

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA GESTION DES STOCKS CHEZ
HYDROTECH MINING INC.

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAITRISE EN SCIENCE DE LA GESTION

PAR

JEAN-SIMON GIGUÈRE

NOVEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Merci à Hydrotech Mining Inc. qui m'a permis de faire ce projet dans leur entreprise librement.

Merci à mon directeur de recherche, Matthieu Gruson, et à ma directrice de recherche, Marilène Cherkesly, pour leur temps, leur patience, leur compréhension et leurs expertises.

Merci à ma mère, sans qui je n'aurais probablement jamais décidé de faire un tel projet.

DÉDICACE

À mes parents.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xiii
RÉSUMÉ	xv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCTION	18
CHAPITRE I Problématique de recherche	30
1.1 Mise en contexte.....	30
1.2 La prévision de la demande.....	31
1.3 La gestion des stocks	32
1.4 Objectifs du travail	33
CHAPITRE II Revue de littérature	34
2.1 Les problématiques des PME	34
2.2 La prévision de la demande.....	37
2.3 La gestion des stocks	41
CHAPITRE III Méthodologie et récoltes des données.....	47
3.1 Méthodologie du mémoire	47

3.2 Récolte et analyse descriptive des données	49
3.2.1 Récolte des données.....	49
3.2.2 Utilisation de Rstudio et d'Excel.....	50
3.3 Utilisation des données pour le développement de différents modèles de prévision	51
3.3.1 Choix de la pompe A	52
3.3.2 Visualisation des données de la pompe A avec Excel.....	52
3.3.3 Visualisation des données de la pompe A avec Rstudio	54
 CHAPITRE IV Développement de modèles de prévision de la demande.....	57
4.1 L'ensemble d'entraînement et l'ensemble de test.	58
4.2 Méthode de moyenne mobile	59
4.3 La moyenne mobile bonifiée	59
4.4 <i>Exponential smoothing state space model</i> (ETS).....	60
4.4.1 Lissage exponentiel simple.....	60
4.4.2 Lissage exponentiel avec erreur, tendance et saisonnalité (méthode additive)	60
4.4.3 <i>ETS</i> multiplicative (Méthode Winters-Holt)	61
4.5 Fit a linear model with time series components (TSLM).....	61
4.6 <i>Modeling of Time Series</i> (ARIMA : Autoregressive Integrated Moving Average)	61
4.7 Prévisions de demande obtenues avec les différents modèles.....	62
4.8 Comparaisons des différents des modèles	66
4.8.1 Comparaisons des erreurs des modèles	66
4.8.2 Avantages et inconvénients de chacun des modèles	68
 CHAPITRE V Développement du modèle de gestion des stocks.....	71
5.1 Méthodologie pour la gestion de stock.....	71
5.1.1 Calcul de la QÉC	72
5.1.1.1 Obtention du coût de commande.....	73
5.1.1.2 Obtention du coût d'entreposage.....	75
5.1.1.3 Calcul de la QÉC de la pompe A	77
5.1.2 Analyse de sensibilité du coût de commande	77
5.1.3 Analyse de sensibilité du coût d'entreposage.....	78
5.1.4 Analyse de sensibilité des ventes.....	80

5.2 Calcul du point de commande	81
5.2.1 Analyse de sensibilité du niveau de service	85
5.3 Comparaison des stocks de sécurité	86
5.4 Calcul du PC de la pompe A	87
5.5 Analyse de sensibilité du délai de livraison	88
5.6 Analyse de sensibilité de l'écart type du délai de livraison avec le point de commande.....	90
5.7 Transformation du PC et de la QÉC en MIN/MAX.....	91
5.8 Comparaison des min-max actuels et ceux proposés	91
5.9 Autres avantages du modèle	93
CONCLUSION.....	94
BIBLIOGRAPHIE	97
ANNEXE A Développement du modèle de la moyenne mobile.....	101
ANNEXE B Développement du modèle de la moyenne mobile bonifiée	103
ANNEXE C Développement du modèle de lissage exponentiel simple	105
ANNEXE D Développement du modèle <i>ETS</i> additif.....	107
Analyse de sensibilité pour le modèle <i>ETS</i>	108
ANNEXE E Développement du modèle <i>ETS</i> multiplicatif (WInters-Holt)	110
Analyse de sensibilité du modèle Winters-Holt.....	111
ANNEXE F Développement des modèles <i>tslm</i>	113
ANNEXE G Calculs d'erreurs	117
ANNEXE H Données de ventes de la pompe A.....	118
ANNEXE I Coefficient du niveau de service testés et utilisés	120

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 La production minérale au Canada de 2000 à 2020, Marshall (2021).....	20
Figure 1.2 Production minérale par région au Canada de 2010 et 2020, Marshall (2021)	21
Figure 1.3 Processus de prévision de la demande des pompes	24
Figure 1.4 Processus de commandes de pompes neuves	29
Figure 2.1 Facteurs clés de croissance de PME québécoises.....	36
Figure 3.1 Présentation de la méthodologie du mémoire.....	48
Figure 3.2 Quantité vendue de chacune des pompes d’Hydrotech depuis son ouverture en 2017	51
Figure 3.3 Ventes mensuelles des pompes A chez Hydrotech Mining depuis son ouverture	53
Figure 3.4 Ventes trimestrielles des pompes A chez Hydrotech Mining depuis son ouverture	53
Figure 3.5 Tendances et saisonnalité observées dans les données de ventes historiques de la pompe A	55

Figure 4.1 Prévisions des ventes de la pompe A avec les différentes méthodes de prévision.....	63
Figure 4.2 Modèle de régression quadratique sans saisonnalité	64
Figure 5.1 Répartition des coûts pour la passation d'une commande.....	74
Figure 5.2 Coût de stockage et d'assurance pour le calcul du coût d'entreposage	76
Figure 5.3 Représentation des différents coûts dans le calcul du coût d'entreposage.	76
Figure 5.4 Évolution de la QÉC en fonction du coût de commande.....	78
Figure 5.5 L'évolution de la QÉC selon différents coûts d'entreposage	79
Figure 5.6 Évolution de la QÉC selon les ventes de la pompe A	81
Figure 5.7 Stock de sécurité en fonction de différents coefficients du niveau de service	85
Figure 5.8 Le PC avec un écart type établi à 0, SS3 et le délai en trimestre.....	89
Figure 5.9 PC selon différents écarts types avec un délai moyen fixé à 3,33 trimestres	90
Figure 7.1 Prévisions des ventes obtenues pour les trimestres 12 à 17 par application de la méthode de moyenne mobile avec $X=2$ pour la pompe A	102
Figure 7.2 Développement du modèle de prévision de ventes de la pompe A avec $X=2$ et ajout de 20% de ventes.....	103

Figure 7.3 Développement du modèle de prévision avec lissage exponentiel simple pour la pompe A.....	105
Figure 7.4 Développement du modèle de prévision avec <i>ETS</i> additif comprenant erreur, tendance et saisonnalité pour la pompe A.....	108
Figure 7.6 Développement du modèle de prévisions des ventes de la pompe A avec Winters-Holt.....	111
Figure 7.7 Développement du modèle de prévisions de ventes avec TSLM avec la régression quadratique incluant l'ajout de saisonnalité pour la pompe A	114
Figure 7.8 Développement du modèle de prévisions de ventes avec TSLM avec la régression quadratique incluant l'ajout de saisonnalité pour la pompe A	115
Figure 7.9 Développement du modèle de prévisions de ventes avec <i>TSLM</i> avec la régression quadratique incluant l'ajout de saisonnalité pour la pompe A	116
Figure 7.10 Fréquence de quantité vendue de pompes A par trimestre	118
Figure 7.11 Fréquence de quantité vendue de pompes B par trimestre	119

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Différents modèle de gestion des stocks	46
Tableau 3.1 Différences entre les ventes mensuelles et trimestrielles	54
Tableau 4.1 Erreurs <i>test set</i> des différents modèles de la pompe A incluant leurs prévisions de 2021 et la prévision de ventes de 2022 de ces modèles	67
Tableau 4.2 Avantages et inconvénients des modèles de prévisions de la demande pour la pompe A	69
Tableau 5.1 Valeur des paramètres pour le calcul de SS1	83
Tableau 5.2 Valeur des paramètres pour le calcul de SS2	84
Tableau 5.3 Différences entre la valeur de l'inventaire du système actuel, le modèle proposé et l'inventaire réel, en quantité de pompe	92
Tableau 7.1 Détermination de la valeur d'alpha.....	106
Tableau 7.2 Détermination des paramètres pour la méthode ETS additif	109
Tableau 7.3 Détermination des paramètres pour la méthode ETS multiplicatif.....	112
Tableau 7.4 Mesures d'erreurs	117

Tableau 7.5 Coefficient de niveau de service testés et utilisés dans les calculs 120

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

PC : Point de commande

QÉC : Quantité économique à commander

SS : Stock de sécurité

ARIMA : *Autoregressive integrated moving average*

TSLM : *Linear model with time series components*

ETS : *Exponential smoothing state space model*

MAPE : Erreur moyenne absolue en pourcentage (*mean absolute percentage error*)

MAE : Erreur moyenne absolue (*mean absolute error*)

ME : Erreur moyenne (*mean error*)

MSE : Erreur carrée moyenne (*mean squared error*)

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

y_t : Ventes à la période t , en nombre de pompes

\hat{y}_t : Ventes prédites à la période t , en nombre de pompes

X : Moyenne des ventes des deux derniers trimestres, en nombre de pompes

α : Constante de lissage

a_t : Niveau à la période t

b_t : Tendance à la période t

S_t : Saisonnalité à la période t

β : Indice du niveau du modèle *ETS* additif

γ : Indice de la tendance du modèle *ETS* additif

δ : Indice de la saisonnalité du modèle *ETS* additif

ε : Indice du niveau du modèle *ETS* multiplicatif

η : Indice de la tendance du modèle *ETS* multiplicatif

λ : Indice de la saisonnalité du modèle *ETS* multiplicatif

Y : Nombre de saison

n : Nombre d'observation

D : Demande pour la prochaine année, en nombre de pompes

C_c : Coût de commande, en dollar

C_e : Coût d'entreposage, en dollar

μ : Ventes trimestrielles moyennes, en nombre de pompes

μ_{max} : Ventes maximales d'un trimestre, en nombre de pompes

d : Délai moyen des trois derniers trimestres

d_{max} : Délai maximal d'un trimestre

σ_v : Écart type des ventes

σ_d : Écart type du délai

Z : Coefficient du niveau de service

RÉSUMÉ

L'objectif principal de ce projet est de développer un modèle de gestion des stocks simple, répliquable, objectif ainsi que facile d'implémentation et de compréhension pour l'entreprise d'Hydrotech Mining Inc. Pour ce faire, il a d'abord fallu extraire certaines données de l'entreprise, notamment les ventes historiques, afin de les observer, de les analyser et de les traiter. Ensuite, avec ces données, on a développé différents modèles de prévision de la demande quantitatifs afin de venir supporter, objectivement, les décisions prises par Hydrotech entourant ce sujet. De nombreux modèles ont été testés afin de pouvoir les comparer, en observant différentes mesures d'erreurs ainsi que leurs prévisions, et afin d'en déterminer le meilleur. La moyenne mobile, la moyenne mobile bonifiée, le lissage exponentiel simple, le modèle *ETS* additif, le modèle *ETS* multiplicatif, le modèle *TSLM* avec différentes régressions linéaires ainsi que le modèle *ARIMA* ont respectivement été testés. Pour la situation actuelle de l'entreprise, c'est le modèle *ETS* multiplicatif qui a été conservé puisqu'il offrait les mesures d'erreurs les plus intéressantes ainsi qu'une prévision des ventes réaliste. En revanche, le présent travail fait aussi des recommandations sur le choix du modèle de prévisions selon différents scénarios dans lesquels l'entreprise peut éventuellement se trouver. Pour continuer, avec ces prévisions, on a développé un modèle de gestion des stocks basé sur un point de commande et une quantité à commander. Afin de rendre ce modèle plus complet, plusieurs analyses de sensibilités ont été faites, accompagnées de recommandations, afin de s'assurer que le modèle puisse s'adapter aux différents changements futurs qui surviendront dans l'entreprise ainsi que pour identifier quels types de changements auraient un impact significatif sur le modèle.

Mots clés : analyse de données, prévision de la demande, gestion des stocks, mesures d'erreurs, réapprovisionnement

ABSTRACT

The main objective of this project is to develop a simple, replicable, objective, easy-to-implement and understandable inventory management model for Hydrotech Mining Inc. To do this, it was first necessary to extract certain data from the company, including historical sales, to observe, analyze and process this data. Then, with this data, we developed different quantitative demand forecasting models to support, objectively, the decisions made by Hydrotech surrounding this subject. Many models have been tested to be able to compare them, observing different measures of error and their predictions, and to determine the best one. The moving average, the enhanced moving average, the simple exponential smoothing, the additive ETS model, the multiplicative ETS model, the TSLM model with different linear regressions and the ARIMA model were respectively tested. For the company's current situation, the multiplicative ETS model was retained as it offered the most interesting error measures and realistic sales forecasting. On the other hand, this work also makes recommendations on the choice of the forecasting model according to different scenarios in which the company may eventually find itself. To continue, with these forecasts, we developed an inventory management model based on a point of order and a quantity to order. In order to make this model more complete, several sensitivity analyses were made, accompanied by recommendations, to ensure that the model can adapt to the various future changes that will occur in the company as well as to identify what types of changes would have a significant impact on the model.

Keywords : Data analysis, demand forecasting, inventory management, error measures, replenishment

INTRODUCTION

Présentation de l'entreprise

Hydrotech Mining Inc. est une jeune PME québécoise qui a démarré en 2017. En 2021, elle compte une vingtaine d'employés. Cette entreprise œuvre dans le domaine minier en offrant un service d'assèchement au moyen de pompes submersibles ainsi que de systèmes de pompage. Plus précisément, Hydrotech possède une variété d'une trentaine de pompes de différentes capacités et de différents formats afin de pouvoir subvenir aux besoins des clients, ce qui représente approximativement 60% de leur chiffre d'affaires. Également, cette entreprise offre la possibilité de construire des systèmes de pompage personnalisés lorsque les clients ont des besoins plus spécifiques, ce qui constitue le 40% restant de leur chiffre d'affaires. La majorité des clients d'Hydrotech sont en Abitibi-Témiscamingue et sont desservis par le seul entrepôt d'Hydrotech, situé à Val-d'Or au Québec. Cela dit, l'entreprise est actuellement en pleine expansion. En effet, Hydrotech a récemment ouvert de nouveaux entrepôts à Kamloops (Colombie-Britannique, Canada) ainsi qu'à Sudbury (Ontario, Canada) et est devenu un fournisseur pour une entreprise au Mexique. Cette expansion se justifie par le fait que les nouveaux clients au Québec se font de plus en plus rares car le nombre de mines, et donc de clients, est de peu d'étendue.

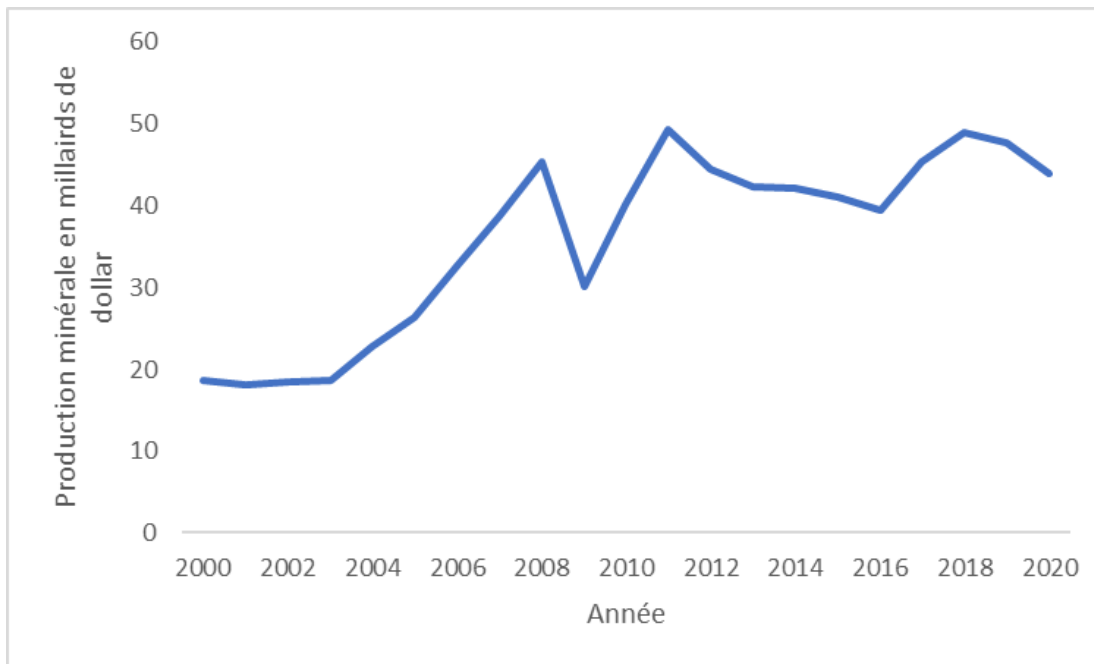
Industrie minière

L'industrie minière est composée d'activités de prospection et d'exploitation des mines. L'excavation d'une mine, autrement dit le fait de creuser dans le sol pour obtenir ses minerais, entraîne des inondations du propre site sous-terrain de celle-ci. Il faut alors

évacuer cette eau si l'on veut pouvoir continuer à creuser et extraire les minerais souhaités. Les minerais contiennent différents métaux de valeur comme l'or, l'argent, le zinc, le plomb et plusieurs autres. La réalité des mines est qu'un système de pompage est indispensable au système opérationnel des mines, et ce, peu importe le type de minerai extrait. Comme la fabrication de système de pompage d'eau n'est pas l'activité principale des compagnies minières, cette tâche se fait sous-traiter. Celle-ci, est essentielle au fonctionnement des opérations minières et se doit d'être remplie en permanence. Les fournisseurs du service de pompage doivent alors s'assurer de pouvoir fournir continuellement ce service, malgré toutes éventualités, s'ils veulent satisfaire leurs clients et développer une bonne image. Aussi, on ne souhaite évidemment pas avoir des bris fréquents car cela peut risquer des arrêts d'opérations minières, ce qui peut entraîner un arrêt complet de la production et ainsi des pertes monétaires considérables. En raison des conditions difficiles dans lesquelles vont opérer les pompes, l'eau pompée étant souvent très sale, la durée de vie d'une pompe dépasse rarement les trois mois. Afin de ne pas toujours devoir acheter des pompes neuves du fait de leurs coûts entourant les 20 000\$, il est pertinent de les faire réparer lorsqu'il est possible de le faire. C'est pourquoi il y a un certain roulement de pompes chez les compagnies minières car les pompes sont utilisées, sont brisées au bout d'un moment, puis sont remises à neuf (réparées) pour être réutilisées. Aussi, afin de ne pas dépendre uniquement d'un seul fournisseur, il est normal, pour les compagnies minières, d'en avoir plus d'un. C'est là où Hydrotech veut se démarquer. Cette entreprise livre des systèmes de pompages fiables et robustes directement chez leurs clients afin d'assurer un assèchement complet des zones désirées. Étant donné que la clientèle d'Hydrotech repose sur l'industrie minière, il est pertinent d'observer son évolution dans les dernières années. La figure 1.1 (Marshall, 2021) illustre cette évolution en chiffres. Comme on peut l'observer dans la figure 1.1, l'industrie minière stagne depuis les 10 dernières années. En effet, la production totale varie entre 40 et 49 milliards de dollars au cours de ces années. Le fait de se trouver dans cette industrie stagnante rend d'autant plus important le besoin de se démarquer des autres entreprises

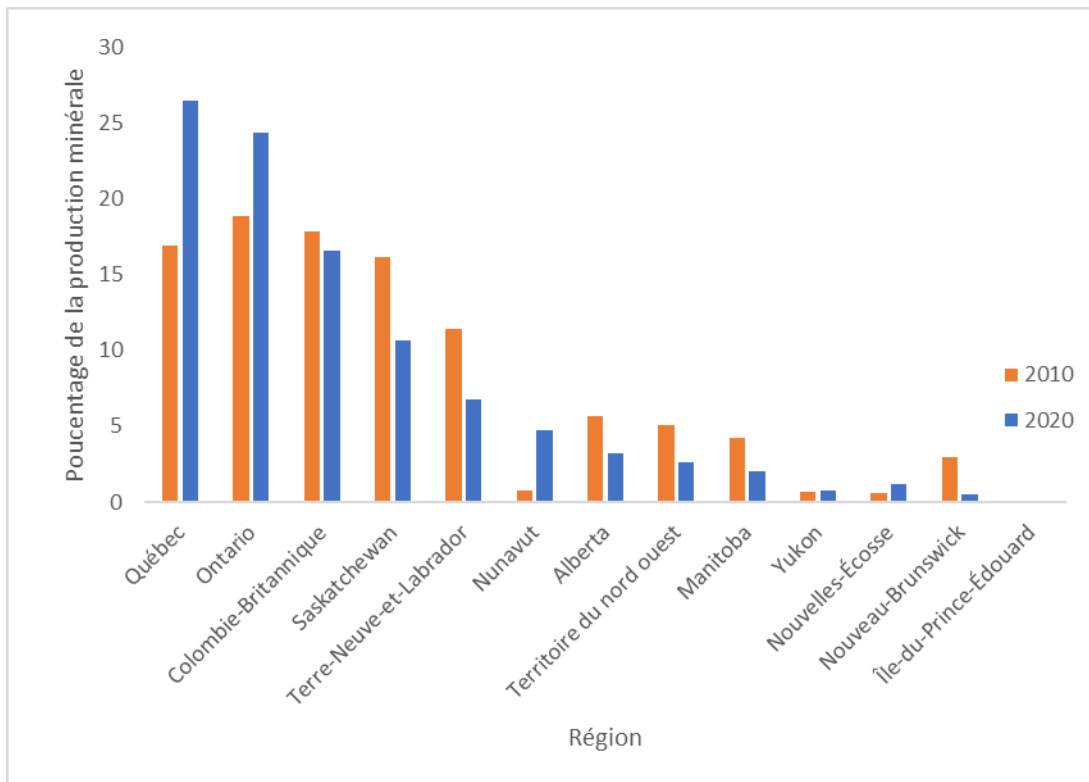
pour Hydrotech car il n'y a pas beaucoup de nouvelles opportunités, c'est-à-dire de nouvelles mines, d'année en année. Il est intéressant d'observer cette production par région comme il est illustré sur la figure 1.2 (Marshall, 2021) :

Figure 1.1 La production minérale au Canada de 2000 à 2020, Marshall (2021)



Comme on peut l'observer sur la figure 1.2, le Québec, l'Ontario et la Colombie-Britannique sont les 3 provinces qui ont la plus grande production de minerais. Cela vient supporter le choix d'Hydrotech de faire son expansion à Kamloops (en Colombie-Britannique) et à Sudbury (en Ontario). Aussi, ce qui est intéressant ici est le fait que ces trois provinces ont augmenté leur production de 13,8% par rapport à la production totale au cours des 10 dernières années. On peut donc croire que bien que l'industrie minière semble stagnante, ces trois territoires continuent de croître, ce qui signifie qu'Hydrotech aura probablement de nouvelles opportunités qui s'offriront à eux dans le futur.

Figure 1.2 Production minérale par région au Canada de 2010 et 2020, Marshall (2021)



Système de réparation des pompes

Comme mentionné plus tôt, Hydrotech ne fait pas que vendre des pompes neuves, mais elle les répare une fois brisées. Lorsqu'une pompe est brisée, elle est immédiatement remplacée par une pompe neuve ou remise à neuf. Hydrotech s'engage à assurer un système de pompage fonctionnel à ses clients. Il se peut alors que dans certaines situations Hydrotech utilise un modèle de pompe similaire à celui brisé lorsqu'il y a une rupture de stocks afin de combler le besoin du client. Cependant, l'interchangeabilité des pompes n'est pas toujours faisable et ce genre de situation n'est vraiment pas souhaitée car les pompes substitués ne sont pas toujours les plus efficaces ou adaptées selon la situation donnée. La pompe brisée est alors réparée, lorsque ses coûts de réparation sont en dessous d'une marge déterminée par Hydrotech pour que

celle-ci soit profitable, ou jeter. Une fois la pompe remise à neuf elle est mise en stock et revendue. En fonctionnant ainsi, Hydrotech s'assure que ses clients ne manquent jamais de pompes. Ces deux activités d'Hydrotech représentent une grande partie de son chiffre d'affaires, soit environ 25% pour les pompes neuves et 35% pour les pompes usagées. Le reste du chiffre d'affaires est composé notamment de ventes de systèmes de pompage personnalisés et de ventes de pièces individuelles. Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur le système de pompage régulier qui exclut les systèmes de pompage personnalisés ainsi que la vente des pièces individuelles. En résumé, les clients achètent un service de pompage chez Hydrotech en choisissant, en se faisant conseiller par les vendeurs d'Hydrotech, un type de pompe approprié pour leurs besoins. Les pompes fournies peuvent être neuves ou remises à neuf (elles ont la même valeur). La différence n'est pas observable pour les clients car elles remplissent les mêmes fonctions et ont la même qualité. Une fois une pompe brisée, Hydrotech la remplace par une autre pompe fonctionnelle (neuve ou remise à neuf) au coût de la réparation.

Pour le développement des modèles de prévisions, la totalité des ventes (pompes neuves et remises à neuf) sera considérée afin de réduire la variabilité dans les ventes et pour permettre d'avoir un nombre de données plus volumineux. Puis, on prendra le pourcentage de pompes neuves vendues par rapport à ce total pour faire le développement du modèle de gestions de stocks, car se concentre uniquement sur les pompes neuves vendues, étant donné que ce sont elles qui sont commandées. Alors, le terme « pompe » désignera les pompes neuves dans le projet.

