



Projet de Master - Section de génie civil

**Optimisation et Déploiement
d'une méthode de calcul au
sein d'un groupe actif dans le
second œuvre**

Auteur :

Thomas POULAIN

Professeur :

Prof. Michel BIERLAIRE

Encadrants au sein de l'entreprise :

Bastien SAUVE

Alexandre L'HOTE

Juin 2023

Remerciements

Ce projet passionnant n'aurait pu avoir lieu sans la contribution de nombreuses personnes que je souhaite remercier.

Un remerciement tout spécial à Bastien SAUVE et Alexandre L'HOTE qui m'ont aidé et accompagné dans ce projet. Je veux particulièrement les remercier pour toutes les connaissances transmises et leur engagement dans ce projet.

Un grand merci au TEAM TECH (Pascal THORENS, Guillaume COUTY, Marcel FRES-SINEAU et Florian JUNG) qui m'a permis d'acquérir les compétences nécessaires dans le domaine de l'étanchéité, qui m'était jusqu'alors inconnu. Leur collaboration et leur soutien m'ont permis de mieux comprendre les problématiques de ce projet, et de le réaliser le plus justement possible. Malgré les circonstances, ils ont toujours été là pour faciliter et s'assurer de l'avancement de mon projet.

Je souhaite également remercier le Prof. Michel BIERLAIRE, sans qui ce projet n'aurait pu avoir lieu. Merci de m'avoir permis de réaliser ce projet de Master et pour l'encadrement.

Résumé

Estimer le prix d'un chantier ? Cette étape est probablement l'une des plus complexes dans la réalisation d'un chantier. En effet, elle nécessite de prévoir au mieux les événements aléatoires qui interviendront pendant son déroulement. Cette étape, mélange entre théorie et pratique, ne doit pas perdre de vue la réalité du chantier. Mais alors, dans quelles mesures est-il possible d'optimiser la méthode de calcul ?

L'idée initiale du projet était de mettre en place un modèle mathématique permettant d'estimer le prix des différentes étapes du chantier en fonction de paramètres. Cependant, ces données n'existent pas... Il est alors étudié les prix rendus aux cours des années précédentes, stockées dans le logiciel *BauBit*. Une base de données est mise en place afin de pouvoir l'étudier sur *Python*. Il est analysé les différentes caractéristiques des chantiers ainsi que les prix rendus. L'étude se focalise sur les prix du bicouche (étanchéité appliquée en deux couches). Les prix sont très dispersés et la fourniture représente la majorité du prix de vente (55 % en moyenne). La date de rendu de l'offre est le paramètre qui a le plus d'effet sur le prix.

Afin d'estimer le prix en fonction des paramètres d'un chantier, il est mis en place une régression linéaire multiple, avec comme variables, les paramètres du chantier. Cependant, du fait du manque de données significatives, ce travail ne peut apporter les résultats escomptés. De plus, cette méthodologie n'est pas en adéquation avec l'utilisation du logiciel *BauBit*. L'amélioration de l'utilisation de ce logiciel pour la calculation est le second aspect de ce travail.

Ce logiciel peut contenir la liste de tous les prix de fourniture. Il permet également de calculer le prix des différentes tâches à réaliser sur chantier en fonction du temps de travail qui y est renseigné ainsi que la quantité de fourniture. Son utilisation permet ainsi de calculer les prix de manière précise, en tenant compte de différents paramètres.

Liste des tableaux

1.1	Catalogue libre - enlèvement de pare-vapeur	7
1.2	CAN - enlèvement de pare-vapeur	8
2.1	Prix de revient	16
2.2	Résultat de chantier	16
2.3	Rendements des fournitures	18
2.4	Rendements de pose	21
3.1	Nombre de données par période de hausses Swisspor	33
3.2	Paramètres de la distribution normale des prix du bicouche avec et sans four- niture	35
3.3	Indice suisse des prix de la construction - Prix unitaires moyens dans la région lémanique (VD, VS, GE)	38
4.1	Résultats du test de Barlett	49
4.2	Résultats du test de Shapiro-Wilk	50
4.3	Résultats du test ANOVA	51
4.4	Résultats du test ANOVA pour toutes les variables	51
4.5	Classement des variables en fonction des différentes méthodes de sélection des variables	52
4.6	Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 11 variables	58
4.7	p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 11 variables	60
4.8	Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 2 variables	61
4.9	p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 2 variables	63
4.10	Rendements [min/m^2] des articles principaux	67
6.1	Prix de vente en fonction des catégories de part de toiture	75
A.1	Résultats de la méthode Lasso CV	82

A.2	Résultats de la méthode RFE	84
A.3	Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 3 variables	85
A.4	p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 3 variables	85
A.5	Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 1 variable	87
A.6	p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 1 variable	87

Table des figures

1.1	Résultats du sondage sur les rendements $[m^2/j]$ auprès des conducteurs de travaux	2
1.2	Détails des couches d'une toiture chaude traditionnelle (DOURNOW, 2014)	5
3.1	Procédé de sélection des données sur <i>BauBit</i>	22
3.2	Données extraites de <i>BauBit</i> vers <i>Excel</i>	23
3.3	Données relatives au prix	25
3.4	Données relatives aux paramètres des projets	25
3.5	Nombre de données par article	27
3.6	Diagramme en boîte des prix pour les articles relatifs au bicouche	28
3.7	Diagramme en boîte des prix du bicouche	29
3.8	Nombre de données par paramètre	30
3.9	Histogramme des prix du bicouche	31
3.10	Évolution du prix de fourniture entre 2017 et 2023	32
3.11	Évolution du prix moyen du bicouche par période avec et sans le prix de fourniture	33
3.12	Histogramme du prix du bicouche, avec et sans le prix de fourniture	34
3.13	Histogramme du prix du bicouche, avec et sans le prix de fourniture, en fonction des hausses de prix	35
3.14	Histogramme du prix du bicouche (article 400.223), avec et sans le prix de fourniture, en fonction des hausses de prix	36
3.15	Prix du bicouche (avec et sans la fourniture) en fonction de la date	37
3.16	Prix du bicouche (avec et sans les rabais, escompte et prorata) en fonction de la date	38
3.17	Prix du bicouche en fonction de la date - Données de l'Office fédérale de la statistique	39
3.18	Matrice de corrélation des paramètres	40
3.19	Diagramme Pareto de l'importance des composantes de l'ACP	41
3.20	Composition des composantes principales	42
3.21	Type de construction - 105 en fonction des deux composantes principales de l'ACP	43

4.1	Matrice de corrélation entre les paramètres et le prix de l'article	45
4.2	Projections des données par variables 2 à 2	46
4.3	Distribution des prix du bicouche en fonction du type de construction	47
4.4	Distribution des prix du bicouche en fonction du type de mandat	48
4.5	Moyenne des indicateurs en fonction du nombre d'itérations - 1000 itérations	56
4.6	Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer	58
4.7	Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer - 2 variables	62
4.8	Prix rendus et estimés en fonction de la date	64
4.9	Prix rendus et estimés en fonction de la date et de la surface	64
4.10	Analyse de sensibilité	65
4.11	Histogrammes du rendement pour les articles principaux	66
4.12	Évolution du rendement du bicouche en fonction du prix de l'ouvrier	67
5.1	Présentation des éléments de coûts sur <i>Baubit</i>	69
5.2	Présentation des éléments de coûts (Matériaux) sur <i>Baubit</i>	69
5.3	Analyse de prix d'un article	70
6.1	Part de toiture en fonction du prix de vente	76
7.1	Schéma du processus de cycle d'étude des prix (PAULOZ et LIÉBENS, 1990) .	79
A.1	10 variables les plus importantes selon Extra Trees Classifier	81
A.2	Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer - 3 variables	86
A.3	Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer - 1 variable	88

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.1.1	Présentation de <i>PHIDA Étanchéité</i>	1
1.1.2	Les prix dans le monde de la construction	1
1.2	Motivation	2
1.3	Introduction à l'étanchéité	3
1.4	Calcul et Catalogues	5
1.4.1	Calcul	5
1.4.2	Les types de catalogues	6
1.5	Objectifs du projet	10
2	Calcul	11
2.1	Obtention d'un chantier	11
2.1.1	L'appel d'offre	11
2.1.2	La procédure de gré-à-gré	12
2.2	Estimation des prix	13
2.2.1	Les différents coûts	13
2.2.2	Comptabilité analytique	14
2.2.3	Estimation des coûts liés au chantier	17
3	Base de données et Analyse des données	22
3.1	Création de la base de données	22
3.2	Sélection des données d'étude	26
3.3	Analyse des prix du bicouche	30
3.3.1	Distribution des prix de bicouche	30
3.3.2	Prix de fourniture	31
3.3.3	Rabais, Escompte et Prorata	37
3.3.4	Comparaison avec les données cantonales	38
3.4	Analyse des paramètres	39
3.4.1	Étude de corrélation	39
3.4.2	Analyse des composantes principales (ACP)	40

4	Développement d'un modèle pour le bicouche	44
4.1	Étude des variables	44
4.1.1	Corrélation	44
4.1.2	Test ANOVA	46
4.1.3	Sélection des variables	52
4.2	Régression linéaire multiple	53
4.2.1	Équation	53
4.2.2	Mesures de performance	54
4.2.3	Performances	56
4.2.4	Analyse de la régression linéaire multiple conservée	63
4.3	Estimation des rendements moyens	66
5	BauBit	68
5.1	Principe général et étapes	68
5.1.1	Éléments de coûts	68
5.1.2	Analyse	70
5.1.3	Facteurs de calcul	71
5.2	Utilisation	71
6	Pour aller plus loin...	73
6.1	Abaque sur les rendements	73
6.2	Impact de la part de toiture sur le prix de vente	74
6.3	Calculations et écologie	76
7	Conclusion	78
A	Annexes	80
A.1	Différentes méthodes de sélection des variables	80
A.2	Résultats de la régression linéaire multiple	85
A.2.1	Régression avec 3 variables	85
A.2.2	Régression avec 1 variable	87
A.3	Fiche méthode d'importation des fournitures Swisspor sur <i>BauBit</i>	88
A.4	Abaque sur les rendements	92

1 | Introduction

1.1 Contexte

L'entreprise *PHIDA Étanchéité* est une entreprise de construction dans le secteur de l'étanchéité. Dans une dynamique de forte croissance, elle a une volonté d'amélioration des processus internes. En effet, dans ce secteur où il est difficile de se distinguer de la concurrence, il y a un souhait d'essayer de se différencier par une amélioration en interne. C'est dans ce contexte que *PHIDA Étanchéité* appuie mon projet de master : Optimisation et déploiement d'une méthode de calcul.

1.1.1 Présentation de *PHIDA Étanchéité*

Appartenant au groupe *PHIDA*, l'entreprise *PHIDA Étanchéité* est le leader de l'étanchéité en Suisse Romande depuis 1931. *PHIDA Étanchéité* intervient pour la pose d'étanchéité bitumineuse et synthétique ainsi que pour la pose d'isolation thermique.

L'étanchéité et l'isolation sont des aspects primordiaux de la construction et leur bonne exécution assure la pérennité des édifices. Pour ce faire, *PHIDA Étanchéité* applique de l'étanchéité tant sur des toitures plates que sur des terrasses ou encore des balcons. Un second domaine d'activité concerne les toitures végétalisées, qui ne cessent d'être en vogue. *PHIDA* intervient alors dans la préparation de ces toitures. Un travail de préparation de la toiture pour la réception de panneaux photovoltaïques est également possible.

