualité, et vu la maîtrise du cœur de métier démontrée, la qualité du produit ne sera pas un critère de discrimination contre SARL Auzia.

Néanmoins pour ce qui en est des coûts, les produits de SARL Auzia ne sont pas assez compétitifs. Tout d'abord, cela est dû aux coûts fixes importants dans l'industrie de fabrication mécanique. Les économies d'échelles des entreprises plus anciennes et mieux installées leur permettent de produire à des coûts plus bas, et donc de proposer des produits moins chers. Un autre aspect à redouter est les avantages des entreprises étatiques, souvent subventionnées, ce qui leur permet de casser le marché en vendant à des prix très bas.

Pour ce qui est des produits internationaux, la tendance économique en Algérie est à l'encouragement de la production locale plutôt qu'à l'importation, et les obstacles pour les importateurs ne cessent d'augmenter, ce qui limite la menace que pourraient représenter les producteurs internationaux.

2.4 Synthèse du diagnostic

L'analyse du fonctionnement interne de l'entreprise ainsi que de son environnement externe nous permet d'émettre un diagnostic que nous synthétiserons à travers une matrice SWOT. Cette dernière apparaît sur la figure 2.3.

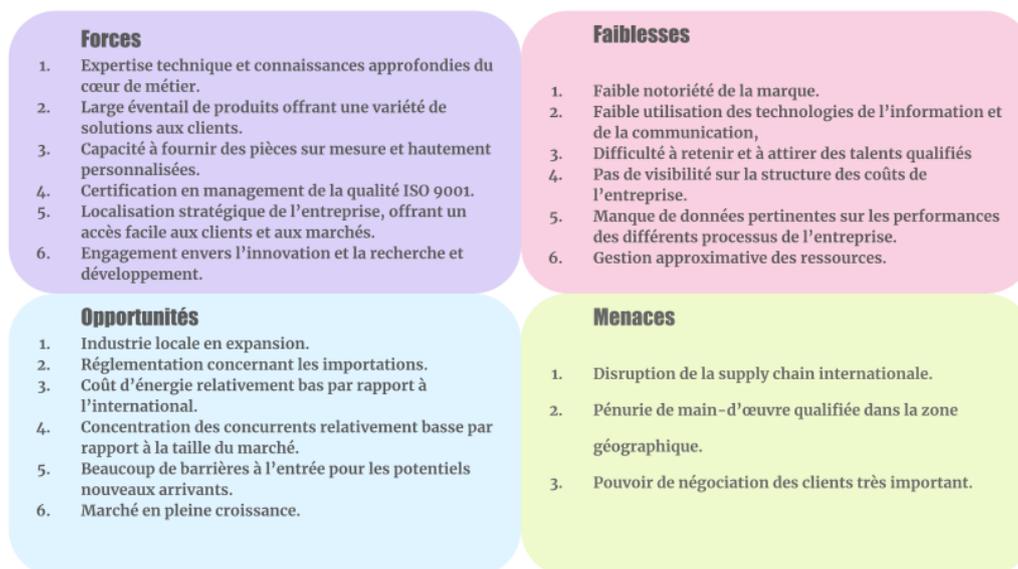


FIG. 2.3 : Matrice SWOT de SARL Auzia

2.5 Présentation de la problématique

Le devis est un élément clé des processus de l'entreprise, puisque celui-ci est la jonction entre cette dernière et le client. Il contient le prix auquel sera facturé le projet demandé par le client, et c'est souvent cette information qui déterminera l'obtention, ou pas du marché. Le devis doit donc être envoyé dans les délais les **plus courts possibles**, avec un montant que le client considère comme acceptable, tout en couvrant la totalité des charges que l'entreprise doit supporter.

Une mauvaise maîtrise de la tâche d'élaboration d'un devis peut entraîner :

- Des pertes de profit dans le cas d'un prix fixé trop bas.
- Des pertes de marché ou même la rupture avec le client, dans le cas d'un prix trop élevé ou d'une offre proposée trop tard.
- Des retards dans la production et la chaîne d'approvisionnement.

La difficulté d'élaboration d'un devis est liée à la nature de la stratégie de production. En effet, les produits en **ETO** sont personnalisés, ce qui rend les volumes de production variables, de mêmes que les charges. Il est donc extrêmement difficile de donner une estimation fiable des charges générées par un projet en amont de sa complétion. Cela s'est avéré être un obstacle à SARL Auzia qui n'arrive pas à surpasser un plafond fictif de production et à réaliser ses ambitions stratégiques et cela principalement car l'entreprise n'a pas de visibilité sur ses charges.

A la lumière de ce diagnostic, la problématique qui se présente d'elle-même est : **Comment estimer les coûts d'un projet en Engineer-To-Order pour proposer**

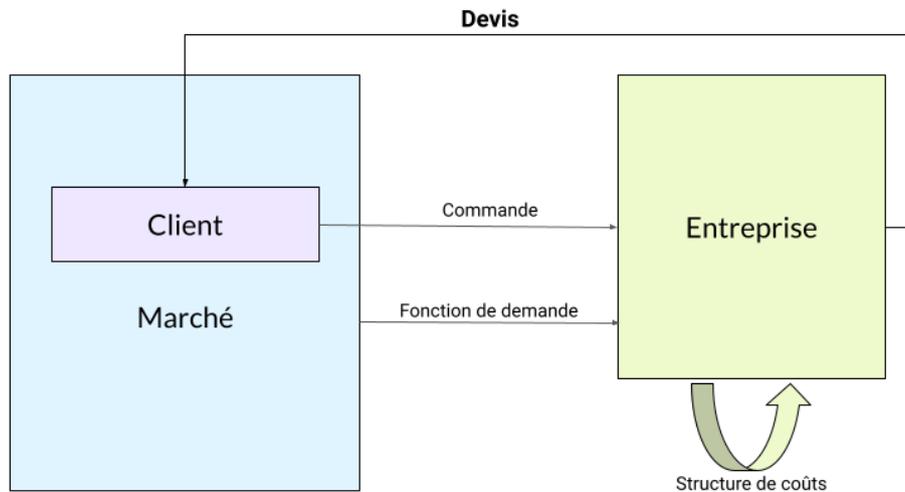


FIG. 2.4 : Schéma de la relation entre l'entreprise et son environnement dans le cadre de l'élaboration d'un devis

un prix ?

Or, de par le diagnostic précédemment effectué au sein de SARL Auzia que cette problématique est liée au *prix* des projets. Le manque de visibilité sur le prix des projets est l'obstacle principal que l'entreprise se doit de surmonter. Le schéma illustre la relation entre l'environnement externe et l'état interne de l'entreprise avec le devis.

En effet, le prix que doit proposer l'entreprise doit être conditionné par deux facteurs principaux :

- La structure de coûts interne de l'entreprise.
- La fonction de demande du marché : la marge de l'entreprise en dépend directement, et donc le prix du produit.

Le client passe tout d'abord une commande. L'entreprise, en prenant en considération ses propres coûts internes, et la tolérance du marché proposera ensuite à ce même client un devis.

On peut donc dégager deux sous-problématiques clés :

1. Comment estimer avec précision les coûts d'un projet en ETO en amont de la production ?
 2. Comment choisir une marge pour le produit ?
1. **Passage du qualitatif au quantitatif** : quels sont les critères de discrimination entre un projet et un autre, et sur quelle base un projet doit-il être plus cher ou moins

cher qu'un autre. Comment établir un modèle pouvant quantifier les différences qualitatives qui existent entre les projets.

2. **Répartition des coûts fixes** : sur quelle base répartir les coûts fixes sur les différents projets, étant donné que la quantité n'est pas représentative du volume de production que requiert le projet. Il est donc impossible de calculer le total et de le répartir sur le volume de production.
3. **Anticipation des charges non-déterministes** : l'estimation des coûts en amont implique l'existence de charges stochastiques. Comment prédire l'occurrence de ces charges, leur montant par projet et s'en prémunir sans perdre en compétitivité sur le marché.
4. **Estimation des charges variables** : comment prédire les montants variables selon les informations disponibles en amont de la production ? quelles sont les activités générant des coûts variables et quels attributs des projets les déclenchent ?
5. **Sélection des variables d'entrées de la solution** : les variables d'entrées doivent être assez pertinentes pour assurer l'exactitude de la variable de sortie. Néanmoins, elles doivent aussi être **pratiquement** quantifiables en amont de la production, c'est-à-dire que celle-ci doivent pouvoir être estimée ou prédite une fois la commande reçue.
6. **Intégration de la solution en amont du processus de production** : La solution doit pouvoir être déployée en amont de la production et s'intégrer dans les processus de l'entreprise.
7. **Choix d'une marge** : quelle mesure quantitative de la tolérance du marché utiliser pour fixer une marge acceptable pour le client ?

Cette difficulté est liée aux différents paramètres intervenants dans la fabrication de pièces mécaniques et au haut niveau de personnalisation exigé par chaque client.

Conclusion

En conclusion, SARL Auzia est une entreprise de production mécanique implantée en Algérie qui rencontrent plusieurs problèmes de différentes natures (stratégiques, opérationnelles, tactiques, internes, externes...). Les problèmes posés par l'environnement ne peuvent être contrôlés, mais il est possible d'adapter le système interne pour que l'entreprise soit résistante aux stimulations externes, tout en palliant à des dysfonctionnements inhérents aux processus de l'entreprise.

Pour cela, répondre à la problématique dégagée est une première et importante étape vers le développement global de l'entreprise. À travers ce travail, nous tentons de poser la pierre angulaire qui permettra à SARL Auzia de s'engager sur le chemin de la croissance et du développement avec des bases solides en gestion des coûts.

Chapitre 3

**Solution proposée : Modèle
Stochastique d'Estimation des Coûts
pour le pricing en Engineer-To-Order**

Introduction

Ce chapitre du document comporte la solution proposée pour pallier à la problématique détectée dans la partie diagnostic, qui est intitulée **Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order**. Tout d'abord la solution sera présentée, ainsi que sa pertinence par rapport à la problématique. Le contexte théorique et pratique de cette étude sera exposé en synthétisant les informations énoncées dans les chapitres ??, puis nous passerons à l'explication des composantes de la solution. Un algorithme de déploiement sera proposé sous format BPMN 2.0, pour faciliter son adaptation au cas de SARL AUzia. La méthodologie sera expliquée étape par étape avant de passer aux potentielles applications alternatives de la solution. Le chapitre se finira sur les limites théoriques et pratiques du modèle, ainsi qu'une conclusion.

3.1 Présentation de la solution

La solution proposée est un modèle stochastique d'estimation des coûts en amont de la production, à insérer entre la phase d'étude de faisabilité et l'envoi du devis au client. Le modèle présente des aspects **déterministes**, tout en prenant en considération des événements stochastiques, tels que l'occurrence de pannes ou de produits défectueux. Le Modèle Stochastique d'Estimation, d'Intégration et de Répartition des Coûts en Engineer-To-Order est une approche scientifique et objective au calcul des coûts de revient des pièces mécaniques par la modélisation mathématique.

Le modèle reprend des éléments classiques de calcul des coûts, pour les adapter à une étude en Engineer to Order, qui nécessite d'anticiper le montant des coûts avant de lancer la production. Seront inclus des coûts fixes, des coûts variables et des coûts dits stochastiques dont le montant est déterminé par des distributions de probabilité.

Le modèle développé n'existe pas, ou du moins pas sous cette forme, dans la littérature, c'est une méthodologie **entièrement développée et testée durant ce stage** avec pour but d'être déployée au sein de SARL Auzia mais aussi d'être généralisable à d'autres applications

Ce modèle permet d'approcher au mieux du coût réel de production des pièces mécaniques en prenant en considération les coûts directs et indirects. Le déploiement de la solution, et comment chaque étape de l'algorithme de résolution s'attaque aux sous-problématiques sont expliqués dans la section 3.4.

3.2 Contexte théorique et pratique de développement

Le développement de cette solution est motivé par un besoin pratique auquel la littérature ne répond pas. En effet, les techniques d'estimation des coûts en ETO comme présentées dans l'état de l'art[14], [16] font face à des limites que nous avons décrites plus haut dans ce travail, qui les rendent sous-optimales dans le contexte de SARL Auzia et des entreprises ayant une structure, un fonctionnement, ou des contraintes similaires[37].

Chapitre 3. Solution proposée : Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order

Les contraintes pratiques de SARL Auzia, expliquées dans le chapitre 1.3.4 rendent particulièrement inapplicables certaines techniques au vu de leurs limites.

Les techniques **qualitatives** requièrent une grande quantité de données **structurées** pour ensuite renvoyer des résultats de précision relativement basse [14]. De plus, ils ont souvent un effet **boîte noire**, qui ne permet pas une bonne visibilité sur la structure de coûts, or cette visibilité est indispensable à SARL Auzia.

Pour ce qui est des techniques **quantitatives**, celles-ci sont plus adaptées à la problématique en théorie, mais posent des problèmes d'ordre pratique :

- Les techniques paramétriques nécessitent la maîtrise des paramètres de coûts et la disponibilité de statistiques relatives au coût. Les statistiques dans une entreprise ETO sont souvent non normalisées, puisque les produits sont difficilement comparables de manière quantitative, de plus les méthodes paramétriques restent moins précises que les méthodes analytiques.
- Les techniques selon opérations nécessitent la connaissance des différents temps liés aux opérations. Or dans le contexte de SARL Auzia, il faudrait pouvoir les prédire en amont de la production, ce qui ajouterait à l'incertitude de l'estimation. De plus, c'est en pratique quasiment impossible à moins de créer une base de données des temps que prennent les opérateurs pour chaque pièce différente, et même ainsi rien n'assure que la base de données puisse couvrir tous les produits potentiels de SARL Auzia ou des entreprises en ETO plus généralement.
- Les techniques selon tolérance nécessitent une connaissance approfondie des fonctions des produits vendus, des matériaux et de l'utilisation finale du produit, ce qui n'est pas toujours le cas. De plus, elles calculent un coût minimal sous contrainte, ce qui est loin d'être l'objectif de ce travail qui se concentre plutôt sur l'estimation du coût à couvrir et non sur un objectif de coût minimal.
- Les techniques selon caractéristiques implique la connaissance des coûts de réalisation de certaines caractéristiques. D'une part, SARL Auzia propose un éventail de produits trop larges pour pouvoir supposer que tous ses produits sont des combinaisons de certaines caractéristiques de base. D'autre part, cette technique suppose que l'entreprise a déjà une visibilité sur le coût d'un panel exhaustif de caractéristiques, ce qui n'est pas le cas.
- La technique de l'ABC a parfois des difficultés lorsque des ressources sont partagées par deux ou plusieurs activités, ce qui est plus optimal pour les PME du secteur secondaire[38]. De plus, elle implique un suivi en détails de ce que chaque projet consomme en terme d'UO dans chaque activité, une exigence que nombre de PME ne remplissent pas.

Ce qui laisse les techniques par **décomposition**. La définition proposée pour ces techniques est vague, les modèles qui se rangent dans cette catégorie sont donc variés. La méthode des coûts complets en est un bon exemple. Celle-ci donne un framework utile pour le calcul des coûts, mais pour les entreprises en ETO il est souvent nécessaire de se

protéger contre divers risques pour des raisons que nous avons expliquées dans le chapitre

Ainsi, le présent travail s'inscrit dans la continuité des efforts de recherche dans le domaine de l'estimation des coûts en ETO en prenant en considération les contraintes générales des PME algériennes et plus particulièrement le cas de SARL Auzia. Pour cela, un modèle mettant à profit différentes les techniques paramétriques, par décomposition et d'ABC est proposé.

En effet, l'approche par décomposition donne un cadre analytique au développement du modèle, tandis que la technique de l'ABC fournit les notions d'activités, d'UO etc, et enfin les techniques paramétriques permettent d'appréhender les notions de risque et de variabilité. Le modèle proposé agrège ces différentes techniques pour proposer une solution plus optimale dans le contexte présenté en 1.3.4.

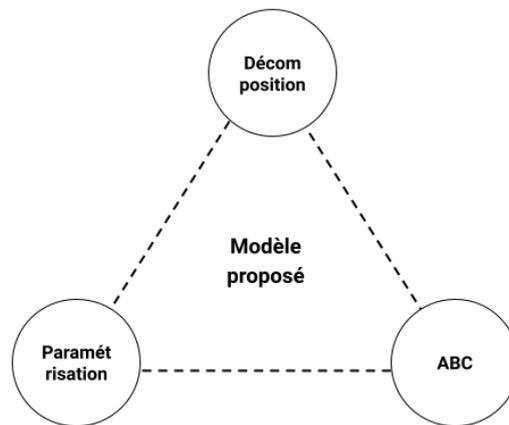


FIG. 3.1 : Positionnement du modèle par rapport aux autres techniques de l'état de l'art

3.3 Modélisation mathématique de la structure de coûts

Une structure de coûts est un élément clé de la gestion des coûts d'une entreprise ou d'un projet. Elle est généralement utilisée pour décrire les différents éléments qui contribuent aux coûts totaux d'un produit, d'un service ou d'un projet. Modéliser la structure de coûts mathématiquement permet de prédire les coûts futurs en fonction des changements apportés à la structure de coûts ou à d'autres facteurs tels que les volumes de production ou les niveaux d'activité, ce qui peut s'avérer très utile en ETO, puisque les volumes sont extrêmement variables.

3.3.1 Typologie des coûts

Il existe plusieurs typologies des coûts, et l'utilisation de l'une ou de l'autre influence grandement les méthodologies de calcul et de structuration de coûts. Dans ce travail, nous irons sur une catégorisation en quatre classes.

Le diagramme apparaissant sur la figure 3.2 résume la logique de classement des coûts dans une catégorie ou une autre.

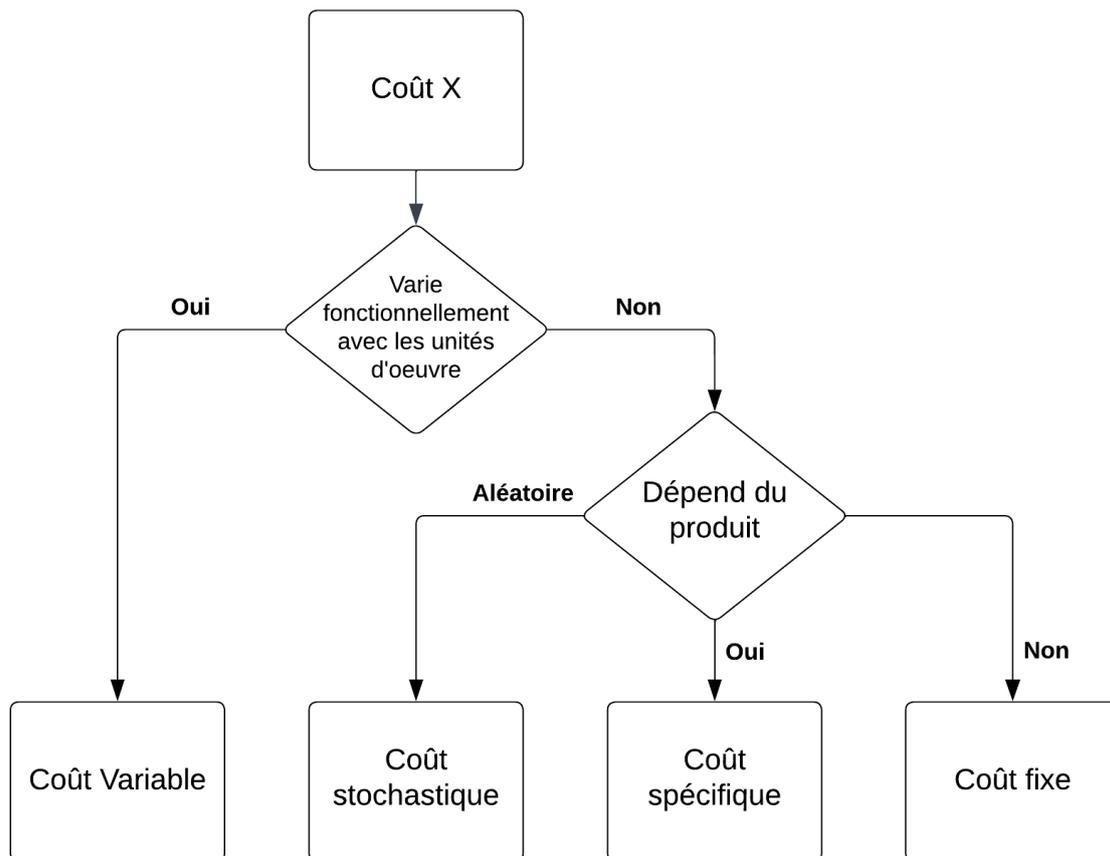


FIG. 3.2 : Diagramme de typologie des coûts du modèle

Le modèle proposé repose sur une distinction entre les coûts fixes et les coûts variables, puis au sein de ces mêmes coûts entre les coûts déterministes et les coûts non-déterministes. Nous introduirons aussi le concept de coûts spécifiques.

Définition 3.1

Les coûts fixes sont des coûts constants en fonction des unités d'œuvre et des produits. Ils ne varient pas avec la variation du nombre d'unité d'œuvres ni avec la variation du produit.

Définition 3.2

Les coûts variables sont les coûts qui varient en fonction des variations de l'unité d'œuvre.

Définition 3.3

Les coûts spécifiques sont des coûts qui varient d'un projet à l'autre, sans pour autant être des fonctions de l'unité d'œuvre. C'est-à-dire que pour une même valeur d'unité d'œuvre, ils peuvent renvoyer des montants différents.

Définition 3.4

Les coûts non déterministes ou stochastiques sont les coûts qui pour une même valeur d'unité d'œuvre et pour un même produit fabriqué à deux instances différentes renvoient des montants différents. Ils se démarquent des coûts spécifiques par une impossibilité à les prédire en amont de manière exacte, car ils ne dépendent fonctionnellement d'aucun élément, tandis que les coûts spécifiques sont directement rattachés au projet.

La nécessité de définir un nouveau cadre conceptuel dans ce travail, qui diffère des notions de l'état de l'art s'explique par plusieurs raisons :

- Les définitions de l'état de l'art sont souvent mathématiquement non rigoureuses. Si l'on se réfère à une typologie en coûts directs et indirects, celle-ci ne permet pas de manipulations mathématiques formelles. En effet, la distinction entre ces coûts est qualitative. Les coûts indirects sont définis, puis répartis en utilisant la notion d'UO. Or dans notre travail, les UO permettront eux-mêmes la distinction.
- Les typologies classiques ne sont pas des partitions de l'ensemble des coûts d'une entreprise. L'union de l'ensemble des coûts fixes et de l'ensemble des coûts variables n'est pas égale à l'ensemble des coûts d'une entreprise. Il existe des coûts, notamment les coûts stochastiques, qui n'appartiennent ni à une catégorie ni à l'autre.

Ces limites expliquent donc l'utilité de formaliser les définitions de ces notions qui nous permettront de construire le reste du modèle mathématique.