La prévision de la demande

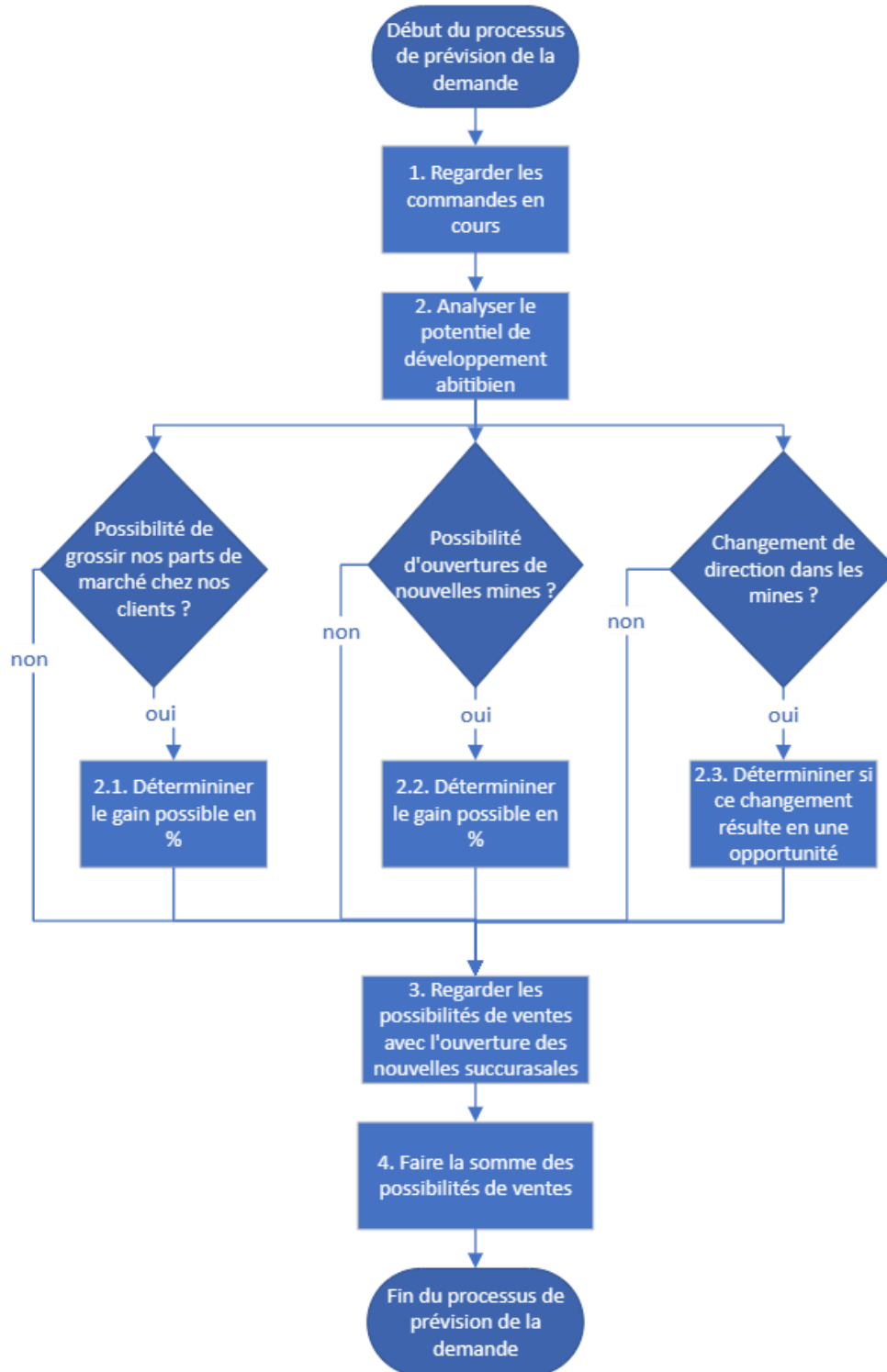
Dans le système de pompage régulier, afin de pouvoir fournir de pompes en permanence à ses clients lorsqu'ils sont dans le besoin, il est important pour Hydrotech de faire des prévisions de la demande afin de pouvoir planifier ses quantités conservées

en inventaire et par le fait même ses commandes de pompes. Aussi, il est pertinent de mentionner qu'Hydrotech considère que la valeur d'une pompe ne se déprécie pas. Il n'y a donc pas d'inconvénient à avoir un petit surplus d'inventaire. Ce phénomène de non-dépréciation s'explique par le fait qu'Hydrotech actualise ses prix de ventes pour l'ensemble de son inventaire. Cela dit, avoir trop de stocks ne permet pas d'avoir une bonne liquidité, ce qui est un problème pour Hydrotech actuellement car l'entreprise a un manque de liquidité.

La Figure 1.3 illustre la procédure d'Hydrotech pour prévoir la demande de pompes neuves et usagées. Le processus est en plusieurs étapes qui se détaillent ainsi :

1. On regarde ce qui est en commande ou qui a été commandé. Plus particulièrement, on identifie les pompes qui ne sont pas en inventaire et qui peuvent avoir de longs délais de livraison.
2. On regarde le développement potentiel abitibien :
 - 2.1. Est-ce possible de grossir la part de marché chez les clients actuels (ex. : si on a 40% chez un client, est-ce qu'on peut aller chercher 50 ou 60% ? Combien de pompes cela représente-t-il ?)
 - 2.2. Y a-t-il des ouvertures de nouvelles mines ?
 - 2.3. Y a-t-il changement de direction dans les mines (opportunités ou pertes de clients, car la relation avec la direction est clé) ?
3. On regarde les nouvelles succursales : Kamloops, Sudbury, Mexique. Pour ces succursales, on analyse des marchés : On cible des minières, on établit un profil, on compare avec des mines que l'on connaît (leur grosseur et leurs opérations, donc leurs besoins). On peut alors prévoir une quantité de pompes qui seront vendues.
4. On fait la prévision. On comptabilise l'ensemble des prévisions aux 3 premières étapes afin d'avoir la somme de prévisions des ventes de pompes pour la prochaine année. C'est-à-dire, de regarder ce qu'on possède en inventaire et en

Figure 1.3 Processus de prévision de la demande des pompes



5. commande, de mettre une quantité, en nombre de pompe, de ce qu'on pense pouvoir aller chercher comme développement potentiel et finalement de quantifier le nombre de pompes qu'on pourrait vendre avec les nouvelles succursales.

Les étapes 2, 3 et 4 sont faites par le directeur du développement des affaires et les représentants d'Hydrotech car ils ont les meilleures connaissances et capacités pour déterminer ces possibilités. En effet, ils ont des interactions directes avec les compagnies minières.

La gestion des stocks

Comme pour la prévision de la demande, la gestion des stocks est une activité importante chez Hydrotech car elle permet d'avoir les pompes pour subvenir aux besoins de ses clients. En effet, Hydrotech souhaite avoir une quantité suffisante de pompes pour fournir ses clients sans toutefois avoir trop de stocks, résultant à un manque de liquidité et par le fait même un ralentissement de leur expansion ou une limitation dans leurs opportunités. Pour gérer ses stocks, Hydrotech fonctionne actuellement avec des min/max. Autrement dit, toutes les pompes ont un minimum et un maximum qui doivent être continuellement respectés dans l'inventaire. Le processus de réapprovisionnement de pompes fonctionne ainsi (voir Figure 1.4 pour un résumé) :

1. Prendre la quantité totale vendue de pompes X^1 durant la dernière année.
2. Transformer cette quantité en consommation par semaine.
3. Déterminer le délai moyen de livraison de la pompe en question selon le fournisseur.

¹ Hydrotech a plus d'une trentaine de pompes en inventaire. Pour chaque type de pompe, le processus est répété.

4. Calculer le stock minimum de sécurité : on prend la consommation moyenne et on le multiplie par le délai de livraison. Ce calcul représente donc la quantité qui devrait théoriquement être vendue pour le temps d'une commande. Le fait d'avoir cette quantité en stock lorsqu'une commande est passée suppose qu'il n'y aura pas rupture de stock si la consommation moyenne et le délai sont respectés.
5. Calculer le stock maximum : on divise un an, en semaine, par le délai de livraison, puis on le multiplie par le stock minimum de sécurité. Ce calcul permet de connaître la quantité théorique qui devrait être consommée dans la prochaine année. On considère donc cette valeur le stock maximum. L'échelle d'un an est utilisée par Hydrotech car l'entreprise a une entente avec son fournisseur par laquelle ils ont un an pour le payer lorsqu'une commande est effectuée.
6. Déterminer la fréquence des commandes et des quantités à commander (p. ex. : 2 commandes dans l'année, la première de 20 unités et la seconde de 30 unités).

Ces étapes sont effectuées par le directeur aux approvisionnements. Cependant, malgré cette méthode de calcul des min/max, il arrive fréquemment, que le min et le max soient exactement les mêmes, comme si l'on souhaitait avoir en permanence cette quantité définie comme « idéale » en inventaire. Une fois les min et les max fixés pour chacune des pompes, on doit faire les commandes des pompes afin de les respecter du mieux que possible. Étant donné le délai d'approvisionnement d'environ un an pour les pompes neuves, il est important de planifier et de prévoir les quantités à commander. Il faut spécifier que, actuellement, il n'y a pas de régularité dans les commandes et que celles-ci sont faites en fonction du niveau des stocks dans l'inventaire et des ventes prévues par les représentants et gestionnaires d'Hydrotech.

Problématique

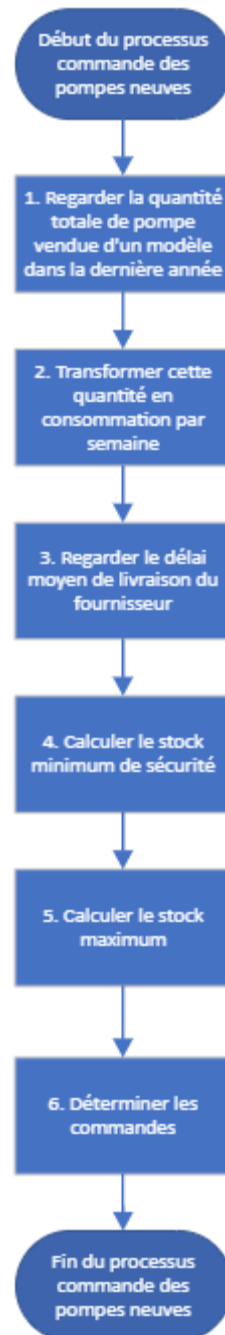
Hydrotech voit actuellement le nombre de pompes en stocks augmenter non proportionnellement à l'augmentation de son chiffre d'affaires. Autrement dit, il semble avoir des surplus de stocks et on souhaiterait les identifier. On se questionne alors sur la fiabilité des prévisions de ventes faites ainsi que de la gestion des stocks qui se fait actuellement. D'abord, les prévisions faites sont très simples et ne sont peut-être pas adéquates. Effectivement, elles ne considèrent pas la croissance d'Hydrotech ni les variations des ventes au cours d'une année. Aussi, le fait que les prévisions finales reposent majoritairement sur les représentants d'Hydrotech a pour effet de rendre difficile le transfert de cette connaissance, soit de faire des prévisions de la demande. Autrement dit, le fait de ne pas avoir des méthodes quantitatives plus avancées pour prévoir la demande rend Hydrotech dépendant de ses représentants et gestionnaires. Ensuite, pour ce qui est de la gestion des stocks, on se questionne sur si la méthode appliquée est adaptée pour les besoins d'Hydrotech. En d'autres termes, le modèle actuel permet-il d'avoir les bonnes quantités en stocks pour subvenir aux besoins des clients considérant l'expansion d'Hydrotech tout en n'ayant pas de surplus considérables ?

Organisation du mémoire et contributions

Le mémoire débutera avec la définition de la problématique de recherche dans le chapitre I. Le chapitre II sera une revue de la littérature entourant les éléments qui seront traités dans le projet. Le chapitre III introduira la méthodologie du projet ainsi que la récolte des données. Le chapitre IV couvrira le développement des modèles de prévisions de la demande de l'entreprise. Le chapitre V présentera le développement du modèle de gestion des stocks. Finalement, le chapitre VI fera une synthèse des chapitres précédents et ainsi donc du projet. Ce mémoire présentera alors un exemple pratique de récolte et traitement de données en entreprise. Aussi, il permettra de

montrer des applications de modèles simples de prévisions de demande et de gestion des stocks. Par le fait même, on verra un exemple pratique d'analyse et d'interprétation d'erreurs et de résultats. Ce travail permettra à Hydrotech d'avoir différents modèles de prévisions de la demande quantitatifs à leur disposition qui pourront être utilisés afin de soutenir les décisions des représentants et gestionnaires d'Hydrotech lors de leurs prévisions de la demande. Aussi, le fait d'avoir plusieurs modèles différents permet une flexibilité d'adaptation selon les divers scénarios possibles de la croissance d'Hydrotech. De plus, le modèle de gestion des stocks pour les pompes neuves qui sera développé sera utile pour ajuster les quantités gardées en inventaire. Ce modèle sera aussi répliquable et pourra être utilisé pour en développer un similaire pour la gestion des pompes usagées et des pièces conservées en inventaire.

Figure 1.4 Processus de commandes de pompes neuves



CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

1.1 Mise en contexte

Au cours des dernières années, Hydrotech a fait face à certains problèmes, notamment en raison de son expansion. Concernant les quantités de ventes à prévoir, Hydrotech se demande : Combien va-t-on vendre l'an prochain ? Concernant la gestion des stocks, Hydrotech se demande : Que doit-on avoir en stock et en quelle quantité ? Ces questions sont des exemples de questions qui posent actuellement des problèmes à l'entreprise. Il faut savoir qu'Hydrotech, pour ce qui est de l'approvisionnement de pompes neuves, possède un seul et unique fournisseur situé au Japon. Étant donnée la distance à parcourir entre le Japon et le Québec et le type de produit à transporter, le moyen de transport privilégié est le bateau, pour traverser les routes maritimes, et le camion, pour ce qui est des routes terrestres afin de réduire les coûts de transport. Pour garder l'entreprise rentable, ces moyens de transport moins coûteux sont nécessaires car il faut éviter à tout prix d'utiliser l'avion.

Compte tenu de cette contrainte, il n'est pas envisageable dans ce travail de songer à modifier le délai de livraison. L'entreprise a de très longs délais avant d'obtenir ses produits. Ces délais peuvent parfois atteindre jusqu'à plus d'un an. De plus, ceux-ci ont été amplifiés en raison de la COVID, qui a pour effet de ralentir le processus de transport global. Il n'y a pas d'autres délais qu'Hydrotech peut contrôler outre le délai de livraison. Il est alors primordial pour Hydrotech, dans la situation actuelle, d'avoir

un suivi rigoureux de son inventaire, de ses commandes ainsi que de ses prévisions de ventes afin de ne pas avoir de surplus ou de rupture de stock. Ces deux situations d'inventaire peuvent être problématiques pour une jeune entreprise comme Hydrotech. Dans le cas de surplus de stock, la trésorerie de l'entreprise se trouve dans l'inventaire, ce qui n'est pas souhaitable puisqu'on a besoin de cet argent pour pouvoir se développer davantage. Dans la situation de rupture de stock ou de sous-stockage, on risque de perdre des clients si on ne peut pas leur fournir les services espérés, ce qui nuit à la croissance de l'entreprise. Présentement, Hydrotech voit la valeur totale d'inventaire augmenter sans cesse. Plus précisément, elle a doublé au cours de la dernière année, sans pour autant avoir d'augmentation significative dans les ventes. L'entreprise se questionne alors sur la qualité du système d'approvisionnement en place et pose l'hypothèse qu'elle se trouve dans une situation de surstockage.

1.2 La prévision de la demande

Comme on peut l'observer dans la partie de la prévision de la demande de l'introduction, Hydrotech s'appuie principalement sur les connaissances des représentants ou du directeur du développement des affaires afin de définir des prévisions de ventes. Autrement dit, on utilise une méthode qualitative. On ne prend pas en compte l'historique des ventes et on ne fait pas de calculs mathématiques plus poussés pour tenter de faire ces prévisions. Il serait donc intéressant de tester différents modèles de prévisions quantitatifs car les données sont disponibles. Dans un premier lieu, cette activité permettra de comparer les prévisions faites par les représentants et gestionnaires d'Hydrotech et pourra également supporter leurs décisions d'approvisionnement. Dans un deuxième temps, le fait de faire des prévisions quantitatives basées sur les ventes historiques peut permettre de faire des prévisions en enlevant la subjectivité des représentants et gestionnaires d'Hydrotech, qui pourrait avoir tendance à surestimer ou sous-estimer les ventes selon le rythme de croissance de l'entreprise. Aussi, faire des prévisions quantitatives permet d'assurer une certaine

pérennité à l'entreprise. En effet, on ne dépend plus uniquement de l'expertise des employés pour faire les prévisions des ventes. La perte d'employés expérimentés ne sera donc pas un événement critique pour Hydrotech. Cela dit, il faut savoir que l'entreprise est jeune et possède peu de données historiques. En effet, pour certains modèles de pompes, on ne compte que quelques ventes d'une grande variabilité. Autrement dit, il est très difficile de déterminer le moment d'une vente possible pour la plupart des pompes. Par conséquent, il est explicable qu'Hydrotech se fie uniquement à leurs représentants et leurs gestionnaires pour faire les prévisions des ventes actuellement.

1.3 La gestion des stocks

La problématique avec le système d'approvisionnement actuel d'Hydrotech, pour ce qui est de la gestion des stocks, est que le fait de fonctionner par min/max ne permet pas de savoir précisément quand commander ni en quelle quantité. Le fait de ne pas connaître ce moment et cette quantité rend la gestion des stocks difficile, voire aléatoire. On ne peut pas avoir une gestion efficace : on ne connaît pas les quantités optimales à avoir en inventaire. Comme on peut l'observer dans la partie sur la gestion des stocks de l'introduction, les quantités commandées sont choisies selon le « gros bon sens » de l'acheteur en fonction du niveau de l'inventaire et des ventes prévues par les représentants et gestionnaires d'Hydrotech. Aussi, le moment des commandes est effectué sur des spéculations de quand ceux-ci pensent qu'il serait temps de faire une commande car de possibles quantités significatives de ventes seront à venir. Pour continuer, le fait d'avoir des min/max qui sont parfois équivalents rend la gestion des stocks très difficile car dès qu'on effectue une vente, on se doit de commander une pompe afin d'avoir la quantité prévue en inventaire, ce qui résulte à payer un coût fixe de commande à chaque fois. Les délais d'inventaire sont très longs et il est donc impossible d'avoir la quantité déterminée par les min/max en permanence en inventaire. Le fait de fonctionner ainsi ne permet pas à l'entreprise d'être robuste dans sa gestion

des stocks. Autrement dit, Hydrotech se met à risque de se retrouver dans une situation de surplus ou de rupture de stock.

1.4 Objectifs du travail

Le premier objectif de ce travail est de supporter la prévision des ventes futures de l'entreprise. Les valeurs trouvées pourront être comparées avec les prévisions actuelles et aider les représentants et gestionnaires d'Hydrotech à rendre leurs prévisions plus robustes. Il est important de préciser que c'est la prévision annuelle qui est intéressante pour la présente situation d'Hydrotech, étant donné l'entente de paiement sur un an avec son fournisseur ainsi qu'en considérant le délai de livraison, qu'y est d'environ un an, et c'est sur cette prévision que l'emphase sera mise. Le second objectif est de développer un modèle de gestion des stocks qui sera flexible aux différents changements de paramètres, comme les ventes ou le délai de livraison, qui pourraient se produire au cours des prochaines années, qui sera simple d'utilisation et facile de compréhension pour les employés et qui sera robuste en étant supporté par des calculs. Aussi, par le développement de ce modèle, on souhaite pouvoir vérifier si les quantités conservées en l'inventaire sont adéquates. Le modèle de gestion des stocks proposé se basera sur le modèle de prévision de la demande que nous aurons d'abord développé.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, on présente une revue de la littérature entourant les grands thèmes de ce projet. On montrera d'abord les problèmes auxquels font face les PME, lors de leur croissance par exemple, afin de bien comprendre le contexte dans lequel Hydrotech se trouve. On présentera ensuite des méthodes de prévision de la demande qui sont utilisées dans la littérature pour ce genre d'entreprise. Finalement, on montrera ce qui est fait pour la gestion des stocks afin de pouvoir avoir les ressources nécessaires pour effectuer ce projet.

2.1 Les problématiques des PME

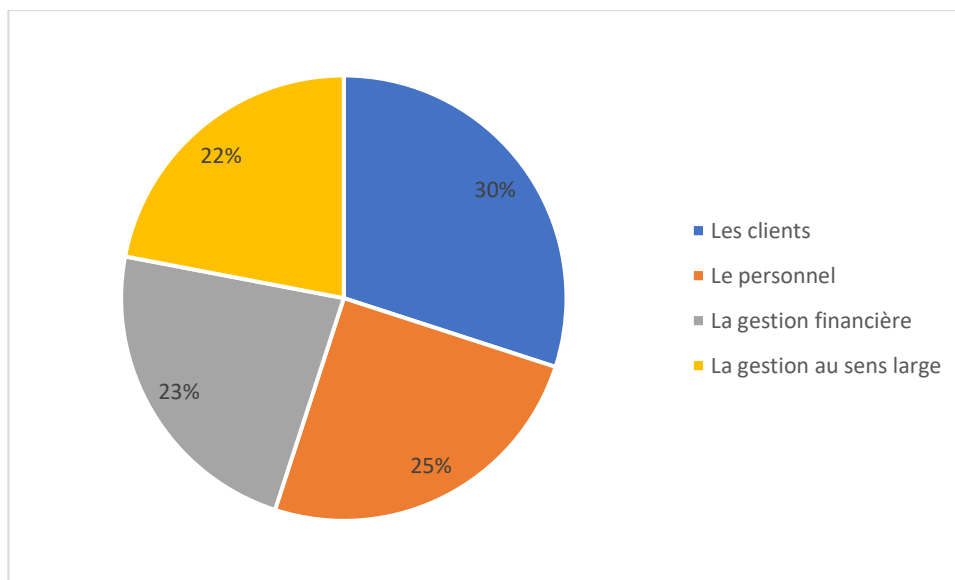
La première thématique est celle des problématiques en PME. Celle-ci est pertinente puisque Hydrotech est en pleine expansion et cette entreprise se pose plusieurs questions au niveau de son efficacité dans certains secteurs d'activités, qui causeraient un frein à leur croissance. Par exemple, les quantités de pièces et pompes conservées en inventaire sont-elles excessives ? Selon St-Pierre (2018), les principales difficultés rencontrées par les PME sont « un accès limité aux ressources financières, [...] une forte dépendance de l'entreprise vis-à-vis du propriétaire-dirigeant et une faible capacité de celui-ci à déléguer son autorité et à se constituer une structure formelle, [...] un pouvoir limité envers le marché, [...] une faible connaissance managériale ainsi qu'une expertise limitée des propriétaires pour gérer l'ensemble des activités de l'entreprise, [...] un manque de réévaluation périodique de la performance financière

ainsi qu'une absence de planification financière et stratégique formalisée ». Parmi celles-ci, quelques-unes sont effectivement pertinentes d'exploration pour le présent projet afin de bien comprendre la problématique d'Hydrotech. Effectivement, en partant de l'hypothèse posée que la gestion de l'inventaire et que la gestion des stocks serait problématique, il est possible de la relier avec la problématique d'expertise limitée des propriétaires. Ces derniers ne sont pas spécialisés dans ces domaines particuliers, de prévision de la demande et de la gestion d'inventaire. Ce manque de spécialisation n'avait pas d'impact considérable à plus petite échelle, c'est-à-dire sur les premières années d'opérations de l'entreprise, cependant, avec sa croissance, il devient nécessaire d'avoir plus d'expertise car les quantités vendues et les quantités en inventaire sont plus volumineuses, ce qui fait augmenter la possibilité d'erreur. Fasad (2021) présente les facteurs de réussite et d'échecs des PME. Il illustre quatre catégories de facteurs dont les facteurs entrepreneuriaux : l'âge et le sexe, le niveau d'éducation, l'orientation entrepreneuriale, l'expérience, les compétences managériales et les traits de personnalité ainsi que les facteurs liés à l'entreprise : la planification stratégique, l'innovation, la transformation numérique, etc. Il est donc important de considérer ces facteurs lors de la création des différents modèles puisqu'ils devront être adoptés et appliqués par Hydrotech.

Selon Julien et *al.* (2002), le manque de compétence est un frein pour la croissance des PME. Un autre frein qui touche les PME, dont Hydrotech, est celui du manque de liquidité puisqu'il est directement en lien avec l'hypothèse que l'augmentation significative de la valeur totale de l'inventaire d'Hydrotech est non-nécessaire ou de trop grande envergure par rapport à leur taille actuelle. Autrement dit, il y aurait trop d'argent mis dans l'inventaire. Il est possible de soutenir le fait que ces freins représentent des enjeux importants pour Hydrotech en appuyant cette affirmation avec l'étude faite sur les facteurs clés de la croissance des entreprises québécoises (Julien et *al.*, 2002), illustré par la Figure 2.1. Comme on peut l'observer sur la Figure 2.1, la gestion au sens large représente 22% des facteurs qui forment la clé de la réussite de la

croissance en entreprise, ce qui englobe la gestion des stocks ainsi que la prévision de la demande. Aussi, la gestion financière représente 23%, ce qui considère l'argent mis dans l'inventaire et dans la recherche et le développement. On peut donc dire qu'une bonne gestion de l'inventaire est très importante pour la bonne croissance d'une entreprise. En effet, si l'on part des principes que la prévision de la demande permet le développement de modèle de gestion des stocks quantitatifs et que « l'objectif de la gestion des stocks est de satisfaire une demande, avec un taux de service élevé et au moindre coût » (Blazejeski et Nogaro, 1993), il devient impératif pour Hydrotech de développer des nouveaux modèles de prévisions et de gestions des stocks afin de l'aider à mieux gérer sa croissance.

Figure 2.1 Facteurs clés de croissance de PME québécoises



Pour ce faire, il est préférable, pour une PME, de développer des modèles simples plutôt que sophistiqués. Ceci est justifié par le fait que la limite de la connaissance et de la compétence des gestionnaires de l'entreprise rend difficile l'intégration et la compréhension de modèles complexes. Il est difficile pour une gestionnaire d'avoir confiance et d'utiliser un modèle dont il ne comprend pas le fonctionnement. Naji

(2009), illustre les compétences requises pour la gestion de changement dans les PME. Notamment, les compétences « planifier la mise en œuvre du changement », « évaluer et mesurer le changement » ainsi qu'« assurer le soutien au changement » sont applicables dans le cas présent. C'est pourquoi, dans ce mémoire, il sera question de développer des modèles de gestion des stocks et de prévision de la demande standards, c'est-à-dire des modèles connus, afin de faciliter l'intégration et l'utilisation de ceux-ci chez Hydrotech. Leur réalité étant que l'entreprise cherche des modèles qui fonctionnent et qui ne nécessitent peu de temps d'assimilation car Hydrotech a plusieurs activités à gérer autre que la gestion des stocks et la prévision de la demande. Autrement dit, les gestionnaires d'Hydrotech n'ont pas nécessairement le temps et l'intérêt de comprendre des systèmes plus complexes alors qu'un modèle simple peut faire la tâche voulue. Pour appuyer ce point, Torres (2000), fait ressortir l'importance de la proximité dans les PME. Il définit ce concept comme « un construit stratégique et organisationnel qui permet au dirigeant de la PME de maintenir son emprise sur l'entreprise et son évolution ». Les modèles doivent alors être facilement transférables.

2.2 La prévision de la demande

La seconde thématique est la prévision de la demande. Bien qu'il existe tant des méthodes qualitatives que quantitatives pour effectuer des prévisions de la demande (Agostino et *al.*, 2020), l'accent est uniquement mis sur des méthodes de prévisions quantitatives dans ce projet afin de produire un outil basé sur des données réelles à Hydrotech. Il permettra aux dirigeants d'Hydrotech de pouvoir s'appuyer davantage sur un modèle mathématique afin de prendre leurs décisions plutôt que se baser uniquement sur leur gros bon sens et leur expérience. Il est d'abord intéressant d'observer les différents modèles de la prévision de la demande au travers du temps afin d'avoir un éventail de modèles potentiellement applicables pour Hydrotech. Par exemple, Athanasopoulos & Hyndman (2018), propose différents modèles de prévisions. La moyenne mobile, le lissage exponentiel, les modèles de régressions avec

les séries temporelles, des modèles avancés comprenant la tendance et la saisonnalité (p. ex : Winters-Holt), le modèle *ARIMA* (*Autoregressive integrated moving average*), les réseaux de neurones et l'auto-régression vectorielle en sont des exemples. Thomopoulos (2015) propose plusieurs modèles qui présentent chacun une ou plusieurs de ces composantes : la prévision de vente horizontale, avec tendance, avec saisonnalité, avec promotion, avec unité de gestion des stocks (SKU) et/ou avec la distribution de la loi normale. Le détail des calculs impliquant les modèles utilisés sera détaillé lors de l'utilisation de ceux-ci au chapitre IV. Ces auteurs indiquent aussi que pour développer un modèle de prévisions, il est nécessaire de séparer les données en un ensemble test, qui sera composé des plus vieilles données historiques (pour une série temporelle) et un ensemble de validation, qui sera composé des plus récentes données historiques (pour une série temporelle) afin de pouvoir tester la qualité du modèle et d'assurer une cohérence temporelle. Pour continuer, Ralph et al (2002) soutiennent l'utilisation de modèles comportant du lissage exponentiel pour faire de la prévision de la demande pour un contrôle d'inventaire. Ils affirment que le lissage exponentiel est un modèle qui reste pertinent lorsque la variance peut être modifiée (augmenter ou diminuer) d'une prévision à l'autre et ils démontrent que les modèles de lissage avec une source d'erreur unique (SSOE) peuvent jouer un rôle pertinent au niveau de la gestion des stocks. Ils présentent les différents modèles de lissage, en passant par lissage exponentiel linéaire simple jusqu'à des modèles de lissage non-linéaire comme le modèle multiplicatif de Winters. Dans de nombreux problèmes de prévisions de la demande étudiés dans la littérature, il est pertinent de comparer les modèles de prévisions développés avec des modèles simples d'application afin d'en évaluer leur performance en observant leurs mesures d'erreurs et leurs prévisions (Taylor et Letham, 2018), ce qui sera fait dans ce mémoire. Pour prévoir la demande, plusieurs auteurs ont utilisés ou développés des modèles sophistiqués et appliqués pour des cas spécifiques. Boussu (2016) présente d'abord une modélisation et simulation de la filière de textile, d'habillement et de distribution, pour ensuite présenter différentes méthodes de prévisions pour celle-ci, soit la prévision par moyenne mobile simple et double,

différentes méthodes de lissage exponentiel, les méthodes exogènes et les méthodes non linéaire. Il propose ensuite des critères pour sélectionner, évaluer et comparer chaque méthode afin de choisir la plus appropriée pour le contexte donné. Il propose aussi des méthodes de classification permettant de choisir la quantité nécessaire d'information (de données) pour pouvoir faire des prévisions. Heaviside et *al.* (2020) utilisent différentes méthodes de prévisions, soit la moyenne mobile, la moyenne mobile pondérée, le lissage exponentiel simple et le lissage exponentiel double, pour faire la prévision de ventes de différentes pièces automobiles, qui seront ensuite utilisées pour faire un modèle de gestion des stocks. Thomassey (2002) présente des prévisions faites avec un jeu de données des ventes de prêt à porter. À la suite d'une sélection de données (sélection d'articles qui ont un historique de trois ans complets), il teste différents modèles de prévisions à court terme et moyen terme en séparant les articles, premièrement, par famille d'article, deuxièmement, par article unitaire, et finalement, par taille/couleur. Les modèles testés sont le modèle de base avec saisonnalité, le modèle Winters-Holt, la régression dynamique, le modèle ARMAX (auto régressif avec moyenne mobile et variables explicatives), et autres modèles complexes. Il propose finalement un système de prévision, qui est composé de plusieurs modèles spécifiques, selon l'horizon (court terme ou moyen terme) et la prévision (à la famille, à l'article ou à la taille/couleur) afin de pouvoir prévoir la demande de ce domaine textile.