1.1.2 Les prix dans le monde de la construction

Le marché de la construction est très concurrentiel. De nombreuses sociétés s'affrontent pour décrocher des chantiers.

Les projets de construction peuvent être financés soit par des entités publiques, soit par des

entreprises privées. Les projets publics sont souvent soumis à des appels d'offres et doivent respecter des procédures d'adjudication strictes, tandis que les projets privés sont souvent négociés directement entre les entreprises et les clients. Avoir une idée la plus précise possible de ses coûts de réalisation sur chantier permet ainsi d'être en mesure d'ajuster ses prix sans risquer d'être à pertes.

1.2 Motivation

Entre la théorie et la réalité du chantier, il y a un fossé... Sur chantier, de nombreux aléas et contretemps peuvent subvenir ce qui peut bouleverser les plannings et donc les coûts du chantier. En effet, il est quasiment impossible de pouvoir imaginer les aléas en amont.

Au cours d'une formation en interne, il a été réalisé un sondage auprès de différents conducteurs de travaux. L'idée de ce dernier était de leur demander, selon leurs expériences, combien de temps de réalisation sur chantier les différentes tâches demandent. La notion de rendement intervient. Par le terme "rendement de pose", on entend le temps de travail nécessaire pour effectuer la pose d'un élément par unité. Les résultats sont présentés à travers la Figure 1.1.

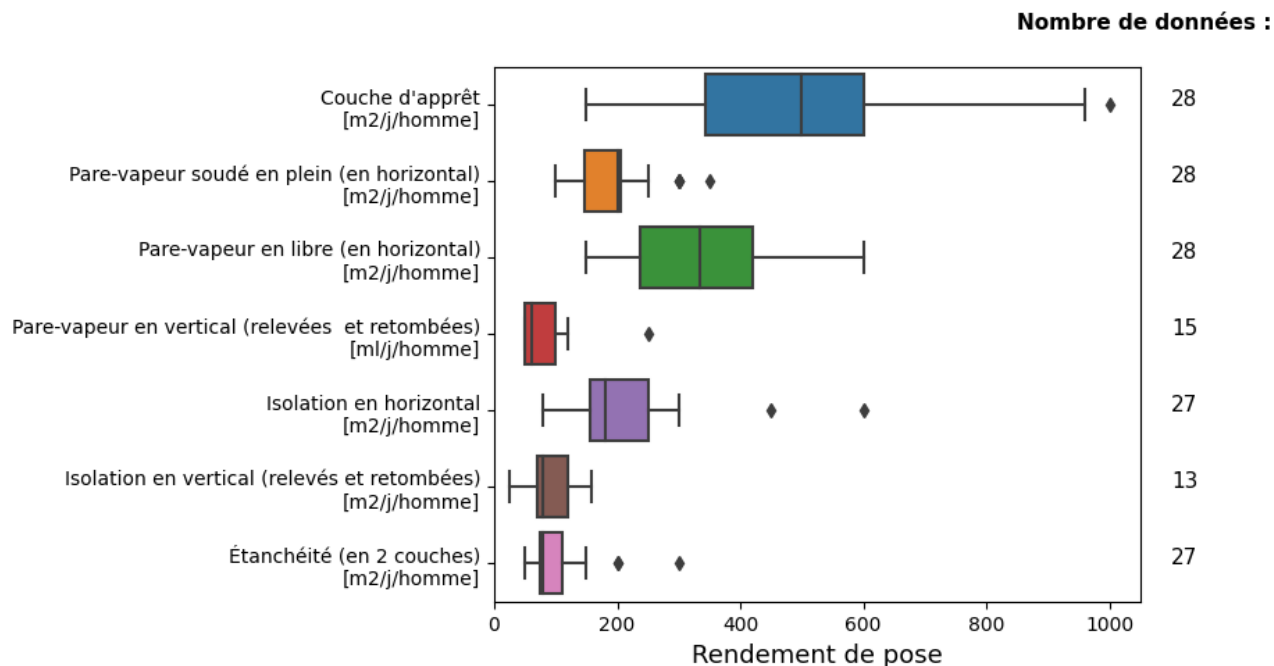


FIGURE 1.1 – Résultats du sondage sur les rendements $[m^2/j]$ auprès des conducteurs de travaux

Ce sondage illustre bien la disparité des réponses. En effet, pour chaque type de travail à effectuer les écarts de rendements sont très importants. Cette réalité, d'hommes qui ont l'habitude de la réalité du chantier, met en lumière toute la complexité de ce travail. Cela ne peut que renforcer la motivation à essayer de mieux saisir la réalité du terrain afin d'avoir des estimations toujours plus proches de la réalité.

1.3 Introduction à l'étanchéité

La compréhension du fonctionnement des différents systèmes d'étanchéité s'est principalement basée sur l'ouvrage majeur de l'étanchéité : *Le livre de l'étanchéité* (DOURNOW, 2014) réalisé par l'entreprise *GeneuxDancet* ainsi que sur la norme SIA 271 (SIA, 2021), relative à l'étanchéité.

Les toitures plates sont de plus en plus populaires dans l'architecture moderne, offrant à la fois esthétique et fonctionnalité. L'un des éléments clés dans la construction de ces toitures est l'étanchéité, qui joue un rôle essentiel dans la protection de la structure contre les infiltrations d'eau.

La superposition de couches est une technique couramment utilisée dans la construction de l'étanchéité des toitures plates. Elle implique l'application de plusieurs couches de matériaux pour renforcer la protection contre les infiltrations d'eau et assurer une étanchéité durable.

En superposant plusieurs couches de matériaux étanches, on crée une barrière multiple qui renforce l'étanchéité globale de la toiture. Cette superposition des couches permet de compenser les éventuelles imperfections ou défauts dans la pose d'une seule couche. Elle offre également une protection supplémentaire en cas de détérioration ou de dommages sur l'une des couches supérieures.

Dans la construction de l'étanchéité des toitures plates, différentes couches peuvent être superposées, selon les besoins et les matériaux utilisés. Voici les plus couramment utilisés :

- Couches bitumineuses : L'un des matériaux les plus couramment utilisés pour l'étanchéité des toitures plates est le bitume modifié. Ce matériau est composé d'une feuille de

bitume renforcée par des armatures de fibres de verre ou de polyester. Il est disponible en différentes épaisseurs pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet.

- Couches d'isolation : En plus des membranes étanches, des couches d'isolation peuvent être superposées pour améliorer l'efficacité énergétique de la toiture plate. Ces couches d'isolation, telles que des panneaux en polystyrène expansé (EPS) ou en polyuréthane (PUR), sont généralement placées sous les couches étanches pour fournir une isolation thermique supplémentaire.

La construction de l'étanchéité des toitures plates nécessite une installation précise pour garantir une protection optimale contre les fuites. Les deux principales techniques de pose sont :

- L'étanchéité bicouche : Cette technique implique l'application de deux couches de membrane bitumineuse. La première couche est fixée à la surface de la toiture à l'aide d'une flamme ou d'une colle spéciale. La deuxième couche est fixée sur la couche d'interposition. Ces deux couches se chevauchent pour créer une barrière étanche.
- L'étanchéité monocouche : Cette technique implique l'utilisation d'une seule couche de membrane bitumineuse ou synthétique.

La toiture la plus couramment réalisée est la toiture chaude traditionnelle, qui a comme superposition de couches :

- Pare-vapeur (ou barrière vapeur). Il est constitué d'une couche caractérisée par sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Placé du côté chaud de l'isolation, il a pour but d'entraver le cheminement de la vapeur d'eau (migration ou diffusion) et en diminuer le débit afin d'éviter tout risque de condensation.
- Couche d'isolation. L'isolation thermique est quantifiable par le coefficient de transmission de chaleur (U). En fonction du chantier, les normes peuvent imposer une valeur afin de garantir une isolation convenable. Il existe différentes sortes d'isolants thermiques.
- Bicouche. L'étanchéité en bicouche permet de garantir l'étanchéité de la toiture.

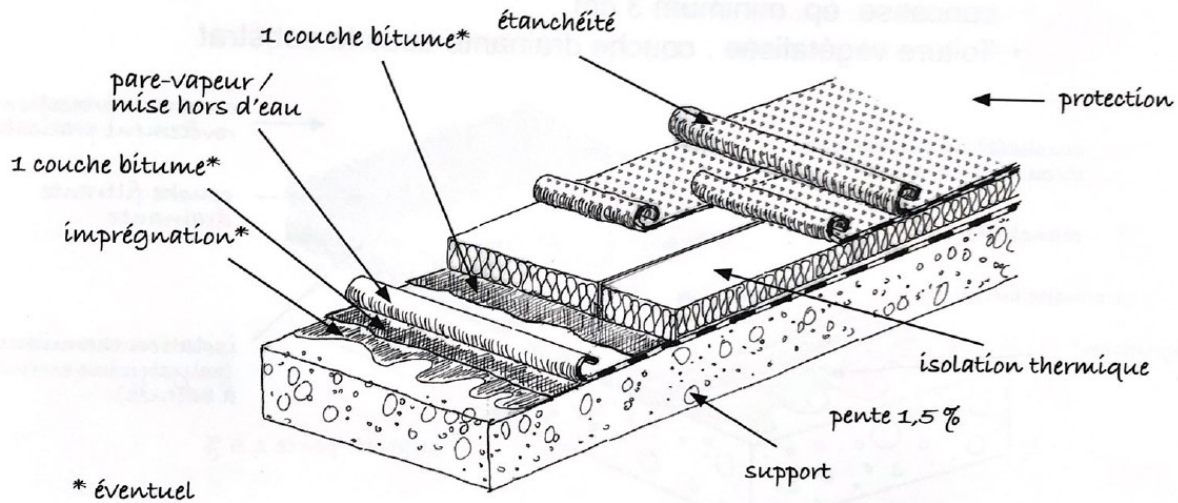


FIGURE 1.2 – Détails des couches d’une toiture chaude traditionnelle (DOURNOW, 2014)

Les lés d’étanchéité peuvent être fixés selon deux méthodes : le soudage en plein ou la pose libre. Souder en plein des lés implique de passer au chalumeau sur l’ensemble de la surface du lé. La chaleur va permettre de faire fondre le bitume, qui pourra alors créer une adhérence avec la couche inférieure. La pose libre est quant à elle plus rapidement applicable. Lors de la pose des lés d’étanchéité, ces derniers sont chevauchés afin de créer une couche étanche. Pour la pose libre, c’est uniquement cette zone de chevauchement qui est chauffée au chalumeau. Ainsi les différents lés sont soudés ensemble, mais pas à la couche inférieure.

1.4 Calculation et Catalogues

1.4.1 Calculation

Une étape primordiale pour une société de construction est de pouvoir prédire le plus justement possible le coût de ses chantiers. Ainsi, en amont du chantier, une équipe est chargée de cette étape : la calculation. C’est la bonne estimation du coût du projet qui va permettre ou non son succès. Il va donc être intéressant de comprendre le fonctionnement de ce système, afin de pouvoir par la suite essayer de l’améliorer.

Afin de comprendre le fonctionnement du système de calculation, prenons l’exemple d’un

chantier. Le calculateur va devoir apposer un prix à différents "articles". Les articles constituent l'offre qui sera faite au client. Ils décrivent les différentes étapes du projet de construction ou de rénovation. Ils incluent des informations sur les matériaux, les équipements utilisés, le type d'étanchéité appliqué... Comprendre le fonctionnement de la calculatrice, revient donc à appréhender la manière dont un calculateur assigne un prix aux différents articles.