3.3.2 Analogie entre le calcul des coûts stochastiques et les pertes financières

Pour construire le modèle, nous emprunterons certaines notions de l'ingénierie financière et les appliquerons au présent travail. Pour cela, nous ferons l'analogie entre l'estimation des pertes financières dans un portefeuille et les coûts stochastiques.

En effet, les méthodes présentées dans le chapitre permettent d'estimer la VaR pour un portefeuille. Or il est possible d'assimiler les coûts stochastiques à cette dernière, puisque ce sont effectivement des pertes financières sur un projet, et qui représentent donc des risques financiers pour l'entreprise à cause de leur nature incertaine.

Le tableau 3.1 comporte les différents éléments permettant d'effectuer cette analogie. Cela nous permettra par la suite d'adapter les méthodes de l'ingénierie financière à notre problématique.

Modèle proposé	Ingénierie Financière
Coût Stochastique	VaR
Mesure statistique	Mesure statistique
Dépend de plusieurs variables aléatoires	
Cycle de production	Mouvements du marché
Formule de coût	Fonction de pertes
Risques de production	Risques financiers

TAB. 3.1 : Analogie entre le modèle proposé et l'ingénierie financière

3.3.3 Construction du modèle de coûts

Le modèle utilisé dans ce travail s'inspire à la fois des modèles classiques de la comptabilité de gestion et des outils quantitatifs de gestion des risques. En effet, le modèle se doit de traduire la réalité aussi fidèlement que possible tout en utilisant des ressources raisonnables par rapport au contexte des entreprises.

La construction du modèle se fait donc en réconciliant les contraintes et données réelles avec les outils et techniques à notre disposition.

Unité d'œuvre

Une unité d'œuvre est une mesure de la quantité de travail effectuée. Cette mesure peut être exprimée en termes de temps, d'effort, de nombre de produits fabriqués ou de toute autre mesure pertinente pour l'activité concernée.

Notre modèle repose sur le choix d'une unité d'œuvre commune à tous les coûts, puisque c'est elle qui nous permettra de faire la distinction entre les types de coûts.

Soit $UO(p)$ le vecteur colonne représentant les unités d'œuvres que consomme un produit p le long de sa chaîne de valeur :

$$UO(p) = \begin{pmatrix} UO_0(p) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ UO_i(p) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ UO_{u-1}(p) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Avec :

- $UO(p)$: vecteur colonne de dimension $1 * u$ dont les éléments sont les unités d'œuvres consommées par la fabrication d'un produit p sur chaque activité.

Chapitre 3. Solution proposée : Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order

- p : produit que l'entreprise souhaite fabriquer et dont on cherche à estimer le coût. Pour deux produits différents, le vecteur d'unités d'œuvres consommées est différent.
- $UO_i(p)$: ième élément du vecteur, est égal à la quantité d'unité d'œuvres que consomme le produit p dans l'activité i .
- i : indice des éléments du vecteur. Désigne les activités par lesquels le produit passe et qui génèrent des coûts variables en fonction de l'unité d'œuvre.
- u : nombre d'activités pouvant générer des coûts variables le long de la chaîne de valeur du produit p .

Coûts variables

Soit X un vecteur colonne variable dans \mathbb{R}^u qui s'écrit :

$$X = \begin{pmatrix} x_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{u-1}(p) \end{pmatrix}$$

On définit la fonction f qui renvoie les coûts variables en fonction des unités d'œuvre. Celle-ci peut s'écrire comme suit :

$$f: \mathbb{R}^u \rightarrow \mathbb{R}^+ \quad (3.2)$$

$$X \mapsto f(X) \quad (3.3)$$

$$f(X) = f_0(x_0) + \dots + f_i(x_i) + \dots + f_{u-1}(x_{u-1}) \quad (3.4)$$

C'est une fonction dont l'ensemble de départ contient des vecteurs de dimension u et dont l'ensemble d'arrivée est un ensemble de scalaires.

En remplaçant par le vecteur $UO(p)$ on obtient :

$$CV = f(UO(p)) = f_0(UO_0(p)_0) + \dots + f_i(UO_i(p)_i) + \dots + f_{u-1}(UO_{u-1}(p)_{u-1}) \quad (3.5)$$

Par définition, les f_i sont les fonctions associant les unités d'œuvres du produit à l'étape i à un montant $f_i(UO_i(p)_i)$ qui sera le montant du coût variable généré par l'activité i . On a alors :

$$f_i: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+ \quad (3.6)$$

$$x_i \mapsto f(x_i) \quad (3.7)$$

$$(3.8)$$

Chapitre 3. Solution proposée : Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order

Ainsi, les coûts variables induits par le produit p peuvent être définis comme suit :

$$CV(p) = f(UO(p)) = f_1(UO_1(p)) + \dots + f_i(UO_i(p)) \dots + f_{u-1}(UO_{u-1}(p)) \quad (3.9)$$

tel que :

- $CV(p)$: somme des coûts variables induits par la fabrication du produit p .

Coûts fixes

L'un des principaux problèmes rencontrés dans la répartition des coûts fixes est l'absence de lien direct entre ces coûts et les unités produites ou les activités spécifiques. Contrairement aux coûts variables qui sont directement liés à la production, les coûts fixes ne peuvent pas être attribués de manière évidente et précise à une unité particulière. Cela crée une difficulté dans l'évaluation du coût réel de chaque produit ou service et peut entraîner une distorsion des informations financières et de gestion.

Ce modèle propose de les répartir selon la fraction d'unité d'œuvre consommée par le produit sur la consommation d'unités d'œuvre de référence.

Soit CF_h le total des coûts fixes de l'entreprise sur un horizon de temps h . Si la quantité d'unités d'œuvres consommées par l'entreprise sur un horizon de temps h est μ , alors les coûts fixes à imputer au produit peuvent être déterminés comme suit :

$$CF(p) = \frac{CF_h}{\mu} \cdot UO(p) \cdot U \quad (3.10)$$

tel que :

- $CF(p)$: montant des coûts fixes à inclure dans le coût du produit p .
- CF_h : total des coûts fixes de l'entreprise sur un horizon de temps h .
- h : horizon de temps fixé, par exemple des coûts fixes mensuels, annuels ou journaliers.
- μ : quantité unités d'œuvres consommées par l'entreprise sur un horizon de temps h .
- U : vecteur colonne dont tous les éléments sont égaux à 1, de dimension égale à la dimension du vecteur ligne $UO(p)$. Ce vecteur s'écrit :

$$U = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix}$$

- $UO(p)$: vecteur d'unité d'œuvres comme défini plus haut.

- p : produit dont nous cherchons à estimer le coût.

Pour déterminer le μ , plusieurs méthodes sont possibles, selon les données disponibles et la précision voulue. Pour déterminer sa valeur en amont, on peut par exemple utiliser des méthodes de prévisions.

Le choix de la méthode de calcul est un choix stratégique qui dépend particulièrement des tendances de l'entreprise et des risques qu'elle peut supporter. Plus exactement :

- Prévisions de consommation : cette méthode implique de prédire la consommation des unités d'œuvres durant l'horizon h pour permettre de répartir efficacement les coûts fixes entre les projets. Cela peut s'avérer particulièrement utile pour les entreprises en expansions ou qui ont une bonne visibilité sur le comportement de la demande. Cela peut néanmoins s'avérer fâcheux si les prévisions sont au-dessus de la réalité, et que les coûts fixes s'en trouvent non-couverts.
- Moyenne de consommation : Cette méthode suggère de répartir les coûts fixes sur une moyenne de consommation des unités d'œuvres sur h . Cette méthode implique la disponibilité d'une certaine liquidité pour se prémunir contre les écarts négatifs entre la moyenne et la consommation réelle, le temps d'atteindre un pic positif qui permettra de rééquilibrer la balance de l'entreprise. Cette méthode est particulièrement adaptée pour les entreprises qui ont un niveau de consommation des unités d'œuvre relativement stable ou du moins symétrique par rapport à une moyenne.

Coûts Spécifiques

On définit les coûts spécifiques comme des coûts indépendants des unités d'œuvres mais qui dépendent du produit. C'est-à-dire qu'en supposant un environnement externe statique (pas de variance des coûts de la marchandise par exemple) ces coûts restent les mêmes pour un même produit.

Les coûts spécifiques peuvent être modélisés par le vecteur ligne $CSP(p)$ suivant :

$$CSP(p) = (csp_0(p), \dots, csp_\nu(p), \dots, csp_{\eta(p)-1}(p)) \quad (3.11)$$

Avec :

- $CSP(p)$: vecteur ligne de dimension $\eta(p)$ dont les éléments sont le montant des différents coûts spécifiques associés à un projet.
- p : produit que l'entreprise souhaite fabriquer et dont on cherche à estimer le coût. Pour deux produits différents, le vecteur de coûts spécifiques est différent.
- $csp_\nu(p)$: ν ème élément du vecteur, est égal au montant du ν ème coût spécifique que l'entreprise doit payer pour le produit p .
- ν : indice des éléments du vecteur. Désigne les coûts spécifiques du produit p , tel que $\nu \in [0, \eta(p) - 1]$.

Chapitre 3. Solution proposée : Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order

- $\eta(p)$: nombre de coûts spécifiques associés au produit p . Ce nombre diffère d'un produit à un autre.

Le coût spécifique total $CSP_T(p)$ supporté par un produit p est donc égal à la somme des éléments de la matrice $CSP(p)$, qui peut être calculé comme suit :

$$CSP_T(p) = CSP(p) \cdot V \quad (3.12)$$

tel que :

- $CSP_T(p)$: montant des coûts spécifiques du produit p .
- p : produit dont nous cherchons à estimer le coût.
- $CSP(p)$: vecteur ligne des coûts spécifiques du produit p de dimension $\eta(p)$.
- V : vecteur colonne dont tous les éléments sont égaux à 1, de dimension $\eta(p)$. Ce vecteur s'écrit :

$$V = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix}$$

Coûts stochastiques

On considère comme coûts stochastiques les coûts qui pour un même vecteur $UO(p)$ ont des montants différents et cela quelle que soit l'unité d'œuvre ou le produit choisi. Ce sont des coûts dont l'occurrence est non-déterministe.

Soit la variable aléatoire X associée au coût stochastique cs d'un projet. Le domaine de définition D de X est l'ensemble des valeurs que peut prendre le coût stochastique dans ce projet. Par exemple, si le coût en question est le coût de logistique retour, il peut être égal au coût de retour par voiture, ou bien par camion, par société de transport etc...

Pour $X = 0$ l'entreprise ne paie rien. En revanche, pour $X \neq 0$ l'entreprise paie le montant X . Soit $E[X]$ l'espérance mathématique de la variable X .

On pose Y variable aléatoire associée à la portion du prix payé par le client accordée au paiement des coûts stochastiques du projet. La variable Z est le profit de l'entreprise c'est-à-dire que :

$$Z = Y - X \quad (3.13)$$

Les propriétés de l'espérance nous donnent que :

$$E[Z] = E[Y] - E[X] \quad (3.14)$$

Le coût imputé doit alors renvoyer le profit à une espérance non-nulle, c'est-à-dire que :

$$E[Z] \geq 0 \quad (3.15)$$

$$E[Y] - E[X] \geq 0 \quad (3.16)$$

$$E[Y] \geq E[X] \quad (3.17)$$

Or, l'objectif du modèle est de passer à l'assignation systématique d'un montant à payer par le client. Donc pour chaque transaction, ou projet, la variable aléatoire Y devient une variable déterministe, c'est à dire qu'elle prend une valeur Y qui peut certes être différente d'un projet à un autre mais qui a une probabilité d'occurrence de 1. L'équation 3.17 devient alors :

$$Y \geq E[X] \quad (3.18)$$

Or, ce pricing suppose que les coûts de l'entreprise convergent bien vers l'espérance, ce qui est certes le cas mais à un certain degré de risque. De plus, l'espérance n'est pas toujours connue à l'avance, il faut donc l'estimer, toujours avec un taux d'erreur. Pour cela, la solution proposée est la **Simulation de Monte Carlo**.

Le tableau 1.3 comporte les caractéristiques des différentes méthodes de la littérature. Les hypothèses de linéarité et normalité étant des hypothèses fortes, et les données historiques n'étant pas nécessairement disponibles, la méthode qui se présente d'elle-même est celle de Monte-Carlo.

Pour chaque coût, en déterminant une distribution des échantillons, et une plage il est possible de construire une simulation de Monte Carlo répondant à la question : "**A quelle probabilité le coût cs est-il inférieur à Y ?**". Il suffira, pour une probabilité acceptable pour l'entreprise, de choisir l'espérance renvoyée par la simulation.

Le coût estimé est donc le suivant :

$$Y = MC[X, \alpha, n] \quad (3.19)$$

où :

- Y : coût estimé pour couvrir les coûts stochastiques à une probabilité $1 - \alpha$.
- X : variable aléatoire du coût stochastique cs .
- α : taux de risque accepté par l'entreprise.
- n : nombre d'itérations choisies pour la simulation de Monte Carlo.
- $MC[X, \alpha, n]$: Espérance monétaire renvoyée par la simulation de Monte Carlo pour la variable X , avec n itérations et pour un risque de α

Pour une même entreprise, il est possible d'avoir plusieurs coûts stochastiques différents. Soit θ l'indice désignant d'un coût stochastique donné. Soit la variable Y_θ égale au coût stochastique de désignation θ . Si Y_θ est une variable composée d'une somme de variables aléatoires X_k (par exemple plusieurs facteurs différemment distribués, tous contribuant au coût final), alors nous l'estimerons par Y_θ comme suit :

$$Y_\theta = MC[X_0 \dots X_k \dots X_{K-1}, \alpha, n] \quad (3.20)$$

- Y_θ : coût estimé pour couvrir le coût stochastique θ .
- α : taux de risque accepté par l'entreprise pour le coût θ .
- n : nombre d'itérations choisies pour la simulation de Monte Carlo.
- X_k : variable aléatoire dont le domaine de définition est les différents montant que l'entreprise peut payer pour un événement aléatoire k (une panne par exemple).
- k : indice des variables aléatoires, fait référence aux coût stochastiques de différents événements pouvant concerner le coût désigné par θ (par exemple coût de pannes 1, coût de panne 2...). $k \in [0, K - 1]$.
- K : nombre d'évènements qui conditionnent le coût θ .

Ainsi, le calcul des coûts stochastiques totaux payés par le client pour le projet p se fait comme suit :

$$CS(p) = \sum_{\theta=0}^{\Theta-1} Y_\theta \quad (3.21)$$

Avec :

- $CS(p)$: coût total à assigner au client pour couvrir les frais stochastiques, pour un projet p .
- Θ : nombre de coûts stochastiques différents dans la structure de coûts finale de l'entreprise.
- θ : indice des différents coûts stochastiques, tel que $\theta \in [0, \Theta - 1]$.
- Y_θ : coût à couvrir pour l'activité θ .

Coût total estimé

$$C(p) = CV(p) + CF(p) + CSP_T(p) + CS(p) \quad (3.22)$$

tel que :

- $C(p)$: coût total du produit p .
- $CV(p)$: coûts variables du produit p comme calculés dans l'équation 3.9.
- $CF(p)$: coûts fixes du produit p comme calculés dans l'équation 3.10
- $CSP_T(p)$: coûts spécifiques du produit p comme calculés dans l'équation 3.12.
- $CS(p)$: coûts stochastiques du produit p comme calculés dans l'équation 3.21.

3.4 Algorithme d'implantation du modèle

Le **Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le Pricing en Engineer-To-Order** bien que général, dépend fortement de l'environnement de mise en œuvre. Les paramètres du modèle mathématique construit plus haut varient selon les processus, le comportement des flux et autres. L'algorithme proposé pour l'implantation du modèle est présenté sur la figure 3.3 selon la norme **BPMN 2.0**.

Bien que BPMN 2.0 soit principalement utilisé pour modéliser les processus métier, cette norme peut également être utilisée pour représenter des algorithmes. Nous avons utilisés BPMN 2.0 pour la modélisation de l'algorithme d'implantation du modèle car ce dernier dépend des processus métiers de l'entreprise, il vaut donc mieux avoir une représentation claire et facilement compréhensible. BPMN 2.0 est une norme largement utilisée et reconnue dans l'industrie, ce qui permet de standardiser la modélisation des processus et des algorithmes ce qui rend l'algorithme plus clair et facilement compréhensible pour les différents acteurs impliqués dans la production.

Chapitre 3. Solution proposée : Modèle Stochastique d'Estimation des Coûts pour le pricing en Engineer-To-Order

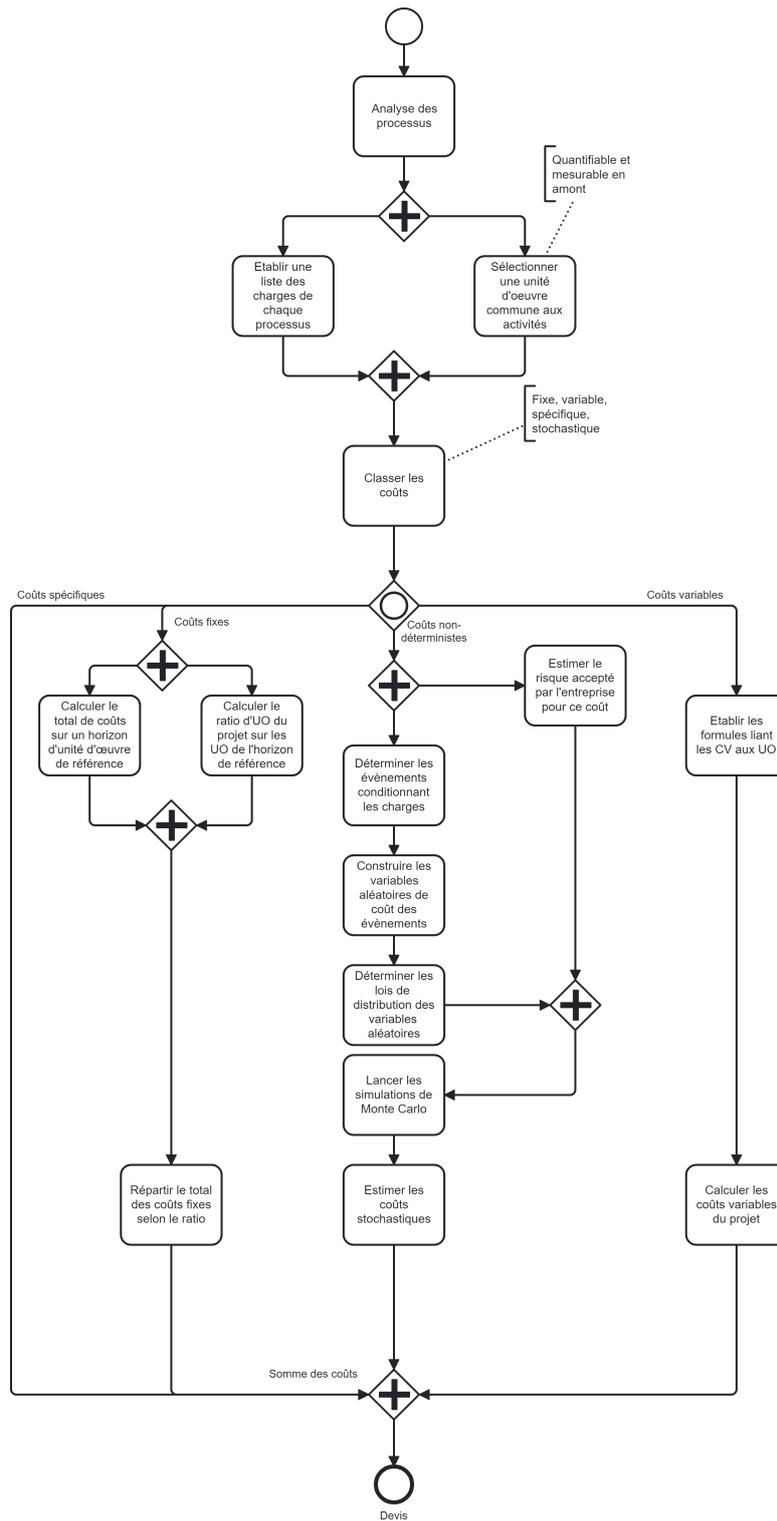


FIG. 3.3 : Algorithme d'implantation du modèle stochastique d'estimation des coûts pour le pricing en Engineer-To-Order

Les étapes de déploiement du modèle en entreprise sont :

1. L'analyse des processus.
2. Le choix d'une unité d'oeuvre.

3. L'énumération et le classement des coûts.
4. La formalisation mathématique des coûts.
5. L'estimation finale

Le déroulement de ces étapes est modélisé sur la figure 3.3 et expliqué dans la suite de cette section.

3.4.1 Analyse des processus

L'analyse des processus joue un rôle essentiel dans l'estimation des coûts d'une entreprise. En examinant en détail les différentes étapes et activités nécessaires à la réalisation d'un produit ou d'un service, cette approche permet de mieux comprendre comment les coûts sont générés et répartis au sein de l'organisation.

Tout d'abord, l'analyse des processus permet d'identifier et de décrire toutes les activités impliquées dans la réalisation d'un produit ou d'un service, ce qui permet ensuite de savoir quelles sont les activités générant les coûts, et suivant quelle logique. Cela nous permettra de comprendre le comportement des flux financiers, matériels, informationnels etc au sein de l'entreprise, et par quoi ceux-ci sont conditionnés.

3.4.2 Choix d'une unité d'œuvre

L'unité d'œuvre représente la base de quantification des ressources utilisées ou des activités effectuées, permettant ainsi d'estimer les coûts associés. C'est un élément clé pour établir des comparaisons pertinentes, prendre des décisions éclairées et optimiser la gestion des ressources.

Cette étape consiste en la sélection d'une unité d'œuvre commune aux différentes activités, sur la base de laquelle nous classerons les différents coûts.

Cette unité d'œuvre doit être soumise aux conditions suivantes :

- **Mesurabilité** : Une bonne unité d'œuvre doit être mesurable de manière objective et fiable. Elle doit permettre une quantification précise de l'activité ou de la consommation des ressources.
- **Pertinence** : L'unité d'œuvre doit être directement liée à l'activité ou au processus mesuré. Elle doit représenter de manière précise et significative la quantité de travail effectuée ou la consommation des ressources nécessaires.
- **Quantifiable en amont** (*pour les ETO*) : Les quantités d'unité d'œuvre consommées doivent être calculables en amont de la production en ETO pour permettre les prévisions.

A la fin de cette étape, nous aurons une unité d'œuvre établie et donc le vecteur d'unité d'œuvre de l'équation 3.1.

3.4.3 Énumération et classement des coûts

L'unité d'œuvre étant choisie, et les processus analysés, il est possible de faire un listing des différents coûts de l'entreprise. Après quoi, il sera possible de classer les coûts en suivant la logique de l'algorithme présenté sur la figure 3.2. Les étapes sont les suivantes :

1. Comparer le comportement du coût avec les unités d'œuvre. Si le coût :
 - dépend fonctionnellement de l'unité d'œuvre : le coût est une fonction de l'unité d'œuvre, c'est donc un coût **variable**
 - ne varie pas fonctionnellement avec l'unité d'œuvre : passer à l'étape 2.
2. Comparer le comportement du coût d'un projet à un autre. Si le coût est :
 - Variable en fonction du projet : c'est un coût **spécifique**.
 - Fixe en fonction du projet : c'est un coût **fixe**.
 - Aléatoirement variable : c'est un coût **stochastique**.