Lorsqu'on parle de prévisions de la demande, il ne faut pas négliger de considérer leurs mesures d'erreurs afin de juger de la qualité de celles-ci. Les mesures d'erreurs habituellement utilisées sont l'erreur moyenne (ME), qui permet d'illustrer la somme des erreurs faites par le modèle, l'erreur absolue (MAE), qui permet de montrer la somme des erreurs absolue faites le modèle (une erreur négative suivi d'une erreur positive ne s'annulent pas), l'erreur carrée (MSE), qui permet de faire ressortir (ou de pénaliser) les modèles qui font des erreurs de plus grandes envergure sur certaines prévisions et l'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), qui permet de voir le

pourcentage d'erreur d'un modèle par rapport à la demande réelle, une mesure plus souvent observée que les autres car elle permet de mieux quantifier (mettre à l'échelle) ce que représente l'erreur, elle permet de donner le niveau de précision du modèle (Thomopoulos, 2015). On peut également observer dans la littérature que de ce type de méthodes (comparaison de modèles) et de modèles (de prévision de la demande) peuvent s'appliquer dans l'industrie minière. Rosienkiewicz et *al.* (2017) utilisent cette méthode de comparaison de différents modèles, plus précisément en comparant leur modèle hybride proposé avec la moyenne mobile, le lissage exponentiel simple, la méthode Syntetos-Boylan, *ARIMA* et deux méthodes basées sur l'intelligence artificielle (nommées hybride ANN (par classification) et ANN (avec 10 variables)), en testant l'efficacité de chacun de ceux-ci. Ils utilisent comme mesures d'erreurs, l'erreur moyenne, l'erreur moyenne absolue, la racine de l'erreur moyenne au carré, l'erreur relative de la prévision ainsi que le coefficient de détermination. Il sera donc pertinent pour ce travail de tester plusieurs modèles afin de pouvoir les comparer et d'en choisir le plus performant selon la situation donnée (la situation actuelle de l'entreprise). La littérature montre aussi qu'une fois qu'un modèle est développé, il est pertinent de le réviser à une fréquence raisonnable afin de s'assurer qu'il soit adéquat selon la situation de l'entreprise (Rego et Mesquita, 2015) puisqu'une entreprise, surtout celle qui croît, évolue rapidement au fil du temps, ce qui peut apporter des changements considérables, en termes de ventes par exemple, ce qui entraînerait un changement sur les prévisions à faire. En ce sens, les modèles de prévisions de la demande développés dans ce projet seront associés à différents scénarios possibles du développement d'Hydrotech. Il faut mentionner que la prévision de la demande joue un rôle important sur la gestion de l'inventaire car elle fait partie des calculs permettant de calculer les quantités nécessaires à avoir en stocks (Guajardo et *al.*, 2015), ce qui justifie le travail fait sur celle-ci et permet l'introduction à la prochaine thématique, la gestion des stocks.

2.3 La gestion des stocks

La troisième thématique est la gestion des stocks. Il est d'abord pertinent de regarder ce que représente la gestion des stocks en PME. Il est possible de décortiquer ce concept en posant les trois questions suivantes : (1) Que doit-on commander ? (2) À quel moment doit-on commander ? (3) En quelle quantité doit-on commander ? (Pellerin, 1997). Pour Hydrotech, la première question (1) interagit directement avec leur choix de pompe en inventaire. Quelles pompes veut-on offrir ? Est-il nécessaire d'avoir l'ensemble des pompes offertes en inventaire ? La réponse à ces questions aura un impact direct sur l'inventaire de l'entreprise car elle pourra éventuellement résulter en une pénurie des stocks ou un surplus d'inventaire selon les prochaines ventes de pompes effectuées. Il est d'autant plus important pour Hydrotech de prendre le temps de réfléchir à cette question puisque leur délai de livraison est d'approximativement un an, ce qui rend le risque de pénurie ou de surplus d'inventaire beaucoup plus difficile à régler rapidement. La deuxième question (2) touche le réapprovisionnement. Le délai de livraison, la demande moyenne, la variabilité de la demande et du délai de livraison ainsi que le niveau de service font habituellement partie du calcul du point de réapprovisionnement (Nollet et *al.*, 1994). Pour soutenir la place du niveau de service dans le calcul du point de réapprovisionnement, Kranenburg et Houtum (2008) affirme qu'il s'agit d'un élément qui ne peut être négligé, car ce sont les clients que l'on doit satisfaire avant tout, puisqu'on doit associer un service approprié pour les besoins des clients. Il faut souligner que le niveau de service, malgré son nom, s'applique impérativement dans le domaine manufacturier. Il sera donc nécessaire, pour ce projet, de réussir à trouver les données sur les délais ainsi que la demande et de déterminer un niveau de service adéquat. La troisième question (3) dicte la quantité qui doit être commandée une fois le moment de commande déterminé. Afin de la calculer, on prend habituellement en compte la demande moyenne annuelle, le délai de livraison, les coûts de commande, les coûts d'entreposage ainsi que le stock de sécurité (Vermorel, 2012).

Afin de pouvoir faire un tel calcul, il est nécessaire de détailler davantage les différents facteurs qui le compose. Les coûts de commande impliquent habituellement les différents frais qui entourent une commande, c'est-à-dire la préparation de la commande, la passation et traitement de la commande, le suivi de la commande ainsi que la réception de la commande. Les coûts d'entreposage incluent les frais associés au bâtiment dans lequel sont entreposé les stocks, le coût de dépréciation des stocks, ainsi qu'aux frais impliquant ceux-ci comme l'assurance (Gélinas, 1996). Aussi, la notion du stock de sécurité (Thomopoulos, 2015) revient souvent dans la littérature et est importante lorsqu'on parle de gestion des stocks, surtout pour la situation actuelle d'Hydrotech qui possède de très longs délais d'approvisionnement, qui peuvent rendre l'entreprise à risque de rupture de stock si ce concept n'est pas appliqué. L'utilité du stock de sécurité est de couvrir les incertitudes que représentent la demande et les délais de livraison. Autrement dit, ce stock permet à l'entreprise de pouvoir subvenir à la demande si elle subit une hausse soudaine ou si l'approvisionnement de stocks a un imprévu. Le stock de sécurité peut comprendre la consommation moyenne, le niveau de service, le délai de livraison et autres. Il existe de nombreuses méthodes pour faire ce calcul tout dépendamment des caractéristiques et des besoins de l'entreprise. Par exemple, Thieuleux (2019) présente la formule moyenne-max, qui s'assure de pouvoir couvrir les cas les plus extrêmes en considérant les maximums et la moyenne des ventes et du délai. Il présente aussi la méthode avec la loi normale de distribution, qui couvre bien les stocks qui ont un grand volume de ventes en considérant le niveau satisfaction des clients désiré ainsi que les ventes moyennes et le délai moyen avec leur écart type. On y trouve également la formule simple, qui s'applique bien pour les produits avec peu de ventes en considérant un nombre de jours de sécurité désiré. Aussi, il présente plusieurs autres méthodes qui peuvent être plus complexes, mais qui ne seront pas testé pour la situation d'Hydrotech par soucis de simplicité. Pour le cas d'Hydrotech, deux méthodes seront testées, la formule moyenne-max ainsi que la loi normale avec incertitude sur la demande et le délai indépendants, car elles semblent être adéquates avec l'entreprise (ceci sera d'avantage détaillé dans le chapitre V).

Il est alors pertinent d'observer différentes méthodes de gestion des stocks afin de pouvoir les comparer et de pouvoir envisager les options possibles. Bien qu'il existe des méthodes de gestions qualitatives, comme la gestion par expérience et jugement ou la méthode d'analyse visuelle (Pellerin, 1997), cette revue de littérature se concentre sur des méthodes plus quantitatives en raison des besoins d'Hydrotech. Le premier modèle que l'on peut retrouver est celui du point de commande (P) et de la quantité à commander (X), qui veut qu'une commande (X) soit effectuée quand le point de commande (P) est atteint. On peut voir dans la littérature qu'il est possible de trouver une quantité économique à commander (QEC) (voir Harris, 1990), qui minimise les coûts de commande et d'entreposage présenté plus tôt. Le calcul de la quantité économique à commander est :

$$QEC = \sqrt{\frac{2 * D * C_c}{C_e}} \quad (2.1)$$

La demande moyenne annuelle est représentée par D . Le coût unitaire de passation d'une commande est représenté par C_c . Le coût unitaire et annuel d'entreposage est représenté par C_e .

La formule du point de commande, selon Thieuleux (2019) est :

$$PC = \mu * d + Ss \quad (2.2)$$

Les ventes moyennes annuelles sont représentées par μ . Le délai de livraison est représenté par d . Le stock de sécurité est représenté par Ss .

Le second modèle est celui du point de commande (P) avec une quantité à commander variable (Y). La différence avec le modèle précédent est que celui-ci commande des quantités différentes quand il atteint le point de commande car il considère une

demande variable. La paramètre D de l'équation 2.1 serait donc différent d'un calcul à l'autre en fonction de la demande estimée pour la prochaine période. Si la prochaine période prévoit une quantité de vente plus grande, la quantité commandée sera plus grande, vice-versa. Le troisième modèle est celui de commande à intervalle de temps fixe. On passe donc une commande variable (W) à chaque temps (T) déterminé qui permettra d'atteindre le niveau de stock espéré (S). Les formules pour faire ce troisième modèle sont (Hammami ,2020) :

$$T = \frac{QEC}{\mu} \quad (2.3)$$

$$S = \mu * (T + d) + S_s \quad (2.4)$$

$$S_s = z * \sigma_{\mu} * \sqrt{T + d} \quad (2.5)$$

$$W = S - S_a \quad (2.6)$$

Le niveau de service est représenté par z . L'écart type de la demande est représenté par σ_{μ} . Le niveau de stock actuel est représenté par S_a .

Le quatrième modèle est celui de Pareto (Pellerin, 1997), modèle qui a déjà beaucoup été étudié dans la littérature, qui consiste à classer en catégorie A, B, et C les différents produits vendus en fonctions de leur niveau de ventes et donc de leur importance. Pour la situation d'Hydrotech, le modèle de Pareto est applicable car l'entreprise possède de nombreux types de pompe qui jouent différents rôles pour l'entreprise. Il sera donc possible d'utiliser ce modèle afin de déterminer le temps à investir sur chacune des pompes lors du développement du modèle de gestion de des stocks ainsi que pour le développement du modèle de prévision de la demande en fonction de leur importance. Le cinquième modèle est celui du juste-à-temps, qui consiste à attendre les commandes

du client avant de s'approvisionner (Lamouri & Thomas, 2009). Étant donné les très longs délais d'approvisionnement d'Hydrotech, cette méthode fut écartée du présent mémoire dans l'objectif de simplification. Le tableau 2.1 illustre les différents modèles ainsi que leurs caractéristiques particulières. Pour développer un modèle de gestion des stocks, plusieurs auteurs ont utilisés ou développés des modèles sophistiqués et appliqués pour des cas spécifiques. Sana (2016) a développé un modèle de réapprovisionnement des stocks avec une demande aléatoire sensible aux initiatives de l'équipe de vente (p. ex. une promotion ou un rabais). Il transforme le modèle « classique » de point de commande et de quantité à commander en considérant un réapprovisionnement en deux étapes, un détaillant et un fabricant, qui possèdent un système de prise de décision centralisé. Il a comme objectif de maximiser les profits totaux de ces deux parties. Heaviside et *al.* (2020) utilisent des prévisions des ventes faites pour des pièces de véhicules afin de calculer un point de commande et une quantité économique à commander avec les formules présentées plus tôt (le modèle 1). Laib & Teddar (2020) propose différentes méthodes de réapprovisionnement pour l'entreprise La Mousse du Sud, soit la méthode actuelle de l'entreprise, la méthode de réapprovisionnement périodique (date fixe, quantité fixe), la méthode du point de commande (date variable, quantité fixe) et la méthode de réapprovisionnement périodique (date fixe, quantité variable), les comparent et font ressortir le meilleur pour la situation donnée (soit la méthode du point de commande). Kacete & Kacete (2017) présente un modèle de gestion de stocks testé sur l'entreprise NAFTAL, soit un modèle faisant d'abord une séparation de produits avec la méthode ABC (Pareto) pour ensuite calculer une période de réapprovisionnement avec quantité économique à commander pour chacun des produits considérés importants.

Il est primordial, avant de choisir un modèle de gestion des stocks pour Hydrotech, de considérer ce qu'il implique pour l'entreprise, en prenant en compte les besoins de celle-ci ainsi que la facilité d'intégration et d'utilisation du modèle. Williams et Tokar (2008) présente une revue sur la gestion des stocks. Ils montrent les grands thèmes

associés à la gestion des stocks : « [...] integrating traditional logistics decisions [...] with inventory management decisions, using traditional inventory control models. [...] and examining inventory management through collaborative models », ce qui vient supporter la force d'un développement de modèle de gestion des stocks dans une entreprise. Ces concepts sont importants pour la réalisation de ce mémoire car ils soulignent l'utilité et la pertinence des modèles de gestion des stocks traditionnels et ils mettent en lumière qu'il sera essentiel de travailler en collaboration avec Hydrotech afin de s'assurer que le modèle développé réponde à leurs besoins, tant au niveau de la facilité d'utilisation que de la performance attendue.

Tableau 2.1 Différents modèle de gestion des stocks

	Modèle	Caractéristiques
1	Point de commande et quantité à commander fixe (Thieuleux ,2019 & Harris, 1990)	Commande fixe (X) faite quand le point de commande (P) est atteint
2	Point de commande et quantité à commander variable (Thieuleux ,2019 & Vermorel, 2012)	Commande variable (Y) faite quand le point de commande (P) est atteint
3	Temps de commande fixe avec quantité à commander (Hammami ,2020)	Commande variable (Z) à chaque temps (T) afin d'atteindre le niveau de stock espéré (S)
4	Pareto (ABC) (Pellerin, 1997)	Classification des produits en fonction de leur importance
5	Juste-à-temps (Lamouri & Thomas, 2009)	Attendre la commande du client afin de s'approvisionner

CHAPITRE III

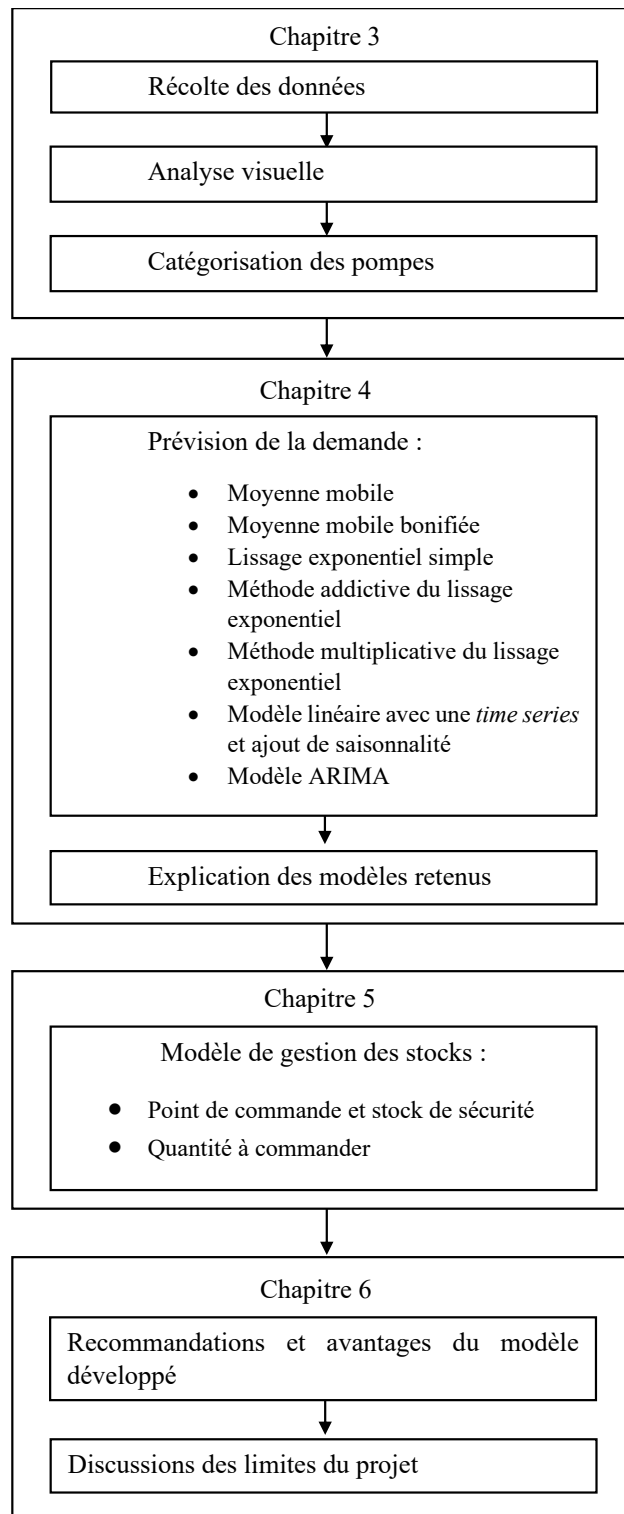
MÉTHODOLOGIE ET RÉCOLTES DES DONNÉES

Dans ce chapitre, on présente d'abord la méthodologie générale du projet effectué. Puis, on expose la méthodologie utilisée pour récolter les données nécessaires afin de pouvoir faire différents modèles de prévisions de la demande ainsi qu'un modèle de gestion des stocks.

3.1 Méthodologie du mémoire

On décortique ici le contenu du mémoire. La Figure 3.1 illustre le plan des prochains chapitres et contenu du mémoire. Comme on peut l'observer sur la figure 3.1, le présent chapitre met l'emphase sur la récolte de données, l'analyse visuelle de ces données et sur la catégorisation des différentes pompes d'Hydrotech. Ensuite, le chapitre IV présentera les modèles de la prévision de la demande qui ont été développés en détaillant leur méthode, en présentant leurs résultats et en les comparant les uns aux autres afin de n'en retenir que certains d'entre eux. Pour continuer, le chapitre V portera sur le développement du modèle de gestion des stocks en détail. Finalement, le chapitre VI présentera des recommandations et des avantages du modèle de gestion des stocks développé et discutera des limites qu'il possède.

Figure 3.1 Présentation de la méthodologie du mémoire



3.2 Récolte et analyse descriptive des données

Dans cette section, on discute de quelles données ont été récoltées et de comment elles ont été utilisées. Dans un premier temps, ces données seront visualisées afin de tenter d'en retirer des informations pertinentes. Dans un deuxième temps, on regardera comment ces données ont été exploitées afin de développer des modèles de prévision de demande et de gestion des stocks, qui seront vus dans les prochaines sections.

3.2.1 Récolte des données

La collecte des données s'est faite via le progiciel de gestion intégré d'Hydrotech, Contal². Cette cueillette avait pour objectif d'avoir des données sur le volume des ventes mensuelles de chaque pompe neuve et usagée depuis l'ouverture d'Hydrotech, le nombre d'achats mensuels de celles-ci, leur coût d'achat, le délai de livraison à chaque commande et finalement les min/max actuels de chaque modèle de pompe, c'est-à-dire la quantité minimale et maximale qui devrait être en stock pour cette pompe.

Lors de la récolte des données, différentes modifications ont eu lieu afin que l'utilisation de ces données dans des modèles soit plus efficace et donne de meilleurs résultats. La première modification qui a été apportée aux données est l'agrégation en trimestre. Cet exercice était nécessaire afin de réduire la variance dans les données et afin d'éviter des mois avec un volume de ventes nulles. En effet, des valeurs de données avec une grande variance ou qui sont nulles ont un impact significatif sur les modèles de prévision de demande et il est souhaitable d'éviter ce genre de situation. Ce genre de situations font augmenter la possibilité d'erreurs lors du développement des modèles et il devient alors beaucoup plus difficile de faire des prévisions intéressantes. La

² <https://contalitec.com/contal/>

deuxième modification qui a été faite a été de cumuler les différentes ventes d'une même pompe, qui était sous différentes formes dans Contal. Prenons l'exemple d'une pompe spécifique, soit la pompe A (le nom a été modifié pour des raisons de confidentialité). Pour cette dernière, il y avait plusieurs types de ventes dans Contal : (1) les pompes neuves, (2) les pompes réparées, (3) les pompes en *Stainless* et (4) les pompes équivalentes réparées chez Hydrotech (p. ex. provenant d'une autre compagnie). Ce qui nous intéressait ici pour le développement de modèle était la somme de toutes ces ventes car ce sont toutes des ventes de pompe A, ce qui représente donc la demande totale de ce type de pompe. Cette agrégation était nécessaire et pertinente car ces 4 types pompes accomplissent la même fonction pour les clients d'Hydrotech. Ils couvrent donc la même demande : les clients ne font pas de différence entre une pompe neuve, remise à neuf ou équivalente, ils veulent simplement que la bonne pompe leur soit fournie. Aussi, les types de pompe sont séparés (A, B, C, D, etc.) car chaque type de pompe ne dessert pas la même demande.

3.2.2 Utilisation de Rstudio et d'Excel

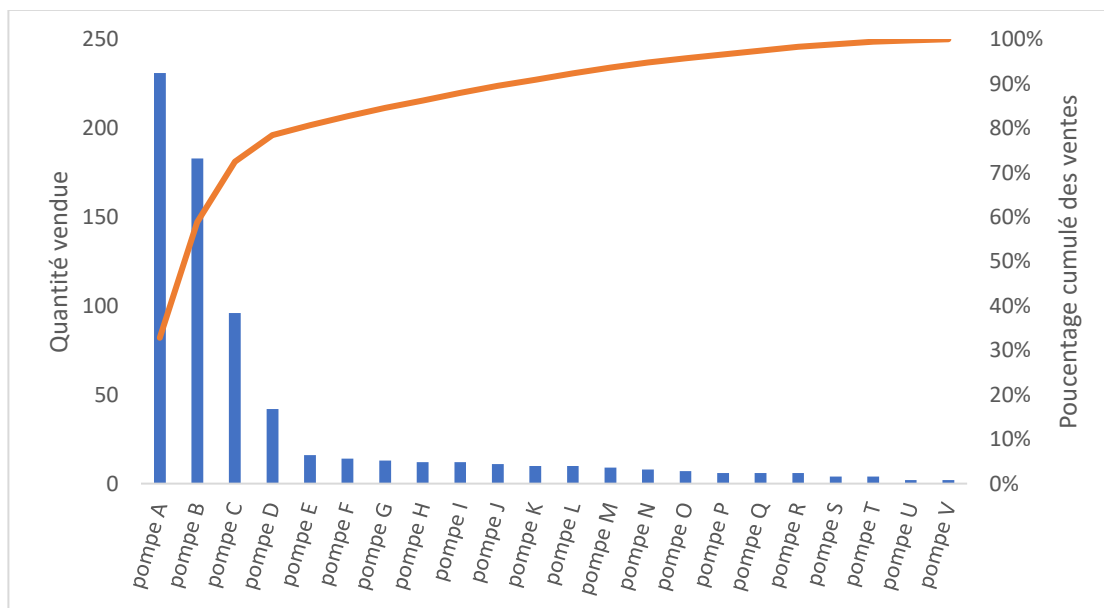
Pour l'observation et le nettoyage des données, le logiciel Excel a été utilisé. Une fois la totalité des données utiles, de Contal, transférées dans Excel, certains modèles et analyses ont été faits directement sur ce logiciel. Rstudio³ a permis de tester de nombreux modèles de prévisions de la demande. Ces choix se justifient car ils étaient compatibles avec les logiciels qu'Hydrotech utilise ce qui permettra une assimilation plutôt facile lors du transfert de connaissances aux employés. Aussi, ils sont simples d'utilisation et permettent une bonne visualisation des données.

³ <https://www.rstudio.com/categories/rstudio-ide/>

3.3 Utilisation des données pour le développement de différents modèles de prévision

Avant de se lancer dans le développement de modèles pour l'ensemble des pompes, il était nécessaire de s'assurer que la quantité des données était suffisante afin de pouvoir appliquer ces modèles. Après observations, certaines pompes ne cumulent que quelques ventes depuis l'ouverture d'Hydrotech. Par exemple, la pompe U n'a que 2 ventes de 2018 à 2021, ce qui est loin d'être suffisant pour développer un modèle. Il a alors fallu catégoriser les pompes en 2 types : celles qui ont assez de données pour avoir un modèle de prévisions et celles qui ont trop peu de ventes historiques. On peut comparer cette catégorisation avec la loi de Pareto. En effet, en observant les ventes, on peut facilement identifier les pompes que l'on peut mettre dans un groupe A, soit les pompes avec plus de ventes et celle qu'on peut mettre dans un groupe B, soit les pompes avec peu de ventes. La Figure 3.2 illustre comment ces deux groupes ont été obtenus en illustrant les quantités de pompes vendues.

Figure 3.2 Quantité vendue de chacune des pompes d'Hydrotech depuis son ouverture en 2017



Les pompes A, B et C ont été catégorisées de groupe A. Pour ces pompes, il était possible de développer différents modèles de prévisions de la demande car on avait suffisamment de données pour utiliser des modèles plus complexes et obtenir des résultats intéressants.

Pour les pompes avec de petites quantités de ventes historiques (pompes D à V), on a simplement pris la moyenne annuelle de vente comme prévisions car il n'était pas possible de développer un modèle plus complexe intéressant avec si peu de données. Si la valeur de la moyenne n'était pas un nombre entier (ex. : 2,2), on arrondissait vers le haut (donc à 3) en raison de la stratégie d'Hydrotech qui consiste à ne pas manquer de pompe en inventaire. Malgré l'absence quantitative de ventes pour ces pompes, on peut quand même espérer obtenir des retombées économiques intéressantes. Par la mise en place du modèle de gestion d'inventaire afin de donner une meilleure structure et afin d'identifier si les quantités actuelles sont bonnes (selon des méthodes quantitatives simples). Dans le reste du chapitre, on se concentre uniquement sur les pompes qui font partie du groupe A (les pompes A, B et C).