Les articles sont référencés dans différents "catalogues". En ce qui concerne l'entreprise PHIDA, le plus courant est d'utiliser le catalogue mis en place en interne : appelé "catalogue libre". Il existe également le catalogue des articles normalisés (CAN), commun à toutes les entreprises. D'autres entreprises utilisent leur propre catalogue, comme le catalogue libre de PHIDA.

1.4.2 Les types de catalogues

1.4.2.1 Catalogue des articles normalisés (CAN)

En Suisse, le catalogue des articles normalisés (CAN) pour l'étanchéité est un outil de référence pour les professionnels de la construction. Il permet aux propriétaires et aux autorités de construction de s'assurer que les travaux d'étanchéité sont réalisés avec des produits de qualité supérieure, garantissant qualité et durabilité des travaux effectués.

Le CAN a une structure bien précise afin de rendre son utilisation la plus simple possible. (OPPER et TSCHOPP, 2008) Les articles sont rangés par catégories, par ordre d'intervention au cours du chantier. Afin d'aider à l'utilisation, un système de numérotation bien précis est appliqué.

Le CAN a néanmoins un inconvénient, du fait du nombre très important d'articles, il est compliqué à utiliser. C'est pourquoi PHIDA a mis en place son propre catalogue : le "catalogue libre".

1.4.2.2 Le catalogue libre

Le catalogue libre a le même fonctionnement que le CAN. Cependant, les articles étant moins détaillés que dans le CAN, le nombre d'articles du catalogue libre est considérablement réduit, ce qui facilite son utilisation.

A titre d'exemple, comparons les articles qui concerne l'enlèvement de pare-vapeur dans le chapitre : Installations de chantier, selon le CAN (Tableau 1.2) et selon la catalogue libre (Tableau 1.1).

N° chapitre	N° position	Article	Unité
140		Enlèvement de pare-vapeur	
141	100	Pare-vapeur bitumineux	
141	110	Pose libre	m2
141	120	Pose collée	m2
141	200	Pare-vapeur en matière synthétique	
141	210	Pose libre	m2
141	300	Dépose de relevé de pare-vapeur	
141	310	Pose collée	
141	311	Hauteur mm 100 à 250	ml
141	312	Hauteur mm	ml

TABLE 1.1 – Catalogue libre - enlèvement de pare-vapeur

N° chapitre	N° position	Article	Unité
135		Enlèvement de pare-vapeur. Matériaux non réutilisés. Déchets prêts à être évacués.	
135	100	Pare-vapeur bitumineux	
135	110	Pose libre, chevauchements collés	m2
135	111	En 1 couche. Désignation du type	m2
135	112	Nombre de couches. Désignation du type	m2
135	113	à .119 dito .112	
135	120	Pose collée en plein.	
135	121	En 1 couche. Désignation du type	m2
135	122	Nombre de couches. Désignation du type	m2
135	123	à .119 dito .112	
135	130	Pose soudée. Enlèvement en régie	
135	131	Chef d'équipe. Désignation du type	h
135	132	Ouvrier qualifié. Désignation du type	h
135	133	Ouvrier de la construction. Désignation du type	h
135	134	Catégorie professionnelle. Désignation du type	h
135	135	à .139 dito .134	
135	181	Description	up
		Nombre de couches	
		Mode de pose	
		Catégorie professionnelle	
		Désignation du type	
135	182	à .189 dito .181	
135	200	Pare-vapeur en matière synthétique	
135	210	Pose libre, chevauchements collés	
135	211	En 1 couche. Désignation du type	m2
135	212	Nombre de couches Désignation du type	m2
135	213	à .219 dito .212	
135	281	Description	up
		Nombre de couches	
		Mode de pose	
		Désignation du type	
135	282	à .289 dito .281	
135	801	Description	up
		Nombre de couches	
		Mode de pose	
		Catégorie professionnelle	
		Désignation du type	
135	802	à .889 dito .801	

TABLE 1.2 – CAN - enlèvement de pare-vapeur

Cet exemple est intéressant car il illustre bien le lien entre CAN et catalogue libre.

La numérotation du catalogue des articles normalisés est un système utilisé pour classer et identifier les différents articles d'un catalogue. Il permet de regrouper les articles en catégories logiques et de les identifier de manière unique. La numérotation de ces deux catalogues fonctionne de manière similaire. Deux nombres à 3 chiffres sont associés à chaque article.

Dans notre exemple, on peut remarquer que les numéros sont quasiment similaires. Pour le CAN, la section contient les articles pour l'enlèvement du pare-vapeur, mais également des matériaux non réutilisés et des déchets prêts à être évacués. Alors que pour le catalogue libre, la section ne contient que l'enlèvement du pare-vapeur. En ce qui concerne le pare-vapeur, on peut remarquer qu'il y a une décomposition similaire des articles.

Cet exemple illustre bien l'intérêt du catalogue libre : plus simple d'utilisation du fait de son nombre réduit d'articles, uniquement les articles couramment utilisés.

Pour constituer la liste des articles pour un chantier, les calculateurs parcourent les articles du catalogue libre pour savoir ceux qui s'appliquent dans le cas du chantier. Une fois la sélection effectuée, il faut y ajouter les prix. Dans le cas où les articles ont été dressés par une autre entreprise, les articles peuvent provenir du CAN ou bien d'articles internes d'une autre entreprise. Le calculateur doit alors y ajouter ses prix pour les remettre au client.

A noter que les offres effectuées avec le catalogue libre représentent la majorité des chantiers. Ainsi, dans le cadre de ce travail, on ne va s'intéresser qu'aux articles du catalogue libre.

Cette décomposition par articles permet de reprendre le système de classifications analogue à celui du Code des coûts de construction Bâtiment (eCCC-Bât) (SIA 506 511, 2020) (OPPER, 2009), proposée par le CRB, Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction. Ainsi, les différentes tâches sont réparties. L'estimation du prix peut alors être relativement précise. Quelques ouvrages de la littérature décrivent cette méthode d'estimation des prix, par décomposition en articles. Néanmoins, il n'existe pas d'ouvrages spécifiques à l'estimation pour l'étanchéité. Les différents secteurs du bâtiment étant très divers il est compliqué d'avoir de la littérature correspondant aux spécificités de chacun.

1.5 Objectifs du projet

Avant tout chantier, l'entreprise se doit d'évaluer l'envergure des travaux afin de pouvoir les planifier au mieux, mais aussi d'assurer sa rentabilité. Au sein de l'entreprise, un calculateur (personne en charge de la calculation) est en charge d'estimer les coûts liés au chantier. Sur la base de ses estimations, l'entreprise va pouvoir proposer ses prix au client.

L'estimation des prix la plus juste possible est donc extrêmement importante pour l'amélioration des performances. C'est ainsi que l'idée de ce projet est apparue. Serait-il possible d'améliorer l'estimation des prix ?

L'idée originelle du projet était de pouvoir estimer les prix en fonction des caractéristiques des chantiers. (AHUJA et CAMPBELL, 1988) Pour ce faire, il avait été pensé d'étudier des données (prix rendus et caractéristiques des chantiers correspondants) afin d'en tirer un modèle. Cependant, ce projet a dû être adapté afin de compenser l'absence de ces données essentielles au projet et la volonté d'utilisation d'un logiciel.

Il y a tout d'abord l'idée initiale d'étudier les rendements. Cette étape comprend l'étude du fonctionnement des rendements, ainsi que l'analyse des prix rendus par PHIDA, aux cours des dernières années, afin d'en extraire les rendements correspondants.

La seconde partie consiste en l'implémentation sur *BauBit* de l'analyse des prix. L'idée est de pouvoir faciliter la calculation ainsi que son exploitation par la suite. De plus cet outil très complet permettrait d'avoir un meilleur contrôle sur la calculation et de faciliter par la suite la réalisation des chantiers.

2 | Calculation

2.1 Obtention d'un chantier

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir un chantier en Suisse, qui vont varier en fonction des types de projets et des situations spécifiques. Au sein de *PHIDA Étanchéité*, deux cas vont principalement se distinguer ; une soumission a été réalisée ou non.

Lorsque la soumission a été conçue au préalable (par PHIDA ou une autre entreprise), le travail du calculateur va être de renseigner les prix pour l'ensemble des tâches à effectuer. En cas d'absence de soumission, il faut d'abord réaliser une offre qui va détailler l'ensemble des prestations pour ensuite, indiquer les prix.

2.1.1 L'appel d'offre

Dans le cadre des chantiers avec des montants importants, une mise à l'enquête est obligatoire. Une entreprise ou une organisation demande des soumissions à plusieurs entrepreneurs pour un projet de construction particulier. L'objectif de l'adjudication est d'attribuer le projet à l'entrepreneur offrant à la fois les meilleures qualifications et le meilleur prix.

Le processus d'adjudication commence souvent par la publication d'un avis d'appel d'offres. Cet avis précise les spécifications techniques du projet, les exigences en matière de délais, les conditions de paiement, les critères d'évaluation et les exigences en matière de conformité. Les entreprises intéressées peuvent alors soumettre une proposition formelle qui répond à ces spécifications.

Une fois que toutes les soumissions ont été reçues, un comité d'évaluation est souvent constitué pour évaluer les propositions et sélectionner la meilleure offre. Les critères d'évaluation peuvent inclure la qualité de la proposition, les qualifications de l'entrepreneur, les délais proposés et le prix offert.

Une distinction est à faire en fonction des marchés publics ou privés. Dans le cas d'un marché privé par exemple, il est possible de proposer des variantes aux travaux mentionnés dans la soumission. La proposition de variantes est importante à considérer, car cela peut avoir de fortes influences sur le prix; par exemple, si en soumission un type d'isolation est prévu mais qu'un autre type d'isolation nettement moins cher pourrait convenir, alors répondre à l'appel d'offre avec une isolation moins chère réduit son prix, ce qui va augmenter les chances d'obtenir le chantier. A l'inverse, dans le cadre d'un marché public, la procédure est plus stricte. Il est impossible de modifier les textes de la soumission, seuls les prix peuvent y être renseignés. Il est uniquement possible d'indiquer des remarques sur le projet en annexes. Concernant les prix, une légère nuance est également à considérer. En cas de marché public, il sera totalement impossible de modifier ou ajuster un prix par la suite. Lors du renseignement des prix, il est alors primordial d'être le plus juste possible et de ne pas commettre d'erreur. C'est ainsi que par exemple les sous-traitants et les fournitures coûteuses sont étudiés en détail afin de ne pas avoir de surprises par la suite. Dans le cadre d'une procédure privée, les discussions sont plus aisées. Dans le cas d'un appel d'offre, le prix est le critère qui influence le plus l'adjudication. Être en mesure d'offrir des prix compétitifs, tout en ayant connaissance des risques pris afin de limiter les pertes, est donc primordial.

2.1.2 La procédure de gré-à-gré

La procédure de gré-à-gré est autorisée pour les chantiers d'un montant inférieur à 150'000 francs pour un marché de travaux de second œuvre.(CONFÉDÉRATION SUISSE, 2023) Cette méthode d'attribution de contrats de construction permet à un client de sélectionner directement une entreprise ou un entrepreneur sans passer par un processus d'appel d'offres public. Elle implique une négociation directe entre le client et l'entrepreneur choisi.

Dans ce cas, les discussions sont bien plus importantes et les prix peuvent être ajustés en fonction du client et du travail spécifique demandé.

Une fois que le travail à effectuer est bien défini, vient l'étape de l'estimation des prix pour chacun des postes de travail.