Une fois le classement fait, il est possible de passer à l'étape suivante.

3.4.4 Formalisation mathématique des coûts

Cette étape désigne l'identification des fonctions et matrices du modèle citées plus haut. C'est une des étapes les plus complexes de l'algorithme, car une erreur de raisonnement ou de calcul peut impacter les résultats très fortement. La formalisation est différente pour chaque coût :

- Coûts variables : Pour les coûts variables, cela signifie la formalisation de la relation entre les unités d'œuvre et le coût. Pour chaque coût variable, il faudra donc identifier les fonctions de l'équation 3.9. Cela peut se faire de plusieurs manières, en examinant par exemple l'état de l'art du calcul de coût, en faisant des régressions linéaires, du machine learning ou d'autres méthodes.
- Coûts fixes : Cette partie consiste à sélectionner un horizon de calcul des coûts fixes h comme par exemple les coûts fixes sur un mois, ou sur 50 heure-homme ou autre selon l'unité d'œuvre choisie.

Sur cette horizon, il faudra ensuite calculer μ , la moyenne des unités d'œuvre consommées par l'entreprise sur l'horizon de temps h .

Ainsi, il sera possible de répartir les coûts fixes sur les différents produits, comme sur l'équation 3.10.

- Coûts spécifiques : Ces coûts ne nécessitent pas de traitement mathématique avancé, puisqu'ils sont liés au projet de manière explicite. Il suffit de les identifier à l'ouverture de projet.

- Coûts stochastiques : Après avoir identifié les coûts stochastiques, il est impératif d'identifier les événements donnant lieu à ces coûts. Après cela, il est possible de construire des séries chronologiques en fonction des unités d'œuvre, par exemple une panne chaque 50 heures-machines si ces dernières sont les unités d'œuvre. Une fois cela fait, il est possible de calculer la probabilité d'occurrence d'une panne pour une matrice $UO(p)$ donnée. Enfin, chaque événement doit être relié à un montant, pour permettre l'estimation de l'espérance et donc du coût finale conformément à l'équation 3.19.

3.4.5 Estimation finale

L'étape finale est l'estimation numérique des coûts. Il est alors possible d'appliquer l'équation 3.22 et de sommer tous les coûts pour obtenir la formule finale.

Ceci est la dernière étape de déploiement du modèle, et à sa sortie on obtient une structure de coût établie. Ces étapes sont les étapes de paramétrisation du modèle, la structure obtenue ici permet donc de calculer le coût optimal à couvrir pour un projet pour assurer la rentabilité de l'entreprise sur l'horizon h .

3.5 Applications du modèle

Le modèle proposé offre de nombreuses applications potentielles dans divers domaines, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles perspectives et opportunités :

1. **Estimation du potentiel d'économies d'échelles internes** : le modèle permet de modéliser le comportement des coûts en fonction des unités d'œuvres (voir la typologie 3.2), ce qui peut donner une visibilité sur le potentiel d'économies d'échelle internes.
2. **Calcul des indicateurs de performance** : ce modèle permet le calcul des différents indicateurs économiques, et ouvre la perspective vers l'élaboration d'un tableau de bord et la prise de décision à tous les niveaux (stratégiques, tactiques et opérationnels). Cela se fait notamment en comparant les coûts prédits et les coûts infligés.
3. **Mise en place de processus de diminution des coûts** : étant donné que le modèle donne une visibilité sur les coûts des différents processus, il est possible de suivre si un processus en particulier génère des coûts anormalement élevés. Ainsi, on peut cibler ce processus et déployer des ressources ou des efforts pour l'optimiser.

3.6 Limites du modèle

Comme beaucoup de modèles, celui-ci présente des limites théoriques et pratiques.

- **Garbage In, Garbage Out** : la qualité des outputs du modèle dépend fortement de la qualité des inputs. Si les données d'entrées ne sont pas représentatives de la réalité, le modèle ne peut pas compenser cela.
- **Suppose que le volume est représentatif de l'échelle de production** : en économie il existe une distinction théorique entre l'échelle de production, et le volume de production. Pour des raisons de simplification, le modèle approche une notion par l'autre.
- **Sous-optimal pour des stratégies autres que ETO** : cela est dû au fait que le modèle tente de proposer une estimation avec un minimum d'information et pour un très large éventail de produits avec une importante variabilité de coûts. Pour d'autres stratégies, une meilleure précision est possible avec des modèles requérant plus d'information.

Conclusion

En conclusion, nous avons développé dans ce chapitre un nouveau modèle d'estimation des coûts en ETO, qui se positionne au centre de trois techniques de l'état de l'art. Ce modèle reprend des notions d'ingénierie financière et de structure des coûts pour s'insérer dans une démarche de maîtrise des coûts pour les PME. Nous avons énuméré et expliqué les étapes d'implantation et d'utilisation de ce modèle, ce qui nous permettra de passer à son déploiement au sein de SARL Auzia dans le prochain chapitre. Nous avons aussi énuméré diverses applications alternatives potentielles de cette solution, pour souligner sa polyvalence et les enjeux pratiques qui l'entourent. Enfin, nous avons identifié certaines limites théoriques relatives à la nature du modèle, et d'autres pratiques découlant directement de son environnement.

Chapitre 4

Déploiement de la solution au sein de SARL Auzia

Introduction

Le présent chapitre est dédié au déploiement de la solution présentée en 2.5 au sein de SARL Auzia. Nous déroulerons les étapes de l'algorithme d'implantation pour modéliser la structure de coûts de l'entreprise. Nous appliquerons ensuite le modèle au cas d'une moto soufflante, puis nous finirons sur un exemple d'application alternative du modèle et une conclusion.

4.1 Choix de l'unité d'œuvre

Pour répondre à notre problématique, l'unité d'œuvre que nous allons sélectionner doit être quantifiable avant la production, mais aussi permettre la comparaison entre deux pièces mécaniques.

Généralement, on utilise la quantité produite, mais étant donné la différence des pièces mécaniques commandées par les clients, il est impossible de mesurer le travail par la quantité.

De plus, la solution doit être intégrée en amont de la production, ce qui pose la contrainte de temporalité de la disponibilité de l'information. Avant l'ouverture de projets, les informations disponibles sont les modèles ou plans des pièces commandées. A partir de ces derniers, il est possible au bureau d'étude d'estimer **le temps** de fabrication nécessaire sur les différentes machines.

L'unité d'œuvre la plus adaptée au calcul du coût des pièces mécaniques est le temps nécessaire à la fabrication, ou les **heures-machine**. En effet, l'heure-machine :

- Consomme les ressources de l'entreprise de **manière quantifiable** (en une heure de fabrication sur n'importe quel poste de travail, on utilise des consommables, on use la machine, on réquisitionne de la main d'œuvre...). Elle permet donc la normalisation des coûts et la comparaison entre les pièces.
- Permet de discriminer entre les pièces mécaniques de façons objectives. C'est à dire qu'il donne une mesure scientifique, réelle et non perçue, de la valeur d'une pièce par rapport à l'autre.

4.2 Énumération et classement des coûts

Dans cette partie, nous allons énumérer les différents coûts de l'entreprise. Nous définirons ces coûts et expliquerons leur comportement, pour ensuite faire un listing de chaque coût et de sa typologie.

4.2.1 Coûts du processus de maintenance

Les opérations de maintenance diffèrent selon les machines, de même que les consommables, ce qui fait du coût de maintenance une dépense à imputer à l'utilisation de chaque

machine individuellement. On distingue ainsi deux types de maintenances différentes, la préventive et la corrective, ce qui nécessite deux approches de calcul de coûts différentes.

Maintenance Préventive

Le plan de maintenance inclue des opérations de maintenance qui peuvent être systématique ou conditionnelles, néanmoins nous les traiterons toutes comme systématiques. Celles qui sont conditionnelles peuvent être assimilées à de la maintenance systématique car :

1. Les opérations de maintenance préventive conditionnelles ont une fréquence pratiquement constante.
2. Le coût de contrôle de vérification de la condition est nul ou presque, car elle se fait par les ouvriers sans arrêt de production.

Dans ce cas, le **coût horaire de maintenance systématique** d'une machine i se calculera comme suit :

$$C_{MS,i} = \sum_{j=0}^{k-1} f_{ij} (nbr_{ij} \cdot c_{MO} \cdot t_{ij} + C_{conso,j}) \quad (4.1)$$

avec :

- $C_{MS,i}$: coût horaire de la maintenance systématique d'une machine i .
- i : désigne une machine i , tel que $i \in [0, u - 1]$ avec u nombre de machines.
- j : désigne une opération de maintenance systématique à effectuer sur la machine i , tel que $j \in [0, k - 1]$.
- k nombre d'opérations de maintenance systématique à effectuer sur la machine i .
- f_{ij} : fréquence horaire de l'opération j . Chaque opération j effectuée sur une machine i a sa propre fréquence, il faut donc ramener cette fréquence à une fréquence horaire pour respecter les dimensions de la formule.
- nbr_{ij} : nombre d'ouvriers nécessaire au bon déroulement de l'opération j affectée à la machine i .
- c_{MO} : coût horaire de la main d'œuvre.
- t_{ij} : temps nécessaire au déroulement de l'opération de maintenance j sur la machine i .
- $C_{conso,ij}$: coût total des consommables utilisés lors de l'opération de maintenance j sur la machine i .

Étant donné que le salaire des employés est comptabilisé plus bas, on pose $c_{MO} = 0$ et l'équation devient alors :

$$C_{MS,i} = \sum_{j=0}^{k-1} f_{ij} C_{conso,j} \quad (4.2)$$

Ce coût est considéré comme un **coût variable**, car il varie avec l'unité d'œuvre, c'est un coût par heure-machine.

Maintenance Corrective

La maintenance corrective est une pratique essentielle pour assurer le bon fonctionnement d'un équipement ou d'un système en cas de défaillance ou de panne. Elle peut être coûteuse et affecter la rentabilité des entreprises si elle n'est pas gérée efficacement. Chaque défaillance j pouvant avoir lieu sur une machine i inflige un coût à l'entreprise qui peut être calculé comme suit :

$$C_{MCij} = nbr_{ij} \cdot c_{MO} \cdot t_{ij} + C_{conso,ij} + c_{op} \cdot t_{ij} \cdot nbr_{i,op} \quad (4.3)$$

Avec :

- C_{MCij} : coût de l'opération de maintenance corrective infligé à l'entreprise suite à la panne j sur une machine i .
- i : désigne une machine i , tel que $i \in [0, u - 1]$ avec u nombre de machines.
- j : désigne la défaillance ou panne potentielle de la machine, tel que $j \in [0, n_i - 1]$.
- n_i : nombre de pannes potentielles estimé de la machine i .
- nbr_{ij} : nombre d'ouvriers affectés à l'opération de gestion de la panne j sur la machine i .
- c_{MO} : coût horaire de la main d'œuvre affectée à l'opération de maintenance corrective j sur la machine i .
- t_{ij} : temps nécessaire à l'opération j sur la machine i .
- $C_{conso,ij}$: coût total des consommables nécessaires à la résolution de la panne j sur la machine i , incluant les pièces de rechange, le lubrifiant, l'huile etc.
- c_{op} : coût horaire des opérateurs de la machine.
- $nbr_{i,op}$: nombre d'opérateurs de la machine i qui sont sans activité le temps de la panne.

Comme pour la maintenance systématique, le salaire des opérateurs est pris en compte dans le processus ressources humaines, on pose donc ici $c_{op} = 0$. La variable c_{MO} est distinctes de c_{op} , puisqu'elle désigne la main d'œuvre de réparation. Si la réparation est interne, le coût de main d'œuvre est déjà comptabilisé ce qui implique de poser $c_{MO} = 0$. Par contre, si la réparation est externe, le coût horaire de la main d'œuvre de réparation est non-nul. Par soucis de généralisation, nous poserons c_{MO} non-nulle. La formule finale obtenue est la suivante :

$$C_{MCij} = C_{conso,ij} + c_{op} \cdot t_{ij} \cdot nbr_{i,op} \quad (4.4)$$

C'est un **coût stochastique** car l'occurrence n'en est pas certaine. En effet, ce coût dépend du nombre de pannes qui peuvent avoir lieu sur une période donnée, et les pannes sont des évènements stochastiques.

4.2.2 Coûts du processus de production

Le calcul des coûts de production est crucial pour les entreprises, car cela leur permet de déterminer le coût total de la production d'un bien ou d'un service. En comprenant ces coûts, les entreprises peuvent fixer des prix de vente rentables et prendre des décisions éclairées sur la façon de maximiser leur rentabilité. Les coûts de production peuvent également aider les entreprises à évaluer leur efficacité opérationnelle et à identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées pour réduire les coûts.

Coût d'étude

Le coût interne des bureaux d'étude peut être significatif pour les entreprises de production industrielle qui doivent constamment innover pour rester compétitives. Les coûts de personnel qualifié, d'outils de conception et de logiciels spécialisés nécessaires pour mener à bien des projets de conception peuvent rapidement s'accumuler.

L'activité réelle de ce département dépend particulièrement de la complexité du projet. En effet, moins le projet est familier à l'entreprise (nouveau modèle, plans indisponibles etc), plus il prend de temps de conception. Mais ce temps est incluse dans le salaire des ingénieurs d'études, qui sont des salariés payés quelle que soit leur productivité, c'est donc un coût fixe. De même, les coûts liés au matériel informatique, aux licences etc.

L'amortissement des machines

L'amortissement est un terme comptable qui définit la perte de valeur d'un bien immobilisé de l'entreprise, du fait de l'usure du temps ou de l'obsolescence. La dévalorisation des machines étant directement liée à la production, ce coût sera attribué au processus de production. Dans notre cas, on utilisera **l'amortissement linéaire**, d'une part à la demande explicite de l'entreprise, et d'autre part car :

- L'amortissement variable : nécessite la connaissance des unités d'œuvre, or les unités d'œuvre de l'entreprise ne sont ni connues ni fixes.
- L'amortissement dégressif ferait varier les coûts de la pièce qualitativement, et pourrait faire perdre des clients réguliers à l'entreprise. Pour une machine i ce coût est donné ainsi :

$$C_{amorti,i} = \frac{p_i}{d} \quad (4.5)$$

avec : i : désigne la machine i , entre 0 et le nombre de machines-1.

$C_{amorti,i}$: coût horaire d'amortissement de la machine i (da/h).

p_i : prix d'achat de la machine i en dinar algérien.

d : durée d'amortissement en heures (nombre d'heures ouvrables multipliées par les jours ouvrables du nombre d'années d'amortissement).

Le coût d'amortissement est un **coût fixe**, qui doit être récupéré indépendamment du volume de production.

La consommation électrique des machines

La consommation électrique des ateliers de production est une dépense considérable, à distinguer de la consommation des bureaux. En effet, les machines consomment selon le niveau de production, Le coût de la consommation électrique dépend de la puissance de la machine. Il faudra multiplier la puissance par le nombre d'heures de fonctionnement puis par le coût du kilowatt heure en Algérie. le coût horaire s'obtient donc ainsi :

$$C_{elt,i} = P_i \cdot p_{kwh} \quad (4.6)$$

avec :

- $C_{elt,i}$: coût horaire de la consommation d'électricité de la machine i .
- i : désigne la machine i , avec $i \in [0, n - 1]$, n nombre de machines.
- P_i : puissance de la machine i en KW.
- p_{kwh} : prix du kilowatt heure en Algérie.

Coût de la matière première

Ce coût désigne la somme des coûts individuels de chaque matériau utilisé dans le projet. En effet, un seul projet peut nécessiter plusieurs matériaux différents, le coût total est donc donné par :

$$C_{mp} = \sum_{m=0}^{M-1} p_m \cdot q_m \quad (4.7)$$

Avec :

- C_{mp} coût de la matière première utilisée dans le projet.
- m : désigne le matériau utilisé dans la réalisation du projet, tel que $m \in [0, M - 1]$
- M nombre de matériaux différents utilisés.
- p_m prix d'achat du matériau m (da/unité de quantité). Ce dernier inclut le prix de la matière elle-même mais aussi le coût de transport du fournisseur à l'usine.
- q_m quantité utilisée du matériau m .

Coût de montage

Le montage se fait sur mesure selon la pièce en production. Son coût est calculé comme le serait un projet indépendant p^* , en reprenant la formule finale 4.32, et en le traitant comme un projet à part. Si le montage n'est pas nécessaire à la réalisation du projet p , alors le coût de montage est nul. Le montant est alors donné par :

$$C_{mtg} = C(p^*) \quad (4.8)$$

Avec :

- C_{mtg} : coût spécifique de montage pour le projet.
- p^* : projet de réalisation du montage nécessaire au projet p .
- $C(p^*)$: coût du projet p^* comme donné par l'équation 4.32.

4.2.3 Coûts du processus de gestion de la qualité

les coûts d'obtention de la qualité sont essentiels pour garantir la satisfaction des clients et la rentabilité à long terme de l'entreprise. Les coûts d'obtention de la qualité peuvent être répartis en **coûts de qualité** et **coûts de non-qualité**, chacun à leurs tours ayant des sous-catégories. Leur évaluation est indispensable pour toute entreprise voulant proposer des coûts compétitifs.

Coûts de Qualité

Ce sont les coûts liés à la production d'un produit de qualité. Ces dépenses permettent d'éviter la non-qualité et de se prémunir des effets indésirables et non quantifiables de cette dernière, tels que la perte des clients. On distingue les coûts de prévention des coûts de détection.

Coûts de Prévention

Les moyens de prévention déployés sont liés à l'obtention de la certification ISO 9001. Les coûts de prévention sont principalement des **coûts fixes** dans l'entreprise, représentés par l'amortissement horaire des coûts de la certification ISO 9001 et de la facturation du bureau d'accompagnement et de préparation à l'obtention de cette certification.

Coûts de détection

Ceux-ci incluent l'amortissement des coûts d'achat des outils de mesure, en plus des coûts d'entretien des outils (opération de calibrage annuelle). Étant des **coûts fixes** ils sont calculés comme suit :

$$C_{det} = \sum_{\vartheta=0}^{N-1} \frac{p_{\vartheta}}{d_{\vartheta}} + c_{ent} \quad (4.9)$$

avec :

- C_{det} : coût total horaire de détection de la non-conformité (da/h).
- ϑ : désigne un des outils de détection de la non-conformité, tels que les outils de mesures numériques etc, avec $\vartheta \in [0, N - 1]$.
- N : nombre d'outils de détection possédés par l'entreprise.
- p_{ϑ} : prix d'achat de l'outil ϑ .
- d_{ϑ} : durée de vie (durée d'amortissement) de l'outil ϑ .
- c_{ent} : coût horaire d'entretien de l'outil (généralement ne nécessite qu'un calibrage annuel que l'entreprise sous-traite).

Coûts de Non-Qualité

Les coûts de non qualité sont nombreux et souvent très conséquents dans les industries lourdes. Pour les maîtriser, il faudrait les calculer et certains étant difficiles à quantifier (mécontentement des clients, mauvaise réputation...), les coûts que nous incluons dans ce travail ne sauraient être exhaustifs.

Les coûts de Non Qualité sont des coûts non-déterministe, il ne suffit donc pas d'en faire la somme et de les imputer aux projets. Ces coûts sont des **coûts stochastiques** car leur occurrence n'est pas certaine en amont de la production.

Coûts de non-conformité

Une non-conformité au niveau de la production implique que la pièce fabriquée ne respecte pas les exigences techniques du client, par rapport à certaines dimensions ou un certain niveau de détails. Cela peut être dû à plusieurs facteurs, erreur humaine, mauvaise programmation des machines, outils non-adaptés etc. La non-conformité concerne les produits finis comme semi-finis, car la non-conformité peut être repérée à la fin de production (sur le produit fini) ou pendant la production (sur produit semi-fini).

Dans le cas de la détection d'une non conformité, plusieurs manières de la rectifier sont possibles :

1. Repasser le produit par le poste de travail dont la non-conformité est issue (ex : problème de soudage -> repasser par un poste de soudage) ou par une machine de rectification (rectifieuse plane, cylindrique..). Ce coût est égal au coût d'exploitation de la machine et s'écrit :

$$C_{rect} = (C_{elt,i} + C_{MS,i}) \cdot t_i \quad (4.10)$$

Avec :

- C_{rect} : coût de rectification par passage dans une machine i .
 - i : machine utilisée pour rectifier la pièce non-conforme.
 - $C_{elt,i}$: coût horaire de la consommation électrique de la machine i comme calculée sur l'équation 4.6.
 - $C_{MS,i}$: coût horaire de la maintenance systématique de la machine i comme calculée sur l'équation 4.2.
 - t_i : heures-macine de rectification sur la machine i .
2. Relancer le projet de l'étape, initiale. Cela se fait lorsque le produit fini ou semi-fini est irrécupérable. Le coût de cette opération est comptabilisé comme étant le coût de ce qui a été perdu (la matière première consommée, les opérations de fabrication faite etc). Ce coût est calculé comme suit :

$$C_{NC} = C_{MP*} + \overbrace{\sum_{i=0}^{k-1} (C_{elt,i} + C_{MS,i}) \cdot UO_i}^{C_{exp}} \quad (4.11)$$

- C_{NC} : coût d'une non-conformité.

- C_{MP*} : matière première utilisée dans le produit non récupérable.
- i : indice faisant référence aux machines utilisées avant la détection de la non-conformité, tel que $i \in [0, k - 1]$.
- k : nombre de machines utilisées avant la détection de la non-conformité.
- $C_{elt,i}$: coût horaire de la consommation électrique de la machine i comme calculée sur l'équation 4.6.
- $C_{MS,i}$: coût horaire de la maintenance systématique de la machine i comme calculée sur l'équation 4.2.
- UO_i : consommation en unité d'œuvre (heure-machine) sur la machine i .
- C_{exp} : c'est le coût d'exploitation des machines, en dehors des coûts fixes.

Le premier coût, de rectification est négligeable devant le second, nous considérerons donc que le coût de non non-conformité C_{NC} sera donné par l'équation 4.11.

Coûts de la logistique de retour

Pour des raisons de simplification, ce coût sera pris comme égal au coût de la logistique de livraison, en supposant que le client est un client local (sur le territoire algérien) la logistique retour sera donc pratiquement équivalent à celle de l'aller.

Coûts de pénalités de retard

Ce coût varie d'un client à un autre, il n'est pas soumis à des paramètres internes. Certains clients peuvent exiger des dédommagements en cas de retard de livraison, et le montant change d'un client à un autre.