3.3.1 Choix de la pompe A

La suite du présent travail met l'emphase sur la pompe de modèle A. Ce choix se justifie par le fait que cette pompe est celle qui possède le plus de ventes chez Hydrotech, soit 231 ventes sur 704. En revanche, il faut savoir que le modèle de gestion des stocks développé pourra s'appliquer à la totalité des pompes.

3.3.2 Visualisation des données de la pompe A avec Excel

On présente ici un exemple de ce que les manipulations ont eu comme impact sur l'ensemble des données de la pompe A. D'autres exemples se trouvent dans l'annexe A. L'impact de l'agrégation des données en trimestres est illustré par les figures 3.3 et 3.4. Le tableau 3.1 illustre quantitativement leur moyenne ainsi que leur écart.

Figure 3.3 Ventes mensuelles des pompes A chez Hydrotech Mining depuis son ouverture

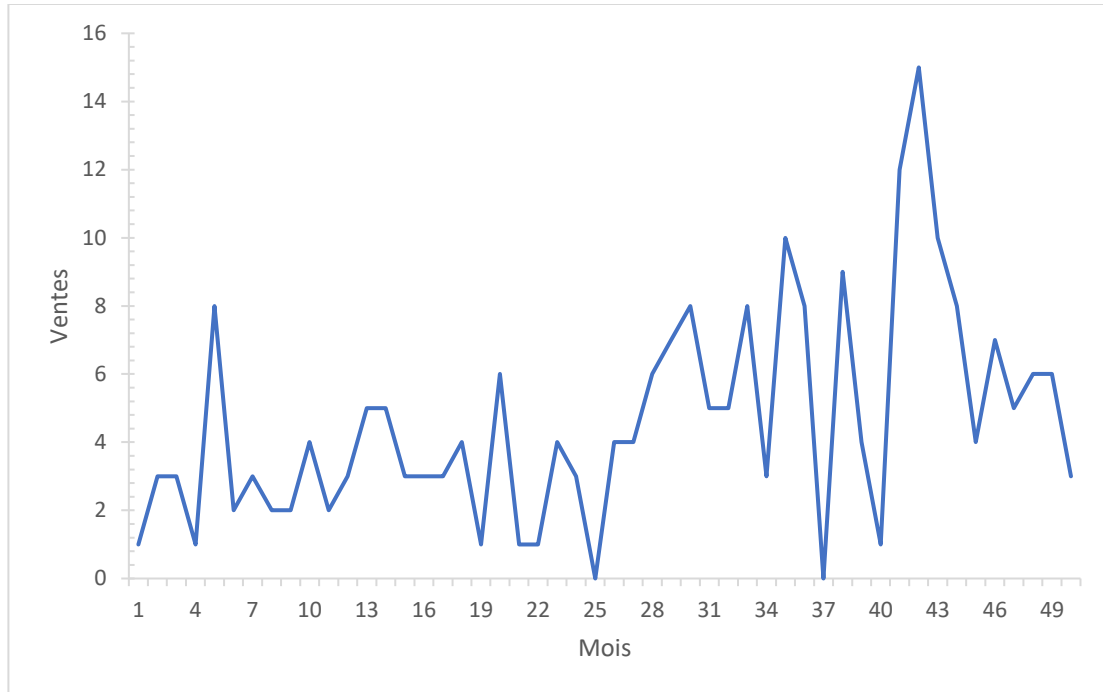


Figure 3.4 Ventes trimestrielles des pompes A chez Hydrotech Mining depuis son ouverture

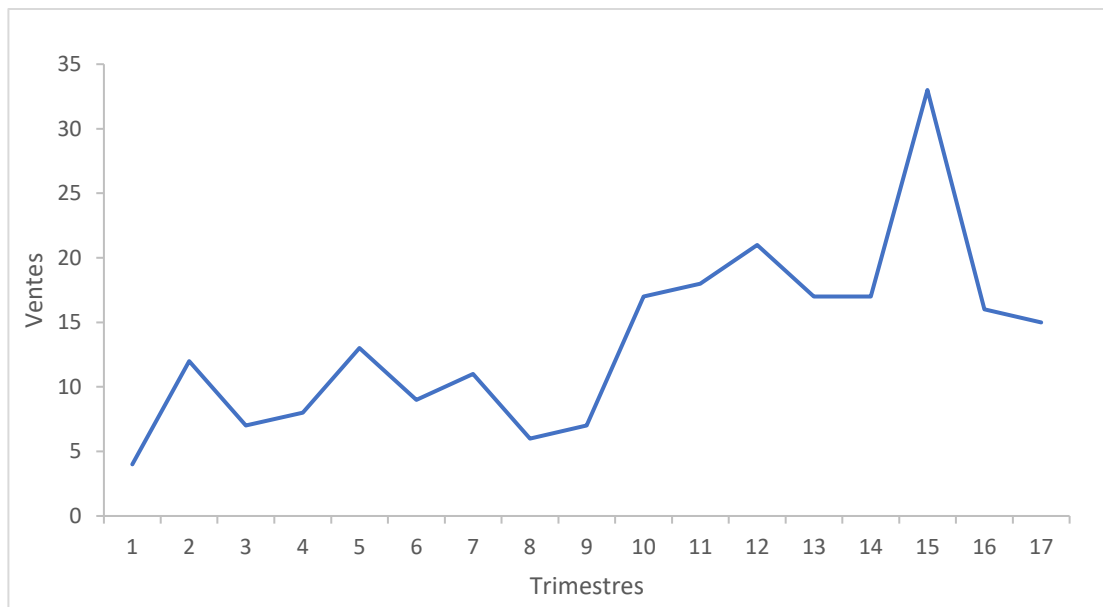


Tableau 3.1 Différences entre les ventes mensuelles et trimestrielles

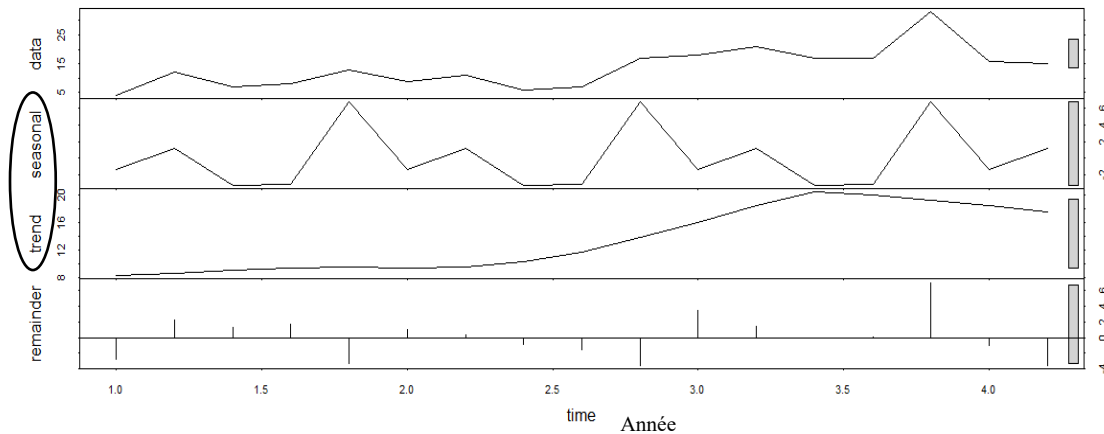
	Moyenne	Écart	Écart en %
Ventes mensuelles	5	3,2	64%
Ventes trimestrielles	14	7	50%

D'abord, en observant le Tableau 3.1, on peut constater que le fait d'agréger les données diminue l'écart des ventes en pourcentage. Cette réduction n'est que de 14% sur le 64% initial. Cependant, cette réduction est souhaitable car on ne veut pas perdre la saisonnalité ou la tendance en agrégeant les données, ou du moins, ne pas les perdre en totalité étant donné qu'on souhaite que les données restent représentatives de la réalité de l'entreprise. Ensuite, en observant les figures 3.3 et 3.4, on constate que les ventes ont une tendance positive et qu'il semble y avoir une certaine saisonnalité qui, elle, est cependant moins évidente à définir et sera étudiée davantage dans la prochaine sous-section. Il est possible d'expliquer l'évolution de la tendance si l'on observe le contexte dans lequel se trouve Hydrotech qui est une jeune entreprise en expansion. Hydrotech gagne la confiance de ses clients et effectue de plus en plus de ventes chez ceux-ci. Ceci expliquerait alors la tendance positive qu'on observe ici, car le nombre de ventes augmente d'année en année. L'hypothèse de la présence d'une saisonnalité est faite en raison des pics de ventes, on voit une augmentation des ventes suivie d'une diminution, qui semblent être présents à chaque trois trimestres, approximativement.

3.3.3 Visualisation des données de la pompe A avec Rstudio

La visualisation avec Rstudio permet de confirmer la présence d'une tendance et de la saisonnalité dans la vente de pompes comme mentionnée plus tôt. La figure 3.5 illustre cette affirmation :

Figure 3.5 Tendance et saisonnalité observées dans les données de ventes historiques de la pompe A



La figure 3.5 a été développée avec Rtsudio en utilisant les données présentées sur la figure 3.3. Ce qui est intéressant ici c'est d'observer visuellement l'évolution des courbes de la saisonnalité et de la tendance. On peut clairement voir qu'il y a une tendance à la hausse des ventes au fil des années en passant de huit unités par trimestre augmentant jusqu'à plus ou moins vingt unités. En effet, la jeune entreprise entre dans le marché tranquillement et prend de plus en plus d'expansion. Il est donc naturel d'observer une augmentation des ventes. Pour continuer, on voit également une saisonnalité claire présente dans la vente des pompes, variant entre -2 et +6 unités par an par rapport à la moyenne de ventes. Hydrotech n'est pas capable d'identifier, actuellement, la raison de cette saisonnalité. On pourrait s'attendre à ce que les ventes deviennent plus constante (sans saisonnalité) dans le temps car la ventes et les bris de pompes ne seront pas prédéterminés (par ex : plus ou moins deux ventes et un bris par jour).

En résumé, à la suite de la récolte de données, on a pu classier les pompes par différents types, soit A, les pompes avec un nombre de ventes significatifs, et B, les pompes avec peu de ventes historiques. Cette classification est nécessaire afin de

pouvoir utiliser des méthodes de prévision de la demande appropriées. Une agrégation des données a été faite afin de réduire la variabilité dans les ventes ainsi que pour éviter d'avoir des valeurs nulles, ce qui permettra d'avoir des résultats plus intéressants pour les différents modèles de prévision de la demande. Finalement, une première analyse visuelle des données s'est faite d'où l'on a pu observer une tendance à la hausse et une saisonnalité (pour la pompe A, par exemple).

CHAPITRE IV

DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES DE PRÉVISION DE LA DEMANDE

Dans ce chapitre, on présente d'abord différents modèles de prévisions qui ont été testés, soit la moyenne mobile, la moyenne mobile bonifiée, le lissage exponentiel simple, le lissage exponentiel additif incluant l'erreur, la tendance et la saisonnalité, le lissage exponentiel multiplicatif incluant l'erreur, la tendance et la saisonnalité, les *time series* avec régression incluant la saisonnalité ainsi que le modèle *ARIMA*. Ensuite, on compare ces modèles d'un point de vue qualitatif, en faisant ressortir leurs forces et leurs faiblesses, ainsi que d'un point de vue quantitatif en comparant leurs différentes erreurs. Bien qu'il existe des modèles plus sophistiqués dans la littérature, les modèles sélectionnés étaient suffisants pour permettre d'atteindre les résultats escomptés, soit de faire une prévision de la demande annuelle, afin de pouvoir l'utiliser lors du développement du modèle de gestion des stocks. Aussi, il était important d'assurer une facilité dans la transférabilité de l'outil développé afin de permettre une utilisation aisée par l'entreprise. Pour conclure ce chapitre, il sera question de déterminer quel modèle sera conservé pour le développement du modèle de la gestion des stocks.

Bien que les modèles développés dans le cadre de ce mémoire soient quantitatifs, les quantités réelles utilisées en pratique seront vérifiées auprès d'Hydrotech, avec les représentants, le directeur du développement des affaires et le directeur de l'approvisionnement.

4.1 L'ensemble d'entraînement et l'ensemble de test.

Avant d'embarquer dans les différentes méthodes de prévisions, il est important de spécifier comment les données sont utilisées dans le développement de ces modèles. Étant donnée la disponibilité de 17 trimestres de ventes historiques, il a été décidé, afin d'évaluer la qualité des différents modèles, que les 11 premiers trimestres (1^{er} avril 2017 à 1^{er} octobre 2019) seront l'ensemble d'entraînement, c'est-à-dire qui permettront au modèle de s'entraîner et donc de se développer avec ces données, et les 6 derniers trimestres (1^{er} janvier 2020 à 1^{er} avril 2021) constitueront l'ensemble de test, c'est-à-dire qui serviront à tester le modèle, en se basant sur l'ensemble d'entraînement, afin d'en juger sa performance. Cette séparation est justifiée par le fait que dans une série temporelle, il est important que l'ensemble d'entraînement précède l'ensemble de test pour être cohérent. Aussi, bien que les ventes aient une augmentation prononcée dans les derniers trimestres (notamment au trimestre 15), la tendance à la hausse ainsi que la saisonnalité est présente dans les 11 premiers trimestres et il devrait être possible d'obtenir des résultats satisfaisants avec cette séparation. Celle-ci sera la même pour tous les modèles afin de pouvoir les comparer. Tous les modèles utilisent un ensemble d'entraînement afin de faire leurs prévisions par la suite. On utilise l'ensemble de test afin de la comparer avec les données réelles d'Hydrotech en observant les mesures d'erreurs. Les résultats des prévisions et les mesures d'erreurs de chacun des modèles seront présentés à la fin du chapitre. Par la suite, pour faire la prévision de l'année suivante (les 4 prochains trimestres inconnus - 1^{er} juillet 2021 au 1^{er} juillet 2022 - on utilise l'ensemble des données connues comme entraînement - les 17 trimestres. Ce choix a été fait afin de faire la prévision avec un maximum de données disponibles.

4.2 Méthode de moyenne mobile

Le premier modèle qui a été testé a été fait avec la méthode de la moyenne mobile. On utilise la moyenne des deux derniers trimestres, pour les pompes de groupe A, car avec l'augmentation des ventes au travers du temps, il semblait plus pertinent de prendre un échantillon plus petit que plus grand. Ce choix a été fait puisqu'il pouvait permettre de voir si ce modèle, utilisé pour les pompes du groupe B, était intéressant dans son ensemble. Il faut noter que les pompes du groupe B utilise la moyenne des quatre derniers trimestres afin d'éviter des prévisions nulles. Aussi, le fait de faire ce premier modèle simple permet de mettre des valeurs de comparaison lors du développement d'autres modèles. On a choisi de présenter uniquement le résultat de la moyenne des deux derniers trimestres car c'est cette moyenne qui présentait les résultats les plus intéressants pour les pompes du groupe A. Le détail du développement de ce modèle se trouve dans l'annexe A. À noter que les valeurs présentées sont arrondies à deux décimales près au maximum. Aussi, pour les pompes, on arrondit vers l'entier le plus haut, car on ne veut pas avoir des fractions de pompe (p. ex : 12,4 pompes est arrondie à 13 pompes). Ces règles sont appliquées pour la totalité du présent travail.

4.3 La moyenne mobile bonifiée

Dans l'optique d'être le plus réaliste possible avec la méthode de la moyenne mobile, il a été déterminé, avec Hydrotech, qu'il serait pertinent d'ajouter un 20% de ventes de plus à cette méthode de prévision afin de mieux représenter la croissance visible lors de l'analyse visuelle des données. Cette bonification représente l'augmentation prévu, en termes de ventes, de la direction d'Hydrotech. Le détail du développement de ce modèle se trouve dans l'annexe B.

4.4 *Exponential smoothing state space model (ETS)*

Ce second type de modèle a été développé sur Rstudio. Il est très intéressant car il possède plusieurs paramètres permettant de tester plusieurs variations du modèle. Notamment, il est possible de donner une importance, par l'attribution de constante, à, l'erreur, la tendance et la saisonnalité, qui seront utilisés lors de la construction des modèles. Autrement dit, ce modèle teste des méthodes de type lissage exponentiel et étant donnée la complexité des données des ventes historiques, c'est-à-dire qu'elles comportent tendance et saisonnalité, il était pertinent de tester ce genre de modèle. On a donc testé le lissage exponentiel simple, le lissage exponentiel additif ainsi que le lissage exponentiel multiplicatif.

4.4.1 Lissage exponentiel simple

Avant de tester des modèles plus complexes, il était intéressant d'en essayer des plus simples et d'en observer leurs performances. C'est pourquoi le lissage exponentiel simple a été expérimenté à titre d'exemple où l'on fait une moyenne entre les prévisions faites et leur erreur respective. Le détail du développement de ce modèle se trouve dans l'annexe C.

4.4.2 Lissage exponentiel avec erreur, tendance et saisonnalité (méthode additive)

À la suite du développement du modèle du lissage exponentiel simple, il était pertinent de continuer sur cette méthode de lissage en incluant la tendance et la saisonnalité. La première méthode qui a été testée est la méthode additive. En d'autres mots, on calcule une erreur, une tendance et une saisonnalité qu'on additionne pour faire une prévision des ventes. Le détail du développement de ce modèle se trouve dans l'annexe D.

4.4.3 *ETS* multiplicative (Méthode Winters-Holt)

Tout comme la méthode *ETS* additive, la méthode de Winters-Holt touche plusieurs caractéristiques que l'on peut voir lorsqu'on observe les différentes données des ventes, notamment la tendance et la saisonnalité. Ce modèle a été développé sur Excel plutôt que sur Rstudio car il est un outil plus familier pour Hydrotech et permet une plus simple présentation et explication des calculs. La différence avec le modèle *ETS* additif est que l'erreur, la tendance et la saisonnalité sont multipliées plutôt qu'additionnées. Le fait que ces deux modèles soient similaires permet alors une comparaison intéressante qui sera faite plus tard dans le chapitre. Le détail du développement de ce modèle se trouve dans l'annexe E.

4.5 Fit a linear model with time series components (TSLM)

Les prochains modèles développés pour la prévision de la demande s'appuient sur la méthode *TSLM*, qui permet d'associer un modèle linéaire à un ensemble de données ainsi que d'y ajouter une saisonnalité. Plusieurs types de modèle linéaire, avec ajout d'une saisonnalité, ont été testés. Plus précisément, la régression linéaire, la régression exponentielle et la régression quadratique ont été expérimentées. Le détail du développement de ce modèle se trouve dans l'annexe F.

4.6 *Modeling of Time Series* (ARIMA : Autoregressive Integrated Moving Average)

Ce modèle a été testé car il semblait pouvoir bien s'appliquer à la situation des ventes d'Hydrotech, qui est une *Time series*. Il s'agit d'un modèle assez complexe à comprendre ainsi qu'à détailler en calculs, c'est pourquoi il sera simplement appliqué dans ce travail. En quelques mots, le modèle fait automatiquement une série de tests

avec ses différents paramètres. Sans entrer dans les détails du calcul, le modèle considère le nombre de termes autorégressifs (AR) : il regarde le degré de dépendance de la donnée observée avec les données antérieures (p. ex. si la variable est égale à 3, alors la modèle s'appuie sur les trois dernières valeurs). Le modèle considère aussi le nombre de différences non saisonnières et les tendances générales (I) : la valeur de cette variable représente la tendance des données. Le modèle prend également en compte le nombre de termes moyens mobiles (MA) : il regarde les calculs d'erreurs faits avec les prévisions antérieures (p. ex. si la variable est égale à 2, alors la modèle s'appuie sur les deux derniers calculs). Finalement, le modèle teste différentes valeurs pour ces variables, puis il conserve la meilleure solution.

4.7 Prévisions de demande obtenues avec les différents modèles

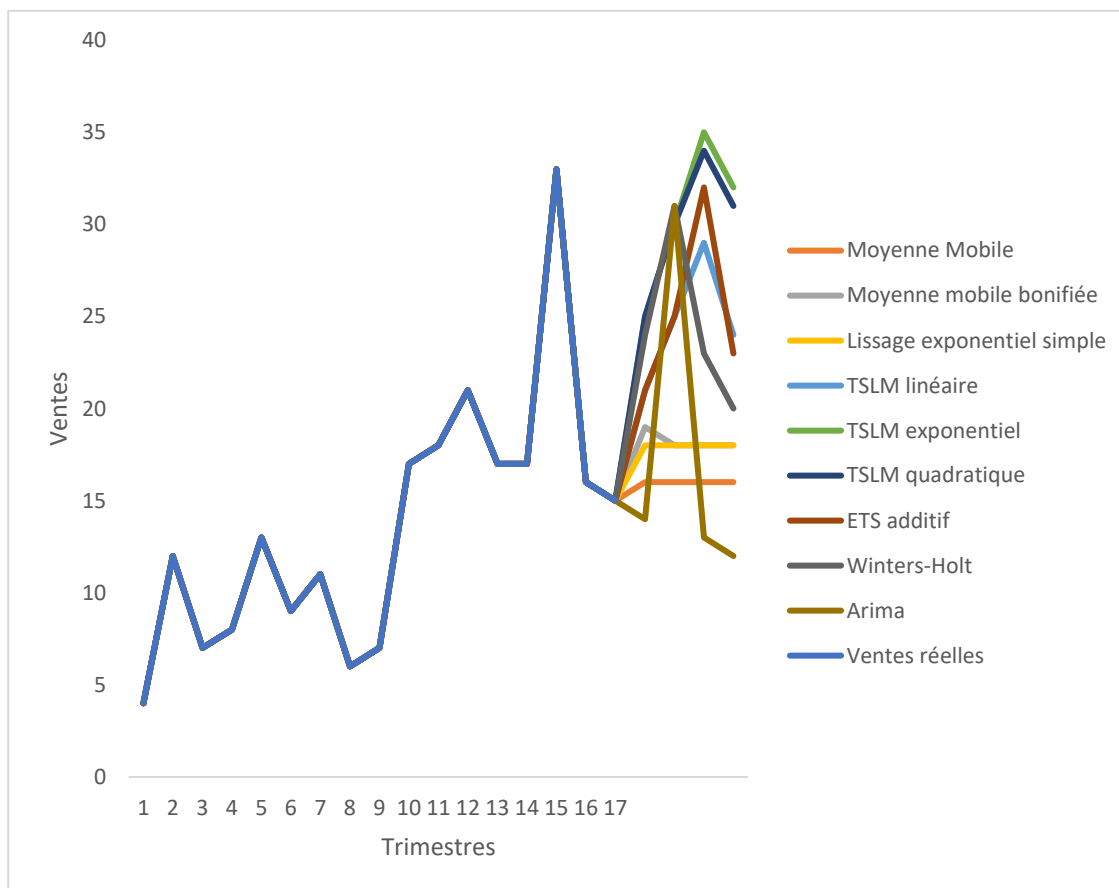
La Figure 4.1 illustre les prévisions de vente trimestrielles de la pompe A, pour 2022, qui seront discutées et comparées. Le graphique ne montre pas les ensembles d'entraînement afin de ne pas mettre de bruit sur le graphique puisqu'on s'intéresse uniquement aux prévisions dans cette section. Voir les annexes D, E et F afin de visualiser graphiquement des ensembles d'entraînement.

Les ventes prédites par la méthode de moyenne mobile sont représentées par la courbe orange. La somme des prévisions s'élève à 61 unités. Étant donné que ce modèle ne suit pas la tendance à la hausse des ventes d'Hydotech, on peut supposer que cette quantité sous-évalue un peu les ventes réelles qui seront effectuées lors de la prochaine année. En observant le reste des prévisions, on voit bien que cette prévision est nettement inférieure à ce qui devrait être attendu.

Les ventes prédites par la méthode de moyenne mobile bonifiée sont représentées par la courbe gris pâle. La somme des prévisions est de 73 unités. On voit que malgré la bonification de 20%, cette prévision n'est pas satisfaisante car elle n'est pas cohérente

avec la tendance positive qui est présente dans les ventes et on s'entendrait à une prévision des ventes de 2022 plus élevée que les ventes réelles de 81 de 2021. Aussi, un point faible de cette méthode est de perdre la saisonnalité.

Figure 4.1 Prévisions des ventes de la pompe A avec les différentes méthodes de prévision



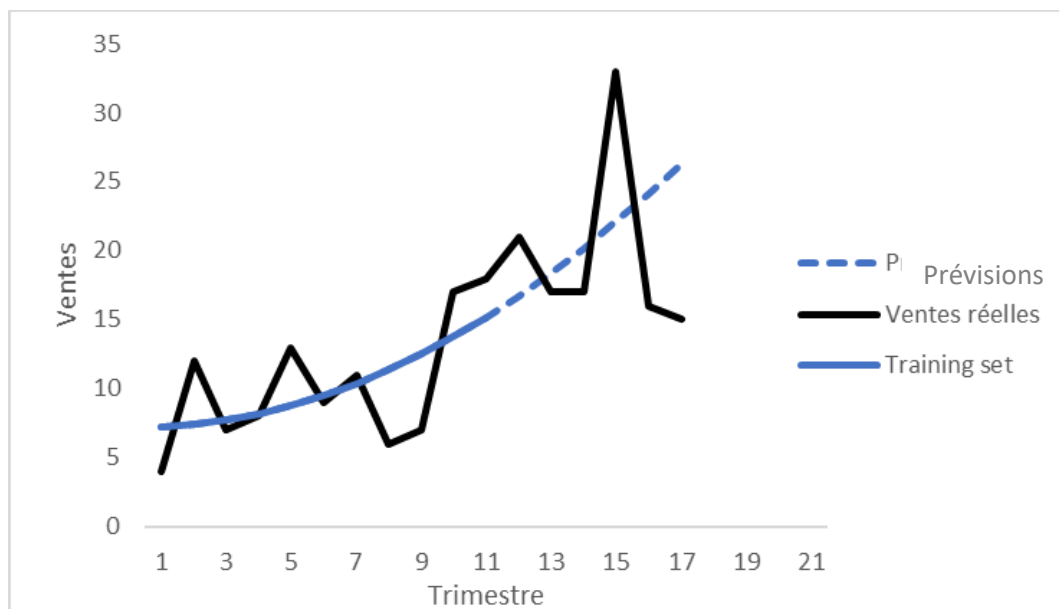
Les ventes prédites par la méthode *ETS* additive sont représentées par la courbe bourgogne. La somme des prévisions s'élève à 101 unités pour 2022. On peut remarquer que les prévisions semblent faire du sens visuellement, suivant une certaine tendance à la hausse ainsi qu'une saisonnalité. Aussi, la somme de cette prévision pour 2022 est supérieure à la quantité de ventes de 2021, soit 81. Il est important de rappeler

qu'Hydrotech est en pleine expansion et qu'avec sa stratégie, il serait surprenant qu'il y ait une diminution entre 2021 et 2022.

Les ventes prédites par la méthode *ETS* multiplicative (Winters-Holt) sont représentées par la courbe gris foncé. La somme des prévisions s'élève à 98 unités. La courbe de prévision est similaire à celle de la méthode additive et est intéressante pour les mêmes raisons.

Les ventes prédites par la méthode *TSLM* avec régression quadratique et saisonnalité sont représentées par la courbe bleu foncé. La somme des prévisions s'élève à 120 unités. Ce nombre peut sembler élevé si l'on observe les ventes historiques, qui est de 81 pour les 4 derniers trimestres. Il est donc pertinent d'essayer de comprendre pourquoi il y aurait une surévaluation. Si l'on prend le cœur de ce modèle, qui est la régression quadratique, on constate qu'avec la forme que prend la courbe représentant les ventes historiques il est évident que la prévision faite sera très optimiste pour Hydrotech. La figure 4.2 illustre cette affirmation :

Figure 4.2 Modèle de régression quadratique sans saisonnalité



On peut observer sur la figure 4.2 que la courbe pointillée, qui représente la prévision de ventes, augmente considérablement dans le temps, particulièrement vers la fin de la courbe. Cependant, cela ne représente pas bien la réalité d'Hydrotech car si l'on regarde les ventes du 1^{er} trimestre en 2021, il y a eu 15 ventes, tandis que la prévision dépasse la trentaine. Il n'est pas impossible qu'Hydrotech, avec son expansion, puisse atteindre de telles quantités. Cela dit, le modèle n'est pas adapté pour la situation actuelle, mais pourrait éventuellement devenir pertinent tout dépendamment du développement de l'entreprise dans le futur.