2.2 Estimation des prix

2.2.1 Les différents coûts

Une fois les articles choisis, le calculateur doit alors associer un prix à chaque article. Ce prix devra comprendre le coût "réel" sur chantier de ce travail pour l'entreprise mais également les coûts en encadrement, les investissements, les bénéfices etc. Par la suite, on va s'intéresser uniquement à l'estimation du coût "réel" sur chantier pour l'entreprise. En effet, une fois ce dernier estimé, une seconde étape pourrait être d'ajuster ces prix afin de considérer les bénéfices et les risques que l'entreprise souhaite prendre. Ces ajustements de prix sont liés aux décisions de la direction. Il est important de bien dissocier ces deux étapes. En effet, le coût "réel" est directement lié aux coûts du chantier alors que le prix de vente comprend en plus les charges de l'entreprise.

Il existe de nombreux coûts associés à un chantier de construction. Certains des coûts les plus courants incluent :

- Les coûts de main-d'œuvre : salaires des travailleurs engagés sur le chantier.
- Les coûts des matériaux : matériaux nécessaires pour la construction.
- Les coûts d'équipement : coûts liés à la location ou à l'achat des équipements nécessaires à la construction, tels que les grues, les camions, les pelles, etc.
- Les coûts de transport : coûts liés au transport des matériaux, des équipements sur le chantier et des déplacements.
- Les coûts administratifs : coûts liés à la gestion du chantier, tels que les coûts de gestion des documents, les coûts de gestion de la paie, etc.
- Les coûts de sous-traitance : coûts liés à l'engagement de sous-traitants pour des travaux spécifiques sur le chantier.

L'entreprise PHIDA décompose ses prix en trois catégories :

- Main-d'œuvre : estimation du temps de pose + charges et frais fixes
- Matériaux
- Sous-traitant (entreprise) et Charges directes (ex : camion et grue)

2.2.2 Comptabilité analytique

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des revenus de PHIDA, il est intéressant d'étudier la comptabilité analytique. Cette comptabilité a été mise en place par PHIDA et est exposée afin de mieux appréhender la composition des prix.

La comptabilité analytique est une technique de comptabilité qui permet de suivre et d'analyser les coûts et les revenus liés à des activités spécifiques ou à des projets. Elle permet de comprendre les tendances et les performances des différentes activités de l'entreprise et d'identifier les domaines qui nécessitent une attention particulière. La comptabilité analytique utilise des informations détaillées sur les coûts pour établir des budgets, évaluer les performances et prendre des décisions stratégiques. Elle est souvent utilisée dans les entreprises qui ont des activités complexes et qui ont besoin d'une analyse détaillée pour comprendre les coûts et les performances de ces activités.

La littérature traite de l'économie de la construction de manière très générale, et souvent pas du point de vue de l'entrepreneur. Néanmoins, un ouvrage (PAULOZ et LIÉBENS, 1990) détaille le fonctionnement du prix de vente. Afin d'avoir une base de comparaison, il semble intéressant d'étudier le principe exposé par cet ouvrage, puis de le confronter au fonctionnement de l'entreprise *PHIDA*.

2.2.2.1 Principes selon la littérature

(PAULOZ et LIÉBENS, 1990) distingue le « Prix de Revient » (PR) et le « Prix de Vente » (PV). Le premier correspond au prix que le travail coûte à l'entreprise, alors que le second est le prix facturé au client. Une distinction entre prix « prévisionnels » et prix « réels » est également effectuée.

Le bénéfice est alors défini comme la marge positive entre le PV et le PR réel. A contrario, la perte correspond à une marge négative entre le PV et le PR réel. Le rôle du calculateur est alors d'estimer le PV le plus adapté possible au PR réel. Le PV est composé du prix de revient prévisionnel ($PR_{prévisionnel}$) et du bénéfice espéré (B).

$$PV = PR_{prévisionnel} + B \quad (2.1)$$

Le bénéfice est fixé en fonction de la stratégie de l'entreprise. Il reste donc à estimer le prix de revient prévisionnel.

(PAULOZ et LIÉBENS, 1990) définit le prix de revient comme :

$$PR = DS + FC + FG \quad (2.2)$$

avec :

- Déboursés secs ou directement affectables (DS) : frais de main-d'oeuvre, matériaux, matériel, matières consommables
- Frais de chantier (FC) : frais relatifs à un chantier en général et non à une partie spécifique de celui-ci (frais d'encadrement et de personnel non directement productif, frais de matériel non affectable, frais d'installation, frais complémentaires de chantier)
- Frais généraux (FG) : frais liés au fonctionnement de l'entreprise, composés des FG d'exploitation et des FG de siège

Lors de la réalisation d'une offre, le calculateur doit ainsi estimer le prix de revient prévisionnel selon l'expression 2.2. Pour étudier les résultats du chantier, il faut également déterminer le PR réel, ce qui implique de connaître l'ensemble des coûts du chantier.

2.2.2.2 Comptabilité analytique au sein de *PHIDA*

PHIDA a mis en place une comptabilité différente de celle qui a été étudiée dans la littérature.

• Prix de revient

Pour *PHIDA*, le prix de revient (PR) est défini comme étant le coût d'une heure d'ouvrier. Ce prix prend en considération le salaire de l'ouvrier, mais également les charges qui y sont liées. De plus, l'entreprise a des frais fixes. Afin de les considérer dans les différents chantiers, *PHIDA* les incorpore dans le prix de revient. Cela a pour avantage de considérer les frais fixes en proportion du travail effectué, puisque les frais fixes sont ainsi liés au temps de travail des ouvriers.

Voici ci-dessous comment le Groupe *PHIDA* définit le prix de revient, soit combien "coûte" une heure d'ouvrier.

- Salaire de l'ouvrier :	35.-/heure	}	Frais Variables : 50.-/heure
- Charges patronales :	15.-/heure		
- Majoration Frais fixes :	35.-/heure	}	Frais Fixes : 40.-/heure
- Risque / Bénéfice :	5.-/heure		
Total : 90.-/heure			

TABLE 2.1 – Prix de revient

- **Prix de vente**

Pour un chantier terminé, les différents frais sont décomposés comme suit :

[CB]	CHIFFRE D’AFFAIRES BRUT	130 %
[ST]	SOUS-TRAITANTS	30 %
<hr/>		
[CN]	CHIFFRE D’AFFAIRES NET	100 %
[MA]	MARCHANDISES	35 %
[MO]	MAIN D’OEUVRE	37 %
[CD]	CHARGES DIRECTES	3 %
<hr/>		
[MB]	MARGE BRUTE	25 %
[FF]	FRAIS FIXES	21 %
<hr/>		
[RE]	RESULTAT D’EXPLOITATION	4 %

TABLE 2.2 – Résultat de chantier

Cette décomposition des frais de chantier permet de visualiser les différents frais. Avant un chantier, il faut prévoir ces différents frais. Et, une erreur dans leur estimation pourrait réduire le résultat d'exploitation. D'où l'intérêt d'être en capacité d'estimer du mieux possible les différents frais qui composent un chantier.

Le prix de vente est un indicateur significatif dans le cadre du suivi du chantier. Il correspond au résultat dégagé par heure de travail sur le chantier, une fois que l'ensemble des charges externes ont été comptabilisées.

$$Prix\ de\ vente\ [PV] = \frac{(CB - ST - MA - CD)}{nombre\ d'heures} \quad (2.3)$$

avec :

- CB : Chiffre d'affaires brut
- ST : Sous-traitants
- MA : Marchandises
- CD : Charges directes

En comparant le prix de vente (PV) et le prix de revient (PR), il est possible d'étudier l'état du chantier.

$$PV > PR \implies \text{chantier mieux réussi que le budget} \quad (2.4)$$

$$PV < PR \implies \text{chantier moins bien réussi que le budget} \quad (2.5)$$

La méthode de comptabilité selon (PAULOZ et LIÉBENS, 1990) et *PHIDA* est relativement différente. *PHIDA* rapporte ses résultats en heures travaillées, ce qui permet d'avoir une base de comparaison entre les différents chantiers. Avoir cet outil permet d'avoir une mesure qui quantifie facilement le résultat du chantier.

Néanmoins, l'inconvénient est de "masquer" la composition de ce prix. En effet, le prix de revient comprend à la fois les frais liés à l'emploi d'un ouvrier pendant une heure, mais également les frais fixes de l'entreprise. Il est donc primordial que ce prix soit ajusté au niveau de la calculation en fonction des décisions stratégiques de l'entreprise.

2.2.3 Estimation des coûts liés au chantier

Dans le descriptif de la soumission, pour chaque position une quantité est associée. Le rôle de la calculation va être d'inscrire un prix unitaire, qui en le multipliant par la quantité permettra de déterminer le montant de cet article. Afin de déterminer combien ce poste va "réellement" coûter à l'entreprise, il est nécessaire d'estimer les coûts des 3 différents prix qui peuvent composer le prix d'un article (main-d'œuvre, fourniture et sous-traitant).

Afin d'avoir des notions de quantités de fournitures nécessaires par mètre carré ainsi que des temps de travail nécessaires pour effectuer une tâche précise, des rendements sont utilisés.

Toutefois du fait de la spécificité de chaque chantier, ces rendements doivent être ajustés. C'est ainsi que l'appréciation du calculateur est importante afin d'être le plus juste possible.

Afin d'appréhender cette notion de rendements, il sera détaillé les rendements pour la fourniture ainsi que pour la main-d'œuvre. Les rendements présentés ci-après sont très théoriques et ne tiennent pas compte de la spécificité de chaque chantier. Ils permettent donc d'avoir des ordres de grandeurs.

2.2.3.1 Rendements de fourniture

Chaque type de fourniture est spécifique et a donc des rendements différents. Pour la fourniture, le rendement correspond à la quantité de fourniture nécessaire par unité de mesure. Ces rendements sont relativement constants, ce qui permet d'avoir une idée relativement précise de la consommation exacte de fourniture.

	Quantité effective	Quantité réelle
Couche d'apprêt	-	0,3 [kg/m^2]
Étanchéité	1 [m^2]	1,15 [m^2]
Isolation	1 [m^2]	1,03 [m^2]
Gaz - pose libre	-	50 [g/m^2]
Gaz - pose pleine	-	400 [g/m^2]
Feutre	1 [m^2]	1,12 [m^2]
Panneau de rétention	1 [m^2]	1,03 [m^2]
Substrat	1 [m^2]	1,15 [m^2]

TABLE 2.3 – Rendements des fournitures

- **Couche d'apprêt**

Les supports vont plus ou moins absorber l'enduit, ce qui va influencer sa consommation.

Une consommation moyenne de 300 [g/m^2] peut être considérée. La densité est considérée comme étant égale à 1 (1 [kg] = 1 [L]).

- **Lé d'étanchéité**

Pour estimer la consommation « réelle » des lés (rouleaux) d'étanchéité il faut considérer le chevauchement et les découpes.

Le chevauchement correspond au fait que sur chantier, afin de rendre étanche la jointure entre deux lés, les ouvriers font superposer sur environ 10 [cm] les deux lés. Puis afin de les rendre parfaitement étanche, ils font chauffer cette surface à l'aide de chalumeaux. Étant donné que les lés d'étanchéité ont une largeur de 1 [m], le chevauchement correspond à environ 10 % de la largeur posée. Toutefois, afin de considérer les approximations de la réalisation sur chantier, il est usuel de prendre 12 % de fournitures supplémentaires pour prendre en compte le chevauchement.