4.2.4 Coûts du processus commercial

Le processus commercial est le premier et dernier maillon de la chaîne du produit. Dans cette partie, nous mentionnerons le coût de livraison du produit fini au client. Les frais de transport varient selon le mode de livraison choisi :

- Voiture de fonction : le coût inclue l'amortissement de la voiture, le coût du carburant consommé ainsi que le salaire horaire du chauffeur, multiplié par le temps de trajet.
- Transporteur (camion/camionnette) : ce coût est proposé par le transporteur lui-même et pour une même destination, et une même marchandise peut varier grandement (selon les jours de la semaine, selon les délais etc).
- Prestataire logistique (transporteur corporate) : ce coût est fixe par destination et poids/volume.

Ce coût ne dépend pas des unités d'œuvre, mais varie d'un projet à l'autre. C'est un coût spécifique.

4.2.5 Coûts du processus de gestion des ressources humaines

Les coûts de ce département sont **fixes**, et ils comprennent :

- Coût des formations.
- Salaires des employés : considéré comme des coûts fixes car ils sont payés même lorsque la production est en arrêt. Ce sont des salariés à temps plein.
- Frais de missions versés aux salariés.

4.2.6 Coûts du processus de finances et comptabilités

Ces processus sont externalisés pour la plupart, les coûts sont donc issus de la sous-traitance comme suit :

- Coût des grands comptes.
- Coût des comptes sociaux.
- Coût des bilans annuels : l'élaboration de ceux-ci est sous-traitée chez un comptable externe, les bilans ont donc un coût d'élaboration fixe.

Ce sont des coûts **fixes**.

4.2.7 Coûts du processus de gestion de stock

Le coût total de stockage est la somme des coûts suivants :

Coûts de l'espace de stockage

Ils incluent le coût d'entretien des bâtiments et des installations (éclairage, climatisation, chauffage, etc.), le coût d'achat et la dépréciation. Ce sont des coûts **fixes**.

Coût des services sur le stock

Ces coûts incluent deux types de coûts :

- Le coût des ouvriers chargés des services sur le stock.
- Les coûts d'acquisition concernant le service de stockage, d'entretien et dépréciation du matériel de service, entre autre un clark.

4.2.8 Coûts du processus d'achat et d'approvisionnement

Les coûts fixes, tel que l'amortissement de matériel informatique, sont énumérés et pris en considération plus bas.

4.2.9 Coûts communs aux processus

Les coûts communs sont des coûts qui ne peuvent être attribués à un seul processus en particulier, et qui sont souvent partagés par tous les éléments de l'entreprise. Pour SARL Auzia, ce sont les coûts suivants :

- Coûts d'investissement : Ils incluent les charges financières liées aux prêts bancaires nécessaires à l'investissement (achat de machines, de terrain...) tels que les intérêts, les montants à repayer hors intérêts, les coûts d'installation, de préparation et de travaux pour les terrains.
- Frais des assurances machines et autres assurances : Les frais des assurances machines et autres assurances représentent les coûts liés à la protection des équipements et des biens utilisés dans le processus de production de l'entreprise. Ils visent à couvrir les éventuels dommages, vols, incendies ou accidents liés aux machines et équipements.
- Factures d'eau, de gaz et d'électricité des locaux (pas des sites de production) : Les factures d'eau, de gaz et d'électricité des locaux correspondent aux dépenses liées à la consommation d'eau, de gaz et d'électricité dans les installations de l'entreprise, telles que les bureaux, les salles de réunion et les espaces communs. Ces frais sont essentiels pour assurer le fonctionnement quotidien des activités administratives et logistiques de SARL Auzia.
- Abonnement internet de l'entreprise : représente le coût associé à la connexion internet utilisée pour les besoins de communication, de recherche, d'échanges de données et de gestion des opérations de l'entreprise. Il permet d'accéder aux outils numériques, aux services en ligne et de maintenir une connectivité essentielle pour le bon déroulement des activités.
- Abonnement téléphonique : englobe les frais liés à la communication téléphonique de l'entreprise, que ce soit pour les appels internes, les appels externes ou les services téléphoniques supplémentaires tels que la messagerie vocale ou les services de conférence. Ces frais couvrent les coûts de téléphonie fixe ou mobile nécessaires pour les opérations et la communication interne et externe de l'entreprise.
- Matériel informatique et bureautique : comprennent l'achat, la maintenance et la mise à jour des ordinateurs, des imprimantes, des scanners, des serveurs, des logiciels et des autres équipements technologiques utilisés dans les activités quotidiennes de l'entreprise. Ces frais sont nécessaires pour assurer le bon fonctionnement des systèmes informatiques et des outils de productivité.
- Entretien des chiens de garde : l'entreprise possède deux chiens de garde actuellement. Ces coûts concernent les frais liés à l'entretien, à la nourriture et aux soins vétérinaires de ces chiens.
- Coût des entreprises d'entretien et de nettoyage : ces frais incluent les dépenses liées à l'externalisation des services de nettoyage et d'entretien des locaux de l'entreprise.

Ce sont tous des **coûts fixes**.

4.2.10 Classement des coûts

Le classement final des coûts en différentes catégories, conformément à l'algorithme 3.2 peut maintenant se faire, car nous connaissons le comportement des différents coûts de l'entreprise. Celui-ci apparaît sur le tableau 4.1.

Processus	Coût	Type
Maintenance	Maintenance préventive	Variable
	Maintenance corrective	Stochastique
Production	Bureau d'étude	Fixe
	Amortissement machines	Fixe
	Consommation électrique des machines	Variable
	Matière première	Spécifique
	Montage	Spécifique
Gestion de la qualité	Prévention	Fixe
	Détection	Fixe
	Non Conformité	Stochastique
	Logistique retour	Stochastique
	Retard	Stochastique
Commercial	Transport produit fini	Spécifique
Ressources humaines	Formations	Fixe
	Salaires	Fixe
	Frais de mission	Fixe
Finances et comptabilités	Grands comptes	Fixe
	Comptes sociaux	Fixe
	Élaboration des bilans annuels	Fixe
Gestion de stock	Espace de stockage	Fixe
	Services sur stock	Fixe
Commun	Investissement	Fixe
	Assurances	Fixe
	Factures eau, gaz, électricité des locaux	Fixe
	Abonnement internet	Fixe
	Abonnement téléphonique	Fixe
	Matériel informatique	Fixe
	Entretien des chiens de garde	Fixe
Entretien et nettoyage	Fixe	

TAB. 4.1 : Classement des coûts de SARL Auzia

4.3 Formalisation mathématique des coûts

La formalisation mathématique des coûts présente plusieurs avantages. Elle permet une analyse plus précise des coûts, une meilleure compréhension des relations entre les différentes variables et une prise de décision plus éclairée. Dans cette partie, nous allons

exprimer mathématiquement la structure de coût de SARL Auzia conformément à notre modèle.

4.3.1 Les unités d'œuvres

Le vecteur d'unité d'œuvre UO de l'équation 3.1 s'écrit dans notre cas ainsi :

$$UO(p) = \begin{pmatrix} UO_0(p) \\ \vdots \\ UO_i(p) \\ \vdots \\ UO_{u-1}(p) \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Avec :

- $UO(p)$: vecteur colonne de dimension $1 \cdot u$ dont les éléments sont les heures nécessaires à la fabrication d'un produit p sur chaque poste de travail.
- p : produit que l'entreprise souhaite fabriquer et dont on cherche à estimer le coût.
- $UO_i(p)$: ième élément du vecteur, est égal au nombre d'heures machines nécessaires au produit p sur le poste de travail i .
- i : indice des éléments du vecteur. Désigne les postes de travail.
- u : nombre de postes de travail à l'usine. Actuellement égal à 30, mais varie régulièrement, selon les machines acquises et mises en marche.

4.3.2 Coûts variables

Les coûts variables de l'entreprise sont les coûts de la consommation électrique des machines, ainsi que les coûts de maintenance systématique. Pour formaliser leur relation avec les unités d'œuvres, nous suivons la logique énoncées dans l'équation 3.9. Ce qui nous donne :

$$CV(p) = \sum_{i=0}^{u-1} (C_{MS,i} + C_{elt,i}) \cdot UO_i(p) \quad (4.13)$$

Avec :

- $CV(p)$: coûts variables induits pour le produit p
- $UO_i(p)$: ième élément du vecteur d'unités d'œuvres, est égal au nombre d'heures machines nécessaires au produit p sur le poste de travail i .

- i : indice des éléments du vecteur. Désigne les postes de travail.
- u : nombre de postes de travail à l'usine. Actuellement égal à 30, mais varie régulièrement, selon les machines acquises et mises en marche.
- $C_{MS,i}$: coût horaire de maintenance systématique de la machine i , comme calculé sur l'équation 4.2.
- $C_{elt,i}$: coût horaire de la consommation électrique de la machine i , comme calculé sur l'équation 4.6.

4.3.3 Coûts fixes

Les coûts fixes, communs aux processus ou pas, sont l'une des dépenses principales de SARL Auzia, comme le tableau 4.1 peut en témoigner. Pour les formaliser, nous devons d'abord définir un horizon de calcul, ainsi que la manière dont nous calculerons les unités d'oeuvres consommées durant cet horizon.

En effet, les coûts ne sont fixes que pour une certaine période, au-delà de laquelle ils peuvent devenir variables. Pour notre étude, il est pertinent de prendre pour horizon h de calcul le **mois**, car c'est un niveau de granularité qui permet une visibilité sur tous les coûts de l'entreprise, qui s'ajuste bien avec leur comportement (tels que les salaires mensuels etc) et qui ne requière pas de grandes quantités de données (tel que l'heure ou la minute par exemple). De plus, même pour plusieurs mois consécutifs, les coûts restent le plus souvent fixe, contrairement aux années par exemple.

Pour calculer les unités d'oeuvres consommées sur un horizon, l'approche privilégiée dans ce travail pour SARL Auzia est celle du calcul de la moyenne de consommation. En effet, les données que l'entreprise dispose sur le marché et sa visibilité sur ses propres capacités ne lui permet pas de faire des prévisions de consommation fiables. Il est plus intéressant de se baser sur une moyenne, ou sur une minoration pour s'assurer que l'entreprise pourra couvrir ses dépenses sur un an.

on posera donc :

$$\mu = \frac{1}{12} \sum_{\tau=1}^{12} \sum_{p \in P_{\tau}} \sum_{i=0}^{u-1} UO_{i\tau}(p) \quad (4.14)$$

- μ : moyenne des unités d'oeuvres consommées sur un horizon h pour une année.
- $UO_{i\tau}(p)$: quantités d'unités d'oeuvres consommées sur la machine i durant le mois τ pour la réalisation du projet p .
- i : indice des des postes de travail, $i \in [0, u - 1]$.
- u : nombre de postes de travail à l'usine. Actuellement égal à 30, mais varie régulièrement, selon les machines acquises et mises en marche.
- τ : indice des mois, étant donné que l'horizon sélectionné est le mois. $\tau \in [1, 12]$ puisqu'on dispose des données d'une année.
- p : produit réalisé par l'entreprise.

- P_τ : ensemble des produits réalisés par l'entreprise durant un mois τ .

Le total CF définie en 3.10 sera composée des montants mensuels coûts fixes apparaissant sur le tableau 4.1.

4.3.4 Coûts spécifiques

: la matrice de coûts spécifiques de l'équation 3.12 se décline comme suit pour le cas de SARL Auzia :

$$CSP(p) = (C_{mp}, C_{mtg}, C_{trp}) \quad (4.15)$$

avec :

- C_{mp} coût de la matière première nécessaire au projet.
- C_{mtg} coût de montage nécessaire.
- C_{trp} coût de transport du produit au client.

4.3.5 Coûts stochastiques

Les coûts stochastiques de SARL Auzia sont issus des processus de gestion de la qualité et de maintenance. Comme expliqué dans la définition de ces coûts, il faut faire la distinction entre ce que l'entreprise supporte comme coût et ce que le client va payer. L'entreprise ne paie qu'en cas d'évènement déclenchant le coût, comme une non-conformité ou une panne, mais le client se doit de payer systématiquement, et en amont. Dans cette section, nous calculerons les montants à faire payer au client pour chaque coût stochastique, conformément à la formalisation apparaissant dans l'équation 3.19. Pour cela, nous définirons les différentes variables aléatoires régissant ces phénomènes, puis nous déterminerons leurs distributions et leurs espérances.

Maintenance Corrective

Soit X_{ij} une variable aléatoire du nombre de pannes j par heure de la machine i . Les variables apparaissent sur le tableau 4.2.

Hypothèse :

X_{ij} suit une loi de poisson de paramètre λ_{ij} :

$$X_{ij} \sim P(\lambda_{ij})$$

tel que λ_{ij} est l'espérance de la variable aléatoire. Un estimateur sans biais de ce paramètre est donné par la méthode de **Maximum Likelihood**, tel que :

$$l(\lambda_{ij}) = \sum_{k=1}^n (X_{ijk} \log \lambda_{ij} - \lambda_{ij} \log X_{ijk}!) \quad (4.16)$$

$$= \log \lambda_{ij} \sum_{k=1}^n X_{ijk} - n \lambda_{ij} \quad (4.17)$$

Après dérivation et mise à zéro on obtient :

$$l'(\lambda_{ij}) = \frac{1}{\lambda_{ij}} \sum_{k=1}^n X_{ijk} - n = 0 \quad (4.18)$$

Et le paramètre de poisson peut donc être estimé par $\lambda_{i,j}$ tel que :

$$\lambda_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n X_{ijk}}{n} = \overline{X_{ij}} \quad (4.19)$$

qui est assimilée au nombre moyen de panne j par heure dans une machine j. Après calcul, les paramètres lambdas journaliers obtenus pour les différentes machines et pannes sont visibles sur le tableau 4.2. La fonction de fiabilité du système est alors donnée par :

$$R(t) = e^{-\lambda_{ij}t} \quad (4.20)$$

Qui est la probabilité de ne pas avoir de panne durant un temps donné t .

Ainsi, la probabilité d'avoir **au moins une panne** est :

$$f(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda_{ij}t} \quad (4.21)$$

Tests d'hypothèses et validation de la Qualité d'ajustement

Avant de passer au déploiement, il faut vérifier que les pannes suivent bien une distribution de Poisson de paramètre λ_{ij} . Pour cela, des test de **Goodness of Fit** ou de qualité d'ajustement sont effectués. Pour tester l'hypothèse que la population suive une distribution de Poisson, nous allons utiliser le **Chi-Test**.

Test de Chi-2

Pour chaque variable aléatoire X_{ij} , soit n_{ij} la taille de la population observée. Soit K le nombre de valeurs différentes que peut prendre la variable X_{ij} . Le test de χ^2 se fait pour toutes les variables X_{ij} vérifiant les hypothèses suivantes :

- Taille de l'échantillon suffisamment grande (60 et plus).
- Fréquences de chaque classe k supérieure ou égale à 5.

1. L'hypothèse Nulle est : la variable X_{ij} suit une distribution de poisson. L'hypothèse alternative est qu'elle ne suit pas une distribution de poisson.

$$H = \begin{cases} H_0 & X_{ij} \sim P(\lambda_{ij}) \\ H_1 & \text{La variable ne suit pas une loi de Poisson} \end{cases} \quad (4.22)$$

2. La dimension du test statistique sera égale à :

$$dim_{ij} = K - p - 1 = k - 1 - 1 = k - 2 \quad (4.23)$$

avec :

- dim : dimension du test de Chi-carré.

- K : nombre d'intervalle des classes.
- p : nombre de paramètres de la distribution de poisson (1).

3. La statistique de test χ_0 sera calculée comme suit :

$$\chi_0^2 = \sum_{k=0}^K \frac{(O_k - E_k)^2}{E_k} \quad (4.24)$$

avec :

- chi_0^2 : statistique du test.
- K : nombre des classes d'observation.

Les valeurs de χ_0 , aussi appelée **p-value**, sont donnée pour les variables $X_{i,j}$ dans le tableau 4.2.

Poste	Panne	Variable	Lambda	p-value
Tour Numérique	Cassure de l'outil	X_{00}	0,15	0,290153103
	Panne Software	X_{01}	0,0083333333	0,627801927
	Fil électrique abimé	X_{02}	0,0083333333	0,627801927
	Capteur endommagé	X_{03}	0,0027777778	0,799763035
Fraise Numérique	Cassure de l'outil	X_{10}	0,1615	0,135917275
	Panne Software	X_{11}	0,007142857	0,130401844
	Fil électrique abimé	X_{12}	0,0041666667	0,189919334
	Capteur endommagé	X_{13}	0,002631579	0,759037082
Fraise Conventionnelle	Cassure de l'outil	X_{20}	0,2	0,065901052
	Cassure de l'axe	X_{21}	0,0335	0,364443041
	Problème de roulements	X_{22}	0,0615	0,757163453
Fraise Conventionnelle	Cassure de l'outil	X_{30}	0,2	0,065901052
	Cassure de l'axe	X_{31}	0,0335	0,364443041
	Problème de roulements	X_{32}	0,0615	0,757163453
Tour Conventionnel 1,5m	Cassure de l'outil	X_{40}	0,2	0,822395896
	Cassure de l'axe	X_{41}	0,0333333333	0,356748865
	Problème de roulements	X_{42}	0,02	0,782537064
Plieuse Numérique	Cassure de l'outil	X_{50}	0,1	0,123144511
	Panne Software	X_{51}	0,0041666667	0,64683185
	Fil électrique abimé	X_{52}	0,0041666667	0,64683185
	Capteur endommagé	X_{53}	0,0027777778	0,797746278
Soudage Mig Mag	Panne Moteur	X_{60}	0,0041666667	0,189919334
	Carte Mère endommagée	X_{61}	0,003571429	0,476050272

TAB. 4.2 : Table des variables aléatoires du nombre de pannes, de leur espérance horaire, et de leur p-value

4. Vérification de la variable de test par rapport à la valeur donnée par la table de dimension du χ^2 avec dim degré de liberté et $\alpha = 0.05$ par convention.

5. Résultats : Les p-value sont dans tous les cas supérieures à α . L'hypothèse H_0 est maintenue, on considère donc bien que les variables suivent une distribution de poisson.

Calcul de coût

Soit X'_{ij} la variable aléatoire du coût que paie l'entreprise par heure pour résoudre une panne j sur une machine i . Par définition on a donc :

$$X'_{ij} = X_{ij} \cdot C_{MCij} \quad (4.25)$$

Avec :

- X'_{ij} : variable aléatoire du coût que paie l'entreprise par heure pour résoudre une panne j sur une machine i .
- X_{ij} : variable aléatoire du nombre de pannes précédemment définies
- C_{MCij} : coût de l'opération de maintenance corrective infligé à l'entreprise suite à la panne j sur une machine i apparaissant sur l'équation 4.4.

Ainsi, il est possible de construire une simulation de Monte-Carlo pour chaque machine, c'est-à-dire pour chaque valeur de i , selon les distributions des variable X_{ij} .

La génération des échantillons aléatoires se fera conformément à une distribution de Poisson d'espérance λ_{ij} pour chaque variable. Nous poserons arbitrairement $n = 1000$, et $\alpha = 0.05$, c'est à dire que la probabilité que le coût dépasse le coût choisi est inférieure ou égale à 0.05.

Ainsi, le coût stochastique pour une heure sur une machine i est donné par :

$$C_{MCi} = MC[X'_{i0} \dots X'_{ij} \dots X_{i(n_i-1)}, 0.05, 1000] \quad (4.26)$$

tel que :

- C_{MCi} : coût d'une heure d'utilisation de la machine i conformément à l'équation 3.20.
- X'_{ij} : variable aléatoire du coût que paie l'entreprise par heure pour résoudre une panne j sur une machine i .
- i : fait référence à une machine i .
- j : indice des pannes d'une machine donnée, avec $j \in [0, n_i - 1]$.
- n_i : nombre de pannes possibles pour une machine i .

Soit un projet p de l'entreprise, qui requière un nombre d'heures-machine $UO_i(p)$ sur la machine i . Alors le total des coûts stochastiques de maintenance corrective à assigner au client pour se couvrir contre le risque de pannes est calculé comme suit :

$$C_{TMC}(p) = \sum_{i=0}^{N-1} UO_i(p) C_{MCi} \quad (4.27)$$

avec :

- $C_{TMC}(p)$: total des coûts stochastiques de maintenance corrective à assigner au client pour se couvrir contre le risque de pannes pour un projet p .
- N : nombre de machines et postes de travail de l'entreprise concernés par les coûts de panne. Dans notre cas, $N = 7$.
- i : indice des machines et postes de travail de l'entreprise concernés par les coûts de panne, tel que $i \in [0, N - 1]$.
- $UO_i(p)$: nombre d'heures-machine requises sur la machine i pour le projet p . Cela indique que l'expérience aléatoire est répétée autant de fois qu'une heure est entamée, donc plus un projet consomme d'heures-machine plus le coût stochastique augmente.
- C_{MCi} : coût d'une heure d'utilisation de la machine i , comme calculé sur l'équation 4.26.

Gestion de la qualité

Le second coût stochastique repéré au sein de SARL Auzia provient du processus de gestion de la qualité. En effet, nous savons que la non-qualité est un événement stochastique, les coûts qui y sont liés sont donc non-déterministe. Pour notre cas, nous avons repérés trois coûts principaux :

1. Le coût de non conformité.
2. Le coût des pénalités de retard.
3. Le coût de la logistique de retour.

Dans cette partie nous allons les formaliser conformément au modèle.

Soit la variable aléatoire Y_0 du coût de non-conformité qu'un projet peut engendrer. C'est une variable continue dont le domaine de définition D est le suivant :

$$D_0 = [0, C_{NC}] \quad (4.28)$$

tel que :

- D_0 est le domaine de définition de la variable aléatoire du coût de non-conformité.

- C_{NC} est le coût de non-conformité comme calculé dans l'équation 4.11.

Il est possible de décomposer cette variable en une somme de deux variables aléatoires :

1. Y_{MP} : variable aléatoire du coût de matière première irrécupérable. C'est une variable continue dont le domaine de définition est $D_{MP} = [0, MP]$, avec MP étant le coût de **toute** la matière première requise pour le produit, c'est-à-dire le coût maximal. C'est une variable aléatoire car il est impossible de déterminer quelle sera la matière première perdue au courant du projet.
2. Y_{trsf} : variable aléatoire du coût de transformation de la matière première sur les machines. On considérera qu'il y a autant de chance qu'une non-conformité soit détecté à n'importe quel niveau de la chaîne, la variable est donc continue et de distribution *uniforme*. Son domaine de définition D_{trsf} est $[0, C_{exp}]$ où C_{exp} est le coût d'exploitation de toutes les machines.

Nous supposons ici qu'une fois que la non-conformité aura lieu et aura été repérée, elle ne se répétera pas sur le même projet, les valeurs maximales sont donc calculées pour un seul projet.

Soient ensuite les variables aléatoires : Y_{ret} et Y_{trsp} :

1. Y_{ret} : variable binaire qui prend 1 si le projet est renvoyé, c'est-à-dire si il y a un retour de produit, et 0 sinon.
2. Y_{trsp} : variable binaire qui prend 1 si il y a un retard sur la production par rapport aux exigences du client, et 0 sinon.