Les ventes prédites par la méthode *TSLM* avec régression exponentielle et saisonnalité sont représentées par la courbe verte. Ces prévisions sont très semblables à la régression quadratique et sont analysées de la même façon.

Les ventes prédites par la méthode *TSLM* avec régression linéaire et saisonnalité sont représentées par la courbe bleu pâle. La somme des prévisions s'élève à 99 unités. Ces prévisions semblent faire plus de sens que les autres modèles *TSLM* car la tendance n'est pas aussi affectée par l'augmentation des ventes dans les derniers trimestres d'Hydrotech, qui ont eu un gros impact sur ces méthodes qui utilisaient la régression quadratique et la régression exponentielle. Les prévisions ressemblent aux prévisions que proposent les modèles *ETS*. En effet, visuellement les prévisions sont intéressantes car elles suivent une tendance positive et ont une saisonnalité plausible.

La ligne bleue pointillée représente les ventes prédites ARIMA. On peut voir que les prévisions futures semblent insatisfaisantes. Effectivement, le modèle prédit des quantités de ventes futures plus basses que dans les 8 derniers trimestres. Les prévisions sont en dessous de celle de la moyenne mobile bonifiée, ce qui est loin d'être intéressant.

4.8 Comparaisons des différents des modèles

On va comparer les différents modèles testés d'un point de vue quantitatif, en observant différentes erreurs afin de déterminer le ou lesquels semblent être les meilleurs. On va aussi discuter des avantages et inconvénients de chacun.

4.8.1 Comparaisons des erreurs des modèles

Il est intéressant de comparer les erreurs des modèles afin de pouvoir identifier lequel semble être le plus adéquat. Les principales erreurs qui seront regardées seront : la moyenne d'erreur absolue en pourcentage (MAPE), l'erreur moyenne (ME), l'erreur moyenne absolue (MAE), l'erreur au carré (MSE), et l'écart des prévisions de 2021 du modèle lors de son entraînement et les prévisions de 2022. Le tableau 4.2 présente l'ensemble des erreurs des différents modèles. Le détail des calculs se trouve dans l'annexe G. Si l'on pose l'hypothèse que la moyenne mobile bonifiée sous-évalue les ventes, du fait que ses prévisions pour 2022 soient plus basses que les ventes réelles de 2021, et que les modèles *TSLM* quadratique et exponentiel les surestiment, comme il est présenté dans la section 4.11 avec la figure 4.2, on suppose que la valeur de la prévision pour 2022 devrait se trouver plus ou moins entre la prévision de ces modèles. On peut alors comparer les modèles qui ont des prévisions dans cet intervalle. En observant le modèle *ETS* additif, le modèle Winters-Holt et le modèle *TSLM* avec régression linéaire et saisonnalité, qui ont tous des prévisions pour 2022 similaires, on constate que c'est le modèle de Winters-Holt qui possède les erreurs les plus basses pour le ME, MAE, MSE et MAPE. C'est donc cette méthode qui sera conservée pour faire les prévisions de ventes utilisées pour le développement du modèle de gestion des stocks. Cependant, il est à noter qu'un ME de 3,2 n'est pas souhaitable car cela signifie que l'on sous-estime en moyenne les ventes de 3 unités par trimestre alors qu'Hydrotech ne veut pas manquer d'inventaire. Aussi, une erreur absolue moyenne de plus de 10% reste cependant un modèle de qualité moyenne (Ghiani et *al*, 2013).

Tableau 4.1 Erreurs *test set* des différents modèles de la pompe A incluant leurs prévisions de 2021 et la prévision de ventes de 2022 de ces modèles

	ME	MAE	MSE	MAPE (%)	Prévisions 2021	Écart avec les ventes réelles de 2021 (81)	Prévisions 2022
Moyenne mobile	1,8	4,2	41,5	17,0	72	-9	61
Moyenne mobile + 20%	-2,0	3,9	47,5	29,4	80	-1	73
Lissage exponentiel simple	2,8	4,0	42,1	16,3	68	-13	72
<i>ETS</i> additif	3,3	4,8	43,6	21,7	76	-5	101
<i>ETS</i> multiplicatif (Winters-Holt)	3,2	3,8	29,2	16,4	71	-10	98
<i>TSLM</i> avec régression linéaire et saisonnalité	4,7	7,3	60	37,7	67	-14	99
<i>TSLM</i> avec régression exponentielle et saisonnalité	0,7	5,9	38,4	30,6	87	+6	122
<i>TSLM</i> avec régression quadratique et saisonnalité	-0,2	5,6	31,5	28,9	92	+11	120
<i>ARIMA</i>	1,0	5,2	50	37,1	86	+5	70

Pour être très performant, un modèle doit habituellement être en dessous de 10% pour le MAPE. Cela dit, étant donné la quantité de données historiques disponibles limitée ainsi que l'objectif derrière la prévision des données, cette erreur est acceptable. Avec la constante expansion de l'entreprise et la grande variabilité dans les données il est attendu d'avoir des modèles de prévisions qui possèdent des erreurs d'une certaine grandeur. Autrement dit, le fait que les données n'aient pas une tendance et une saisonnalité constantes rend l'exactitude des prévisions plus difficiles et il est normal que celles-ci possèdent des erreurs. Il faut alors s'assurer que lors du développement du modèle de gestion des stocks, on considère que ces prévisions ont une erreur modérée.

4.8.2 Avantages et inconvénients de chacun des modèles

Bien que ce soit le modèle de Winters-Holt qui soit retenu pour le présent travail, les autres modèles ont aussi des avantages et pourraient être utilisés éventuellement si la situation devait changer. En effet, la moyenne mobile bonifiée pourrait être utilisée si l'on souhaite avoir un modèle de prévision plus simple et facile de compréhension ou si l'on pense que les ventes stagneront lors de la prochaine année. Le modèle *ETS* additif ressemble beaucoup à Winters-Holt, il pourrait être testé d'année en année afin de voir s'il performerait mieux au travers du temps que celui sélectionné. Le modèle *TSLM* avec régression quadratique avec saisonnalité pourrait être utilisé si les représentants et gestionnaires d'Hydrotech prévoient une augmentation des ventes significatives lors de la prochaine année dépendamment de différents facteurs entourant leurs clients, par exemple, un changement de direction dans une compagnie minière.

Aussi, il est important de mentionner que la prévision faite est intéressante uniquement pour ce qui est des ventes pour l'ensemble des mines qui sont déjà des clients au Québec. Étant donné que l'entrepôt de Val-d'Or fournit actuellement les autres entrepôts, à Kamloops et à Sudbury, la prévision faite devra être bonifiée par les

représentants et gestionnaires d'Hydrotech avec l'ajout de nouveaux clients dans ces régions extérieures. En autres mots, lorsque Kamloops et Sudbury commenceront à faire des ventes, ce qui devrait arriver dans un futur rapproché, il devrait y avoir une augmentation de la somme des ventes totales. Le tableau 4.2 résume les avantages et inconvénients des différents modèles.

Tableau 4.2 Avantages et inconvénients des modèles de prévisions de la demande pour la pompe A

	Avantages	Inconvénients
Moyenne mobile	<p>Prévision simple d'obtention</p> <p>Pertinent lorsque la demande est stable</p> <p>Utile pour les types de pompes avec peu de ventes (groupe B)</p>	<p>Ne considère pas la tendance et la saisonnalité</p>
Moyenne mobile + 20%	<p>Prévision simple d'obtention</p> <p>Pertinent lorsque l'augmentation de la demande est connue/anticipée par les représentants et gestionnaires d'Hydrotech</p> <p>Utile pour les types de pompes avec peu de ventes (groupe B)</p>	<p>Considère une tendance subjective</p> <p>Ne considère pas la saisonnalité</p>
Lissage exponentiel simple	<p>Donne une prévision simple et intéressante pour le prochain trimestre</p> <p>Utile pour les types de pompes avec peu de ventes (groupe B)</p>	<p>Ne considère pas la tendance et la saisonnalité</p> <p>N'est pas très efficace pour faire la prévision de la prochaine année</p>

<i>ETS</i> additif	<p>Considère la tendance et la saisonnalité</p> <p>Utile pour les types de pompes avec plus de ventes (groupe A)</p>	Nécessite une quantité suffisante de ventes historiques
<i>ETS</i> multiplicatif (Winters-Holt)	<p>Considère la tendance et la saisonnalité</p> <p>Utile pour les types de pompes avec plus de ventes (groupe A)</p>	Nécessite une quantité suffisante de ventes historiques
<i>TSLM</i> avec régression linéaire et saisonnalité	<p>Considère la tendance et la saisonnalité</p> <p>Utile pour les types de pompes avec plus de ventes (groupe A)</p>	Moins sensible aux grosses variations des ventes
<i>TSLM</i> avec régression exponentielle et saisonnalité	<p>Considère la tendance et la saisonnalité</p> <p>Pertinent quand la demande augmente ou diminue considérablement d'une année à l'autre</p> <p>Utile pour les types de pompes avec plus de ventes (groupe A)</p>	La tendance à un impact global significatif sur les prévisions (résultant potentiellement à une surestimation ou sous-estimation)
<i>TSLM</i> avec régression quadratique et saisonnalité	<p>Considère la tendance et la saisonnalité</p> <p>Pertinent quand la demande augmente ou diminue considérablement d'une année à l'autre</p> <p>Utile pour les types de pompes avec plus de ventes (groupe A)</p>	La tendance à un impact global significatif sur les prévisions (résultant potentiellement à une surestimation ou sous-estimation)
<i>ARIMA</i>	<p>Complexe de compréhension et d'adaptation</p> <p>Utile pour les types de pompes avec plus de ventes (groupe A)</p>	Nécessite une quantité suffisante de ventes historiques

CHAPITRE V

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE GESTION DES STOCKS

Dans ce chapitre, on discute des résultats obtenus pour le modèle de gestion des stocks. On fait de nombreuses analyses de sensibilités afin de bien présenter l'importance de chacun des paramètres. Ces analyses permettent de visualiser et de comprendre l'importance de la précision de chacun de ces paramètres. Autrement dit, elles permettent de constater ce que le changement de valeur d'un de ces paramètres a comme impact sur le point de commande ou sur la quantité à commander.

5.1 Méthodologie pour la gestion de stock

Dans cette section, on détaille un modèle pour gérer l'inventaire. Ce modèle fonctionne par point de commande (PC) et par quantité économique à commander (QÉC). Bien qu'il serait possible de développer des modèles plus complexes et sophistiqués comme on peut le voir dans la littérature, il semblait plus adéquat, selon la situation actuelle d'Hydrotech, qui est une jeune entreprise ayant un unique fournisseur de pompes, de développer un modèle plus simple. En effet, cela se justifie aussi par le fait qu'il est plus simple de compréhension, d'adoption, car le transfert de connaissance est plus facile, et d'application pour l'entreprise : on commande une quantité déterminée (QÉC) lorsque les stocks atteignent un certain niveau (PC). Aussi, ce modèle est pertinent en considérant la demande et la gestion des commandes que possède Hydrotech. Autrement dit, Hydrotech n'a pas besoin de faire des commandes quotidiennes ou hebdomadaires afin de subvenir à la demande.

Avant d'entrer dans le détail des calculs, il est important de souligner certaines hypothèses entourant le choix de la quantité économique à commander. Habituellement, pour appliquer cette formule, on doit avoir : (1) un coût de commande fixe, (2) un prix d'achat à l'unité constant ainsi que (3) un taux de demande connu réparti uniformément tout au long de l'année. Ces conditions sont actuellement respectées à l'exception que la demande possède une saisonnalité. Dans le but de développer un modèle simple et facile de compréhension, cette formule sera tout de même conservée malgré ce fait et constitue une limite de ce projet, qui sera abordée dans la conclusion.

Il faut aussi détailler la façon dont sera déterminé le point de commande. En considérant que la demande n'est pas constante, il faut impérativement mettre un stock de sécurité. Les facteurs à considérer pour le calcul du point de commande sont donc : (1) les ventes moyennes, (2) le délai de livraison et (3) le stock de sécurité.

5.1.1 Calcul de la QÉC

La formule de la QÉC est :

$$QÉC = \sqrt{\frac{2 * D * Cc}{Ce}} \quad (5.1)$$

La demande totale pour la prochaine année est représentée par D . Le coût unitaire de passation d'une commande est représenté par Cc . Le coût unitaire et annuel d'entreposage est représenté par Ce .

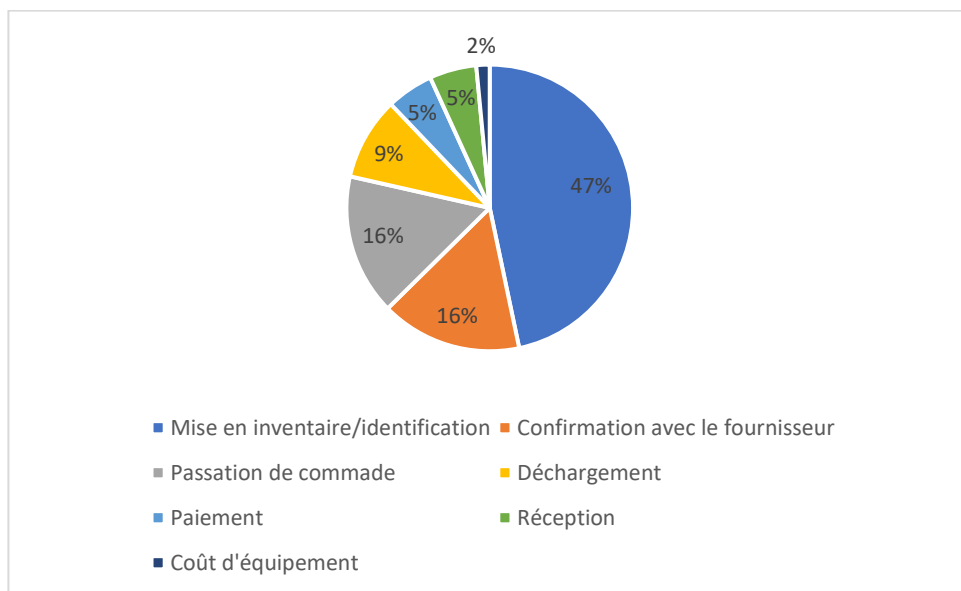
La force de ce travail de recherche est de pouvoir utiliser les modèles de prévision de demande développés dans les sections précédentes afin de déterminer la valeur de la demande annuelle D . Nous allons donc utiliser la demande prédite avec le modèle Winters-Holt, c'est-à-dire de 98 unités pour 2022.

5.1.1.1 Obtention du coût de commande

Le coût de commande inclut habituellement le coût du processus de la commande ainsi que les coûts reliés au transport de la marchandise. Ces coûts seront repris dans leur ensemble sous la forme qui suit. D'abord, le passage d'une commande inclut différentes opérations faites par les employés d'Hydrotech : (1) le passage d'une commande en tant que tel, (2) la confirmation avec le fournisseur, (3) le déchargement de la marchandise, (4) le temps de mise en inventaire et d'indentification des pompes, (5) le coût d'usure des équipements, (6) le temps de réception de la livraison dans le système informatique ainsi que (7) le temps de paiement au fournisseur. Le temps, en heures, de chaque activité a été estimé en discutant avec les employés d'Hydrotech occupant les postes respectifs et en me basant sur mon expérience personnelle de travail chez Hydrotech. Nous avons pu déterminer une valeur pour chacune de ces tâches en tentant d'être le plus réalistes possible. Pour des raisons de confidentialité, les salaires des employés ne sont pas exposés, mais une valeur globale de cette portion des coûts est illustrée. Pour continuer, le coût d'utilisation de l'équipement représente l'utilisation du *lift* et du *loader* lors de la réception de la commande, que ce soit pour le déchargement de la livraison ou afin de placer en inventaire les items. Ce coût est calculé en considérant le coût d'achat de l'équipement, son nombre d'années d'amortissement, son nombre moyen d'utilisations par jour ainsi que le nombre de jours ouvrables de l'entreprise. Autrement dit, on estime un coût à une simple utilisation du *lift* ou du *loader* afin de savoir combien coûte une seule opération. La figure 5.1 illustre les coûts de passation d'une commande. Ces coûts s'élèvent à 47\$. Ensuite, le coût de transport externe a été plus difficile à déterminer. En effet, l'entente avec le fournisseur est que le prix de la pompe inclut le coût du transport. Autrement dit, on ne peut pas déterminer une valeur précise du coût de transport car il se trouve dans le prix global de la pompe. Le fait de commander une pompe de plus ou une pompe de moins, dans une commande, ne change pas le prix fixé de la pompe par le fournisseur. On ne considère donc pas le coût de transport, ici, dans le coût de

commande. On pose l'hypothèse que l'entièreté du transport, c'est-à-dire par bateau et par camion, est gérée par le fournisseur.

Figure 5.1 Répartition des coûts pour la passation d'une commande

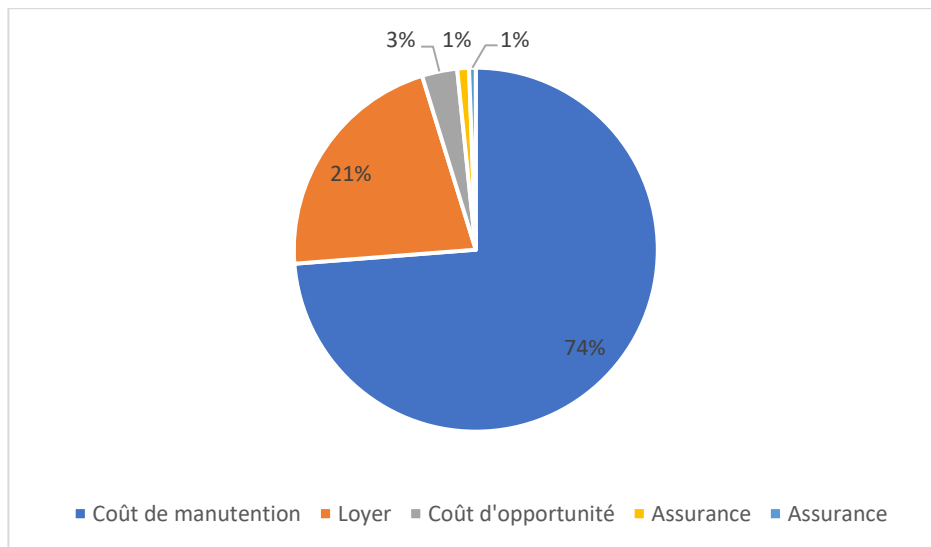


En revanche, il y a des frais de manutention ou d'inspection supplémentaires à ajouter car le fournisseur ne les couvre pas. Ces coûts peuvent arriver lors des transferts de marchandises dans les ports ou lorsqu'il y a des inspections faites sur les colis lors du déchargement dans ceux-ci. Ces frais sont indépendants de la quantité commandée car c'est le conteneur, dans lequel les pompes sont transportées, qui se fait inspecter et non la marchandise spécifiquement. Il faut considérer que si l'on devait passer une commande qui devait avoir deux conteneurs, ces coûts seraient doublés. Cependant, cette situation n'est jamais arrivée dans le passé, et avec les quantités calculées dans ce qui suit cela ne devrait pas survenir. Dans le cas présent, on estime que les frais sont de 1400\$ par commande, qui sont principalement des frais d'inspection qui arrivent régulièrement depuis plusieurs commandes. Cette donnée nous a été transmise par un employé d'Hydrotech qui s'occupe du paiement de ces frais. Le coût de commande total est donc de 1447\$ en additionnant les deux parties.

5.1.1.2 Obtention du coût d'entreposage

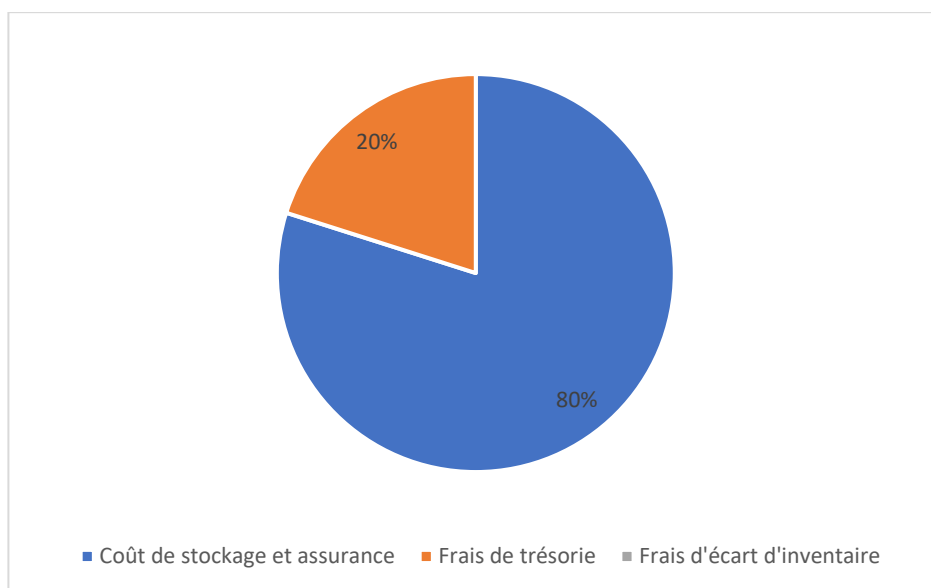
Le calcul du coût d'entreposage utilise habituellement le coût de stockage et d'assurance, les écarts d'inventaire, les frais de trésorerie, le coût de dépréciation du stock ainsi que le coût d'opportunité. Ces coûts sont calculés de façon annuel et unitaire. Il faut noter que dans cette situation-ci, Hydrotech n'a jamais d'écart d'inventaire pour ce qui est des pompes neuves, c'est pourquoi les frais d'écart d'inventaire sont nuls. Hydrotech ne considère pas que le stock de pompes neuves perd de la valeur au travers du temps. Cette valeur sera également nulle. Seuls les deux autres éléments seront alors pris en compte. D'abord, le coût de stockage et d'assurance considère le coût du loyer, de l'électricité et d'assurance. Afin de déterminer ce que ces coûts représentent pour une seule pompe, on estime ici qu'elle occupe environ un millième du loyer, et donc, un millième de ces coûts. Cette estimation a été faite par les employés selon la grosseur moyenne d'une pompe et l'espace disponible sur le plancher. D'autre part, on considère un coût d'opportunité car on pourrait placer cet argent à la banque et en obtenir un intérêt plutôt que d'acheter une pompe pour la mettre en inventaire. Aussi, le fait d'avoir des pompes dans l'entrepôt entraîne de la manipulation car on doit souvent déplacer une ou plusieurs pompes afin d'atteindre celle que l'on veut avoir. Le coût de manutention est donc le temps pris par l'employé pour faire cette tâche. La Figure 5.3 reprend l'ensemble de ces coûts qui s'élèvent à 670\$. En observant la figure 5.2, on constate que les coûts de manutention représentent près de 75% des coûts de stockage et d'assurance. Avec la réalité que possède Hydrotech, il serait difficile de réduire ces coûts à court terme. Cependant, il ne serait pas impossible de les réduire avec de nouvelles stratégies de gestion de l'espace dans l'inventaire, par exemple, ce qui pourrait permettre de diminuer ces coûts. L'impact d'un tel changement sur la quantité à commander peut s'observer sur la figure 5.5.

Figure 5.2 Coût de stockage et d'assurance pour le calcul du coût d'entreposage



Ensuite, les frais de trésorerie sont des données fournies par Hydrotech. Naturellement, on doit connaître le prix d'achat de la pompe afin de faire le calcul avec le taux. La Figure 5.3 illustre tous les éléments entrant dans le coût d'entreposage, une somme atteignant 839\$:

Figure 5.3 Représentation des différents coûts dans le calcul du coût d'entreposage



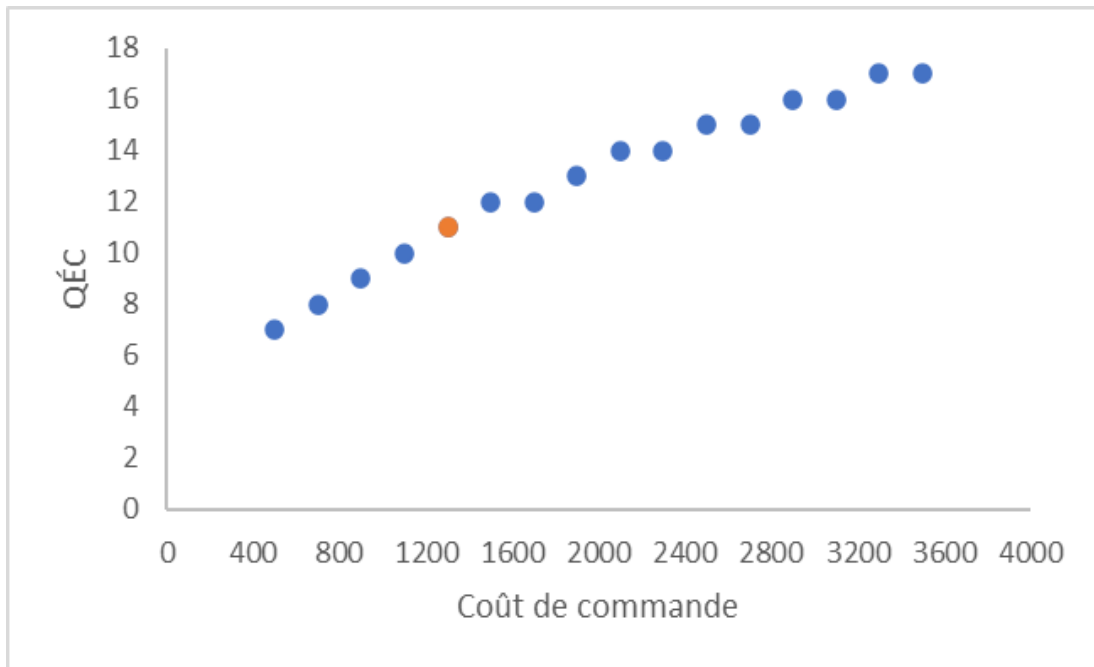
5.1.1.3 Calcul de la QÉC de la pompe A

La demande (D) a été déterminée par le modèle de prévision de demande Winters-Holt, soit de 98. Le coût de commande (C_c) s'élève à une valeur de 1447\$. Le coût d'entreposage unitaire et annuel est de 839\$. La valeur obtenue pour la quantité à commander est alors de 11. Cela veut donc dire que lorsqu'on passe une commande, 11 pompes seront commandées simultanément.

5.1.2 Analyse de sensibilité du coût de commande

Cette analyse avait pour but d'observer comment la QÉC varie en fonction du coût de commande. Dans la situation actuelle d'Hydrotech, l'unique fournisseur de pompes neuves inclut le transport dans le prix des pompes. Il n'y a donc pas de différence, actuellement, entre faire une commande d'une ou de 10 pompes. Cependant, après discussions avec les dirigeants de l'entreprise, il est possible, dans le futur, que ces termes changent et que le transport soit assumé par Hydrotech, ce qui impliquerait un grand changement par rapport au coût de commande car il n'y aurait pas qu'un coût fixe de commande, mais aussi un coût variable en fonction des quantités commandées. Il est donc pertinent de prêter attention à ces changements en testant différentes valeurs pour le coût de commande. En plus, il est possible que les frais d'inspection et de manutention soient mal estimés du fait qu'ils semblent plutôt variables au travers du temps. Nous avons alors testé des valeurs plus faibles ainsi que plus élevées afin de bien couvrir les scénarios possibles du changement du coût de commande. Les valeurs du coût de commande testées sont entre 500\$ et 3500\$ par bon de 200\$. La Figure 5.4 en illustre les résultats.