Un second paramètre est également à prendre en considération ; les découpes. Sur chantier des découpes sont nécessaires afin de répondre aux exigences de la toiture (ventilation, coupoles, bordure, etc.). Il est d'usage de considérer 3 % de fourniture supplémentaires pour palier aux découpe.

Ainsi, pour 1 [m²] effectif d'étanchéité, en réalité, 1,15 [m²] seront utilisés.

- **Isolation**

Pour l'isolation, étant donné qu'il n'y a pas de chevauchement, il faut uniquement compter les chutes de 3 %. Ainsi, pour 1 [m²] effectif d'étanchéité, en réalité, 1,03 [m²] seront utilisés.

- **Gaz**

Afin de souder les différents lés d'étanchéité, les ouvriers utilisent des chalumeaux fonctionnant au gaz. Pour avoir une estimation complète des coûts de fournitures, il est nécessaire de comptabiliser la consommation de gaz.

La consommation varie en fonction des conditions extérieures (notamment la température). En fonction du type de pose, les rendements couramment utilisés sont :

— Pose libre : 50 [g/ml] = 50 [g/m²]

— Pose pleine : 400 [g/m²]

(Pour rappel la notion de pose libre et pose pleine est détaillée à la section 1.3)

- **Feutre**

Les couches de feutre sont des rouleaux qui sont juste déroulés les uns à côté des autres avec un chevauchement de 10 [cm]. Ainsi, tout comme pour le chevauchement des lés d'étanchéité, il faut compter 1,12 [m^2] pour 1 [m^2] effectif.

- **Panneau de rétention**

Les panneaux de rétention sont disposés les uns à côté des autres. Ainsi, de même que pour l'isolation, afin de considérer les chutes, il faut compter 1,03 [m^2] pour 1 [m^2] effectif.

- **Substrat**

Lorsque le substrat est mis en place il va se tasser. Le volume sera donc plus faible que le volume transporté. Afin d'anticiper cette diminution de volume, il faut calculer le foisonnement du substrat. Étant donné un coefficient de foisonnement de 15 %, pour 1 [m^3] effectivement végétalisé, il faut commander 1,15 [m^3].

2.2.3.2 Rendements de travail

Afin d'estimer le temps de travail pour chacune des tâches à effectuer, il est utilisé des rendements de travail en fonction du type de tâche à effectuer. Cependant, le rendement de travail est quant à lui beaucoup plus incertain que pour les fournitures. La Table 2.4 indique les rendements théoriques qui ont été présentés aux conducteurs de travaux au cours d'une formation en interne.

		Par homme	Pour une équipe de 3 hommes
Couche d'apprêt	Plat	800 [m^2/j]	2'400 [m^2/j]
	Relevés et retombées	400 [m^2/j]	1'200 [m^2/j]
Barrière vapeur	Pose libre	Plat	600 [m^2/j]
	Soudée en plein	Plat	200 [m^2/j]
		Relevés et retombées ¹	100 [ml/j]
Isolation	Plat	200 [m^2/j]	600 [m^2/j]
	En pente	150 [m^2/j]	450 [m^2/j]
Bicouche		100 [m^2/j]	300 [m^2/j]
Feutre		800 [m^2/j]	2'400 [m^2/j]
Panneau de rétention		250 [m^2/j]	750 [m^2/j]

TABLE 2.4 – Rendements de pose

Comme il a été vu à la section 1.2, ces chiffres sont discutables. La spécificité de chaque chantier est telle qu'il n'est pas possible de figer des rendements de travail et de les appliquer à tous les chantiers.

1. dans l'hypothèse de relevés inférieurs à 500 mm

3 | Base de données et Analyse des données

3.1 Création de la base de données

BauBit est un logiciel qui permet de suivre l'intégralité d'un projet ; depuis sa création jusqu'à son achèvement.

Au sein de *PHIDA*, *BauBit* sert de base de données pour l'ensemble des projets. Chaque projet y est renseigné. Lors de la création d'un projet, différentes informations peuvent être inscrites, telles que les informations administratives relatives au projet, ou encore la soumission/offre.

Afin d'obtenir les prix rendus par *PHIDA*, les prix ont été extraits de *BauBit*. Ce dernier dispose d'un outil *Statistiques* permettant d'accéder à l'ensemble des données enregistrées. Le fonctionnement est comparable à celui des "Tableaux croisés dynamiques" sur *Excel*. Une figure illustrant le fonctionnement de la sélection des données est présentée à la Figure 3.1.

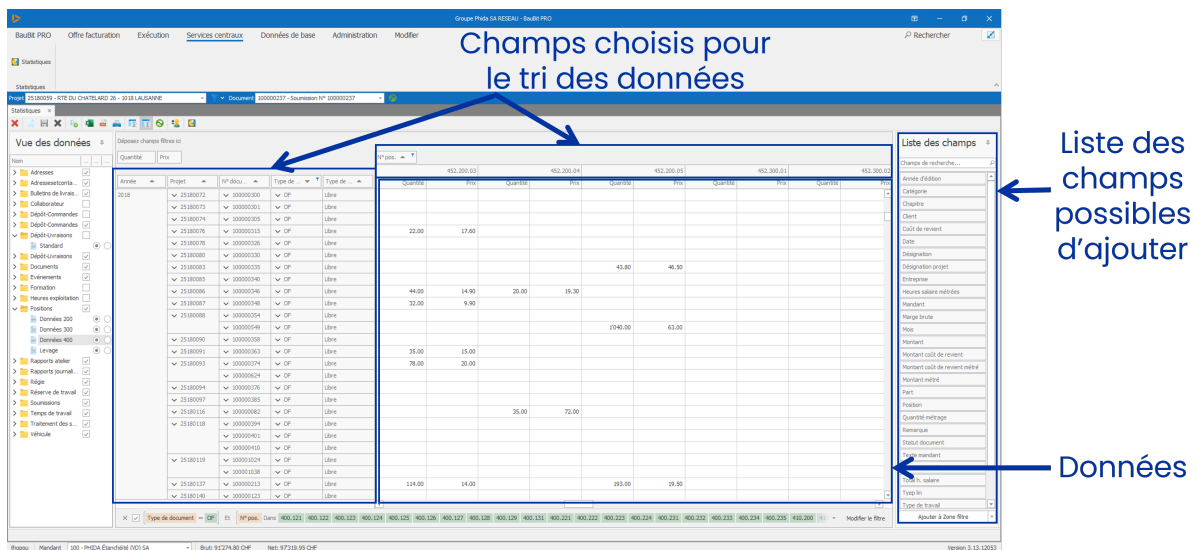


FIGURE 3.1 – Procédé de sélection des données sur *BauBit*

Une fois les données sélectionnées, il est possible de les exporter vers un fichier *Excel*. Cependant, lors de l'exportation des données, le fichier n'est pas exploitable tel quel.

Année	Projet	N° document	Type de document	Type de catalogue	Quantité	Prix
2014	OP	251800146	OP	libre	36,00	2,20
2014	OF	20000140	OF	libre	42,00	2,20
2014	OP	20000146	OP	libre	41,00	2,20
2015	OP	20000146	OP	libre	41,00	2,20
2015	OF	20000140	OF	libre	42,00	2,20
2015	OP	20000146	OP	libre	41,00	2,20
2016	OP	2517100	OP	libre	9 201,00	0,00
2016	OF	20000124	OF	libre	8 889,00	0,00
2016	OP	25180013	OP	libre	1 137,00	2,75

FIGURE 3.2 – Données extraites de *BauBit* vers *Excel*

Un travail de mise en forme a été nécessaire afin de mettre en page le fichier (suppression des lignes inutiles, suppression des informations à doublon).

Un même projet dans *BauBit* peut avoir plusieurs documents. En effet, il est courant que les offres établies soient modifiées et ajustées au cours d'un projet. Afin de conserver l'historique des offres, il arrive qu'un nouveau document soit créé avec la nouvelle offre, dans le même projet. Afin de ne pas compter plusieurs fois des offres qui correspondent au même projet, les offres les plus anciennes ont été supprimées.

Après avoir commencé par traiter les données en VBA sur *Excel*, il a semblé plus cohérent de constituer la base de données à l'aide de *Python*. Un travail avec *Python* a alors permis de mettre en forme ces données, afin de les rendre exploitables. Pour ce faire, un fichier de code a été écrit. A partir du fichier *Excel* extrait de *BauBit*, ce code met de l'ordre dans l'affichage des données.

Étant donné que toutes les données ne sont pas enregistrées dans le même fichier sous *BauBit*, il n'est pas possible d'extraire toutes les données ensemble. Pour pallier ce problème, il faut

procéder en plusieurs phases. 2 fichiers différents sont donc extraits, le premier avec les prix et les quantités pour les articles sélectionnées du catalogue libre pour l'ensemble des projets ; le second document contient les caractéristiques des différents projets. Les différentes caractéristiques qui ont pu ainsi être tirées de *BauBit* sont les suivantes :

- Date de création de projet sur *BauBit* (correspondant à la date de la réalisation de l'étude)
- Type de construction (neuf, rénovation, bricoles, entretiens...)
- Type de mandat (entreprise générale, entreprise publique, privé, gérances, architectes)
- Responsable du projet en interne
- Type de chantier (chantier Étanchéité, chantier Résine, chantier Ferblanterie...)
- Architecte
- Client
- Conducteur de travaux
- Direction de travaux
- Statut du projet (encours, fermé...)
- Actif (indique si le chantier est encore en cours)
- Net (prix total net de l'offre)
- Brut (prix total brut de l'offre)

Afin de limiter les calculs, il a été mis en place un code permettant le tri des données et de les stocker sur un fichier *csv*. Ainsi lorsque l'utilisation des données sera nécessaire, il suffira de lire le fichier *csv* en *dataframe* (format de tableau sous *Python*). 2 fichiers de stockage des données ont donc été mis en place. Afin de rendre par la suite leur utilisation plus facile, il a été également choisi de calculer/ajouter des données.

Le premier concerne les prix pour les différents projets. Pour chaque projet, pour les articles sélectionnés, il y a le prix. Mais sont également calculés, le prix de fourniture ainsi que le rabais, escompte et prorata (désigné par *REP* dans ce travail pour alléger l'écriture).

		Prix article	Prix fourniture	REP
Projet	N° document			
25220374	100008371	93.90	14.316120	1.055460
25236057	100008597	58.00	14.316120	1.023150
25236082	100008714	29.00	14.316120	1.023150
25236132	100009031	29.75	14.316120	1.015597
25230001	100008428	32.70	14.713790	1.044224
...
25190043	100006536	25.40	12.228352	0.972288
25216687	100008209	27.80	15.111460	1.055460
25200306	100006276	65.60	15.128077	0.982634
25216652	100006091	23.40	12.228352	1.055460
25190260	100009171	40.00	14.316120	1.055561

FIGURE 3.3 – Données relatives au prix

Le second fichier contient les différentes caractéristiques des projets. Un travail a été effectué afin de transformer certaines données en variable discrète, afin de pouvoir rendre leur utilisation plus facile par la suite.