On considère que ces variables aléatoires suivent une distribution de **Bernoulli**, pour les raisons suivantes :

- Ce sont des variables binaires. Il n'y a que deux possibilités (en retard ou à l'heure, renvoyé ou accepté).
- Sur l'horizon de l'application de ce modèle, on peut considérer que la probabilité d'apparition d'une valeur ou l'autre (1 ou 0) est fixe. En effet, on considère que l'entreprise n'aura pas le temps de mieux maîtriser les projets de niveau A par exemple. Cette hypothèse est possible grâce à la nature ETO de l'entreprise, qui ne lui permet pas de produire à répétition un même produit.
- Les résultats sont totalement indépendants les uns des autres : une non qualité dans un projet n'affectera pas la qualité d'un autre projet.

Ainsi on peut poser les variables aléatoires : Y_{Ctrp} et Y_{Cret} des **coûts** de retour de produit et de retard. Par définitions, elles s'écrivent comme suit :

$$Y_{Ctrp} = C_{trp} Y_{trp} \quad (4.29)$$

$$Y_{Cret} = C_{ret} Y_{ret} \quad (4.30)$$

tel que :

- Y_{Ctrp} : variable aléatoire du coût de retour client
- C_{trp} : coût de transport en cas de renvoi.
- Y_{trp} : variable binaire qui prend 1 si le projet est renvoyé, et 0 sinon.
- Y_{Cret} : variable aléatoire du coût de retard.
- C_{ret} : frais de retard demandé par le client.
- Y_{ret} : variable binaire qui prend 1 si il y a un retard, et 0 sinon.

C_{trp} et C_{ret} sont déterministes et connus avant le début du projet.

Ainsi, nous avons tous les éléments en main pour construire une simulation de Monte-Carlo pour les coûts de l'activité de gestion de la qualité. Elle est donnée par :

$$C_Q(p) = MC[MP, Y_{trsf}, Y_{Cret}, Y_{Ctrp}, \alpha, n] \quad (4.31)$$

tel que :

- C_Q : tarif à imposer au client pour couvrir les coûts stochastiques de l'activité de gestion de la qualité pour le produit p .
- MP : Variable aléatoire du coût de la matière première irrécupérable.
- Y_{trsf} : variable aléatoire du coût de transformation effectué sur une pièce défectueuse irrécupérable.
- Y_{Cret} : variable aléatoire du coût de retard sur livraison ou production selon les exigences du client.
- Y_{Ctrp} : variable aléatoire du coût de transport associé au renvoi du produit en cas de non qualité.
- α : erreur tolérée par l'entreprise.
- n : nombre d'itérations de la simulation de Monte-Carlo.

La loi de distribution de MP n'étant pas connue, nous utiliserons la **loi triangulaire**, dont les paramètres seront choisis selon le montant MP qui varie d'un projet à l'autre.

Quant aux variables Y_{trp} et Y_{ret} pour déterminer les paramètres de leur loi de distribution, il nous faudra introduire le concept de **complexité du projet**.

Une analyse qualitative des données du processus de gestion de la qualité montre une dépendance de la performance de l'entreprise à la nature du produit. Plus l'entreprise est familière avec ce produit et moins il y a des chances que les ouvriers commettent des erreurs lors de la production. En plus de la familiarité, certains projets sont **objectivement** plus faciles à réaliser. L'indicateur dit objectif de cette facilité est la **complexité**. En subdivisant les différents produits en plusieurs niveaux de complexité, on obtient des distributions de probabilité plus cohérentes, et plus simple à modéliser, sans pour autant perdre de l'information. Les critères de discrimination entre les projets sont les suivants :

- Nombre d'opérations différentes nécessaires à la réalisation. Un objet nécessitant 15 minutes de tournage sera plus complexe qu'un objet nécessitant 5 minutes de tournage, 5 minutes de fraisage et 5 minutes de soudage.
- Le projet nécessite-t-il l'usinage d'une surface gauche. Plus la commande comporte de surfaces gauche, plus la complexité augmente.
- Tolérance du client. Moins le client est tolérant, plus la complexité du projet augmente. Tolérance en terme d'état de surface, de variabilité des caractéristiques etc.

Pour cela, trois niveaux de complexité sont définis, du plus complexe au moins complexe : **A**, **B** et **C**.

Ainsi, on peut voir sur le tableau 4.3 les lois de distribution des variables Y_{trp} et Y_{ret} selon le niveau de complexité du projet.

Complexité	A		B		C	
Domaine de définition	0	1	0	1	0	1
Y_{trp}	0,975	0,025	0,981132075	0,018867925	0,983606557	0,016393443
Y_{ret}	0,976190476	0,023809524	0,981481481	0,018518519	0,984126984	0,015873016

TAB. 4.3 : Loi de distribution des variables de retour client et de retard selon le niveau de complexité

4.4 Estimation Finale

Maintenant que tous les coûts ont été formalisés, il est possible de passer à l'estimation finale, et donc le calcul du coût total pour un produit. L'estimation finale se fait selon l'équation 3.22, et le montant renvoyé d'un produit à un autre varie significativement.

$$C(p) = \underbrace{\sum_{i=0}^{u-1} (C_{MS,i} + C_{elt,i}) UO_i(p)}_{CV(p)} + \underbrace{\frac{CF_h}{\mu} \sum_{i=0}^{u-1} UO_i(p)}_{CF(p)} + \underbrace{C_{mp} + C_{mtg} + C_{trp}}_{CSP_T(p)} + \underbrace{C_{TMC}(p) + C_Q(p)}_{CS(p)} \quad (4.32)$$

Avec :

- $C(p)$: coût à couvrir pour la réalisation du projet p .
- i : indice des machines et postes de travail de l'entreprise, avec $i \in [0, u - 1]$.
- u : nombre de postes de travail de l'entreprise.
- $C_{MS,i}$: coûts de maintenance systématique de la machine i par heure-machine.
- $C_{elt,i}$: coût de la consommation électrique des machines par heure-machine.
- $UO_i(p)$: ième élément du vecteur d'UO de l'entreprise, égale aux heures-machines sur le poste i pour la réalisation du projet p .

- $CV(p)$: total des coûts variables du projet p .
- CF_h : montant total des coûts fixes de l'entreprise sur un horizon h .
- μ : consommation d'UO prévue sur l'horizon h .
- $CF(p)$: total des coûts fixes à imputer au produit p .
- C_{mp} : coût de la matière première comme calculé sur l'équation 4.7.
- C_{mtg} : coût de montage comme calculé sur l'équation 4.8.
- C_{trp} : coût de transport de la marchandise finie au client.
- $CSP_T(p)$: total des coûts spécifiques du projet p .
- $C_{TMC}(p)$: coût total de la maintenance corrective pour le projet p comme calculé sur l'équation 4.27.
- $C_Q(p)$: coût stochastique de gestion des non qualités comme calculés sur l'équation 4.31.
- $CS(p)$: total des coûts stochastiques à couvrir pour le projet p .

Cette équation permet l'estimation finale du coût du projet p .

4.5 Application au cas d'une Moto Soufflante

La réalisation d'une moto soufflante est l'un des nombreux projets menés à bien par SARL Auzia cette année. C'est une pièce mécanique tournante fabriquée pour un client B-to-B.

Dans cette partie nous allons appliquer le modèle pour calculer le prix que SARL Auzia devrait proposer selon les différents éléments que nous avons passés en revue plus haut et analyser les résultats en comparaison avec les coûts réels et le prix appliqué par l'entreprise.

Nous poserons le coût de la moto soufflante renvoyé par le modèle $C(MS)$. Le coût réel hors CF sera défini plus bas et noté $CF_R(MS)$. Quant au prix de vente, nous le noterons $P(MS)$

4.5.1 Présentation du cas

Le projet consiste en la réalisation d'une moto soufflante à partir d'un modèle livré par le client. L'entreprise fait donc l'étude, le reverse engineering de la pièce et la réalisation. La matière première utilisée pour les ailettes est l'innox 4mm tandis que le noyau est fait en acier 42CD4 de diamètre 180, dont le coût total est de 90 000 DA. La fabrication de la soufflante ne nécessite pas de montage.

Une fois les plans faits, le noyau est usiné dans le tour numérique, et les ailettes sont fabriquées en utilisant la machine de découpe plasma et celle de pliage numérique. Ensuite, l'assemblage est fait grâce au soudage Mig Mag. Les temps de travail nécessaires sur chaque poste sont résumés sur le tableau 4.4.

Postes	Tour Numérique	Découpe Plasma	Plieuse Numérique	Soudage Mig Mag	Equilibreuse
Heures-machine	5	1	1	8	3

TAB. 4.4 : Tableau des heures-machine requises pour la fabrication de la mot soufflante

- La pièce étant très complexe, elle a dû être fabriquée **deux fois**. En effet, la première fois le noyau était décentré, et cette non-conformité n'a été détectée qu'en fin de production. Toute la matière première était donc irrécupérable, et il a fallu relancer la production en repassant par tous les postes de travail.
- Aucune panne n'a été rencontrée pendant la fabrication, ni aucun dysfonctionnement des machines.
- Pas de montage nécessaire.
- Aucune pénalité de retard n'a été exigée par le client en amont.
- La pièce a été envoyée au client par transporteur, pour un montant de 7000 DA.
- Le prix final facturé par SARL Auzia est de 200 000 DA.

4.5.2 Calcul à posteriori

Avant tout, nous ferons la distinction entre le coût dit "réel" et le prix. Il existe plusieurs mesures subjectives du coût, qui dépendent fortement de la stratégie de l'entreprise, il est donc difficile d'avoir une mesure totalement objective du coût que l'on pourrait nommer mesure "réelle" (voir le chapitre). Par soucis de comparabilité, nous garderons donc la typologie de coûts présentée en 3.2 tel que :

- Les coûts variables seront calculés en utilisant l'équation des coûts variables 3.9 et les données du tableau 4.4.
- Les coûts spécifiques restent les mêmes puisqu'ils ne sont soumis à aucune incertitude, ni calcul complexe.
- La notion de coûts stochastiques n'a pas de sens étant donné que nous sommes à posteriori de la production, ces coûts sont donc connus. Ils seront égaux au coût de NQ présenté dans l'équation 4.11, le coût de retour et les frais de retard si besoin. Les coûts de pannes seront calculés selon l'équation 4.4, si ils ont lieu. Par abus de langage nous les nommerons quand même coûts stochastiques sur les différents graphiques, mais leur calcul est totalement déterministe.

- Les coûts fixes ne seront pas calculés pour le coût réel, car comme expliqué plus haut, ils sont **imputés** ce qui rend subjective toute mesure autre que leur montant total. Nous ne pourrions qu'estimer la portion du prix qui peut être accordée au paiement des coûts fixes.

On calcule que pour un seul cycle de production, le coût variable, auquel nous s'ajoutent les coûts de matière première et de transport comme spécifiés sur le tableau 4.6.

Néanmoins, nous savons qu'une non-qualité a eu lieu, et que toute la matière première a été perdue. Le coût stochastique de non qualité est là un coût connu, il peut être calculé comme définis sur l'équation 4.11.

Nous considérerons que la différence entre le total de ces coûts, et le prix payé par le client, sera attribuée aux coûts fixes. Nous omettrons la marge.

Les résultats de ce calcul sont présentés sur le tableau 4.5.

Coûts	Variables	Matière première	Non Qualité	Transport	Total	$P(MS) - C_R(MS)$
Montant (DA)	7 097.672	90 000	97 097.672	7000	201 195.344	-1195.344

TAB. 4.5 : Calcul des coûts à posteriori de la production de la Moto Soufflante

4.5.3 Utilisation du modèle stochastique d'estimation des coûts

Soit le projet de réalisation de moto-soufflante p_{MS} . Pour utiliser le modèle, on pose le vecteur $UO(p_{MS})$ suivant :

$$UO(p_{MS}) = \begin{pmatrix} 5 \\ 0_{15.1} \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 8 \\ 0_{9.1} \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

Se référer à l'annexe B.3 pour l'ordre de remplissage du vecteur.

Les coûts spécifiques peuvent être résumés sur le tableau 4.6.

Coût Spécifique	Montage	Transport	Matière première
Montant (DA)	0	7000	90 000

TAB. 4.6 : Coûts spécifiques associés à la moto soufflante

Une simulation du modèle sur R nous permet alors d'obtenir les résultats apparaissant sur le tableau 4.7.

Coût	Fixes	Variables	Stochastiques	Spécifiques	Total
Montant (DA)	97086.5	7 097.672	86 856,11	97 000	288 040.282

TAB. 4.7 : Résultats de simulation du modèle pour le cas de la moto soufflante

La distribution des coûts de NQ renvoyée par la simulation de Monte Carlo apparaît sur la figure 4.1. Les distributions des coûts horaires de pannes sont en annexe A.1.

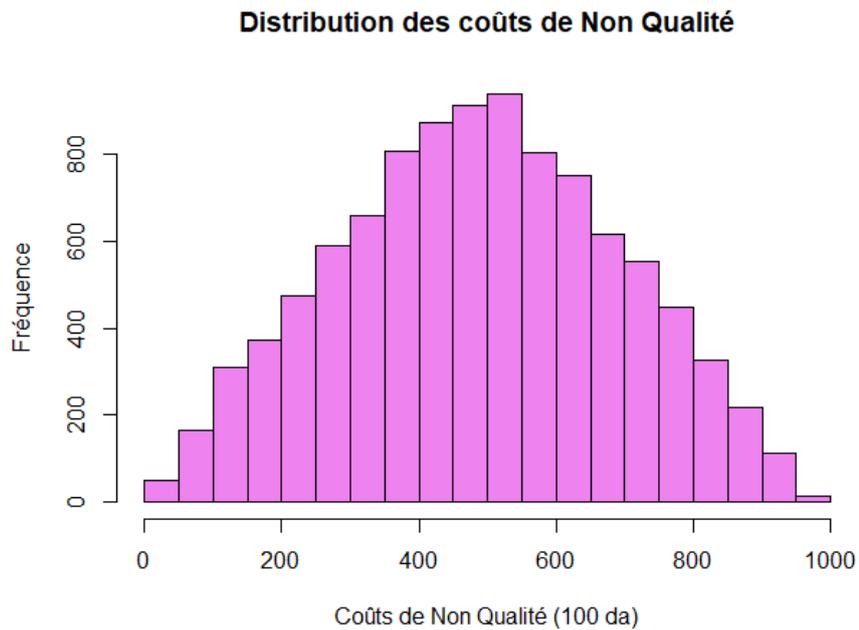


FIG. 4.1 : Distribution des coûts de Non Qualité renvoyée par la simulation de Monte Carlo pour la Moto Soufflante

La structure de coût de la moto soufflante renvoyée par le modèle pour la réalisation de la moto soufflante apparaît sur la figure 4.2.

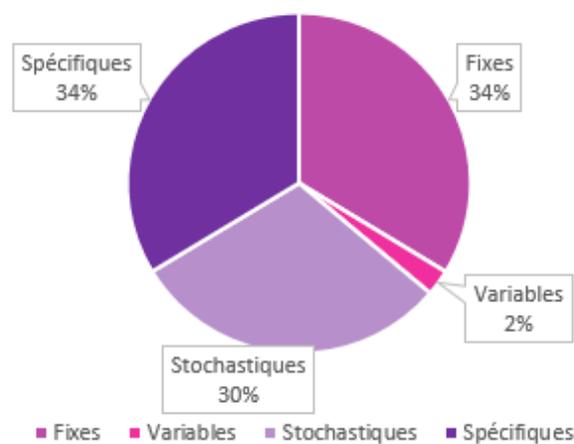


FIG. 4.2 : Pourcentage de chaque type de coût dans le coût de la moto soufflante

4.5.4 Discussion des résultats

On remarque tout d'abord que la différence entre le prix de vente et les coûts réels est **négative**, même si les coûts réels sont comptabilisés sans les coûts fixes. Cela signifie que le prix payé par le client ne couvre pas les coûts mentionnés, ni les coûts fixes, et aucun bénéfice n'est dégagé.

En revanche, le modèle renvoie un coût nettement supérieur au coût réel, et cela dû à l'imputation des coûts fixes. La figure 4.2 illustre cela, puisque les coûts fixes occupent une portion importante du coût final, ce qui se justifie par le total des coûts fixes que l'entreprise paie chaque mois, et la nécessité de les couvrir pour être rentable.

Pour ce qui est de la précision du modèle, elle n'a de sens qu'en comparant les coûts stochastiques. Le résultat est le suivant :

$$\frac{|CS_R(MS) - CS(MS)|}{CS_R(MS)} = 10,54\% \quad (4.34)$$

En se référant au tableau 1.2, on voit que cette précision se trouve effectivement entre la moyenne des techniques analytiques et paramétriques, c'est donc une valeur conventionnellement acceptable.

4.5.5 Prix proposé

Le prix final à proposer est donc une somme des coûts à laquelle s'ajoute une marge. Le chapitre détaille la relation de la marge à l'environnement extérieur. Néanmoins, en ETO, et plus particulièrement lorsque la variabilité de produits est grande, cela équerrerait une étude d'un large panel de marchés différents. Dans certains cas, cela peut s'avérer difficile, voir impossible à cause de l'absence de l'information, comme par exemple pour le cas de SARL Auzia qui évolue dans un marché naissant (voir le chapitre 1.3.4) ou l'information n'existe pas encore.

Pour le cas de notre pièce, tenter d'effectuer un benchmark des prix de vente proposés à l'international soulève le problème de la disponibilité de notre pièce sur le marché. la moto soufflante réalisée, avec ces dimensions et ces matériaux est introuvable sur le marché car c'est une commande extrêmement spécifique qui n'est pas produite à la chaîne. Pour le benchmark, il est donc possible d'utiliser des pièces mécaniques aux dimensions similaires et remplissant les mêmes fonctions que la moto soufflante.

Ne disposant pas des canaux d'information nécessaires pour l'identification du prix accepté sur le marché sans effectuer de sondage, il est possible de suivre deux scénarios. Nous poserons pour cela $P_M(MS)$ le prix moyen proposé par le marché pour une moto soufflante de même dimension et de même matériaux que celle proposée par SARL Auzia. Les deux scénarios sont donc que le prix du marché soit supérieur à $C(MS)$ (le coût renvoyé par la simulation) ou au contraire qu'il soit inférieur ou égal.

$$C(MS) < P_M(MS)$$

Si le prix sur le marché est strictement supérieur au coût du modèle, alors l'entreprise peut dégager une marge telle que : $P(MS) \in [C(MS), P_M(MS)]$, et l'entreprise peut choisir de se positionner selon ses capacités de production et le segment de marché qu'elle vise. Il faudra alors résoudre un problème basique d'optimisation du profit sous contrainte de la demande (qui est décroissante par rapport au prix).

$$C(MS) \geq P_M(MS)$$

Si le prix du marché est inférieur ou égal au coût du modèle, cela signifie que l'entreprise ne peut pas proposer un prix compétitif, car le prix du marché est déjà inférieur à ses coûts. Cela peut s'expliquer de différentes manières, selon l'origine de la différence de montant :

1. Coûts fixes trop élevés : cela signifie que l'entreprise n'est pas arrivée à réaliser des économies d'échelle, elle doit donc optimiser ses processus dans ce sens là, c'est à dire en augmentant sa production et en captant une plus grande part de marché.
2. Coûts stochastiques trop élevés : cela signifie que certains processus de l'entreprise ne sont pas sous-contrôle, et qu'elle doit donc déployer des efforts dans le sens de la minimisation des pertes.
3. Coûts spécifiques trop élevés : ces derniers dépendent le plus souvent de prestataires externes, cela signifie donc qu'il faut optimiser le processus de sélections des fournisseurs ou des prestataires de service.
4. Coûts variables trop élevés : ceux-ci dépendent directement du coeur de métier, il faudrait alors trouver des manières de réaliser les mêmes produits, à des coûts plus bas, en optimisant par exemple l'usage des machines.

En conclusion, le coût final est certes interne à l'entreprise, mais le prix à proposer dépend des conditions du marché.

4.6 Potentiel d'économies d'échelle internes

Le chapitre 2.5 mentionne plusieurs applications potentielles pour le modèle développé, notamment l'estimation du potentiel d'économies d'échelles. Nous démontrerons dans cette partie comment cela est possible, en l'appliquant au cas de SARL Auzia. Les autres applications étant de nature plus générale et ne nécessitant pas de développement particulier ne seront pas abordées dans ce travail.

Définition 4.1

Les économies d'échelle sont définies comme "une diminution du coût moyen suite à une augmentation de la production marginale d'une entreprise, que ce soit pour un bien tangible ou intangible".

4.6.1 Mise en oeuvre du modèle

La notion d'économie d'échelles est une notion théorique qui reste difficilement applicable dans la pratique [39]. Pour l'adapter à notre cas, nous approcherons certains concepts de la manière suivante :

1. L'échelle de volume de production sera le vecteur d'unités d'oeuvres consommées. Cette échelle démarrera donc, pour un vecteur $UO(p)$ unitaire [40], dont tous les éléments seront égaux à 1, puis varieront de manière linéaire ($UO(p)$ dont tous les éléments seront égaux à 2 etc).
2. Étant donné que chaque produit a une valeur différente, le coût moyen sera estimé par rapport aux unités d'oeuvres consommées et pas aux nombres de pièces fabriquées.
3. On considérera la limite de capacité de l'entreprise comme étant une borne des unités d'oeuvres consommables en 1 mois, puisqu'un mois n'a que 160 heures ouvrables. A partir de là, il faudra réinvestir. Notre étude ne traitera pas de ce cas, puisque le réinvestissement implique de recalculer les différents coûts variables selon la nature de l'investissement. Nous nous contenterons d'observer le comportement du coût moyen avec les capacités actuelles.

Ainsi, en suivant cette logique, le coût moyen sera donné par la formule :

$$C_{moy} = \frac{C(vUO_u)}{v} \quad (4.35)$$

Avec :

- C_{moy} : coût moyen de l'entreprise par unité d'oeuvre.
- v : coefficient d'échelle, $v \in [1, 160]$, permet de faire varier l'échelle de production en multipliant le vecteur de production.
- UO_u : vecteur unitaire des unités d'oeuvres consommées, avec pour éléments 1 à toutes les lignes.
- $C(vUO_u)$: coût calculé par le modèle pour un vecteur d'unité d'oeuvres vUO_u .

4.6.2 Résultats et interprétation

Une simulation effectuée sur R nous permet alors d'obtenir le graphe 4.3. C'est un graphe de l'évolution des différents coûts en fonction du volume de prédiction, représenté par la variable v . Les abscisses s'étendent de 1 à 160, car comme expliqué plus haut, l'usine ne peut dépasser 160 heures de travail machine actuellement, sans investissement. La courbe représente les coûts fixes d'un mois, les coûts variables et les coûts stochastiques.