Figure 5.4 Évolution de la QÉC en fonction du coût de commande



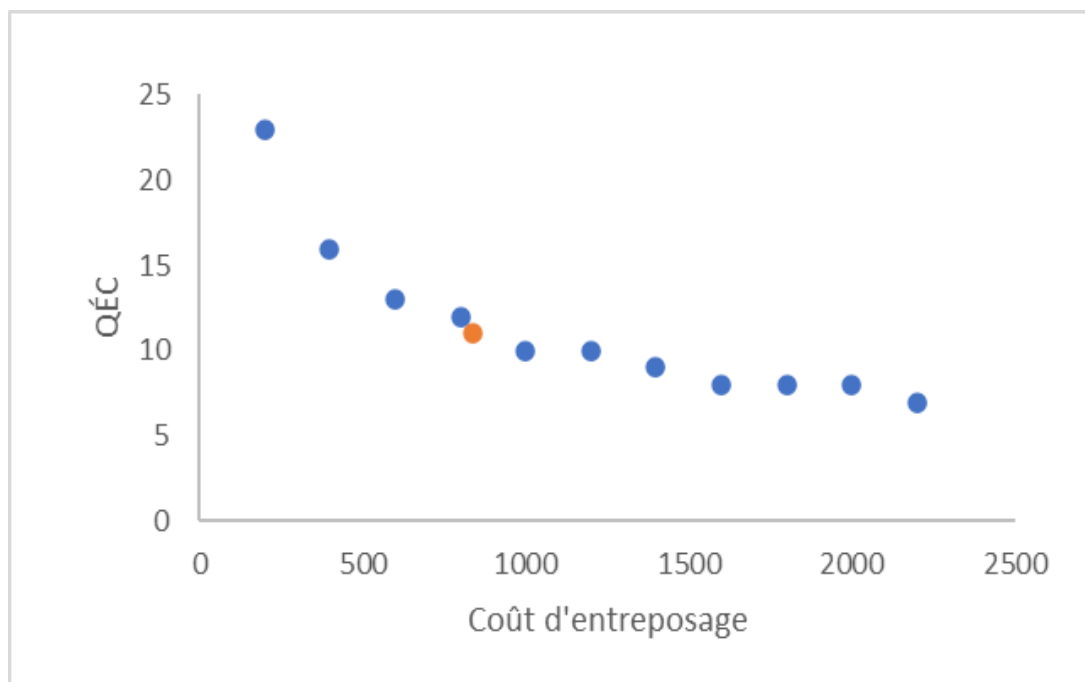
En observant la figure 5.4, on peut remarquer que la QÉC change de façon plutôt significative lorsque le coût de commande augmente. Si nous présentons l'exemple réel de l'entreprise, le coût de commande est actuellement estimé à 1447\$, ce qui résulte en une QÉC de 11 (point orange). Dans le cas où le transport devrait être pris en charge par Hydrotech, on peut estimer les coûts à plus de 3000\$, résultant en une QÉC minimale de 16. Il est donc primordial de savoir que si les coûts de commande estimés devaient changer, il y aurait d'importants ajustements à faire sur les quantités à commander. Il serait pertinent de faire un suivi de ces coûts sur chaque nouvelle commande reçue afin de voir s'assurer de la valeur de ceux-ci.

5.1.3 Analyse de sensibilité du coût d'entreposage

Cette seconde analyse avait pour but d'observer l'impact de la variation du coût d'entreposage sur la QÉC. Cette a permis de savoir s'il fallait s'attarder plus rigoureusement sur ce calcul ou si l'estimation faite était satisfaisante. Les valeurs du

coût d'entreposage testées sont entre 200\$ et 2200\$ par bon de 200\$. La Figure 5.5 illustre cette relation :

Figure 5.5 L'évolution de la QÉC selon différents coûts d'entreposage



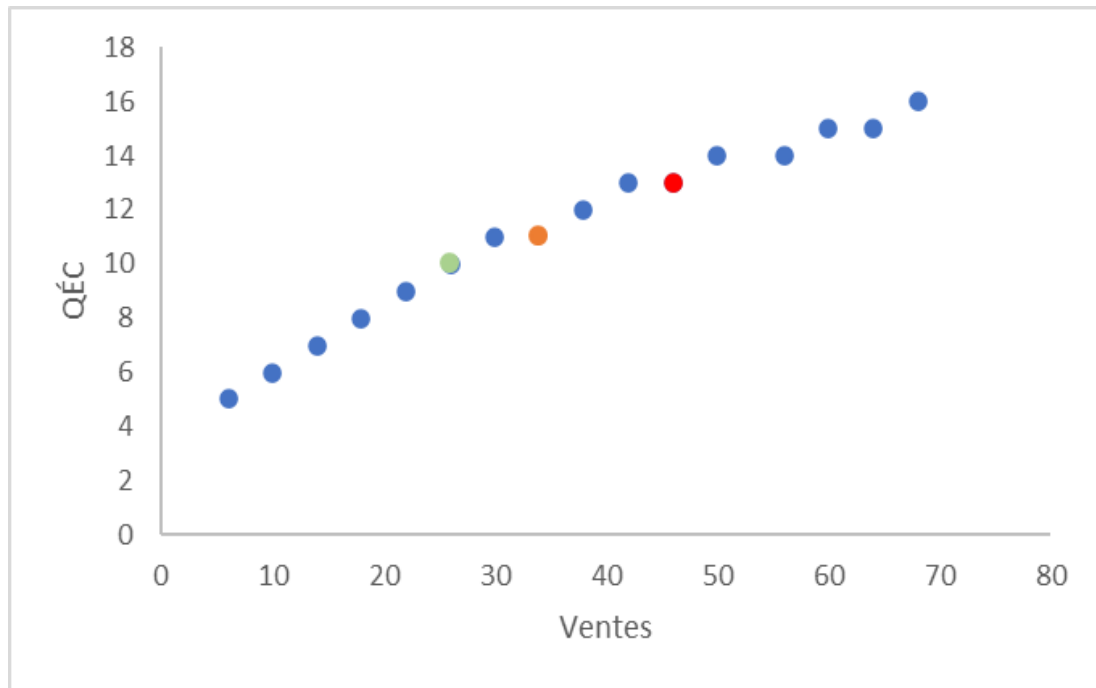
À première vue, on pourrait penser que la QÉC d'Hydrotech sera grandement affectée par le coût d'entreposage si l'on ne fait qu'observer le graphique, mais cela n'est pas tout à fait vrai avec la situation réelle de l'entreprise. Effectivement, le coût actuel qui a été estimé est d'environ 840\$, résultant en une QÉC de 11 (point orange). Ce coût a été calculé en tentant de ne pas le surestimer. En effet, étant donnée la stratégie d'Hydrotech, qui souhaite gagner des parts de marchés et de surtout ne pas manquer de stock, on a privilégié le fait de sous-estimer la valeur du coût d'entreposage plutôt que de la surestimer. Alors, même si l'on suppose que le coût d'entreposage serait le double de la valeur estimée, soit de 1700\$, la QÉC serait de 8, ce qui ne serait pas un changement significatif par rapport au 11 estimé. Le contraire ne serait pas vrai, car si le coût d'entreposage serait plus bas que 840\$, par exemple 400\$, la QÉC pourrait

atteindre 16, ce qui serait un changement bien plus significatif. Cette analyse supporte alors le fait d'avoir mis une stratégie initiale de ne pas surestimer le coût d'entreposage.

5.1.4 Analyse de sensibilité des ventes

Il est maintenant intéressant de se questionner sur comment les ventes interagissent avec la QÉC. En effet, on a développé un modèle de prévision de la demande au chapitre IV, il faudrait maintenant savoir si l'importance de la qualité de ce modèle a un impact sur la QÉC. Autrement dit, si le modèle se trompe de plusieurs ventes, quel impact cela aura-t-il sur la QÉC réelle? La figure 5.6 illustre les résultats en partant de 6 ventes, autrement dit des ventes presque nulles, allant jusqu'à 68 ventes, qui représente le double des ventes prévues. Comme on peut le voir sur la figure 5.6, la relation entre la QÉC et les ventes est quasiment linéaire. Dans un premier temps, si l'on regarde les extrêmes, la QÉC varie entre 5 et 16 selon le nombre de ventes. Cette variation est assez significative. Il est donc important pour Hydrotech de réviser le modèle de prévision de la demande chaque année, au minimum, car avec leur expansion en cours et du fait que l'entreprise soit encore jeune, il est possible que les ventes prévues par le modèle ne soient pas exactes ou bien que le modèle ne soit plus adapté. Il est donc important, lors du calcul de la QÉC de ne pas se fier uniquement sur le modèle prévisionnel, mais de se fier aussi aux prévisions de ventes faites par les représentants pour l'année à venir ainsi qu'au directeur du développement des affaires avec l'ouverture des nouveaux entrepôts.

Figure 5.6 Évolution de la QÉC selon les ventes de la pompe A



En revanche, dans un deuxième temps, si l'on observe la variation lorsque les ventes seraient plus basses ou plus élevées qu'avec la prévision faite par Winters-Holt (point orange) en prenant des extrêmes étant le modèle de la moyenne mobile (point vert) et le modèle *TSLM* avec régression exponentielle et saisonnalité (point rouge), la différence sur la QÉC est d'une unité et de deux unités, ce qui a pour impact de donner une marge d'erreur intéressante à la prévision des ventes.

5.2 Calcul du point de commande

Le calcul du point de commande se fait avec l'équation suivante :

$$PC = Ss + (\mu * d) \quad (5.2)$$

Le stock de sécurité (Ss) représente la quantité que l'on doit conserver en inventaire afin d'éviter les ruptures des stocks. Les ventes trimestrielles moyennes (μ) représentent la moyenne des ventes des huit derniers trimestres, donnée qui semblait être la plus représentative. Le délai moyen (d) représente la moyenne des trois derniers délais de livraison, données disponibles dans le progiciel de gestion intégré d'Hydrotech. Le délai est exprimé en trimestres.

Le stock de sécurité a été calculé de deux manières différentes pour deux raisons : les deux méthodes semblaient pertinentes selon la situation actuelle et dans le but de pouvoir faire une comparaison.

La première méthode (SS1) est la moyenne/max (Thieuleux, 2019). Cette méthode a été choisie car elle permet de couvrir les cas extrêmes. En effet, en considérant les ventes maximales ainsi que le délai maximum par rapport à leur moyenne respective, on tente d'éviter tout risque de rupture des stocks. La formule utilisée est la suivante :

$$SS1 = (\mu_{max} * d_{max}) - (\mu * d) \quad (5.3)$$

La vente maximale d'un trimestre est représentée par μ_{max} . Le délai maximal, en trimestre, est représenté par d_{max} .

La donnée de vente maximale (μ_{max}) a été trouvée en observant les données agrégées des ventes en trimestres. Le délai maximum (d_{max}) a été extrait sur le programme de gestion intégré d'Hydrotech.

Tableau 5.1 Valeur des paramètres pour le calcul de SS1

u_{max} (unités)	d_{max} (trimestres)	mu (unités)	d (trimestre)
12	3,98	8	3,33

Le résultat du calcul est alors $SS1 = 21$.

La deuxième méthode (SS2) est celle de loi normale avec incertitude sur la demande et sur un délai, qui sont indépendants. Bien qu'on utilise une demande annuelle constante lors du calcul de la QÉC, cette méthode reste pertinente car l'incertitude sur la demande réelle est toujours existante. La méthode SS2 a été choisie car elle permet de considérer un niveau de service, la moyenne des ventes ainsi que le délai. Bien que les données ne suivent pas exactement une loi normale, elles ne sont pas très loin de la suivre. Le détail des données se trouve en annexe H. Nous appliquons cette formule dans le but de garder le calcul du stock de sécurité avec une formule simple. Les limites seront discutées dans la conclusion. Voici la formule utilisée :

$$SS2 = Z * \sqrt{((\mu * (\sigma_v)^2) + (d * (\sigma_d)^2)} \quad (5.4)$$

Le coefficient du niveau de service est représenté par Z . L'écart type de la demande, en trimestre, est représenté par σ_v . L'écart type du délai, en trimestre, est représenté par σ_d .

Le coefficient du niveau de service (Z) a été déterminé selon sa table qui se trouve en annexe I. Il est à noter que ce coefficient assume que la demande suit une loi normale, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour Hydrotech. Cela dit, bien que la demande ne semble pas suivre une distribution connue, nous avons opté pour ce choix par soucis de simplicité. De plus, en menant des analyses de sensibilité sur le Ss (voir Section

5.2.2), cela permet de mitiger notre choix de Z . Nous avons choisi un niveau de service à 99%, car c'est le service qu'Hydrotech souhaite avoir afin de s'assurer de pouvoir bien couvrir la demande, surtout pour les pompes du groupe A. Aussi, la stratégie de l'entreprise de vouloir prendre de l'ampleur et de mettre les besoins du client comme priorité soutient le choix de ce niveau de service. Ce choix se justifie également par le fait qu'Hydrotech considère que son stock de pompes neuves ne perd pas de valeur dans le temps, ce qui résulte en un coût de détérioration nul, ce qui justifierait un niveau de service de 100% car c'est habituellement en fonction de ce coût qu'on détermine le niveau de service. Cependant, un tel niveau de service n'est pas réaliste puisqu'il faudrait avoir une quantité en stock infinie, d'où le choix du 99%. Par souci de simplicité et dans l'optique de ne pas vouloir sous-estimer le calcul du stock de sécurité, la valeur du niveau de service sera la même pour l'ensemble des pompes. Les autres paramètres ont été trouvés ou calculés de la même façon que la méthode précédente (SS1).

Tableau 5.2 Valeur des paramètres pour le calcul de SS2

Z	μ (unités)	σ_v	d (trimestres)	σ_d
2,33	8	1,77	3,33	0

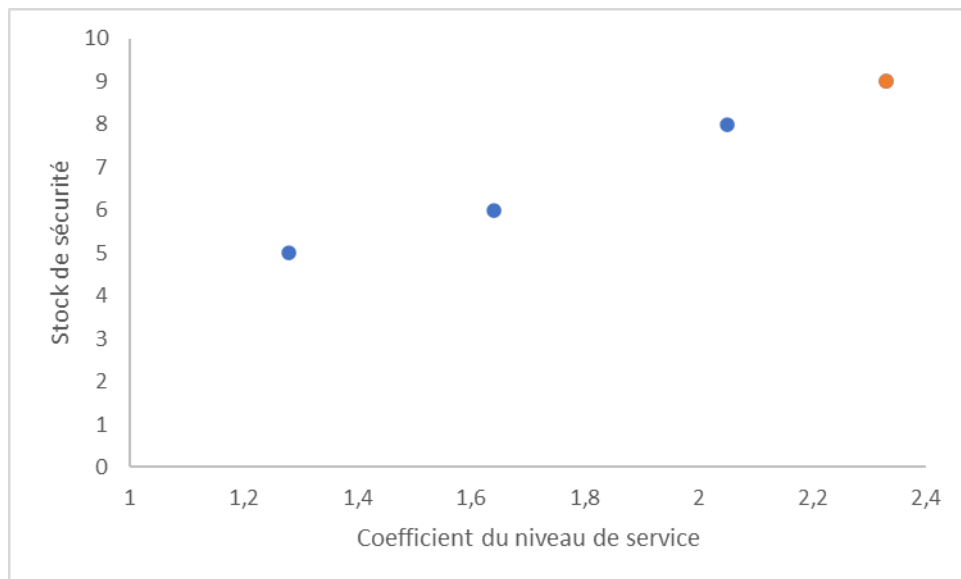
Le résultat du calcul est alors $SS2 = 9$.

Il est important de spécifier que la valeur de l'écart type était très difficile à trouver avec les données disponibles chez Hydrotech. En effet, bien que l'ERP d'Hydrotech donne accès aux délais moyens (total et des 3 dernières commandes) et au délai maximal, il n'était malheureusement pas possible d'avoir la totalité des délais par commande et par le fait même l'écart type. Nous avons donc posé la prémisse de mettre cet écart type à 0. Ce choix sera analysé et justifié dans la section 5.6.

5.2.1 Analyse de sensibilité du niveau de service

Il est pertinent de faire cette analyse puisque bien qu'Hydrotech ait actuellement une stratégie d'expansion, en voulant gagner de nouveaux clients tout en offrant un excellent service à ses clients actuels, il est possible qu'éventuellement, l'entreprise soit mieux ancrée dans le marché et n'plus besoin d'un niveau de service aussi élevé. La figure 5.7 illustre le stock de sécurité selon un niveau de service de Z étant égal à 1,28 (Niveau de service = 90%), 1,64 (Niveau de service = 95%), 2,05 (Niveau de service = 98%) et 2,33 (Niveau de service = 99%) :

Figure 5.7 Stock de sécurité en fonction de différents coefficients du niveau de service



En observant la figure 5.7, on remarque que le stock de sécurité est sensible au changement du niveau de service. En effet, passer de 99% à 90% de niveau de service résulte en une diminution de quatre du stock de sécurité. Il est donc important pour Hydrotech de faire la modification du stock de sécurité si jamais il y avait un changement dans leur stratégie.

5.3 Comparaison des stocks de sécurité

Comme on peut l'observer, pour le modèle de pompe A, il y a un grand écart entre les deux méthodes : SS1 prévoit une valeur de 21 comme stock de sécurité, tandis que SS2 prévoit une valeur de 9 pour le stock de sécurité. Ce résultat fait prendre du recul sur les calculs afin de comprendre pourquoi cet écart est si grand. Après analyse, on remarque que la valeur de SS1 est élevée car il y a un très grand écart entre le délai maximum et le délai moyen tout comme pour la vente maximale et la vente moyenne. En effet, il y a des écarts considérables d'un trimestre à l'autre, notamment en raison de la saisonnalité. Cela dit, le fait que ces écarts dans le calcul soient grands résulte en une valeur élevée de SS1. En revanche, on ne veut pas, étant donné la saisonnalité existante dans les ventes d'Hydrotech, avoir en permanence de l'inventaire pour subvenir à la période de vente maximale. Autrement dit, on ne veut pas avoir un stock de sécurité trop grand, car cela peut avoir un impact négatif sur la trésorerie de l'entreprise, qui est le problème d'Hydrotech actuellement. Le calcul du stock de sécurité avec la méthode SS1 est alors, fort probablement, surévalué. La méthode SS2, quant à elle, pourrait potentiellement être sous-évaluée. En effet, il est important de rappeler que l'écart type du délai est mis à zéro. La partie de l'équation qui est multipliée par ce facteur est alors nulle, ce qui n'est pas parfaitement représentatif de la réalité d'Hydrotech car cet écart type n'est pas réellement nul. Dans ces circonstances, il a été choisi de faire la moyenne entre ces deux méthodes afin de trouver un juste milieu. Ce choix a été fait dans l'optique d'avoir un stock de sécurité approximatif, acceptable et obtenu par des calculs simples. En posant l'hypothèse que le calcul du SS1 est sous le stock de sécurité réel et que le calcul du SS2 se trouve au-dessus de celui-ci, on suppose que la bonne valeur se trouve entre SS1 et SS2. Nous utiliserons donc comme formule pour calculer le stock de sécurité la formule suivante (SS3) :

$$SS3 = \frac{SS1 + SS2}{2} \quad (5.5)$$

La valeur de SS3 est alors de 15. Il faut mentionner que la valeur de SS3 sera arrondie vers le haut pour être cohérent avec la stratégie utilisée pour la vente de pompe de groupe B dans la section 4.1.

5.4 Calcul du PC de la pompe A

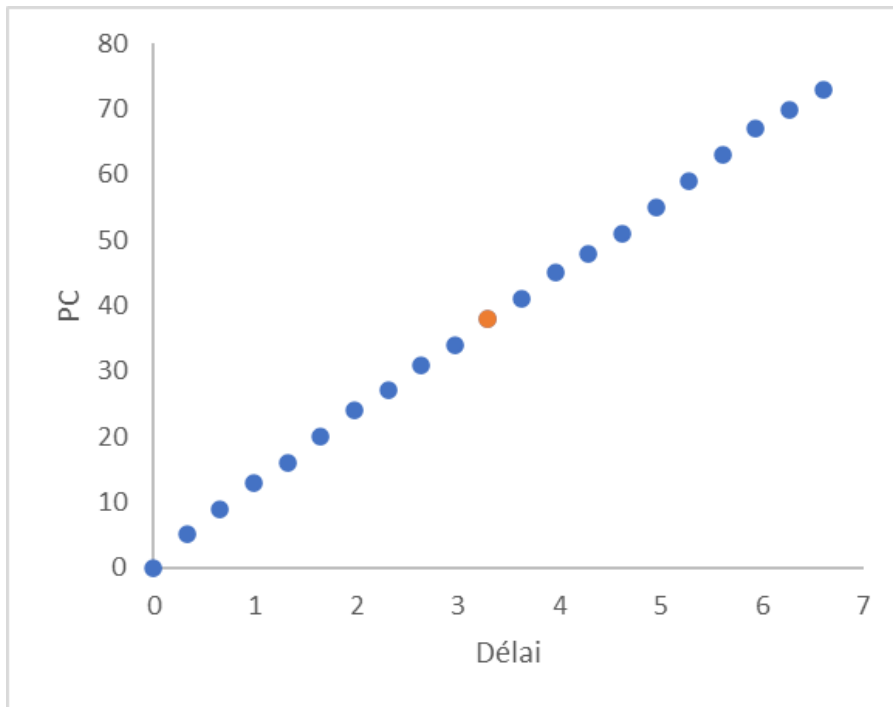
Le stock de sécurité a été déterminé plus tôt avec une moyenne (SS3) entre la méthode moyenne/max (SS1) et la méthode de la loi normale avec incertitude sur la demande et sur le délai, qui sont indépendants (SS2), qui donnait une valeur de 15. Le choix de prendre la troisième méthode (SS3) pour l'ensemble des pompes se justifie par la raison qu'on souhaite uniformiser les calculs et rester dans la simplicité. En effet, il deviendrait plus complexe de calculer, avec différentes méthodes, le stock de sécurité de chacune des pompes. La moyenne des ventes est calculée en prenant les ventes prévues pour la prochaine année. Cette valeur fut divisée par 4 afin d'avoir une valeur par trimestre, car tous les chiffres doivent être sur la même échelle lors des calculs, soit en trimestres. Cette valeur de vente obtenue sera multipliée par 35%, donnant une valeur arrondie de 7. Ce 35% représente la partie de pompes neuves vendues par Hydrotech, l'autre partie est celle des pompes usagées. Le choix de prendre la prévision des ventes totales pour ensuite prendre un pourcentage de ventes neuves se justifie par le fait que ce pourcentage de 35% risque fortement de changer au cours des prochaines années. En effet, Hydrotech étudie actuellement le seuil de rentabilité de la réparation de pompes et pose l'hypothèse qu'il faudrait en réparer moins et favoriser la vente de pompes neuves. Cela pourrait avoir comme impact de modifier le pourcentage de vente de 35% à 50% ou 60%, par exemple. Donc, en faisant le calcul ainsi, avec le pourcentage des ventes totales, on permet une flexibilité du paramètre de pompes neuves vendues. Pour continuer, le délai moyen est obtenu en faisant la moyenne des

3 dernières livraisons, car ce sont elles qui sont les plus significatives et représentatives, donnant une valeur de 3,33 trimestres. La valeur obtenue pour le point de commande est alors de 44.

5.5 Analyse de sensibilité du délai de livraison

La présente analyse a pour but d'observer ce que différents délais de livraison auraient comme impact sur le point de commande. Étant donné la situation de l'entreprise, c'est-à-dire dont les délais de livraison pour les pompes neuves sont très longs, il était intéressant de se questionner sur l'impact du changement de la valeur du délai sur le PC. En effet, avec des situations comme la COVID-19, qui peut augmenter les délais de livraisons, ou par le changement de type de transport, par exemple choisir l'avion plutôt que le bateau, il est possible de penser que ces délais puissent augmenter ou diminuer. Nous avons donc testé des délais beaucoup plus courts, comme un délai de moins d'un trimestre afin de représenter un transport par avion ou un changement de fournisseur, et des délais beaucoup plus longs, comme un délai allant jusqu'à 5 trimestres afin de présenter un cas extrême où la commande aurait des délais supplémentaires. Les valeurs du délai testées sont alors entre 0 et 6,6 trimestres par bon de 0,33 trimestres. Pour pouvoir faire une analyse pertinente, il était important que les paramètres soient les mêmes pour tous les essais. Étant donné l'écart type étant mis à 0, le délai moyen et le délai maximum sont mis à la même valeur pour cette analyse. La Figure 5.8 illustre le résultat des différentes possibilités.

Figure 5.8 Le PC avec un écart type établi à 0, SS3 et le délai en trimestre

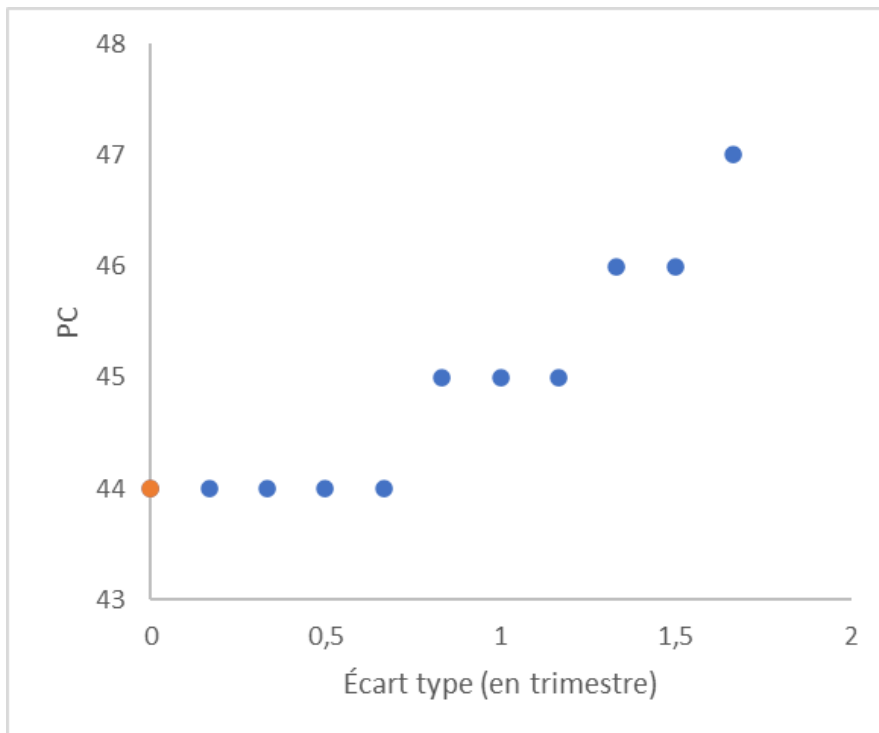


En observant la Figure 5.8, on peut observer que si le délai change de quelconques manières, on devra ajuster le PC. Il est donc pertinent pour Hydrotech de réviser le délai de livraison moyen chaque année, ou à chaque 6 mois, afin de faire l'ajustement sur le point de commande. Étant donné les longs délais, il serait inutile de le réviser hebdomadairement ou mensuellement, mais il ne faudrait pas non plus trop tarder afin de le réviser car un changement peut provoquer une modification dans le point de commande. Une autre remarque pertinente est que si les délais devenaient plus longs, comme de 6 trimestres, on devrait avoir un point de commande dépassant 70, avec une quantité à commander de 11, pour une demande annuelle d'environ 100 pompes. C'est à se demander si un tel modèle ferait du sens car c'est comme si on avait en stock la quasi-totalité de la demande prochaine en permanence.

5.6 Analyse de sensibilité de l'écart type du délai de livraison avec le point de commande

Cette analyse s'est faite puisque nous voulions savoir l'impact que l'écart type aurait sur le point de commande s'il n'était pas de 0, en considérant que la méthode choisie pour calculer le stock de sécurité utilise ce paramètre. Si cet impact était significatif, on devrait tenter de trouver l'écart type réel ou, du moins, de l'estimer adéquatement. La Figure 5.9 illustre les résultats.