Projet	N° document	Date	Net	Somme Quantité	Résultat financier	Type de construction - 100	Type de construction - 105	Type de construction - 110	Type de construction - 120	Type de construction - 125	Type de construction - 130	Type de mandat - 200
25186306	100005102	2021-05-25 08:04:52.007	115883.30	0.0	20.233899	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25190400	100008615	2023-01-31 07:55:00.983	37771.60	0.0	0.698801	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
25190402	100002610	2019-09-18 08:21:46.937	410332.05	0.0	56.313953	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
25180167	100000211	2018-03-01 14:10:08.013	10289.15	0.0	-79.119538	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25180171	100000253	2018-03-26 08:25:00.897	18429.80	0.0	-15.955833	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
...
25180146	100004415	2021-01-15 14:37:34.837	30421.05	0.0	-26.707400	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25186294	100000839	2018-07-18 14:05:24.030	33535.40	0.0	20.286138	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25180153	100000150	2015-07-31 11:36:27.093	5793.10	0.0	55.352703	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25190394	100002590	2019-09-17 09:35:05.513	12495.45	0.0	11.971676	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
25190396	100002593	2019-09-10 08:25:44.080	34335.30	0.0	-43.206709	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FIGURE 3.4 – Données relatives aux paramètres des projets

Ces fichiers mis en place, il est possible de commencer à les exploiter.

3.2 Sélection des données d'étude

Pour commencer, il sera étudié uniquement un seul article afin de pouvoir l'analyser en profondeur.

En effet, différents essais ont été réalisés sans succès convaincant. Il a alors été décidé d'approfondir le travail pour un article en particulier. Par la suite, en fonction des résultats obtenus, l'analyse pourrait être généralisée à d'autres articles.

Le première étape est alors de choisir l'article qui semblerait être le plus intéressant pour une telle analyse. Par la suite, une étude de différents paramètres sera faite pour tenter d'estimer le prix de l'article. Une analyse selon le rendement sera également effectuée.

L'article idéal devrait comprendre les caractéristiques suivantes :

- avoir un grand nombre de données
- être un article important (correspondre à un montant significatif d'une offre)

Afin de pouvoir choisir l'article, la liste de tous les articles qui semblent importants a été dressée. Par article important, on entend article qui représente une part importante du montant global d'une offre ; mais également un article qui est utilisé dans de nombreux chantiers. Ainsi, pour chacune des grandes étapes (Pare-vapeur, Isolation, Étanchéité), les articles les plus intéressants ont été sélectionnés. Afin de choisir parmi ces articles celui qui sera étudié il a été étudié le nombre de données pour chacun de ces articles. En effet, afin d'espérer avoir des résultats les plus probants possibles, il faut privilégier un grand nombre de données.

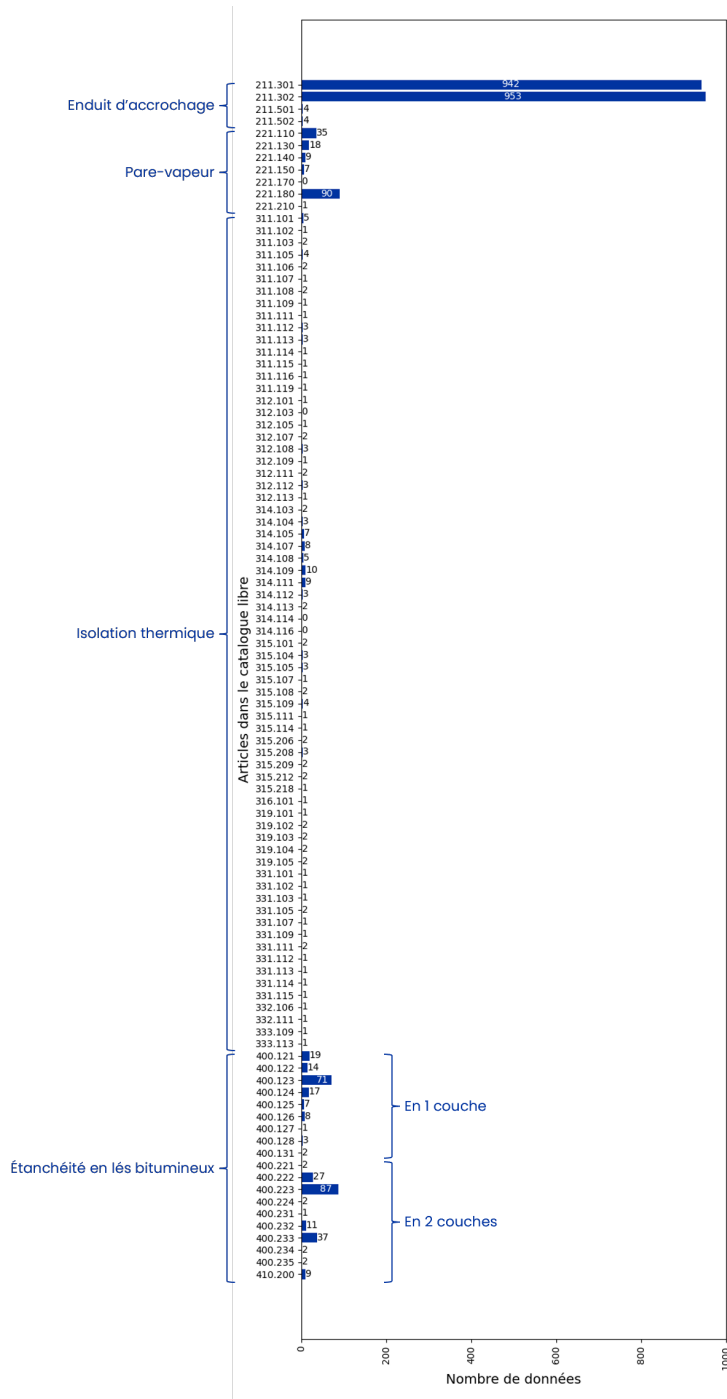


FIGURE 3.5 – Nombre de données par article

En observant la Figure 3.5, il est possible de remarquer qu'il y a un grand nombre de données pour les articles 211.301 et 211.302, relatifs à la pose de la couche d'apprêt respectivement en horizontal et en vertical. La pose en vertical est fortement dépendante de la hauteur du relevé vertical. Ainsi, étudier la pose horizontale semble plus intéressant. Toutefois, la pose

de la couche d'apprêt représente un coût très faible en comparaison du reste des travaux. S'intéresser à un article ayant plus d'importance semblerait plus intéressant.

Néanmoins, aucun autre article ne réunit un nombre suffisant de données. Mais, comme les articles de l'étanchéité en lés bitumineux en deux couches sont calculés de manière similaire, il serait possible de les réunir et de les analyser comme étant un unique article. En effet, il existe différents articles pour expliciter l'utilisation de différents types d'étanchéité. Ainsi, une analyse des prix du bicouche (étanchéité en 2 couches) sera effectuée.

Du fait du peu de données disponibles pour les articles relatifs au bicouche, il a été pensé de les réunir et ainsi de les traiter comme un unique article. Afin de pouvoir valider ces solutions, on va regarder la distribution des données selon chacun de ces articles, afin de valider le fait qu'ils aient des prix comparables.

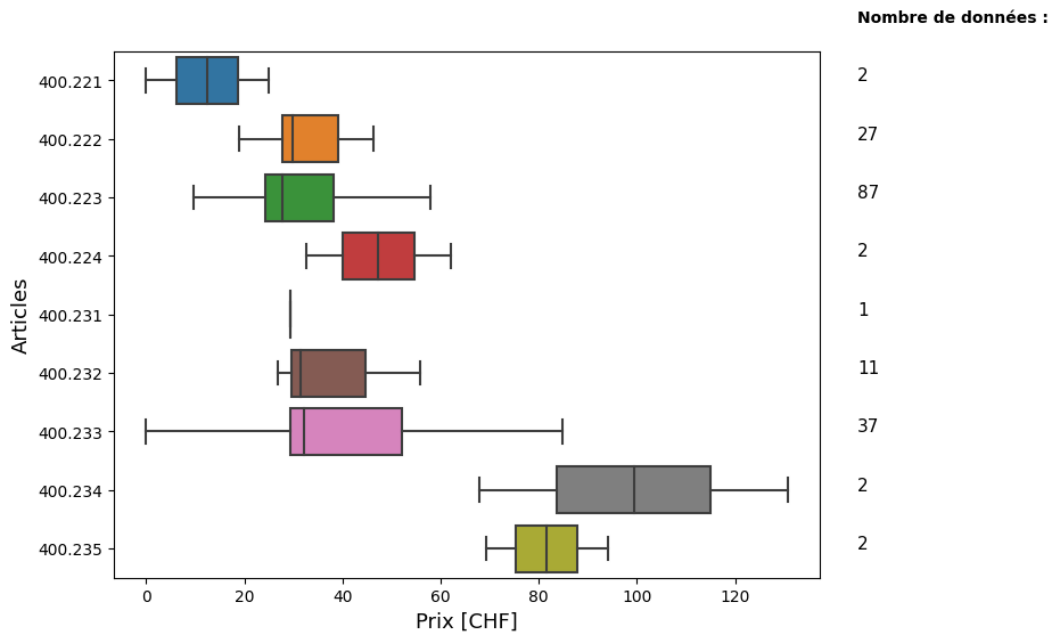


FIGURE 3.6 – Diagramme en boîte des prix pour les articles relatifs au bicouche

La Figure 3.6 illustre la distribution des prix pour chacun des articles liés au bicouche. Cette représentation, permet de mettre en évidence le premier et le dernier quartile (respectivement extrémité gauche et droite de la boîte en couleur), la médiane (barre noire dans la boîte colorée) ainsi que les valeurs minimales et maximales (hors valeurs extrêmes) (respectivement extrémité gauche et droite des barres noires entourant la boîte de couleur).

Au premier abord, il semblerait que les prix entre les différents articles ne se ressemblent

pas. Toutefois, il est important de considérer différentes choses. Tout d'abord, il faut lier ce graphique au nombre de données par article. En effet, les articles ont des nombres de données très variables. Il est aisé d'en déduire qu'un article avec très peu de données n'aura pas une distribution de prix significative. Les 3 articles avec le plus de données sont les articles : 400.222, 400.223 et 400.233. Pour ces derniers, comme attendu, il est possible d'observer une distribution de prix cohérente. De plus, ces écarts peuvent être dus aux prix de fourniture qui sont variables en fonction des différents articles. L'hypothèse de pouvoir considérer tous ces articles comme un seul article semble donc validée.

En réunissant toutes les données, on obtient la distribution présentée dans la Figure 3.7. Il est trouvé des valeurs cohérentes avec les distributions des 3 articles avec le plus de données.

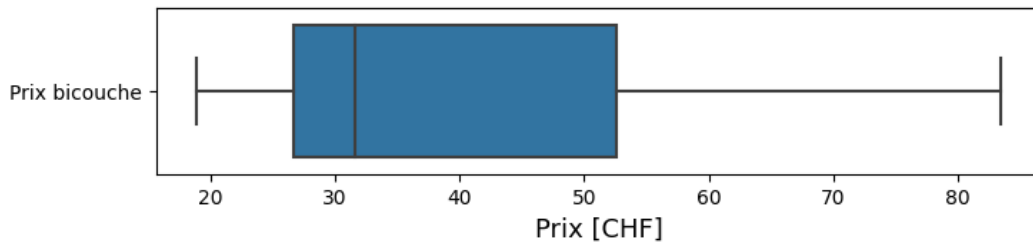


FIGURE 3.7 – Diagramme en boîte des prix du bicouche

Maintenant que le jeu de données lié aux prix rendus est constitué, il est intéressant d'en étudier les paramètres correspondants.

En réunissant tous les prix déposés pour le bicouche, cela permet d'avoir un ensemble de 149 données. Cependant, sur *BauBit* tous les paramètres ne sont pas nécessairement complétés. Il a donc été dressé le nombre de données à disposition pour chaque paramètre en lien avec les 149 prix de bicouche.