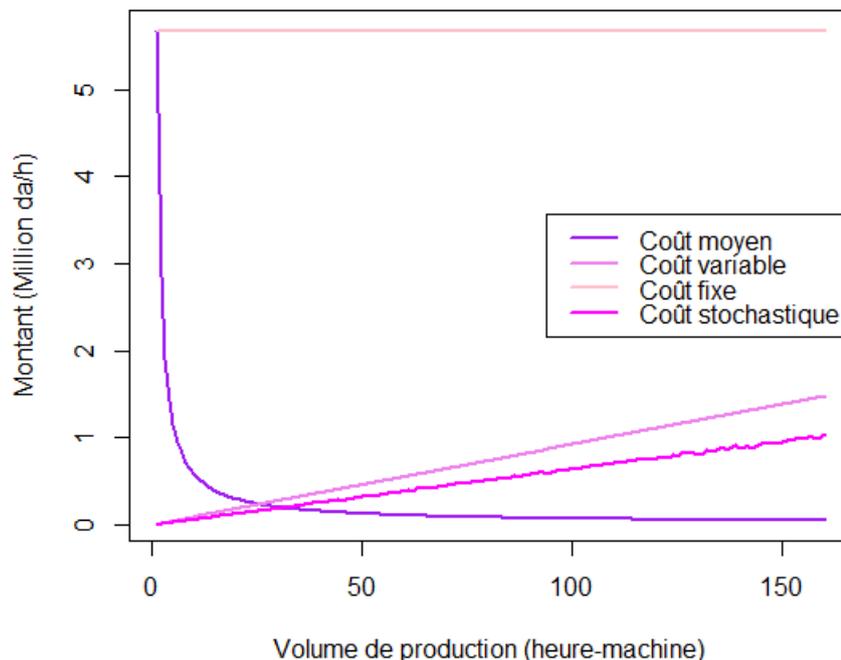


FIG. 4.3 : Variation des coûts de SARL Auzia en fonction du volume de production

On remarque que la courbe du coût moyen est une courbe décroissante en L. Lorsque le volume de production est nul, la notion de "coût moyen" n'existe pas, d'où son absence sur le graphe. Les coûts variables et stochastiques augmentent avec l'augmentation du volume de production. On remarque des perturbations dans la courbe des coûts stochastiques. Cela est dû à la différence d'échantillonnage lors de la simulation sur R. Pour des heures machines proches, la différence d'espérances n'est pas suffisamment significatives pour assurer une augmentation linéaires des résultats de la simulation.

La forme en L du coût moyen en fonction du volume de production nous permet donc de conclure que l'entreprise a un fort **potentiel** d'économies d'échelles internes. Potentiel, car en fonction du marché, des évolutions technologiques et autre facteur, l'entreprise peut ne pas réaliser ces économies. La courbe en L est expliquée par le fait que nous n'avons pas posé les contraintes de capacité [41] en limitant le volume de production à 160. Pour la partie déséconomie d'échelles, elle peut être évaluée par la capacité que l'entreprise a d'étaler horizontalement ses ressources humaines spécialisées [41] et de gérer efficacement des capacités de production plus importantes.

Le modèle peut donc permettre à l'entreprise d'avoir une visibilité sur son potentiel d'économie d'échelle interne. Cela reste néanmoins aussi fiable empiriquement que le concept d'économie d'échelle puisse l'être[39].

4.7 Interfaçage et utilisation en entreprise

Pour faciliter l'utilisation du modèle en pratique, celui-ci sera implémenté sur Excel. Bien que ce dernier présente des capacités de gestion de données limitées, son utilisation est très intuitive. De plus, les employés de l'entreprise sont pour la plupart déjà familiers avec l'interface d'Excel, ce qui limitera les difficultés liées à la résistance au changement. A l'utilisation, les données d'entrées du modèle devront être les suivantes :

1. Les temps d'usinage nécessaires sur chaque machine : Il faudra entrer le temps de transformation nécessaire sur chaque machine pour la complétion du projet.
2. Les montants des coûts spécifiques : ces derniers sont connus, il suffit donc de les entrer manuellement en amont de la production.
3. Le niveau de complexité du projet : A, B ou C, A étant le plus complexe et C le moins complexe.

Pour ce qui est des coûts stochastiques, il est possible d'effectuer une simulation sur R et d'en récupérer les données (voir annexe A.1) ou d'utiliser la simulation de Monte Carlo sur Excel, ce qui est possible mais déconseillé à cause du temps de calcul nécessaire pour des itérations élevées.

Ces données seront traitées, et le modèle renverra le **prix de vente préconisé**, sans comptabiliser la marge bénéficiaire qui est laissée à la discrétion des responsables.

Conclusion

En conclusion, il existe bien un écart entre le coût des projets et leur prix de vente. Cela peut s'avérer être une menace dangereuse pour l'entreprise, particulièrement si le coût est nettement supérieur au prix du marché, mais étant donné que SARL Auzia propose une prestation indisponible sur le marché locale en terme d'innovation et de qualité, il lui est possible de fixer des prix supérieur au coût du projet, moyennant qu'elle ait une visibilité sur ce dernier.

Le modèle peut donc bien être utilisé pour l'estimation des coûts en ETO, pour le pricing ainsi que pour l'évaluation du potentiel d'économies d'échelles, comme le montre cette application à la moto soufflante réalisée par SARL Auzia.

Conclusion générale et perspectives

En Algérie, et plus généralement dans les zones où l'industrialisation est à une étape de développement embryonnaire, la problématique d'estimation des coûts est au centre des préoccupations des entreprises de production. Cela est particulièrement vrai pour les entreprises qui fonctionnent en Engineer-To-Order, puisque ces dernières sont soumises à des risques financiers importants, qui peuvent menacer jusqu'à l'existence même de l'entreprise.

Plusieurs efforts de recherche ont été menés dans ce sens, expliquant l'important panel de méthodes, méthodologies et modèles disponibles dans la littérature et traitant du thème de l'estimation des coûts d'un produit en Engineer-To-Order. Néanmoins, ces travaux restent souvent purement académiques ou sont plus adaptées aux industries 3.0 et 4.0 et aux entreprises occidentales.

Le présent travail a donc pour ambition de réconcilier les techniques de l'état de l'art aux réalités pratiques du terrain industriel des PME des pays en développement, et plus particulièrement des PME algériennes. Pour atteindre ce meta-objectif, ce projet a été mené dans le cadre de l'accompagnement de SARL Auzia dans sa démarche de réalisation de devis pour les pièces mécaniques. Au-delà du coût, nous avons tenté de présenter un modèle permettant le *pricing*. L'objectif premier de cette étude est donc de permettre à SARL Auzia de réaliser les devis de ses projets.

Dans cette optique, nous avons suivi un raisonnement en entonnoir, qui s'est déroulé en quatre chapitres. Dans un premier temps, nous avons exploré les différentes notions et techniques de l'état de l'art pour poser un cadre conceptuel général, que nous avons ensuite affiné grâce à une analyse interne et externe de l'entreprise menée dans le deuxième chapitre. Ces deux premiers chapitres nous ont permis d'identifier les limites des techniques classiques d'estimation des coûts lorsque le milieu de déploiement est soumis à la fois aux contraintes de la production en ETO, et aux contraintes classiques des PME en voie de développement. Un modèle a donc été développé, avec ce qu'il en suit de formalismes mathématiques, dans le troisième chapitre, ainsi qu'un algorithme d'implantation. Ce dernier nous a permis de déployer notre solution au sein de SARL Auzia et de calculer le coût d'une moto soufflante. L'objectif étant de proposer un devis, nous avons proposé une démarche d'interprétation des résultats face aux prix du marché, pour en dégager une marge. Néanmoins, par manque de données sur les prix de vente de la pièce étudiée, nous n'avons pu déterminer une marge précise. Cela constituera pour nous une première piste pour les perspectives de ce travail.

Les résultats obtenus dans le troisième chapitre suite au déploiement de la solution montre que SARL Auzia, malgré sa maîtrise du coeur de métier, manque de visibilité sur sa structure de coût. En effet, le prix proposé pour la moto soufflante reste nettement inférieur au coût de réalisation de la pièce. La solution que nous proposons permet de se prémunir contre des situations similaires en calculant un devis basé sur les coûts de l'entreprise et non sur un benchmark externe qui peut être trompeur. Si les processus ne sont pas optimisés, le coût renvoyé peut être relativement cher pour le marché, néanmoins SARL Auzia peut alors profiter pleinement de sa stratégie de différenciation, et faire valoir son engagement pour l'innovation et la qualité pour justifier des prix plus élevés que la concurrence. Ce modèle, si utilisé à bon escient, peut représenter un premier pas de l'entreprise sur la voie du cost control.

Malgré les résultats concluants renvoyés par le modèle, celui-ci se heurte à certaines limitations qui peuvent entraver son utilisation dans divers contextes. Les limites théoriques ont été posées après la construction du modèle et se résument principalement au principe du *garbage in garbage out*, à l'approximation de l'échelle de production par le volume de production et à une sous-optimalité pour les stratégies de production différentes de l'ETO. L'identification de ces limites ouvre la voie à de nombreuses améliorations pour le modèle en lui-même mais aussi pour son application.

Une première piste d'amélioration concerne la fiabilisation des données d'entrées du modèle. Pour le cas de SARL Auzia, cela reviendrait à évaluer le temps d'usinage ou de chaudronnerie nécessaire à partir du modèle d'une pièce. Il est possible de généraliser pour toutes les industries en ETO en proposant une méthodologie d'estimation des valeurs d'unités d'oeuvres consommées par un projet avant que celui-ci ne soit réalisé, permettant ainsi de meilleures entrées pour le modèle. Cela pourrait aussi faciliter l'automatisation de tout le processus d'élaboration du devis, puisqu'à partir de la commande elle-même il deviendrait ainsi possible de passer systématiquement à un devis final. Plusieurs pistes sont à explorer dans cette optique, tel que l'estimation analytique selon les différentes pièces ou l'estimation paramétrique.

Une seconde amélioration potentielle, d'ordre plus pratique concerne l'évaluation de l'élasticité prix-demande des produits concernés par le devis. Une meilleure visibilité sur les données du marché permettrait d'intégrer la marge directement au modèle. Faute de temps, cela n'a pas été fait. Il serait pertinent d'un point de vue pratique d'établir une méthodologie de collecte et de valorisation de données du marché, ou de modéliser ce dernier pour simuler son comportement et tenter d'approcher les valeurs de l'élasticité-prix.

Il est aussi possible, pour de prochains travaux, d'ajouter des coûts stochastiques liés aux risques d'approvisionnement ou aux risques du marché. L'analogie effectuée entre les coûts stochastiques et les notions financières permet d'étendre l'étude à des sources d'incertitudes externes à l'entreprise.

Enfin, une troisième possibilité concernerait le passage à un système cyber-physique, ou à un jumeau numérique basique qui ne récolterait que les données liées aux coûts stochastiques, donc les coûts à risque. Cela limiterait les dépenses liées à la construction du digital twin, car nous aurions un rapport optimal entre les ressources investies dans la démarche et les pertes évitées (ou couvertes par le modèle). En effet, le projet impliquerait de placer des capteurs de données permettant de fiabiliser les distributions en amont de la simulation de Monte Carlo, et non pas de digitaliser toute la chaîne de production. En ciblant les processus à risque, l'entreprise peut avoir une meilleure visibilité sur ses coûts stochastiques et ainsi couvrir ses pertes en les incluant dans le prix final grâce au modèle, et cela en faisant un investissement modulable. En effet, le nombre de processus à contrôler ne dépend que de l'entreprise, l'investissement peut donc se faire par à coup.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] T. JACQUOT et R. MILKOFF, *Comptabilité de gestion : analyse et maîtrise des coûts*. Pearson Education France, 2007.
- [2] G. COKINS, S. CĂPUȘNEANU et al., “Cost drivers. Evolution and benefits”, *Theoretical and Applied Economics*, t. 8, n° 8, p. 7, 2010.
- [3] L. GEOFFROY, *Comptabilité analytique et analyse des coûts à l’hôpital*, Communication personnelle, 1990.
- [4] R. LAUNOIS, “Typologie des coûts en comptabilité analytique”, *Ateliers de la transparence : comparaison des coûts des thérapeutiques dans le dossier de la transparence*, 1995.
- [5] B. GRANDGUILLOT et F. GRANDGUILLOT, *Comptabilité et gestion*. Dunod, 1991.
- [6] M. N. BELTRAMO, “Beyond parametrics : The role of subjectivity in cost models”, *Engineering Costs and Production Economics*, t. 14, n° 2, p. 131-136, 1988.
- [7] K. I. VAUGHN, “Does it matter that costs are subjective?”, *Southern Economic Journal*, p. 702-715, 1980.
- [8] C. HICKS et T. MCGOVERN, “Product life cycle management in engineer-to-order industries”, *International Journal of Technology Management*, t. 48, n° 2, p. 153-167, 2009.
- [9] C. HICKS, T. MCGOVERN et C. F. EARL, “Supply chain management : A strategic issue in engineer to order manufacturing”, *International journal of production economics*, t. 65, n° 2, p. 179-190, 2000.
- [10] B. YANG et N. BURNS, “Implications of postponement for the supply chain”, *International journal of production research*, t. 41, n° 9, p. 2075-2090, 2003.
- [11] B. YANG, N. D. BURNS et C. J. BACKHOUSE, “Postponement : a review and an integrated framework”, *International journal of operations & production management*, t. 24, n° 5, p. 468-487, 2004.
- [12] R. ADDO-TENKORANG et E. EYOB, “Engineer-to-order : a maturity concurrent engineering best practice in improving supply chains”, in *Customer-Oriented Global Supply Chains : Concepts for Effective Management*, IGI global, 2012, p. 112-128.
- [13] M. TORRES, “Methodology to create cost estimation models for engineer-to-order operations”, 2011.
- [14] Y. HOOSHMAND, P. KÖHLER et A. KORFF-KRUMM, “Cost estimation in engineer-to-order manufacturing”, *Open Engineering*, t. 6, n° 1, 2016.

- [15] A. NIAZI, J. S. DAI, S. BALABANI et L. SENEVIRATNE, “Product cost estimation : Technique classification and methodology review”, 2006.
- [16] A. Z. A. KADIR, Y. YUSOF et M. S. WAHAB, “Additive manufacturing cost estimation models—a classification review”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, t. 107, p. 4033-4053, 2020.
- [17] M. SHAMOUSHAKI, G. MANFRIDA, L. TALLURI, P. H. NIKNAM et D. FIASCHI, “Different Geothermal Power Cycle Configurations Cost Estimation Models”, *Sustainability*, t. 13, n° 20, p. 11 133, 2021.
- [18] F. FACCHINI, A. DE CHIRICO et G. MUMMOLO, “Comparative cost evaluation of material removal process and additive manufacturing in aerospace industry”, in *Industrial Engineering and Operations Management I : XXIV IJCIEOM, Lisbon, Portugal, July 18–20 24*, Springer, 2019, p. 47-59.
- [19] C. AHMED, “Early cost estimation models based on multiple regression analysis for road and railway tunnel projects”, *Arabian Journal of Geosciences*, t. 14, n° 11, p. 972, 2021.
- [20] S. L. COTRIM, A. de ARAUJO MACHADO, G. C. L. LEAL, E. V. C. GALDAMEZ et M. A. d. S. S. RAVAGNANI, “Parameters for cost estimation in shell and tube heat exchangers network synthesis : A systematic literature review on 30 years of research”, *Applied Thermal Engineering*, t. 213, p. 118 801, 2022.
- [21] R. COOPER et R. S. KAPLAN, “How cost accounting distorts product costs”, *Strategic Finance*, t. 69, n° 10, p. 20, 1988.
- [22] Z. CIDAV, D. MANDELL, J. PYNE, R. BEIDAS, G. CURRAN et S. MARCUS, “A pragmatic method for costing implementation strategies using time-driven activity-based costing”, *Implementation Science*, t. 15, n° 1, p. 1-15, 2020.
- [23] M. W. MAHER et M. L. MARAIS, “A field study on the limitations of activity-based costing when resources are provided on a joint and indivisible basis”, *Journal of Accounting Research*, t. 36, n° 1, p. 129-142, 1998.
- [24] T. J. LINSMEIER, N. D. PEARSON et al., “Risk measurement : An introduction to value at risk”, 1996.
- [25] T. J. LINSMEIER et N. D. PEARSON, “Value at risk”, *Financial Analysts Journal*, t. 56, n° 2, p. 47-67, 2000.
- [26] R. KONDAPANENI, “A Study of the Delta-Normal Method of Measuring VaR.”, thèse de doct., Worcester Polytechnic Institute, 2005.
- [27] P. GLASSERMAN, “Calculating portfolio credit risk”, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, t. 15, p. 437-470, 2007.
- [28] S. RAYCHAUDHURI, “Introduction to monte carlo simulation”, in *2008 Winter simulation conference*, IEEE, 2008, p. 91-100.
- [29] R. L. HARRISON, “Introduction to monte carlo simulation”, in *AIP conference proceedings*, American Institute of Physics, t. 1204, 2010, p. 17-21.
- [30] S. RUBENTHALER, “Méthodes de Monte-Carlo”, Master, Lecture, France, jan. 2019.
- [31] J. STOEHR, *Méthodes de Monte Carlo*. Université Paris Dauphine, 2022.

- [32] N. CHEN et L. JEFF HONG, “Monte Carlo simulation in financial engineering”, in *2007 Winter Simulation Conference*, 2007, p. 919-931. DOI : [10.1109/WSC.2007.4419688](https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419688).
- [33] B. EDWIN, “World Steel in Figures”, WorldSteel Association, rapp. tech., 2022.
- [34] S. B. YAMINA, “Bulletin trimestriel des statistiques premier trimestre de 2021”, Office National des Statistiques, rapp. tech., 2021.
- [35] B. GARRETTE, P. DUSSAUGE et R. DURAND, *Strategor : Toute la strategie d'entreprise*. Dunod, 2009.
- [36] O. N. des STATISTIQUES, “INDICE DE LA PRODUCTION INDUSTRIELLE - au 3ème trimestre 2022”, Office National des Statistiques, 2022.
- [37] B. AGYEKUM, E. KISSI, D. YAMOAH AGYEMANG et E. BADU, “Examining barriers for the utilization of non-traditional cost estimating models in developing countries : Ghanaian quantity surveyors’ perspectives”, *Journal of Engineering, Design and Technology*, t. 16, n° 6, p. 814-827, 2018.
- [38] T. BECKER et H. STERN, “Impact of resource sharing in manufacturing on logistical key figures”, *Procedia Cirp*, t. 41, p. 579-584, 2016.
- [39] J.-C. HOURCADE, “Les économies d’échelle”, *Communications*, t. 42, n° 1, p. 103-119, 1985.
- [40] C. GERMAIN, “Réflexions sur les économies d’échelle-1”, *L’Actualité économique*, t. 43, n° 4, p. 696-714, 2011.
- [41] D. BESANKO, D. DRANOVE, M. SHANLEY et S. SCHAEFER, *Economics of strategy*. John Wiley & Sons, 2009.

Annexes

Annexe A

Processus de SARL Auzia

Cette annexe est consacrée à la présentation des processus de l'entreprise SARL Auzia.

A.1 Processus de maintenance

Les machines étant un moyen de production indispensable à toutes es commandes de SARL Auzia, le processus de maintenance est au centre de la chaîne de valeur, et revêt une importance capitale pour l'entreprise.

La maintenance de l'entreprise se scinde en maintenance **préventive** et en maintenance **corrective**.

Les activités liées à la maintenance préventive sont :

1. L'élaboration et le suivi du plan de maintenance.
2. Réaliser le plan de maintenance préventive.
3. Appliquer les dispositions prévues pour la préservation de l'environnement et de la sécurité des personnes.
4. Renseigner la feuille de synthèse mensuelle de la maintenance.

Quant aux opérations de maintenance curative, elles se font suite à une panne sur la base d'une demande d'intervention établie par l'utilisateur et transmise au responsable maintenance.

A la réception de la demande d'intervention, le responsable maintenance curative, accompagné de son équipe, effectue un diagnostic sommaire pour déterminer les causes de la panne puis les travaux demandés et une description sur les travaux réalisés. Si la pièce de rechange est disponible, l'intervention de réparation est programmée. Après intervention, l'équipe de maintenance complète la fiche de diagnostic et travaux et procédera aux essais nécessaires. Une fois la prestation réalisée, on procède à un essai et s'il s'avère concluant, un enregistrement "fiche d'intervention de mise à disposition" est établi mentionnant les opérations réalisées.

Processus de production

Le département intitulé "Production" prend en charge tout le processus de production de Sarl Auzia, de l'étude à travers le bureau d'étude, à la fabrication et la maintenance des machines. La fabrication se fait au niveau de l'**Atelier de chaudronnerie** et l'**Atelier d'usinage**, dont les machines sont suivies par les chargés de maintenance.

- **Bureau d'études** : le bureau d'étude a pour tâche d'étudier la faisabilité des demandes envoyées par le commercial, de donner les procédés de fabrication nécessaire à chaque projet ainsi que les quantités de matière première requises. Ainsi, c'est au bureau d'étude de spécifier par quelles machines, dans quel ordre et pour combien de temps la matière devra être transformée. Une fois le projet ouvert, le bureau d'étude se charge de faire la conception sur logiciel de la pièce voulue.
- **Ateliers de fabrication** : Une fois le plan de fabrication d'un projet reçu de chez le bureau d'études, de même que la matière première, la fabrication du produit peut être entamée, dans un des deux ateliers de l'usine : l'atelier d'usinage et l'atelier de chaudronnerie. Les machines sont visibles dans le tableau A.1.

Atelier d'usinage	Atelier de chaudronnerie
centre de fraisage 4 axe	Machine de découpe Plasma
Tour numérique 3 axe	Plieuse numérique
Tour conventionnel 3m	Guillotine
Tour conventionnel 5m5	Poste à souder MIG MAG
Tour conventionnel 4m	Poste à souder Tig
Tour conventionnel 1m5	Poste à souder arc
Fraise conventionnelle	Four de peinture électrostatique
Fraise conventionnelle	Chalumeau
Rectifieuse plane	Tronçonneuse
Rectifieuse cylindrique	Rouleuse
Scie à ruban	Machine de peinture
Four thermique	Presse hydraulique
Perceuse	Perceuse
Étau limeur	Cintreuse de tubes
Mortraiseuse	Equilibreuse
	Perceuse à colonnes

TAB. A.1 : Distribution des machines de SARL Auzia entre les ateliers

L'ordre de passage dans ces ateliers ou dans les machines est spécifié par le bureau d'études. Les machines ne fonctionnent qu'en cas d'ouverture de projet. Si aucun projet n'est ouvert, celle-ci sont à l'arrêt malgré la présence des ouvriers.

Processus de gestion de la qualité

Le processus de gestion de la qualité est subdivisé en trois activités principales : la prévention de la non qualité, l'évaluation de la qualité et la gestion de la non-qualité.

1. Prévention de la non qualité

La prévention au sein de l'entreprise est d'une part assurée par le recrutement de main d'œuvre très qualifiée et de gestion des salaires en fonction de cela, et d'autre part par le fonctionnement selon les standards de la certification ISO 9001. Acquérir cette certification et articuler les processus de l'entreprise autour d'elle est un investissement dans la prévention contre la non-qualité.