Figure 5.9 PC selon différents écarts types avec un délai moyen fixé à 3,33 trimestres



Comme on peut l'observer sur la figure 5.9, le point de commande est à 44 (point orange) avec un écart type de 0 et est de 47 lorsque l'écart type est de 50%, c'est-à-dire un écart type de 1,67 trimestre. Hydrotech estime qu'un écart aussi grand n'est pas

possible avec leur situation actuelle. Cela indique que le fait de poser un écart type à 0, dans notre situation, n'exerce pas une influence significative sur le PC et qu'il est correct qu'il en soit ainsi.

5.7 Transformation du PC et de la QÉC en MIN/MAX

À la suite de l'élaboration du modèle, il a fallu trouver un moyen de pouvoir le comparer au système utilisé actuellement par Hydrotech. Pour ce faire, il a simplement été question de pouvoir mettre une valeur équivalente au min et au max de l'inventaire d'Hydrotech. Pour le Min, il est possible de le comparer au point de commande car c'est le minimum que l'on veut avoir en inventaire : $\min = SS$. Pour ce qui est du max, on a additionné la quantité à commander au point de commande car c'est le maximum que l'on peut avoir en inventaire avec ce modèle : $\max = PC + QÉC$. Bien qu'il soit possible de trouver d'autres méthodes pour calculer des minimums ou des maximums, il était simple et facile de compréhension d'utiliser la valeur des calculs déjà utilisée dans le cadre du développement du modèle de gestion des stocks.

5.8 Comparaison des min-max actuels et ceux proposés

D'abord, il a fallu calculer le min et le max pour toutes les pompes soit comme démontré plus tôt : $\min = SS$ et $\max = PC + QÉC$. Ensuite, il fallait trouver le stock moyen pour chaque pompe. Il a donc été décidé de prendre la valeur moyenne entre le min et le max : $\frac{\min + \max}{2}$. Puis, on a comparé les quantités en inventaire de chacun, c'est-à-dire les valeurs trouvées avec le modèle, les valeurs actuelles théoriques ainsi que les valeurs de l'inventaire actuel. Le tableau 5.3 illustre les résultats. Une valeur positive représente un surplus d'inventaire par rapport à la valeur actuelle d'Hydrotech tandis qu'une valeur négative représente une quantité insuffisante en inventaire.

Tableau 5.3 Différences entre la valeur de l'inventaire du système actuel, le modèle proposé et l'inventaire réel, en quantité de pompe

	Pompe A	Pompe B	Pompe C	...
Inventaire moyen du modèle (théorique)	34	19	15	...
Inventaire moyen actuel (théorique)	56	18	8	...
Différence théorique	22	1	-7	...
Différence réelle (Selon l'inventaire actuel au moment de l'analyse)	14	0	4	...

Comme on peut le voir sur le tableau 5.3, Hydrotech, en appliquant le nouveau modèle, on remarque qu'Hydrotech possède, théoriquement, 22 pompes A en surplus dans son inventaire, et, en réalité, en ont 14 en trop par rapport au modèle proposé par ce projet. Il faut ensuite observer les différences au cas par cas, exercice qui sera effectué avec Hydrotech. En effet, comme discuté plus tôt, certaines décisions pour l'achat de pompes sont prises sur l'expérience et le gros bon sens des gestionnaires, cela a donc pour impact de ne pas avoir l'inventaire réellement nécessaire pour chacune des pompes. L'écart entre la différence théorique et réelle peut s'expliquer par le fait que certains min et max sont identiques, il est alors très difficile d'avoir cette quantité espérée étant donné les longs délais d'approvisionnement. Le fait d'appliquer ce nouveau modèle pourrait alors permettre à Hydrotech de mieux gérer ses quantités en inventaire et par le fait même, avoir un meilleur suivi sur les quantités attendues en inventaire.

5.9 Autres avantages du modèle

Le modèle a plusieurs autres avantages. La construction du modèle est bien détaillée et définie, celui-ci est facilement répliquable, par exemple, pour d'autres besoins de gestion de stocks d'Hydrotech comme celle des pompes usagées, des pièces d'usures ou autres. Aussi, le fait que le modèle permette le changement des valeurs des différents paramètres à risque d'avoir des changements dans le futur lui donne une flexibilité très utile afin de pouvoir calculer rapidement l'impact de ces changements sur les min et les max. Pour continuer, le modèle reste simple et facile de compréhension pour quiconque l'utilisera. Finalement, le modèle est objectif, car il est appuyé par des calculs qui permettent de donner des valeurs de min et de max objectives plutôt que subjectives.

CONCLUSION

En conclusion, ce travail illustre l'effort requis pour l'extraction de données réelles d'entreprise jusqu'à la création d'un modèle pertinent applicable pour celle-ci. En effet, on voit d'abord comment déterminer les données nécessaires au projet, de les traiter et de les analyser. Ensuite, on présente le développement des modèles de prévision quantitatifs à partir de ces données extraites précédemment. Finalement, on développe un modèle de gestion des stocks, à l'aide des prévisions faites, qui est, dans le cas présent, un modèle avec point de commande et quantité économique à commander.

Le développement de modèles de prévision de la demande va s'avérer un outil utile pour supporter les prévisions de ventes faites par les représentants et gestionnaires d'Hydrotech. En effet, plusieurs modèles ont été testés et comparés, selon leurs erreurs et leurs prévisions, afin d'en choisir un, qui était le plus représentatif pour la réalité d'Hydrotech. C'est le modèle *ETS* multiplicatif, autrement nommé Winters-Holt, qui a été retenu puisqu'il présentait les plus petites erreurs ainsi qu'une prévision plausible. L'avantage d'avoir testé plusieurs modèles est que ceux-ci ne sont pas perdus pour autant et pourront être utilisés ou réévalués si la situation d'Hydrotech venait à changer. Aussi, ces modèles de prévision permettront à Hydrotech d'assurer une pérennité à l'entreprise car il sera possible de faire des prévisions sans dépendre de leurs représentants et leurs gestionnaires actuels.

Le développement du modèle de gestion des stocks va s'avérer pratique pour Hydrotech afin d'avoir une gestion de son inventaire plus efficiente. En effet, le fonctionnement par point de commande et par quantité économique à commander, calculés objectivement, permet une gestion mieux adaptée considérant les différentes

conditions d'Hydrotech, notamment le long délai d'approvisionnement. De plus, le modèle est facile d'utilisation et d'assimilation pour les employés. La modification possible de différents paramètres permet à Hydrotech de trouver de nouvelles valeurs d'inventaire rapidement et facilement selon les panoplies de changements éventuels. Ce modèle de gestion des stocks pourra être appliqué sur l'ensemble de leurs pompes neuves et permettra de déterminer de nouveaux min/max plus objectifs et appropriés.

Le présent travail possède plusieurs contributions intéressantes. Il présente la démarche du développement d'un modèle de gestion des stocks, passant par la récolte de données, par le traitement et l'analyse de celles-ci, par le développement de modèles de prévisions de la demande avec les données extraites, par l'analyse et la comparaison des erreurs de ces modèles pour en déterminer le meilleur, par des analyses de sensibilité des différents paramètres du modèle et, finalement, par le résultat final, soit le modèle de gestion des stocks. Les modèles utilisés, de prévisions de la demande ainsi que de la gestion des stocks, seraient répliquables pour Hydrotech, pour leurs pièces en inventaire par exemple, ou pour d'autres entreprises qui souhaiterait améliorer leur gestion d'inventaire ou afin de se faire un point de comparaison avec leur système actuel. Aussi, le modèle de gestion des stocks est très flexible et peut facilement s'adapter à la modification de paramètres, ce qui est important lorsqu'on observe les analyses de sensibilité qui montrent que certains changements ont un impact significatif sur les quantités prédites par le modèle.

Le projet possède certaines limites. D'abord, les données de ventes historiques pour la grande majorité des pompes, notamment celle de type B, sont insuffisantes pour développer des modèles de prévision de ventes plus complexes. Avec les années, ces pompes pourront utiliser les utiliser par les pompes de type A et avoir des prévisions quantitatives plus intéressantes. Ensuite, les modèles de prévisions de la demande ne sont pas parfaits. En effet, il n'en reste pas moins que les modèles ont des erreurs modérées, quoi qu'acceptables. Il ne faut donc pas uniquement se fier à ces prévisions

et s'assurer, avec les représentants et gestionnaires d'Hydrotech, que ces prévisions aient du sens sans quoi elles devraient être ajustées. Cette affirmation est d'autant plus pertinente vu la situation d'expansion d'Hydrotech à Kamloops, Sudbury et au Mexique qui pourraient modifier considérablement les ventes futures de l'entreprise. Ensuite, le calcul du stock de sécurité a été fait de manière simple. Il serait possible de le calculer avec des méthodes plus poussées, par exemple, en déterminant la loi qui représente les ventes et lui associer une formule plus complexe, comme la loi de poisson ou la loi binomiale. Il faut souligner que trouver le stock de sécurité réel pour l'entreprise pourrait représenter un projet en soi. Dans le même ordre d'idées, la méthode pour calculer la quantité à commander reste simple comme pour le stock de sécurité. Les conditions nécessaires pour l'appliquer ne sont pas entièrement respectées. Il serait intéressant d'utiliser des méthodes plus complexes et plus poussées pour déterminer cette quantité à commander. Une autre limite liée à ce calcul est celle de l'écart type du délai mis à 0. Comme il était très complexe de trouver cette valeur avec les données disponibles, cet écart type a été mis à 0, cependant il serait possible de compiler les données des prochaines livraisons effectuées afin de pouvoir déterminer la vraie valeur de cet écart et, éventuellement, l'intégrer au modèle. Pour continuer, il faut mentionner qu'une seule méthode de gestion des stocks a été testée, soit celle du point de commande et de la quantité à commander. Il pourrait être intéressant d'en développer d'autres et d'en comparer leurs résultats.

Bien que le projet permette une meilleure gestion des stocks à Hydrotech, il serait pertinent, voire nécessaire, de transposer ce type d'exercice, puisque le modèle est facilement répliquable, pour les pompes usagées ainsi que pour leurs pièces conservées en inventaire d'Hydrotech puisque le problème d'augmentation de la valeur de l'inventaire non proportionnel par rapport à l'augmentation de leur chiffre d'affaires n'est pas réglé à la suite de ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

- Agostino, I. R. S., da Silva, W. V., Pereira da Veiga, C., & Souza, A. M. (2020). *Forecasting models in the manufacturing processes and operations management: Systematic literature review*. *Journal of Forecasting*, 39(7), 1043-1056.
- Athanasopoulos, G. & Hyndman, R. J. (2018). *Forecasting: Principles and Practice*. (2nd ed.), OTexts, <https://otexts.org/fpp2/>
- Blazejewski, H. et Nogaro, J-M, (1993) *On peut maitriser ruptures et sur-stocks*, Harvard-L'expansion Management Review, p. 65-74.
- Boussu, F. (2016). *Simulation de la filiere textile/habillement/distribution : réduction de la complexité en vue d'une meilleure prévision des ventes*, Doctoral dissertation, Université des Sciences et Technologies de Lille 1, 203, [SIMULATION DE LA FILIERE TEXTILE/HABILLEMENT/DISTRIBUTION: REDUCTION DE LA COMPLEXITE EN VUE D'UNE MEILLEURE PREVISION DES VENTES \(hal.science\)](#)
- Fasard, M. E. (2021). *Modèle de la réussite des PME: Une revue narrative de la littérature sur les facteurs de succès et d'échec des PME*. *Alternatives Managériales Economiques*, 3(2), 318-337.
- Gélinas, R. (1996) *La gestion des ressources matérielles: approvisionnements et stocks*, Montréal, Chenelière/McGraw-Hill.
- Ghiani, G., Laporte, G., Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management* (2e éd.), John Wiley & Sons. Thomopoulos, N. T. (2015). Demand forecasting for inventory control. Springer. doi: 10.1007/978-3-319-11976-2_10
- Guajardo, M., Rönnqvist, M., Halvorsen, A.M. & Kallevik, S.I. (2015) *Inventory management of spare parts in an energy company*, *Journal of the Operational Research Society*, 66, 331–341, <https://doi.org/10.1057/jors.2014.8>

- Hammami, F (2020) *Modèle d'Approvisionnement à Intervalle Fixe pour la Gestion des Stocks*, Youtube, [Modèle d'Approvisionnement à Intervalle Fixe pour la Gestion des Stocks - YouTube](#)
- Harris F. (1990) *How Many Parts to Make at Once*. Operations Research 38(6):947-950. <https://doi.org/10.1287/opre.38.6.947>
- Heaviside, M et al. (2020) *Determination of minimum stock on retail using forecast, economic order quantity and reorder points methods*, IOP Conference Series : Materials Science and Engineering
- Julien, P.-A., M. Carrier, D. Luc, L. Desaulniers et Y. Martineau (2002). *Les PME à forte croissance. 17 cas d'entreprises québécoises*, Québec, Presses de l'Université du Québec.
- Kacete N. & Kacete, S. (2017) *La gestion des stocks appliquée sur les lubrifiants de NAFTAL*, Université Moulud Mammeri de Tizi-Ouzou, 65, [Kacete, Noura.pdf \(ummto.dz\)](#)
- Kranenburg, A. A., & Van Houtum, G. J. (2008). *Service differentiation in spare parts inventory management*, Journal of the Operational Research Society, 59(7), 946-955.
- Laib, A. & Teddar, A. (2020) *Optimisation d'un stock de réapprovisionnement au profit d'un système de production*, Université Kasdi Merbah Ouargla, 48, [Teddar abdessamed&Laib abderaouf_compressed.pdf \(univ-ouargla.dz\)](#)
- Lamouri, S. & Thomas, A. (2009) Lamouri, S., & Thomas, A. (2009). *Juste à temps et qualité totale: concepts et outils*, Techniques de l'ingénieur, Usines et ateliers, p. 1-16.
- Marshall, Brendan. (2021) *Faits & Chiffres 2021 : La situation de l'industrie minière au Canada*, L'association minière du Canada, 9-21.
- Monstock (2022). *Stock de sécurité : mettez-vous à l'abri des ruptures de stock !* Monstock. [Stock de sécurité : mettez-vous à l'abri des ruptures de stock ! - Monstock](#)
- NAJI, A. (2009). *Identification des compétences requises par les dirigeants des PME pour la gestion du changement organisationnel* Université du Québec à Montréal, 356. [Identification des compétences requises par les dirigeants des PME pour la gestion du changement organisationnel \(bac-lac.gc.ca\)](#)

- Nollet, J. Kélada, J. et M.O. Diorio (1994). *La gestion des opérations et de la production 2^e édition*, Gaetan Morin éditeur, p. 209-222.
- Pellerin, L. (1997) *La formalisation des activités de gestion des stocks dans les PME manufacturières québécoises*, Université du Québec, 166. [*000634334.pdf \(uqtr.ca\)](#)
- Ralph D. Snyder, Anne B. Koehler, J.Keith Ord, (2002). *Forecasting for inventory control with exponential smoothing*, International Journal of Forecasting, 18(1), 5-18 [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(01\)00109-1](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(01)00109-1).
- Rego, J. R., & Mesquita, M. A. (2015). *Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts*, International Journal of Production Economics, 161, 1–16.
- Rosienkiewicz, M., Chlebus, E., and Detyna, J. (2017). *A hybrid spares demand forecasting method dedicated to mining industry*, Applied Mathematical Modelling, 49, 87-107, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.04.027>.
- Sana, S. S.(2016) *Optimal production lot size and reorder point of a two-stage supply chain while random demand is sensitive with sales teams' initiatives*, International Journal of Systems Science, 47:2, 450-465, DOI: 10.1080/00207721.2014.886748
- St-Pierre, J. (2018). *Gestion financière des PME : théorie et pratique*, Presses de l'Université du Québec, 588(2), <https://doi-org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/10.2307/j.ctvt1sj12>
- Syntetos, A., Boylan, J. & Disney, S. (2009). *Forecasting for inventory planning: a 50-year review*, *J Oper Res Soc* 60, S149–S160 <https://doi.org/10.1057/jors.2008.173>
- Taylor, Sean J. & Letham, b. (2018). *Forecasting at Scale*, *The American Statistician*, 72:1, 37-45, DOI: [10.1080/00031305.2017.1380080](https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080)
- Thieuleux (2019) *Calcul stock de sécurité : les 6 meilleures formules*, *AbcSupplyChain*, [Calcul Stock De Sécurité : Les 6 Meilleures Formules|AbcSupplyChain](#)
- Thomopoulos, N. T. (2015). *Demand forecasting for inventory control*, Springer, doi: 10.1007/978-3-319-11976-2_10

- Thomassey, S. (2002) Méthodologie de la prévision des ventes appliquée à la distribution du textile, Université des sciences et de technologies de Lille, 156, [Contribution à la modélisation de tissus techniques \(univ-lille.fr\)](http://univ-lille.fr)
- Torres, O. (2000). *Du rôle et de l'importance de la proximité dans la spécificité de gestion des PME*. 5ème Congrès International sur la PME, 25-27
- Vermorel (2012). *Quantité économique de commande*, Lokad, [Quantité de Commande Economique \(EOQ\), définition et formule \(lokad.com\)](http://lokad.com)
- Williams, B.D., Tokar, T. (2008) *A review of inventory management research in major logistics journals: Themes and future directions*, International Journal of Logistics Management, 212-232, DOI:10.1108/09574090810895960.

ANNEXE A

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE LA MOYENNE MOBILE

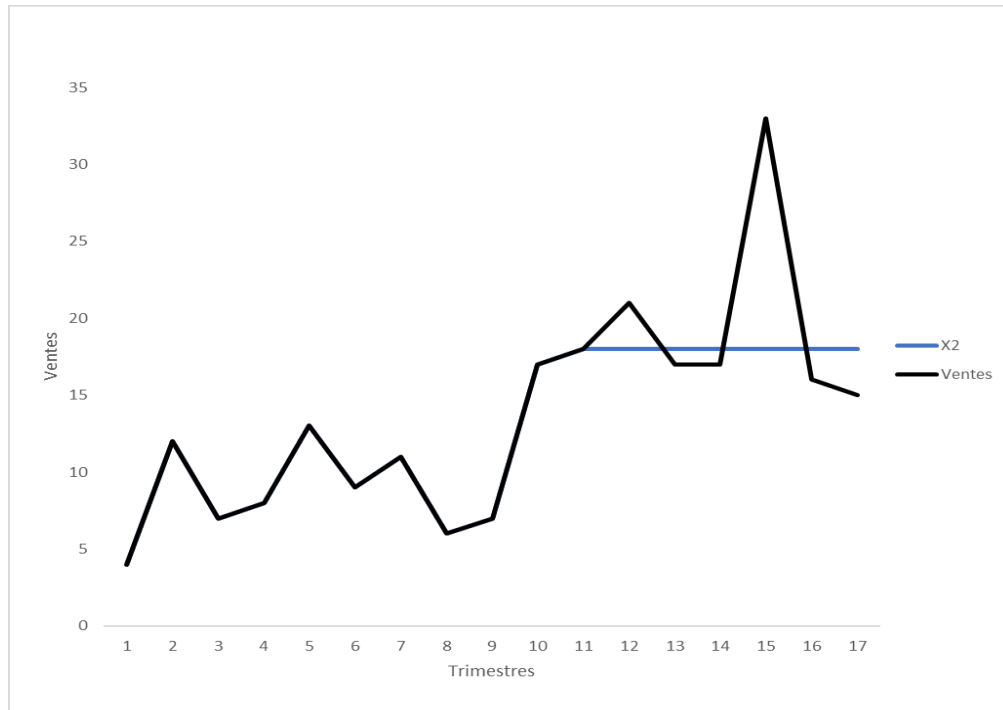
Ce modèle consiste à faire la moyenne des ventes de X derniers trimestres afin de faire la prévision pour le prochain trimestre. Il était donc pertinent de tester plusieurs valeurs différentes de X afin de voir laquelle obtenait les meilleures prévisions, c'est-à-dire, qui minimisent les erreurs. Voici la formule utilisée :

$$\hat{y}_t = \frac{\sum(y_{t-1}) + \dots + (y_{t-X})}{X} \quad (7.1)$$

La prévision de vente du trimestre t est représentée par \hat{y}_t . Les ventes réelles du trimestre t sont représentées par y_t . Le nombre de trimestres précédents utilisé est représenté par X .

La Figure 7.1 donne un exemple de développement d'un modèle de prévision par moyenne mobile avec la moyenne des deux derniers trimestres pour une pompe du groupe A. Le même exercice a été fait pour $X=3$ et $X=4$, mais ne sera pas présenté dans ce mémoire.

Figure 7.1 Prévisions des ventes obtenues pour les trimestres 12 à 17 par application de la méthode de moyenne mobile avec $X=2$ pour la pompe A



Comme on peut l'observer sur la Figure 7.1, les prévisions faites par le modèle de la moyenne mobile deviennent rapidement une droite horizontale. Cela s'explique par le fait que lorsqu'on avance dans les prévisions, on fait une moyenne des moyennes précédentes. Cela a donc pour effet de ne pas pouvoir suivre ni la tendance ni la saisonnalité, ou du moins l'atténuer de beaucoup. Cela dit, le modèle fait quand même des prévisions qui ne s'éloignent pas trop de la réalité, ce qui permet, comme mentionnée plus tôt, de pouvoir donner un point de comparaison pour les autres modèles qui seront testés. Aussi, l'objectif du modèle de prévision de la demande pour le présent contexte est de pouvoir prédire une quantité de vente annuelle pour ensuite pouvoir l'utiliser dans le modèle de gestion des stocks. Par ailleurs les erreurs sont d'autant plus acceptables si elles s'annulent en moyenne sur l'année. Les quantités prédites par ce modèle pourront également servir de point de repère pour les autres modèles.

ANNEXE B

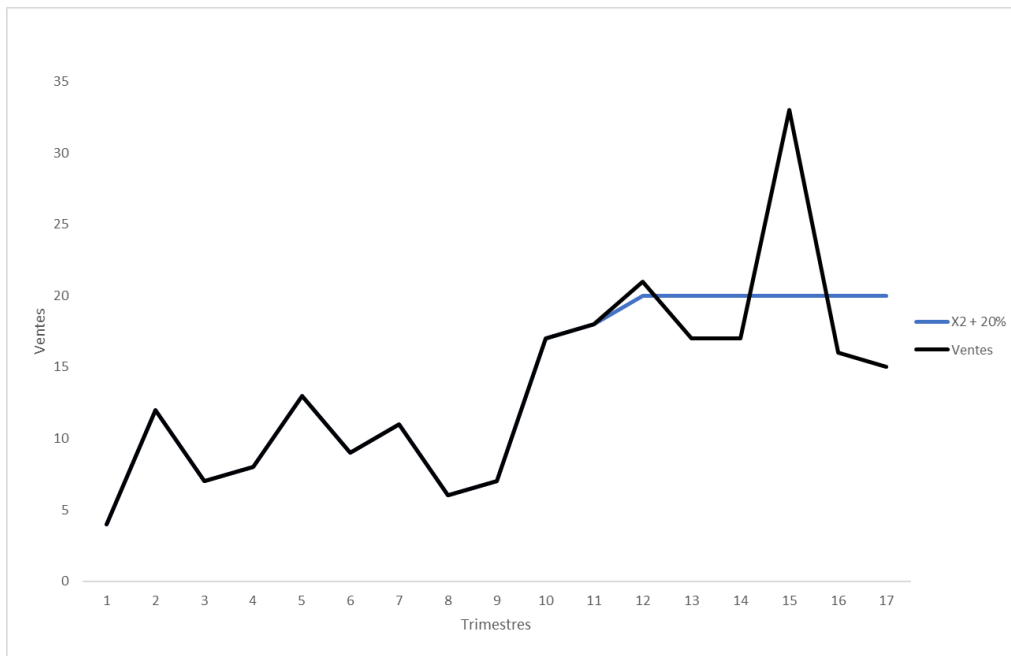
DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE LA MOYENNE MOBILE BONIFIÉE

L'équation de la moyenne mobile est modifiée ainsi :

$$\hat{y}_t = \left(\frac{\sum (y_{t-1}) + \dots + (y_{t-X})}{X} \right) * 1,2 \quad (7.2)$$

La prise en compte de cette modification est illustrée sur la Figure 7.2 :

Figure 7.2 Développement du modèle de prévision de ventes de la pompe A avec X=2 et ajout de 20% de ventes

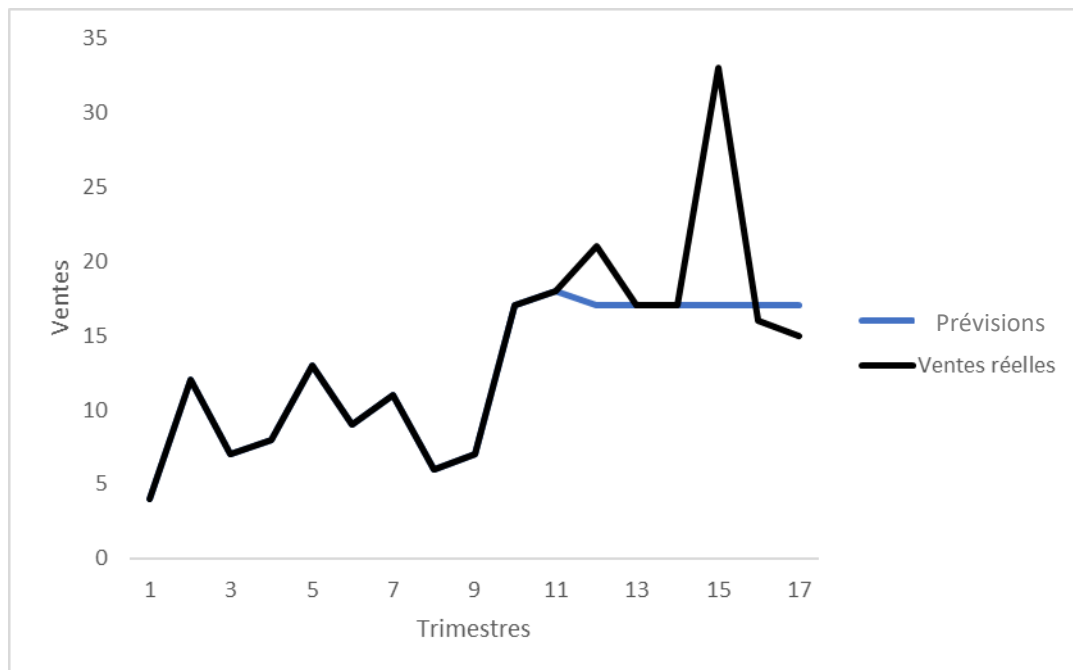


En observant les Figures 7.1 et 7.2, on peut constater que la Figure 6.3 semble mieux suivre le cours naturel de la courbe. Effectivement, comme on peut l'observer dans le tableau 4.2, l'ajout de 20% de ventes permet de changer l'erreur moyenne de -1,83 à 2,00. Ce changement est souhaitable car, en raison de l'expansion d'Hydrotech, il est mieux que cette erreur soit positive plutôt que négative car on ne veut pas sous-estimer les ventes. Aussi, on peut remarquer une augmentation dans la prévision des ventes qui se veut nécessaire, mais tout de même insuffisante, car la prévision des ventes pour 2022 reste en dessous de ventes de 2021, soit de 81.

ANNEXE C

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE LISSAGE EXPONENTIEL SIMPLE

Figure 7.3 Développement du modèle de prévision avec lissage exponentiel simple pour la pompe A



Comme on peut le voir sur la Figure 7.3, le lissage exponentiel simple prévoit la même valeur pour tous les prochains trimestres. Cela s'explique par le fait que lorsqu'on arrive à la deuxième prévision, le modèle utilise sa première prévision comme vente réelle pour faire son calcul, qui prend alors exactement la même valeur car il n'y a pas d'écart entre la prévision et la vente réelle à l'instant $t+1$. En voici la démonstration mathématique :

$$P_t = P_{t-1} + \alpha * (V_t - P_{t-1}) \quad (7.3)$$

Les prévisions à l'instant t sont représentées par P_t . Les ventes réelles à l'instant t sont représentées par V_t . La constante de lissage est représentée par α .