Certains paramètres n'ont que très peu de données (Architecte, Conducteur Travaux et Direction de Travaux), ils ne pourront donc pas être utilisés pour la suite de l'étude.

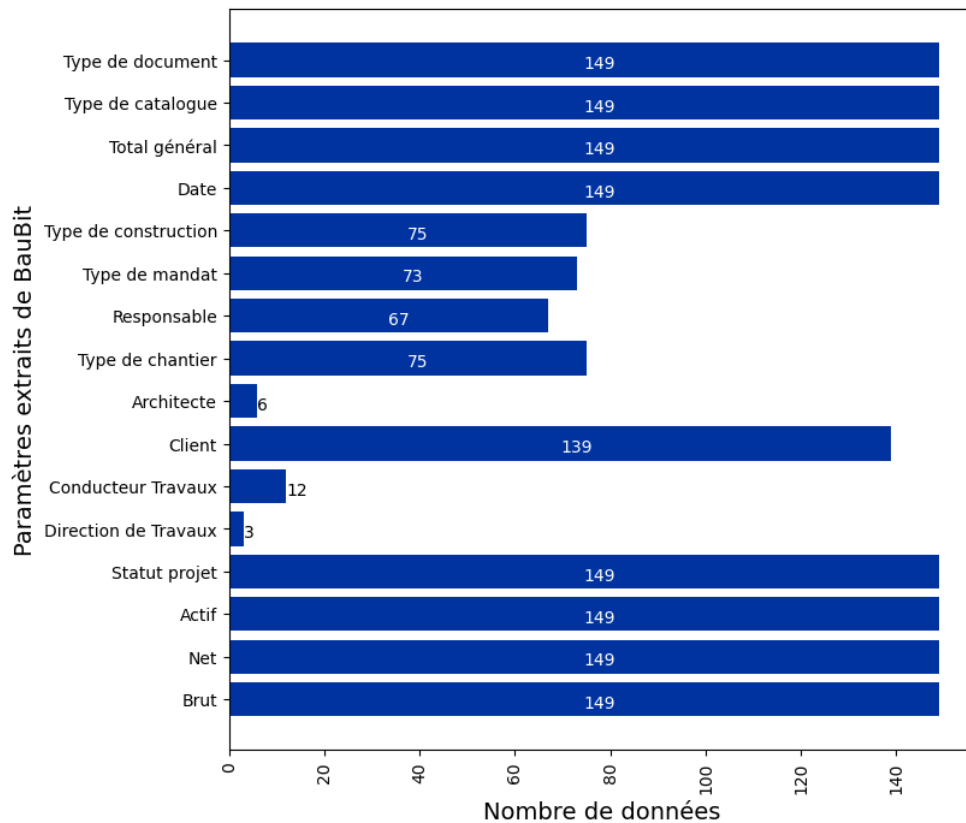


FIGURE 3.8 – Nombre de données par paramètre

Sur la base des prix rendus du bicouche, il est possible de les étudier afin d'essayer d'en tirer des conclusions.

3.3 Analyse des prix du bicouche

3.3.1 Distribution des prix de bicouche

Une façon qui permet d'illustrer plus facilement la distribution des données est l'histogramme.

En observant la Figure 3.9, il est possible de remarquer que les prix du bicouche suivent approximativement une distribution normale, même si la distribution n'est pas parfaitement symétrique. Il est intéressant de noter que certaines valeurs de prix semblent être données plus régulièrement que d'autres. Par exemple, beaucoup de prix sont rendus autour de 29 francs, et entre 31-32 francs. Par contre, beaucoup moins de prix ont été rendus à 30 francs. Cela est probablement lié aux habitudes des différents calculateurs.

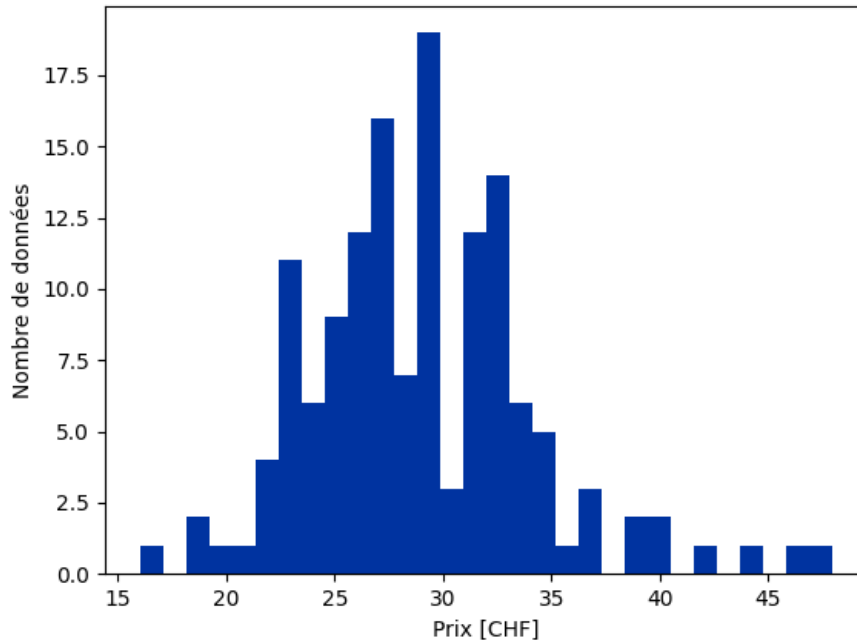


FIGURE 3.9 – Histogramme des prix du bicouche

3.3.2 Prix de fourniture

La fourniture représente une part importante du prix du bicouche, puisque c’est en moyenne 55 % de son prix. Il est donc intéressant d’étudier plus en profondeur cet aspect, d’autant que le prix de fourniture est variable en fonction des différentes hausses. Il peut ainsi être important de se demander si l’évolution du prix de fourniture a un impact sur le prix du bicouche ?

Afin de visualiser l’évolution du prix de fourniture, il est possible de représenter le prix de fourniture en fonction des différentes hausses au cours de dernières années. Ces hausses sont importantes puisque les prix des matériaux ont augmenté d’environ 80 %.

La différence entre les différents articles qui composent le bicouche provient de l’utilisation de différents lés d’étanchéité. À chaque article correspond un prix de fourniture différent. Les hausses de fournitures de Swisspor sont communes pour les différents lés ce qui explique que les courbes des prix de fourniture des matériaux évoluent parallèlement.

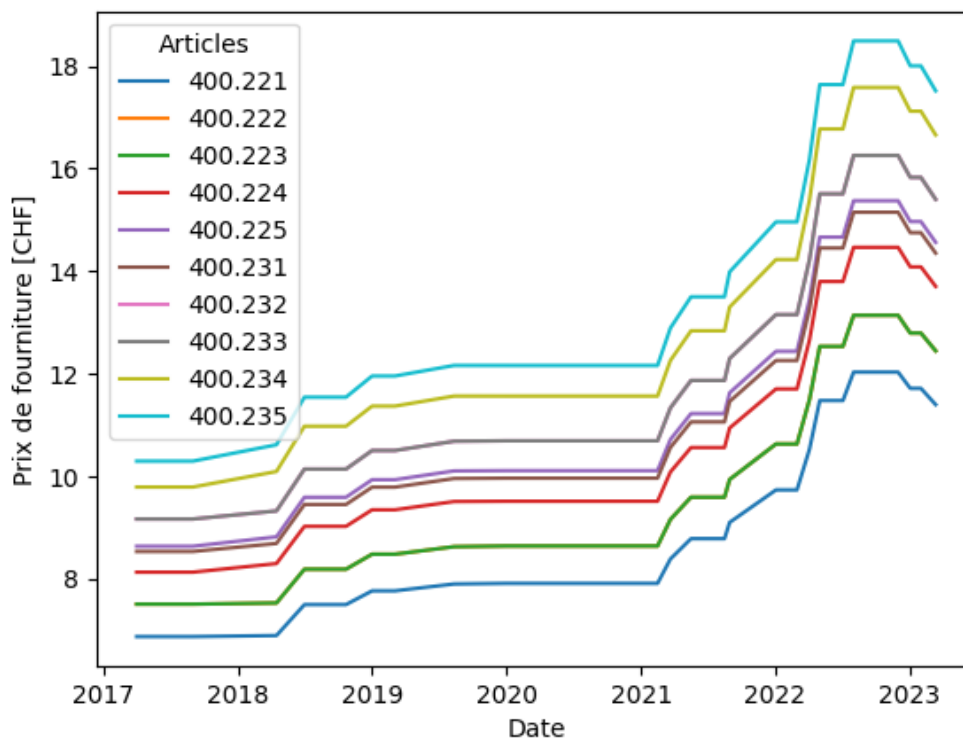


FIGURE 3.10 – Évolution du prix de fourniture entre 2017 et 2023

En ayant connaissance du prix de fourniture, il devient ainsi possible de calculer le prix de vente de l'article sans la fourniture. L'étude de ce prix sans la fourniture permet d'observer les prix déposés par l'entreprise, sans que ces derniers ne soient biaisés par les hausses de fourniture. La Figure 3.11 illustre l'évolution du prix moyen du bicouche, en prenant en compte ou pas du prix de fourniture. Swisspor réajuste ses prix en mettant à jour ses hausses de prix à différentes dates. Pour chacune de ces périodes de hausses Swisspor (entre chaque date de hausses), le prix moyen du bicouche a été calculé en faisant la moyenne de tous les prix du bicouche.

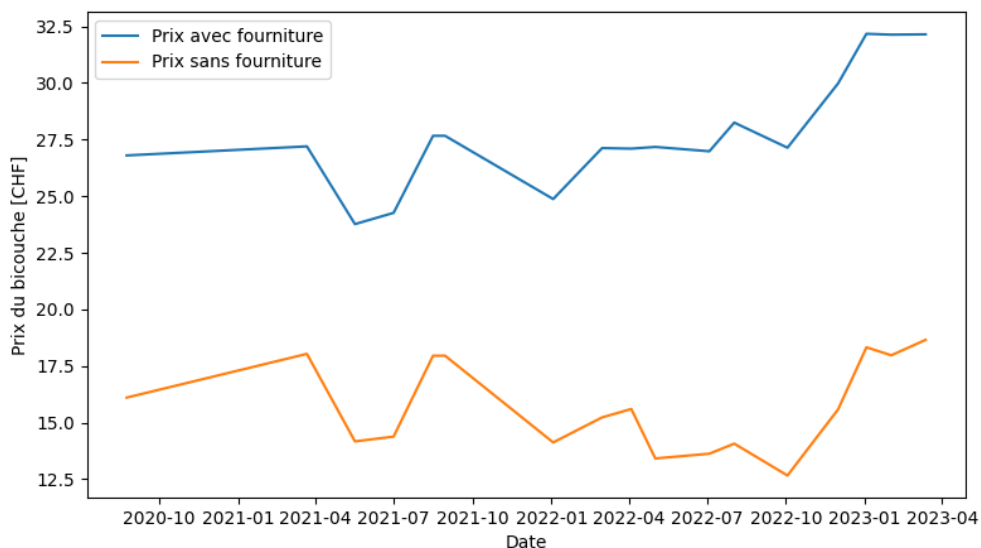


FIGURE 3.11 – Évolution du prix moyen du bicouche par période avec et sans le prix de fourniture

Le prix moyen par période de hausse Swisspor du bicouche avec la fourniture augmente à partir de fin 2022. Même s’il est difficile d’en tirer des conclusions précises, il semblerait que l’impact de l’évolution des prix de fourniture soit bien visible. En ce qui concerne le prix moyen sans fourniture, il varie entre 13.- et 18.- environ, alors qu’il n’est pas sensé y avoir de fortes variations. Le coût humain a augmenté au cours des années, cependant étant donné les oscillations irrégulières, cette évolution ne provient pas de l’augmentation des salaires. La forte variation des prix peut provenir de la faible quantité de données, en effet, le prix moyen des différentes périodes est composé d’un nombre très variable de données, allant de 1 à 41 données par période.