2. Évaluation de la Qualité

L'évaluation de la qualité se fait à la sortie de chaque machine, puis à la fin du cycle de production grâce aux instruments de mesures de pointe. Pour les lots de plusieurs pièces, le contrôle est exhaustif et le bureau d'étude nécessite alors l'assistance des ouvriers non impliqués dans la production. Le contrôle des exigences se fait en utilisant des instruments de mesure numériques de sorte à éviter qu'une non conformité passe inaperçue et atteigne le client.

3. Gestion de la non qualité

La non qualité peu entraîner plusieurs conséquences, selon sa gravité et le moment auquel elle est détectée :

- **Non-conformité** : toute non conformité doit être rectifiée. Cela peut se faire en repassant les pièces à travers les machines d'où la non conformité est issue (par exemple pour un problème de soudage, la pièce est repassée dans le poste de soudage etc) ou bien dans d'autres machines pouvant faire disparaître la non conformité. Néanmoins, dans certains cas extrêmes, le projet doit être relancé de la première étape (commander de la matière première, refaire l'étude etc).
- **Retard de production** : une non qualité qu'il faut rectifier peut engendrer un non respect des délais, qui aboutit à des pénalités de retard qu'il faudra payer.
- **Retour client** : une non conformité qui n'a pas été détectée cause des retours de la part des clients.

N'importe quel projet peut être soumis à une combinaison de ces trois événements.

Processus commercial

Le département commercial est un maillon très important de la chaîne de valeur du produit, puisqu'il se trouve sur l'interface entre l'entreprise et le client. Les activités du processus commercial :

1. La prospection du marché et la recherche de clients.
2. la réception et le traitement des demandes : Le département se charge de recevoir les commandes, de les communiquer au bureau d'étude, puis d'informer les clients de la faisabilité ou pas du produit, du devis de l'entreprise, de négocier les délais et les modalités de transport. Un client peut passer une commande de deux façons :

- Par plan : le client peut envoyer le plan détaillé du produit qu'il souhaite recevoir. Cette méthode est plus simple puisqu'elle ne requiert pas d'étude de conception.
 - Par modèle : le client donne un modèle réel de la pièce qu'il souhaite recevoir. Ce sera alors au bureau d'études d'analyser la pièce pour en tirer des plans.
3. la confirmation des commande et l'ouverture de **projet** : on désigne par projet le processus de production d'une commande client.
 4. La communication avec les clients et potentiels clients : hors projet, avant projet et après projet.
 5. La facturation et le suivi du paiement : en cas d'ouverture de projet (si le produit demandé par le client est faisable dans les délais exigés, le projet est ouvert), c'est au département commercial d'effectuer la facturation et de s'assurer de la réception du paiement en bonne et due forme.
 6. La livraison du produit : la livraison du produit se fait en utilisant un des trois moyens suivants :
 - **Voiture de fonction** : celle-ci avec pour chauffeur un des employés ou même le directeur général est utilisé pour les pièces de taille moyenne à petite, et n'a pas de grandes limites de kilométrage, puisqu'elle est utilisée pour desservir Setif et même Hassi Messaoud.
 - **Transporteur indépendant** : c'est-à-dire les chauffeurs de camions et de camionnettes. Ceux-ci sont sollicités lorsque la commande est de taille moyenne à grande, ou que la voiture n'est pas disponible ou bien que le personnel est dans l'impossibilité d'effectuer la livraison.
 - **Société de transport** : pour les petites commandes, et particulièrement celles qui doivent être transportée relativement loin, les services d'une société de transport sont demandés.

Processus achat et approvisionnement

1. **Réception de la demande d'approvisionnement** : Toute structure en besoin d'un matériaux, outillage ou autres type de fourniture doit formuler sa demande via un formulaire. La demande d'approvisionnement est reçue au niveau du responsable achat puis étudiée en terme de faisabilité. Le responsable est chargé de la validation et l'acceptation de la demande après consultation du DG pour les demande à caractère exceptionnel.
2. **Expression des besoins d'achat** : Le responsable achat satisfait la demande dans le cas où le produit demandé est disponible. Dans le cas contraire (non disponibilité), le service des approvisionnements établit une demande d'achat regroupant l'ensemble des achats non disponibles. Le Directeur Général doit donner son accord par visa sur le bon de commande global lorsqu'il s'agit d'achats importants.

3. **Étude et planning d'achats et des fiches de spécifications** : Sur la base du planning prévisionnel global, il est établi un planning mensuel tenant compte de la planification de réalisation de toutes les unités. Chaque achat est décrit par des spécifications (techniques) mentionnées dans la demande d'achat.
4. **Sélection et qualification du fournisseur** : Le fournisseur est sélectionné par rapport aux critères suivants :
 - Conformité des spécifications des achats demandés,
 - Prix sur la base d'une facture pro-forma,
 - Modalités de paiement,
 - Délais de livraison,
 - Relations professionnelles.

Le fournisseur peut être choisi du fichier existant. Dans le cas où c'est un nouveau fournisseur, une fiche sous support électronique est immédiatement ouverte et insérée dans le fichier. La liste des prestataires externes est organisé par type de produit ce qui facilite le suivi des performances des fournisseurs. En fonction de l'importance et de la nature de l'achat (ou prestation), la vérification de la qualification du fournisseur ou du prestataire est effectuée par le Responsable d'achat et approvisionnement. La vérification concerne les capacités techniques, financières et commerciales du fournisseur. Elle est effectuée dans le cas d'achat de moindre importance, par l'obtention et la simple vérification des références commerciales du fournisseur. Pour les achats jugés importants, il pourrait être exigé du fournisseur : le bilan comptable, les statuts, la situation fiscale,

5. **Passation des commandes et des marchés** : Pour certains achats jugés importants, il est établi des marchés qui peuvent prendre la forme de gré à gré ou celle d'appel à la concurrence. La passation des commandes de gré à gré est effectuée chaque fois que ce mode de passation est jugé plus avantageux pour l'entreprise, quand par exemple :
 - La prestation ne peut être exécutée que par un partenaire unique qui détient une situation de monopole,
 - l'appel à la concurrence s'avère infructueux,
 - L'urgence motivée par l'arrêt d'un équipement ou d'une unité,
 - Une opportunité commerciale qui ne peut s'accommoder des délais de l'appel à la concurrence.

Le service des achats peut recourir à ce mode de passation de marché après consultation et accord du Directeur Général

6. **La consultation des fournisseurs** : La consultation des fournisseurs est sous la responsabilité d'achat. La consultation directe concerne généralement les achats de gré à gré. Elle est formalisée par la visite chez le fournisseur, et la transmission d'une lettre de consultation signée par le responsable d'achat.

7. **Le choix des fournisseurs** : Lorsqu'il s'agit de plusieurs offres, le choix du fournisseur s'effectue sur la base de l'élaboration d'une comparaison des offres. Le choix du fournisseur s'effectue par Le Responsable d'achat le responsable utilisateur.
8. **L'engagement des achats** :
 - **L'établissement des bons de commande** : Tout achat de matière, fourniture ou de prestation est formalisé par l'établissement d'un bon de commande, établi par le responsable achats et signé par le directeur générale et le responsable achats.
 - **L'élaboration des contrats d'achat** : L'élaboration d'un contrat d'achat de fournitures, de matières ou de services est établit à chaque fois que le Responsable d'achat estime que le genre de transaction projetée ne s'accommode pas avec l'établissement d'un bon de commande, et notamment lorsqu'il s'agit de :
 - La nature de la prestation suppose des engagements des deux parties,
 - D'un achat jugé important et doit faire l'objet de clauses spécifiques,
 - D'une prestation complexe,
 - D'un délai de réalisation relativement long,
 - De modalités de paiement spécifiques.
9. **Paiement des fournisseurs** : Les règlements des achats s'effectuent suite à l'établissement d'une demande de paiement et transmise, accompagnée d'un dossier, à la direction des finances et comptabilités.
10. **Conditions et modes de livraison** : Pour les achats locaux, les conditions et modes de livraison sont à convenir contractuellement. Pour les importations, le mode de livraison est défini par les incoterms.
11. **Réception et vérification du produit acheté** : la réception est effectuée par le responsable achat et approvisionnement et l'utilisateur, formalisée par la signature conjointe d'un bon de réception.
12. **Gestion et évaluation des fournisseurs** : évalués et réévalués annuellement.

Processus de gestion des ressources humaines

La gestion des ressources humaines passe par une relation de travail et répond aux étapes suivantes :

1. **Le besoin** : Les besoins en ressources humaines sont exprimés par les responsables de structures et/ou la Direction Générale, tout besoin est formalisé par une demande de dotation en personnel.
2. **L'étude des candidatures** : Après la réception des candidatures (CV) une présélection est effectuée par le chef service RH et la structure concernée éventuellement.

3. **L'accueil et entretien** : Le candidat est convoqué pour un test et/ou une évaluation, cette dernière est effectuée en collaboration avec le demandeur. L'entretien porte sur les qualifications (compétences) par rapport au profil.
4. **Installation et mise à l'essai** : Le candidat retenu complète et/ou fournit un dossier administratif. Suite à cela, un contrat de travail (CDD et CDI) est établi et signé par les deux parties. S'en suit l'installation de l'employé. Avant d'être confirmé, tout employé nouvellement recruté est soumis à une période d'essai, sanctionnée par une fiche d'évaluation de la période d'essai.
5. **Gestion administrative** : cela inclut le contrôle du pointage, des congés et des paies.
6. **Gestion carrière** : englobe les aspects de mobilité interne, d'intérim, d'évaluation annuelle des compétences, et de mise à la retraite.
7. **La formation** : Cela passe par le recueil et l'analyse des besoins en formation, la consultation et la sélection des organismes de formation, l'élaboration d'un plan de formation, la mise en formation et le suivi, l'évaluation et la mise à jour des matrices de qualification.
8. **La sensibilisation** : cherche à réaliser l'implication et la motivation du personnel, en sensibilisation à l'importance de la politique de qualité, de sécurité, d'hygiène etc.

Processus finances et comptabilités

Ce processus a pour but la maîtrise des flux financiers de l'entreprise. Cela passe par les étapes suivantes :

1. **Établissement et suivi du budget prévisionnel de fonctionnement** : Le quatrième trimestre de l'année "n", la direction finances et comptabilités demande à l'ensemble des structures d'établir leur budget prévisionnel pour l'année "n+1". Suite à cela le directeur finances et comptabilités fait la synthèse de tous les besoins (budgets) et établit le budget prévisionnel de fonctionnement de l'entreprise sous la forme d'un tableau global. La direction s'occupe aussi de la vérification et validation des budgets, de la notification des structures de leur budget, mais aussi du suivi, contrôle et réajustement budgétaire.
2. **Gestion des flux (dépenses - recettes)** : Le dossier de paiement est transmis à la direction finances et comptabilités par l'ensemble des structures ayant procédé à des dépenses de tous types. Quant aux recettes, pour toute opération de vente ou de prestation, la direction finances et comptabilités reçoit : Un exemplaire de la facture originale de vente ou de prestation, et une copie originale des situations.
3. **Gestion bancaire** : Un rapprochement bancaire est effectué mensuellement par la direction finances et comptabilités auprès des différentes banques de l'entreprise, pour un suivi réel.

4. **Gestion de la caisse** : A la fin de chaque journée et après l'arrêté de caisse, le caissier établit un bordereau de récapitulation de toutes les dépenses et recettes de la journée. Ce bordereau est transmis au supérieur hiérarchique pour le suivi et le contrôle des mouvements de la caisse.
5. **Analyse et bilan** : Des analyses régulières et systématiques sont opérées pour s'assurer de la bonne gestion des finances et comptabilités de l'entreprise. Toutes les conclusions qui s'imposent sont énumérées dans le rapport mensuel d'activités.

Processus de gestion de stock

Conventionnellement, la gestion des stocks est d'une importance cruciale pour l'entreprise, car elle permet de maintenir un équilibre optimal entre l'offre et la demande, d'éviter les pénuries ou les surstocks, et de garantir une disponibilité rapide des produits. Or, à SARL Auzia, les stocks ne semblent pas être au centre des préoccupations, puisque les activités les entourant ne sont ni formalisées ni très élaborées. Elles peuvent être résumées comme suit :

1. **Réception de la demande d'approvisionnement et fourniture** : Toute structure en besoin d'un matériaux, outillage ou autres type de fourniture doit formuler sa demande via les formulaires "Demande de Fourniture". La demande de fourniture et reçue au niveau de responsable gestion de stock, la demande est étudiée en terme de faisabilité, le responsable de gestion de stock est chargé de la validation et l'acceptation de la demande après consultation du Directeur Général pour les demande à caractère exceptionnel.
2. **Gestion des fournitures** :
 - Réception en stock : Le responsable de gestion de stock et après réception d'une copie du bon de commande ou de la notification d'un contrat de fourniture procédera à la réception de la fourniture en stock. Dans le cas où la fourniture présente une non-conformité le service Achats est informé pour prise en charge via le bon de réception et/ou le PV de réception et la procédure maîtrise des non-conformités est applicable. Si la fourniture est conforme aux exigences de la commande, la fourniture est admissible en stock, le responsable du magasin procédera à la préparation du bon d'entrée au Magasin
 - Sortie des fournitures : L'expression des besoins internes de l'entreprise en matière de fournitures (outillages, produits, pièces de rechange ... etc) se fait via une demande fourniture, le responsable gestion de stock est chargé de la vérification et validation de la demande, l'autorisation est donnée par le Directeur Général. Le responsable gestion du stock établira les états de sortie du stock mensuellement en fourniture et procédera à l'envoi de ces états après validation et approbation au responsable finance et comptabilité.

Annexe B

Simulations et résultats

Les résultats présentés dans ce projet ont été atteints en utilisant le langage R, ce dernier étant particulièrement adapté aux calculs statistiques. Cette annexe contiendra donc les différents programmes que nous avons élaborés au cours de ce travail.

B.1 Simulations de Monte Carlo

La première étape est de construire les simulations de Monte Carlo qui vont permettre d'évaluer le coût total.

Nous aurons deux scripts différents, l'un pour le résultat des simulations des coûts de NQ, et l'autre pour les coûts de maintenance corrective.

B.1.1 Coûts stochastiques de pannes

Les premiers coûts stochastiques à simuler sont les coûts de panne. Nous les calculerons pour les machines suivantes :

1. Le tour numérique.
2. La fraiseuse numérique.
3. La fraiseuse conventionnelle 1.
4. La fraiseuse conventionnelle 2.
5. Le tour conventionnel 1m5.
6. La plieuse numérique.
7. Le poste de soudage.

Le code qui permet de simuler ces coûts est le suivant :

```

1 # Set the parameters of the simulation
2 n.sim <- 10000
3 lambdaT <- c(223.2142857, 10.41666667, 62.5, 208.3333333)
4 lambdaF <- c(240.327381, 8.928571429, 30, 197.3684211)
5 lambdaFC <- c(71.80059524, 1.246279762, 2.287946429)
6 lambdaFC2 <- c(71.80059524, 1.246279762, 2.287946429)
7 lambdaTC <- c(5.970982143, 1.240079365, 0.744047619)
8 lambdaP <- c(26.04166667, 5.208333333, 31.25, 208.3333333)
9 lambdas <- c(4.427083333, 89.28571429)
10
11 #create a list that contains the expected values of each variable for all machines
12 machine_list <- list(lambdaT, lambdaF, lambdaFC, lambdaFC2, lambdaTC, lambdaP, lambdas)
13 machine_list
14 n <- length(machine_list)
15
16 # Initialize an empty list
17 num_rows <- n
18 dfprices <- data.frame(prices = numeric(num_rows))
19 sum_values <- list()
20
21 i<-0
22 for (i in 1:n) {
23 # Generate the random variables
24 x <- rpois(n.sim, machine_list[[i]])
25
26 # Calculate the sum of values for each iteration
27 sum_x <- rowSums(matrix(x, ncol = length(machine_list[[i]]), byrow = TRUE))
28
29 sum_values[[i]] <- sum_x #store the values of sums for each machine
30
31 # Print the mean and variance
32 cat("Mean of the sum:", mean_sum_x, "\n")
33 cat("Variance of the sum:", var_sum_x, "\n")
34 # Set the range of values
35 a <- 0
36 # Calculate the probability of the sum being higher than a
37 prob <- sum(sum_x >= a) / n.sim
38 prob
39 while (prob > 0.05) {
40 a<-a+0.001
41 prob <- sum(sum_x >= a) / n.sim
42 }
43
44 a
45 dfprices$prices[i]<- a
46
47 }
48
49 dfprices
50
51 for (j in 1:n) {
52 hist(sum_values[[j]], main = paste("Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine", j, ")"),
53 xlab = "Coût de panne (da/h)", ylab = "Fréquence", col = "violet")
54 # Add a line to stop and wait for user input
55 cat("Press Enter to continue to the next iteration...")
56 invisible(readLines(n = 1))
57 }

```

FIG. B.1 : Code en R pour la simulation de MonteCarlo des coûts de maintenance corrective

La dernière section du code permet de renvoyer les histogrammes liés aux différentes machines. Ceux-ci apparaissent sur les figures ci-dessous.

Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine 1)

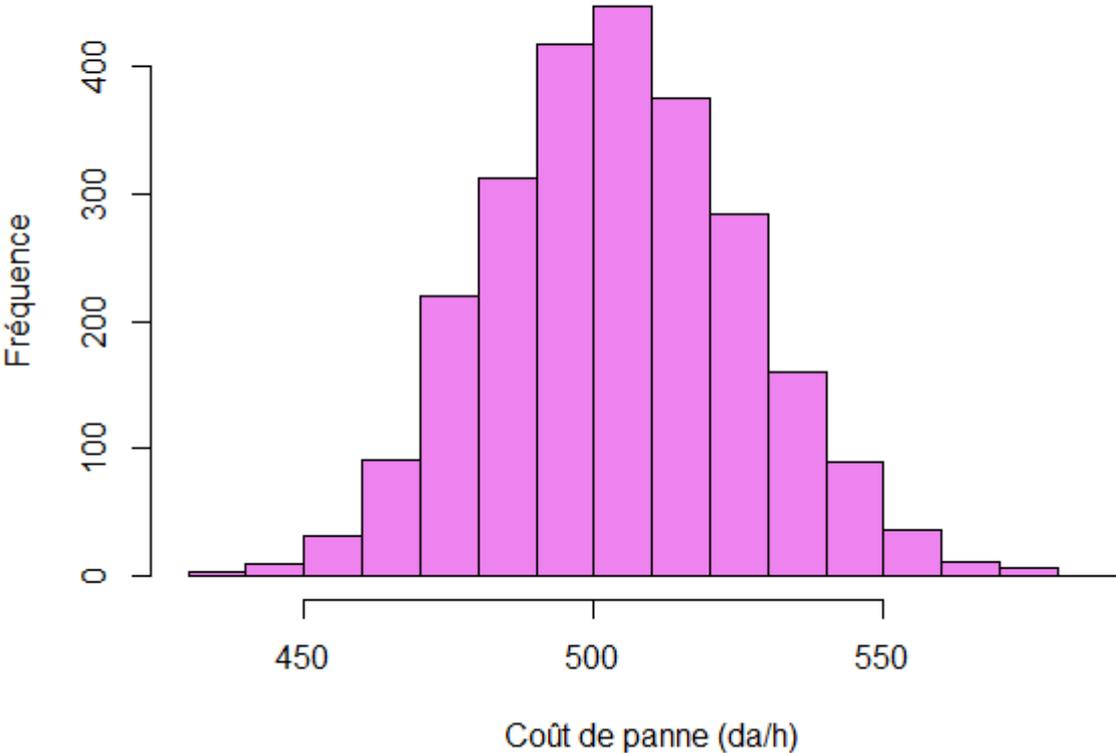


FIG. B.2 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le tour numérique

Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine 2)

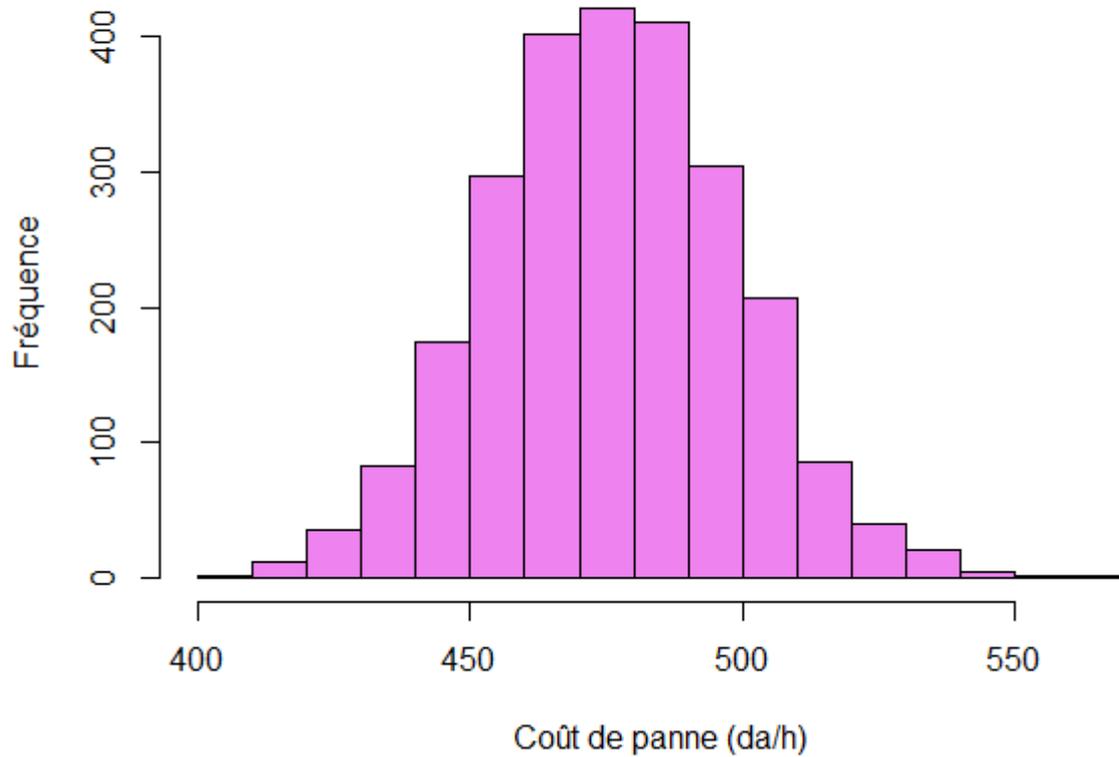


FIG. B.3 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le centre de fraisage numérique

Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine 3)