Donc si $V_t = P_t$, la prévision sera toujours la même après $t+1$. Ce modèle n'est donc pas bien adapté pour les ventes d'Hydrotech, ne considérant pas la tendance et la saisonnalité. La prochaine section reviendra sur cette affirmation. Le paramètre α est de 0,8. Cette valeur a été déterminée de façon à réduire l'erreur. Afin de déterminer la meilleure valeur pour α , la stratégie utilisée a été de mettre la valeur du paramètre à 0,5 initialement, d'observer l'erreur, puis de réduire sa valeur de 0,1 afin de regarder si l'erreur augmente ou diminue. Dans le cas d'une augmentation, on arrête la décrémentation et on incrémente. Dans le cas d'une diminution, on continue la décrémentation. On effectue cet exercice jusqu'à l'erreur augmente si l'on décrémente et incrémente. Par souci de simplicité, on observe uniquement le MAPE puisqu'il serait complexe de considérer plusieurs erreurs en même temps (on devrait accorder un poids à chacune des erreurs) et puisque le MAPE est l'erreur la plus pertinente pour juger de la qualité d'un modèle (Ghiani et al, 2013). La démarche illustrée se trouve dans le tableau 7.1. Aussi, afin de se comparer et de justifier le choix d'Alpha, le même exercice a été fait en observant le ME, donnant un résultat très similaire (le $\alpha=0,9$ étant le meilleur résultat et le $\alpha=0,8$ étant le deuxième meilleur résultat).

Tableau 7.1 Détermination de la valeur d'alpha

Alpha (α)	0,5	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8
MAPE (%)	29,7	36,2	22,73	16,94	14,78	16,27	14,78

ANNEXE D

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE *ETS* ADDITIF

Voici la formule qui a été utilisée :

$$\hat{y}_{t+k} = a_t + (k * b_t) + S_{t+k-Y} \quad (7.4)$$

$$a_t = (\beta * y_t - S_{t-Y}) + ((1 - \beta) * (a_{t-1} + b_{t-1})) \quad (7.5)$$

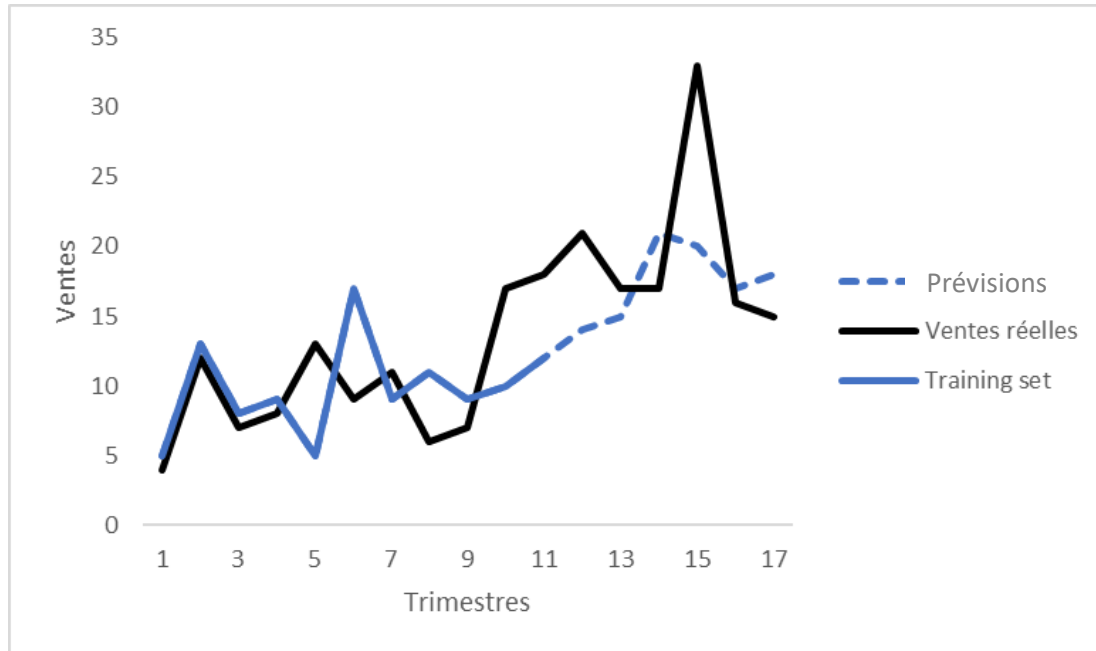
$$b_t = (\gamma * (a_t - a_{t-1})) + ((1 - \gamma) * b_{t-1}) \quad (7.6)$$

$$s_t = \delta * (y_t - a_{t-1} - b_{t-1}) + ((1 - \delta) * S_{t-Y}) \quad (7.7)$$

Le niveau à la période t est représenté par a_t . La tendance à la période t est représentée par b_t . La saisonnalité à la période t est représentée par S_t . Le nombre de prévisions dans le futur est représenté par k . Le nombre de saisons est représenté par Y . L'indice du niveau est représenté par β . L'indice de la tendance est représenté par γ . L'indice de la saisonnalité est représenté par δ .

Le résultat de cette expérimentation (type d'erreur additive, tendance additive, saisonnalité additive) est illustré sur la Figure 7.4:

Figure 7.4 Développement du modèle de prévision avec *ETS* additif comprenant erreur, tendance et saisonnalité pour la pompe A



On peut observer sur la figure 7.4 que la courbe de prévision (en pointillés) a une forme similaire, mais atténuée, des ventes réelles. On voit aussi que cette courbe possède une tendance positive, qui permet de suivre la hausse des ventes ainsi qu'une saisonnalité, qui permet de mieux suivre la courbe des ventes réelles de l'entreprise. Cette figure a un *training set* représenté par la ligne bleue. Cela s'explique par le fait que les méthodes présentées précédemment utilisaient comme *training set* les valeurs exactes des données historiques de ventes.

Analyse de sensibilité pour le modèle *ETS*

Le modèle possède 3 paramètres modifiables, soit l'erreur (β), la tendance (γ) et la saisonnalité (δ), pouvant chacun avoir une valeur entre 0 et 1. Il est alors possible de faire plusieurs combinaisons qui résulteraient tous à des résultats très différents. Plus précisément, si l'on teste les valeurs possibles en partant de 0 et en incrémentant de 0,1 pour chacun des paramètres, il y a plus de 1000 combinaisons

possibles. Afin de déterminer la meilleure d'entre elles, la stratégie utilisée a été de mettre la valeur des paramètres à 0,5 initialement, d'observer l'erreur, puis de réduire la valeur d'un des paramètres de 0,1 afin de regarder si l'erreur a augmentée ou diminuée. Dans le cas d'une augmentation, on arrête la décrémentation et on incrémente. Dans le cas d'une diminution, on continue la décrémentation. Une fois la meilleure valeur trouvée pour β , on fait le même exercice pour γ , puis δ . Si l'une des valeurs entre γ et δ a changé, on recommence l'exercice, et ce, jusqu'à ce qu'on ait trouvé la meilleure combinaison. L'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) du test set de chacune des combinaisons était observée et comparée afin de déterminer la meilleure. Ces valeurs sont de 0,4 pour β , 0,1 pour γ et 0,4 pour δ et en voici la démarche :

Tableau 7.2 Détermination des paramètres pour la méthode ETS additif

Beta (β)	Gamma (γ)	Delta (δ)	MAPE (%)
0,5	0,5	0,5	53,79
0,4	0,5	0,5	40,86
0,3	0,5	0,5	30,1
0,2	0,5	0,5	24,93
0,1	0,5	0,5	27,21
0,2	0,4	0,5	24,76
...
0,2	0,2	0,5	24,36
0,2	0,2	0,4	23,4
0,2	0,2	0,3	23,14
0,2	0,2	0,2	23,46
0,1	0,2	0,2	26,84
0,3	0,2	0,2	22,38
0,4	0,2	0,2	25,33
...
0,4	0,1	0,4	21,66

ANNEXE E

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE *ETS* MULTIPLICATIF (WINTERS-HOLT)

Le modèle se présente ainsi :

$$\hat{y}_{t+k} = (a_t + (k * b_t)) * S_{t+k-Y} \quad (7.8)$$

$$a_t = \left(\varepsilon * \frac{y_t}{S_{t-Y}} \right) + ((1 - \varepsilon) * (a_{t-1} + b_{t-1})) \quad (7.9)$$

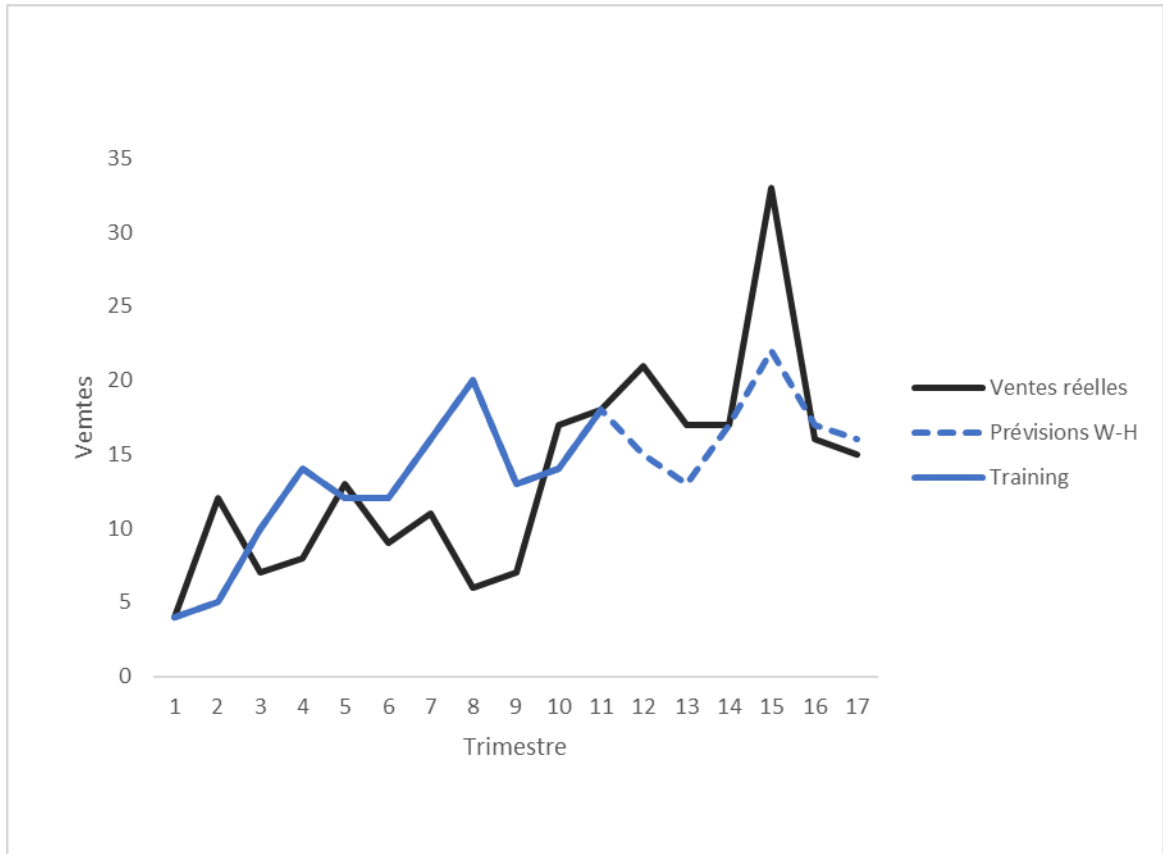
$$b_t = (\eta * (a_t - a_{t-1})) + ((1 - \eta) * b_{t-1}) \quad (7.10)$$

$$s_t = \left(\lambda * \frac{y_t}{a_t} \right) + ((1 - \lambda) * S_{t-Y}) \quad (7.11)$$

L'indice du niveau est représenté par ε . L'indice de la tendance est représenté par η . L'indice de la saisonnalité est représenté par λ .

Le résultat est illustré dans la Figure 7.5. D'un point de vue visuel, ce graphique est intéressant. En effet, la ligne pointillée bleue, qui représente les prévisions, suit la ligne noire, qui représente les ventes réelles. Cependant, les prévisions sont en dessous des ventes réelles, ce qui les rend moins satisfaisantes.

Figure 7.5 Développement du modèle de prévisions des ventes de la pompe A avec Winters-Holt



Analyse de sensibilité du modèle Winters-Holt

Comme pour le modèle *ETS* additif, il est possible de donner plusieurs valeurs différentes aux variables ε , η et λ , modifiant ainsi l'erreur. La méthode utilisée est identique à l'annexe précédent. Les valeurs 0,2 pour ε , 0,3 η et 0,1 λ ont été conservées :

Tableau 7.3 Détermination des paramètres pour la méthode ETS multiplicatif

Epsilon (ε)	Êta (η)	Lambda (λ)	MAPE (%)
0,5	0,5	0,5	35,1
0,4	0,5	0,5	30,8
0,3	0,5	0,5	24,6
0,2	0,5	0,5	22,5
0,1	0,5	0,5	25,9
0,2	0,4	0,5	21,1
0,2	0,3	0,5	26,2
0,2	0,4	0,4	21,9
0,3	0,4	0,4	21,1
...
0,2	0,3	0,1	16,4

ANNEXE F

DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES *TSLM***La régression linéaire**

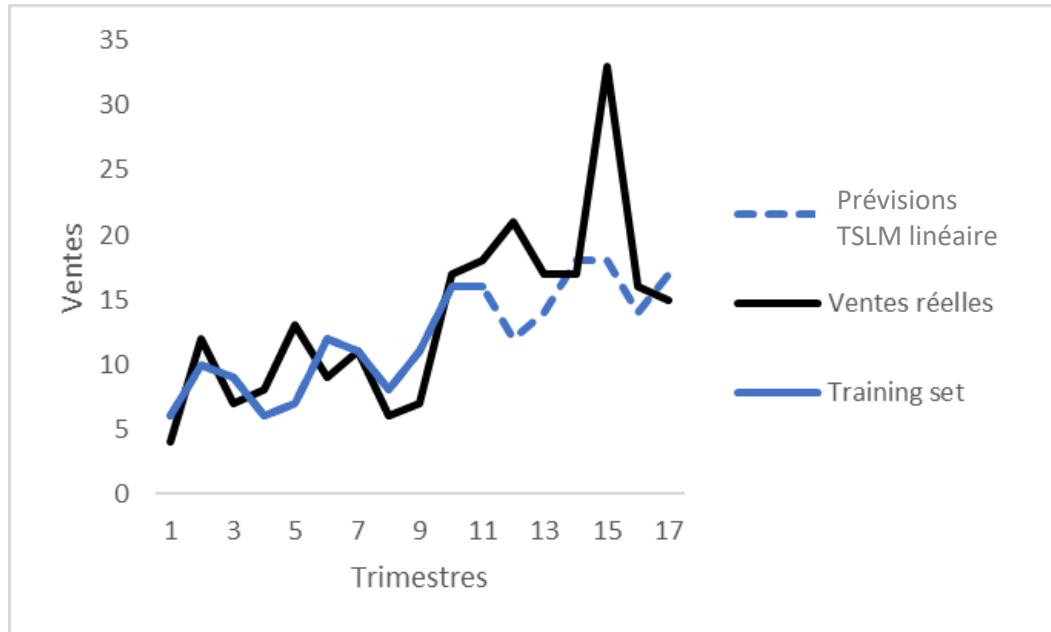
Voici la formule utilisée, pour la régression linéaire :

$$\hat{y}_t = (a + bx) + S \quad (7.12)$$

a et b appartiennent aux réels. La saisonnalité est représentée par S .

Les résultats du modèle *TSLM* avec régression quadratique et saisonnalité sont illustrés dans la Figure 7.7. On voit sur la figure 7.7 que les prévisions, représentées par la courbe pointillée bleue, sont en dessous des ventes réelles, ce qui n'est pas satisfaisant. On voit cependant que la saisonnalité est respectée.

Figure 7.6 Développement du modèle de prévisions de ventes avec TSLM avec la régression quadratique incluant l'ajout de saisonnalité pour la pompe A



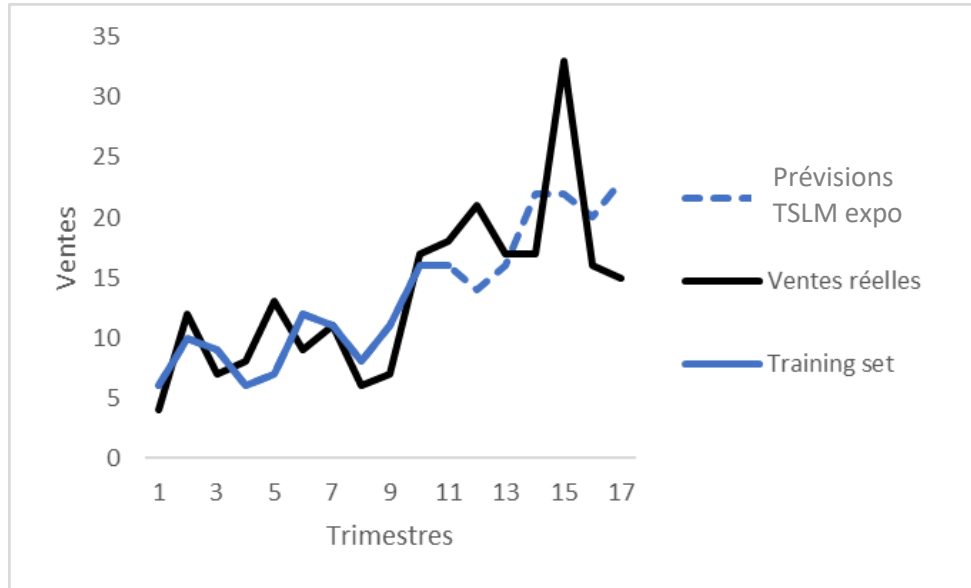
La régression exponentielle

Voici la formule utilisée, pour la régression exponentielle :

$$\log(\hat{y}_t) = (a + bx) + S \quad (7.13)$$

Les résultats du modèle TSLM avec régression quadratique et saisonnalité sont illustrés dans la Figure 7.8. On voit sur la figure 7.8 que les prévisions faites sont majoritairement sous les ventes réelles, mais semblent suivre grossièrement la forme de la courbe des ventes. À première vue, ces prévisions sont intéressantes car elles suivent la tendance et la saisonnalité. Il sera intéressant de voir ses prévisions pour 2022 ainsi que ses erreurs.

Figure 7.7 Développement du modèle de prévisions de ventes avec TSLM avec la régression quadratique incluant l'ajout de saisonnalité pour la pompe A



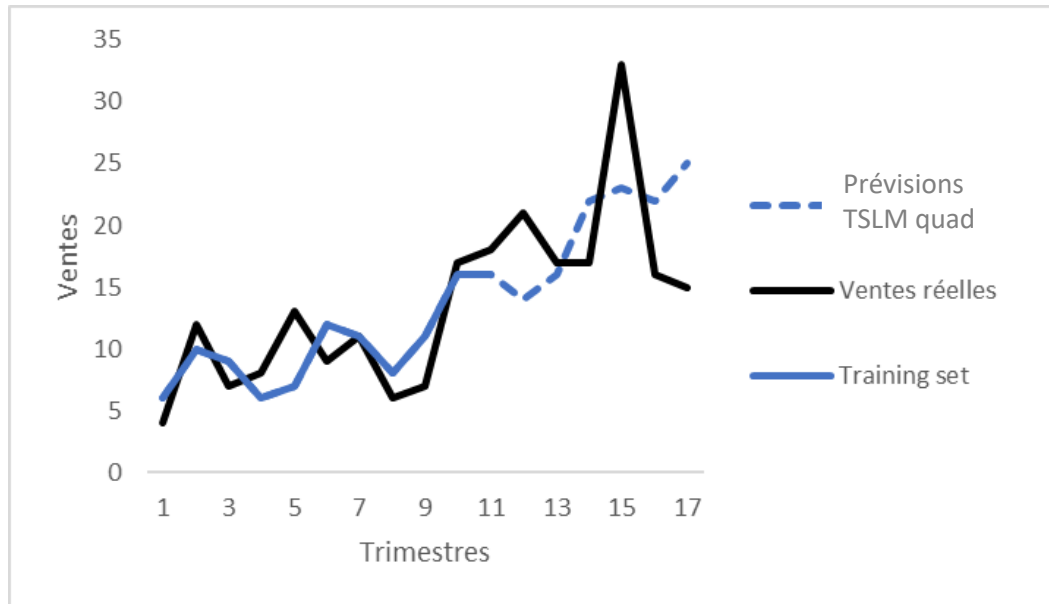
La régression quadratique

Voici la formule utilisée, pour la régression quadratique :

$$\hat{y}_t = (ax^2 + bx + c) + S \quad (7.14)$$

Les résultats du modèle TSLM avec régression quadratique et saisonnalité sont illustrés dans la Figure 7.9 :

Figure 7.8 Développement du modèle de prévisions de ventes avec *TSLM* avec la régression quadratique incluant l'ajout de saisonnalité pour la pompe A



Cette méthode à un résultat semblable à la méthode avec la régression exponentielle. L'analyse visuelle est donc la même.

ANNEXE G

CALCULS D'ERREURS

Tableau 7.4 Mesures d'erreurs

ME	$\frac{\sum(y_t - \hat{y}_t)}{n}$
MAE	$\frac{\sum y_t - \hat{y}_t }{n}$
MSE	$\frac{\sum(y_t - \hat{y}_t)^2}{n}$
MAPE	$\frac{\sum\left(\frac{ y_t - \hat{y}_t }{ y_t }\right)}{n} * 100$
Écart de la somme des prévisions 2021	$y_t - \hat{y}_t$

Le nombre d'observations est représenté par n .

ANNEXE H

DONNÉES DE VENTES DE LA POMPE A

Figure 7.9 Fréquence de quantité vendue de pompes A par trimestre

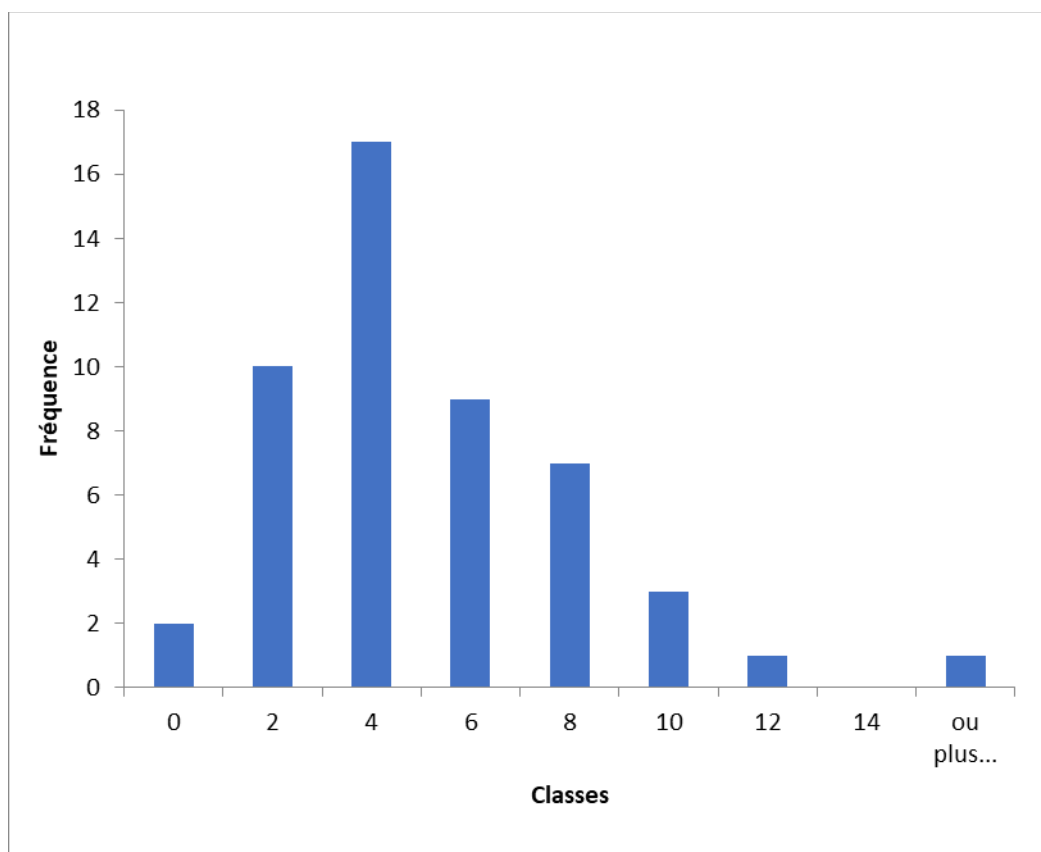
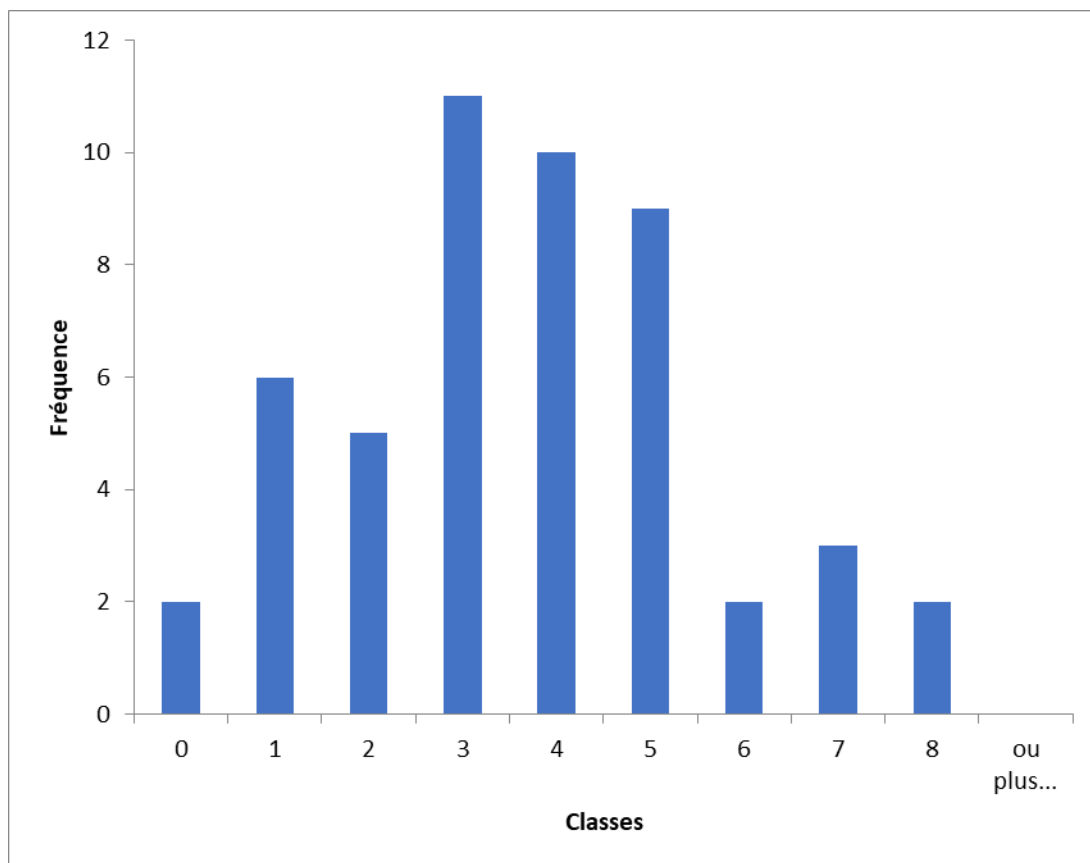


Figure 7.10 Fréquence de quantité vendue de pompes B par trimestre



ANNEXE I

COEFFICIENT DU NIVEAU DE SERVICE TESTÉS ET UTILISÉS

Tableau 7.5 Coefficient de niveau de service testés et utilisés dans les calculs

Niveau de service	Coefficient du niveau de service (Z)
90%	1,28
95%	1,64
98%	2,05
99%	2,33