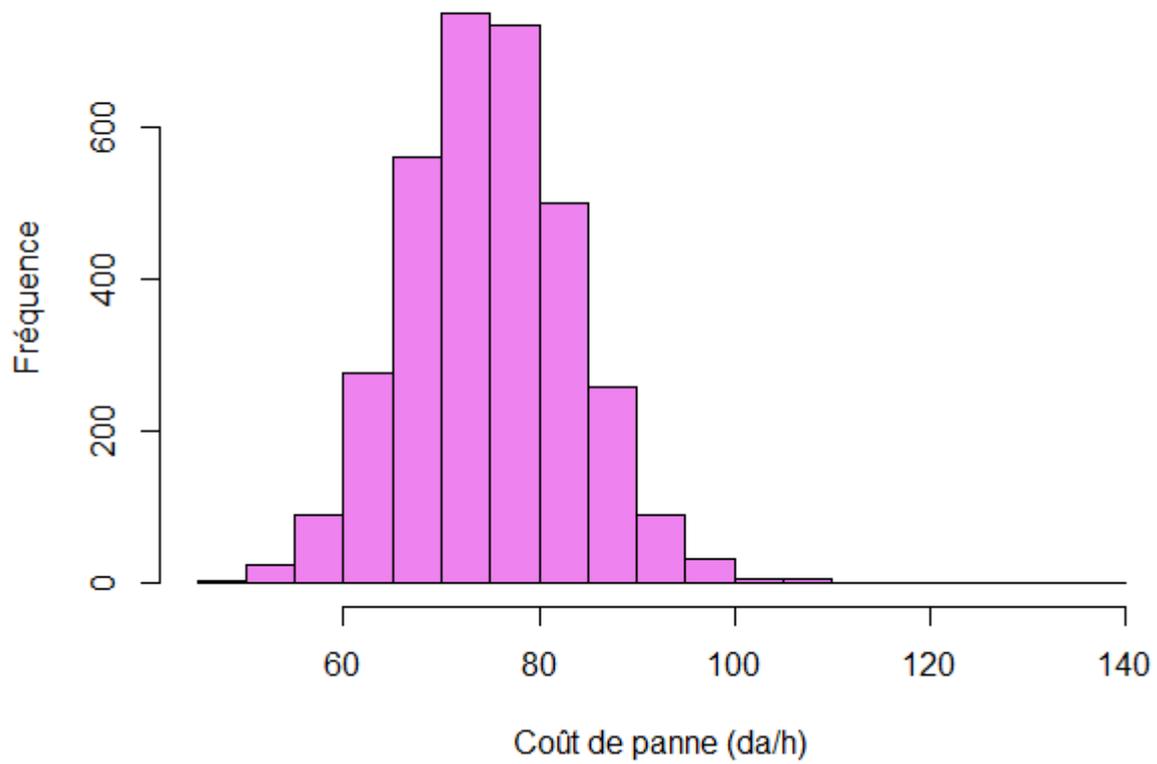


FIG. B.4 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le tour numérique

Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine 4)

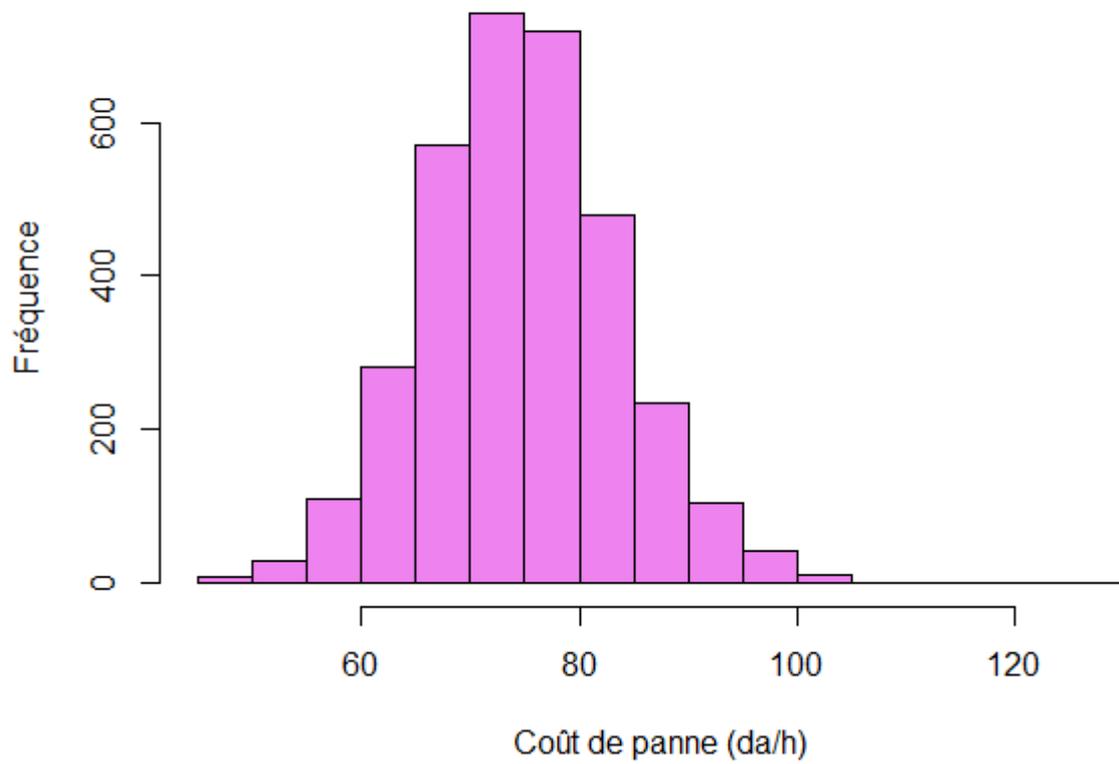


FIG. B.5 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur la fraiseuse conventionnelle

Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine 5)

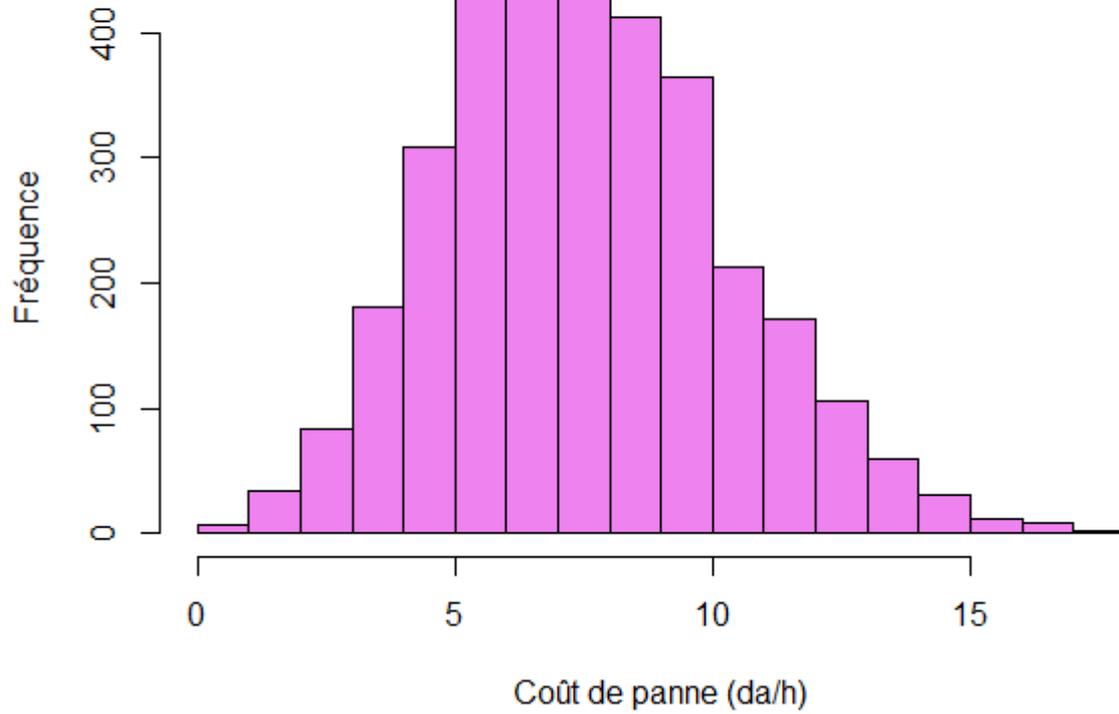


FIG. B.6 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le tour conventionnel

Distribution des coûts stochastiques de panne (Machine 6)

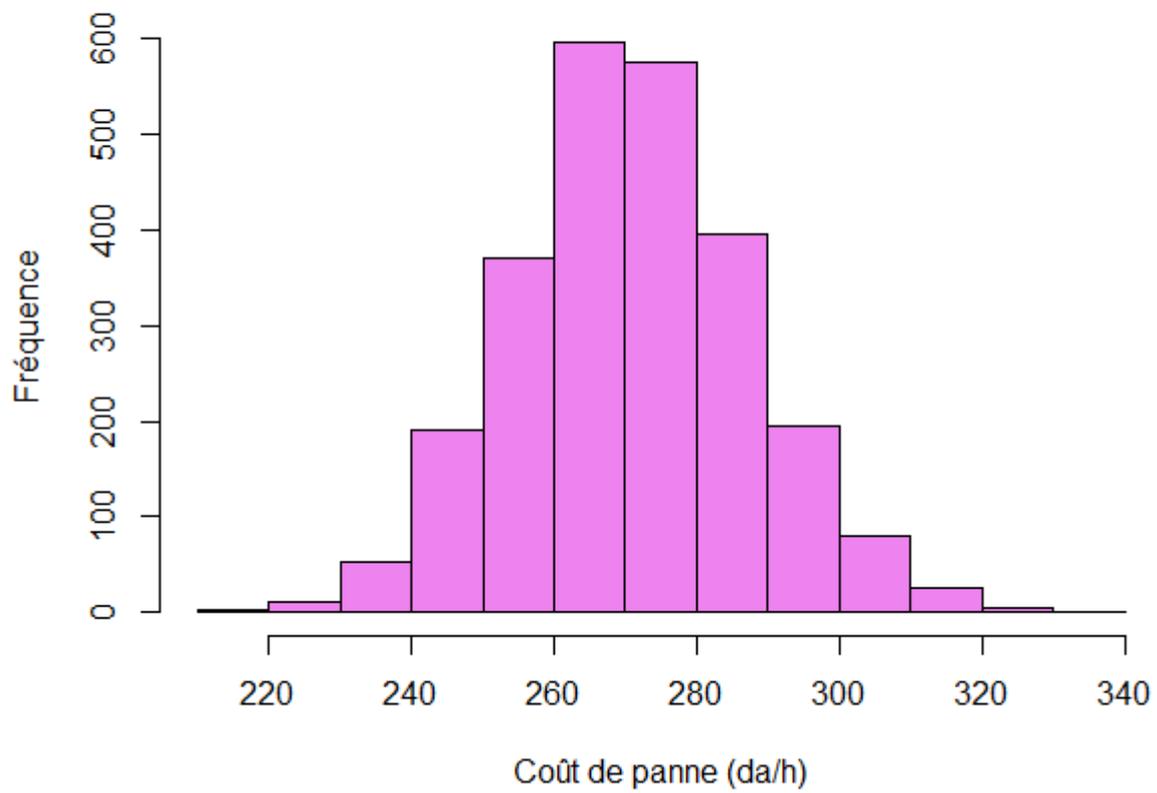


FIG. B.7 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur la plieuse numérique

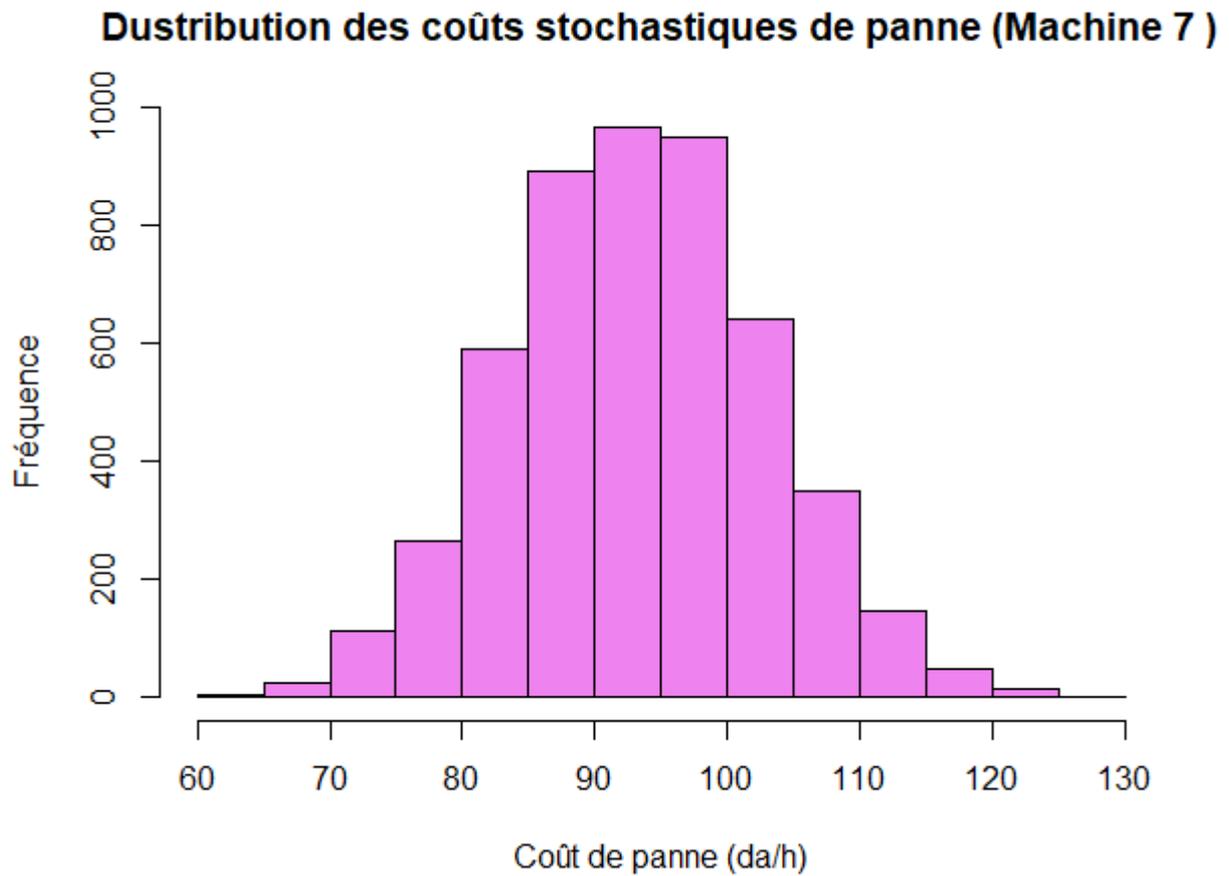


FIG. B.8 : Distribution des coûts de pannes pour une heure sur le poste de soudage

B.1.2 Coûts stochastiques de Non-Qualité

Les coûts stochastiques de NQ dépendent directement du projet. Nous prendrons pour exemple le projet de la moto soufflante.

Le code est le suivant :

```

1 library(triangulr)
2 # Set the number of simulations
3 num_simulations <- 10000
4
5 # Define the parameters for the triangle distribution of MP
6 mp_min <- 0
7 mp_mode <- Cmp/2
8 mp_max <- Cmp
9
10 # Generate random values for MP from the triangle distribution
11 mp_values <- rtri(num_simulations, min = mp_min, max = mp_max, mode = mp_mode)
12
13 # Define the parameters for the uniform distribution of Ytrsf
14 ytrsf_min <- 0
15 ytrsf_max <- CV
16
17 # Generate random values for Ytrsf from the uniform distribution
18 ytrsf_values <- runif(num_simulations, min = ytrsf_min, max = ytrsf_max)
19
20 # Define the probability for the Bernoulli distribution of Ycret
21 ycret_prob <- 0.0238095 #A #B 0.01851852 #C 0.01639344
22
23 cret <- 0 #frais de retards imposés
24
25 # Generate random values for Ycret from the Bernoulli distribution
26 ycret_values <- rbinom(n=num_simulations, size=1, prob=ycret_prob)
27
28 # Define the probability for the Bernoulli distribution of Yctrp
29 yctrp_prob <- 0.01587302 #0.025 #A #B 0.01851852 #C
30 Ctrpnq <- 7000
31 # Generate random values for Yctrp from the Bernoulli distribution
32 yctrp_values <- Ctrpnq * rbinom(n=num_simulations, size=1, prob = yctrp_prob)
33
34 # Perform Monte Carlo simulation of the sum
35 sum_results <- numeric(num_simulations)
36
37 for (i in 1:num_simulations) {
38   sum_results[i] <- mp_values[i] + ytrsf_values[i] + ycret_values[i] + yctrp_values[i]
39 }
40
41 # Calculate the mean of the sum
42 sum_mean <- mean(sum_results)
43 cat("Mean of the sum:", sum_mean, "\n")
44
45 # Example: calculate the standard deviation of the sum
46 sum_sd <- sd(sum_results)
47 cat("Standard deviation of the sum:", sum_sd, "\n")
48
49 # Plot histogram of the probability distribution of the sum
50 hist(sum_results/100, breaks = 35, col = "violet", main = "Distribution des coûts de Non Qualité", ylab="Fréquence", xlab = "Coûts de Non Qualité (100 da)")
51
52 # Set the range of values
53 CNQ <- 0 #coût de non qualité
54 # Calculate the probability of the sum being higher than a
55 prob <- sum(sum_results >= CNQ) / num_simulations
56 prob
57 while (prob > 0.05) {
58   CNQ <- CNQ + 0.1
59   prob <- sum(sum_results >= CNQ) / num_simulations
60 }

```

FIG. B.9 : Code en R pour les simulations des coûts stochastiques de non qualité

B.2 Estimation du coût de la moto soufflante

L'estimation du coût total de la moto soufflante utilise les sorties des simulations précédentes pour procéder au calcul. Le code pour obtenir les résultats est le suivant :

```
1 # Load the readxl package
2 library(readxl)
3
4 # Read data from an Excel sheet
5 data <- read_excel("C:/Users/PC/Documents/Projet De Fin d'Etudes/cost estimation/Tests du modèle/RformatModel.xlsx")
6 data
7
8 # Coûts variables
9
10 CV <- sum(data[, 1] * data[, 2])
11 print(CV)
12
13 # Coûts Fixes
14 CFh <- 5663379.17#total des coûts fixes du mois
15
16 mu <- 1050 #moyenne de conso des UO
17
18 UO <- sum(data[, 2])# somme des UO de p
19
20 CFp <- CFh * UO / mu # coûts fixes du projet
21 print(CFp)
22
23 # Coûts spécifiques
24 Cmp <- 90000
25 Cmtg <- 0
26 Ctrp <- 7000
27
28 # Coûts stochastiques de non qualité
29
30 CNQ
31 print(CNQ)
32 #####
33 #Coûts stochastiques de pannes
34 data2 <- read_excel("C:/Users/PC/Documents/Projet De Fin d'Etudes/cost estimation/Tests du modèle/RformatModel.xlsx", sheet="corrective")
35 data3 <- data2[,2]
36 data3
37 dfprices
38
39 Csp <- sum(dfprices * data3)
40 CSp
41 #####
42 #Estimation finale
43 C <- CSp+CNQ+Cmp+Ctrp+Cmtg+CFp+CV
44 print (C)
```

FIG. B.10 : Code R pour l'estimation du coût de la Moto Soufflante

B.3 Simulation des économies d'échelle

La simulation des économies d'échelles nécessite de calculer l'équivalent de plusieurs projets. Le code utilisé pour cela est le suivant :

```

1 # Load the readxl package
2 library(readxl)
3
4 # Read data from an Excel sheet
5 data <- read_excel("C:/Users/PC/Documents/Projet De Fin d'Etudes/cost estimation/Tests du modèle/RformatModel.xlsx")
6 data
7
8 # Define the range of x-values
9 v <- seq(0, 160, 1) # à revoir
10 v
11 n<-length(v)
12 n
13 # Coûts variables
14 CV <- v *sum(data[, 1] * data[, 3]) #possible car linéaire
15 print(CV)
16
17 # Coûts Fixes
18 CFh <- 5663379.17#total des coûts fixes du mois
19
20 #mu <- 300 #moyenne de conso des UO
21
22 UO <- v*sum(data[, 3])# somme des UO de p
23 UO
24 CFP <-c(CFh * UO /(31*v)) # coûts fixes du projet
25 CFP[[1]]<-CFh
26 print(CFP)
27
28 # Coûts spécifiques
29 Cmp <- 0
30 Cmtg <- 0
31 Ctrp <- 0
32
33 # Coûts stochastiques de non qualité
34 print(mtcars$mpg)
35 CNQ<- numeric()
36 CNQ <- c(CNQ,mtcars$mpg)
37 print(CNQ)
38 for (i in 2:n){
39   NQ <- mtcars$mpg[i]
40   print(NQ)
41   CNQ <- c(CNQ,NQ)
42 }
43 print(CNQ)
44 #####
45 #Coûts stochastiques de pannes
46 data2 <- read_excel("C:/Users/PC/Documents/Projet De Fin d'Etudes/cost estimation/Tests du modèle/RformatModel.xlsx", sheet="corrective")
47 data3 <- data2[,3]
48 data3
49 dfprices
50 CSp <- v*sum(dfprices * data3)
51 CSp
52 #####
53 #Estimation finale
54 C <- CSp+CNQ+Cmp+Ctrp+Cmtg+CFp+CV
55 print (C)
56 Cmoy=C/v
57 print(Cmoy)
58 #####
59 # Create the line plot of total costs
60 cavmil<-Cmoy/1000000
61 CF<-CFp/1000000
62 Cvm<-CV/1000000
63 cstoch <-(CNQ-CSp)/1000000
64 plot(v, cavmil, type = "l", col = "purple", lwd = 2, xlab = "Volume de production (heure-machine)", ylab = "Montant (Million da/h)")
65
66 lines(v, Cvm, col = "violet", lwd = 2)
67 lines(v, CF, col = "pink", lwd = 2)
68 lines(v,cstoch, col = "magenta", lwd=2)
69 # Add a legend
70 legend("right", legend = c("Coût moyen", "Coût variable", "Coût fixe", "Coût stochastique"), col = c("purple", "violet", "pink", "magenta"), lwd = 2)

```

FIG. B.11 : Code en R d'estimation du potentiel d'économies d'échelles de SARL Auzia

Annexe C

Indexation des machines

SARL Auzia possède plusieurs postes de travail et donc machines différentes. Le vecteur d'unité d'oeuvres UO construit dans le déploiement de la solution est basé sur ces machines là. L'indice i faisant référence à chaque machine apparaît sur le tableau

Indice i	Machine
0	Tour numérique 3 axes
1	Centre de fraisage 4 axes
2	Rectifieuse plane
3	Rectifieuse cylindrique
4	Fraiseuse conventionnelle
5	Fraiseuse conventionnelle
6	Tour conventionnel 1,5m
7	Tour conventionnel 0,8m
8	Tour conventionnel 4m
9	Mortraiseuse
10	Étau limeur
11	Four traitement thermique
12	Tour conventionnel 5,5m
13	Scie
14	Perceuse
15	Plasma
16	Plieuse
17	Guillotine
18	MIG MAG
19	Poste à souder Tig
20	Poste à souder arc
21	Four de peinture électrostatique
22	Chalumeau
23	Tronçonneuse
24	Rouleuse
25	Machine de peinture
26	Presse hydraulique
27	Perceuse
28	Cintreuse de tubes
29	Equilibreuse
30	Perceuse à colonnes

TAB. C.1 : Indexation des machines de SARL Auzia