Période	08/2020	03/2021	05/2021	07/2021	08/2021	08/2021	01/2022	03/2022	04/2022
Nb données	1	1	3	8	3	3	11	8	5
Période	05/2022	07/2022	08/2022	10/2022	12/2022	01/2023	02/2023	03/2023	
Nb données	4	15	6	7	17	7	3	41	

TABLE 3.1 – Nombre de données par période de hausses Swisspor

Pour poursuivre l’analyse des prix, il pourrait sembler intéressant d’étudier les prix du bicouche après déduction du prix de fourniture. Cela permettrait d’éviter que le prix du bi-

couche ne soit impacté par la hausse des fournitures.

Afin de visualiser l'impact du prix de fourniture sur le prix du bicouche, il est possible de représenter sous la forme d'un histogramme les prix du bicouche avec, et sans la fourniture comprise (Figure 3.12).

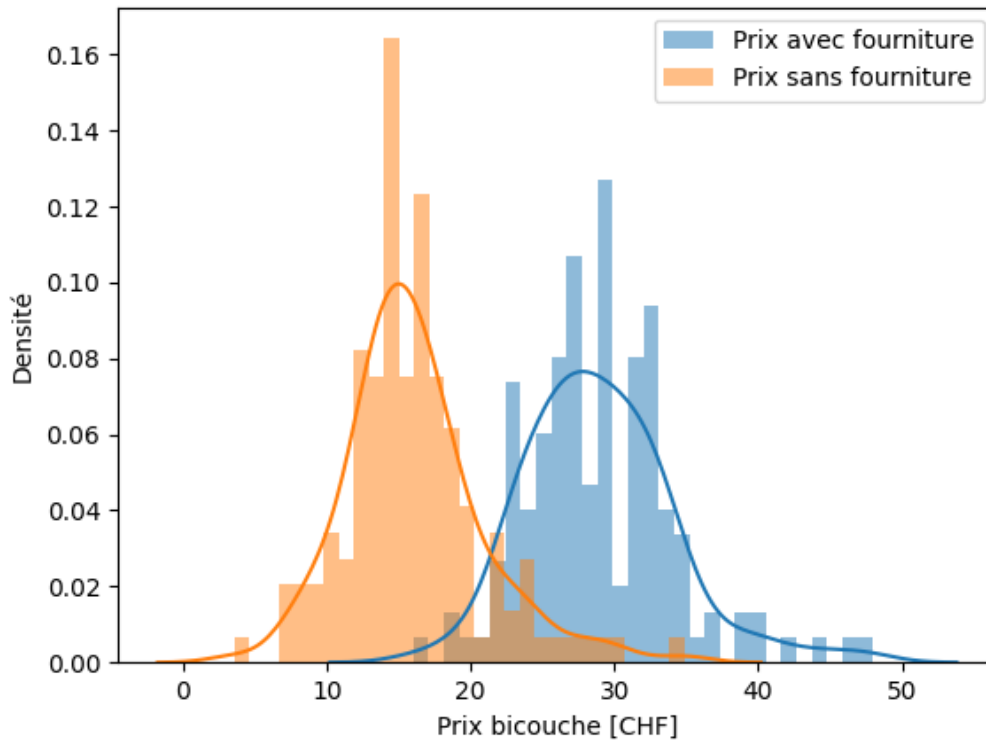


FIGURE 3.12 – Histogramme du prix du bicouche, avec et sans le prix de fourniture

La distribution des prix du bicouche sans la fourniture ressemble à une distribution normale. En comparaison avec la distribution des prix avec fourniture, sans la fourniture le kurtosis (coefficient d'aplatissement de la courbe, qui permet une mesure directe de l'acuité et une mesure indirecte de l'aplatissement) est plus important. Une valeur positive signifie que le pic de la distribution est plus aigu que dans une distribution normale.

Le skewness permet de calculer la symétrie de la distribution des données. Une valeur de 0 indique une symétrie parfaite. Lorsque la valeur est positif (les cas dans les deux ensemble de données), alors il y a une asymétrie vers la droite., c'est-à-dire que la majorité des données se trouvent sur la gauche et les données extrêmes se trouvent sur la droite. En soustrayant le prix de fourniture au prix du bicouche, cela accentue donc l'asymétrie.

	Skewness	Kurtosis
Prix avec fourniture	0.77	1.51
Prix sans fourniture	0.89	1.96

TABLE 3.2 – Paramètres de la distribution normale des prix du bicouche avec et sans fourniture

Afin d’observer l’impact du temps sur le prix du bicouche, il est possible de réaliser un histogramme comme précédemment, mais en ajoutant les périodes de hausses Swisspor.

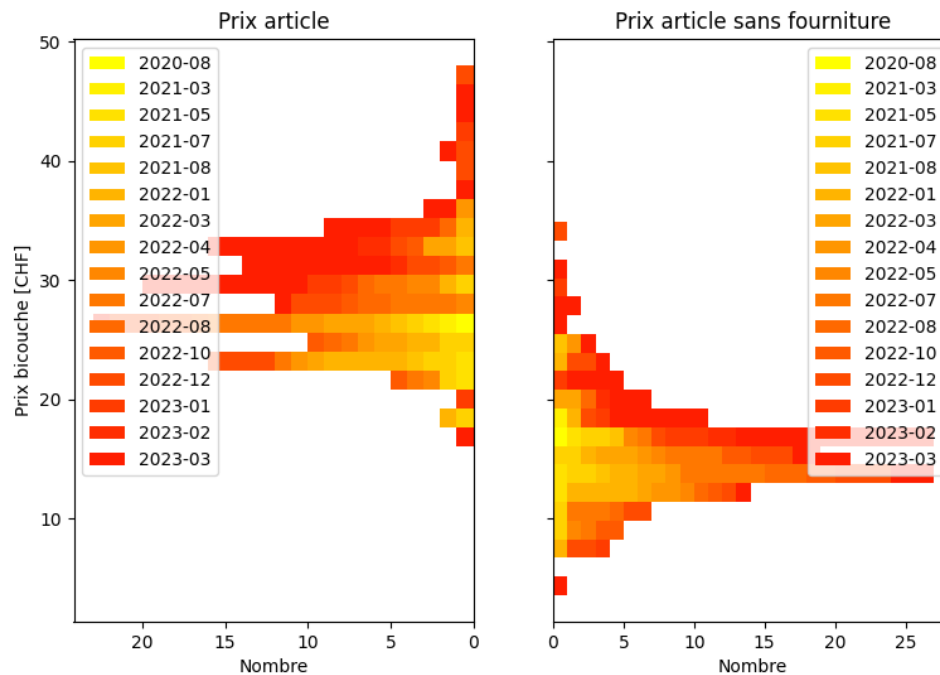


FIGURE 3.13 – Histogramme du prix du bicouche, avec et sans le prix de fourniture, en fonction des hausses de prix

La Figure 3.13 permet de mettre en avant le fait que les prix pour les périodes les plus récentes semblent être plus importants. Cela se traduit sur ce graphique par la présence de plus de rouge, vers les prix les plus élevés. Cependant, en soustrayant le prix de fourniture, alors les prix semblent mieux distribués. Cela permet donc de supprimer le biais dû au prix de fourniture.

Une problématique subsiste néanmoins, ce graphique ne permet pas de savoir si les différents articles qui composent le bicouche sont réellement vendus à des prix de pose similaires. Pour

ce faire, il est possible de réaliser une analyse similaire à ce qui a été effectué, mais pour un article bien précis. Cette analyse a donc été réalisée pour l'article 400.223, car c'est celui qui comporte le plus de données. Les observations sont similaires à précédemment, ce qui ne peut que confirmer les attentes.

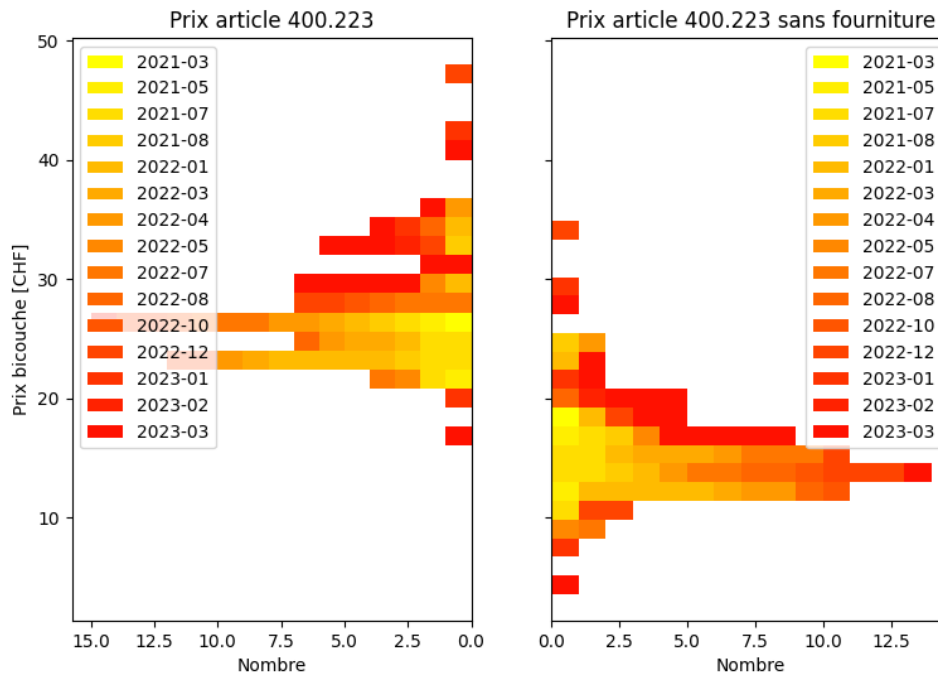


FIGURE 3.14 – Histogramme du prix du bicouche (article 400.223), avec et sans le prix de fourniture, en fonction des hausses de prix

Afin d'observer l'effet qu'il y a sur le prix en soustrayant le prix de fourniture, il est possible de représenter cela graphiquement (Figure 3.15). Sur ce graphique, il est représenté le prix du bicouche avec et sans le prix de fourniture en fonction de la date. De plus, afin de rendre cette étude plus visuelle, il a été représenté la courbe tendance. Le premier coefficient de la courbe tendance représente l'impact d'un jour sur le prix du bicouche. Dans le cas des prix avec fourniture, ce coefficient est de 0.01184. Ceci signifie donc que le prix du bicouche est plus important de 0.01184 franc par jour, soit environ 4.3 francs par an. Cette hausse comprend à la fois la hausse des matériaux mais également le reste des frais (hausse des salaires, des frais généraux etc). Dans le cas du prix sans la fourniture, le prix du bicouche augmente de 0.00624 franc par jour, soit environ 2.28 francs par année. La hausse est moins importante.

Cela correspond aux attentes. En effet, du fait que la fourniture est été soustraite, cette hausse ne tient plus compte de la hausse des prix de fourniture.

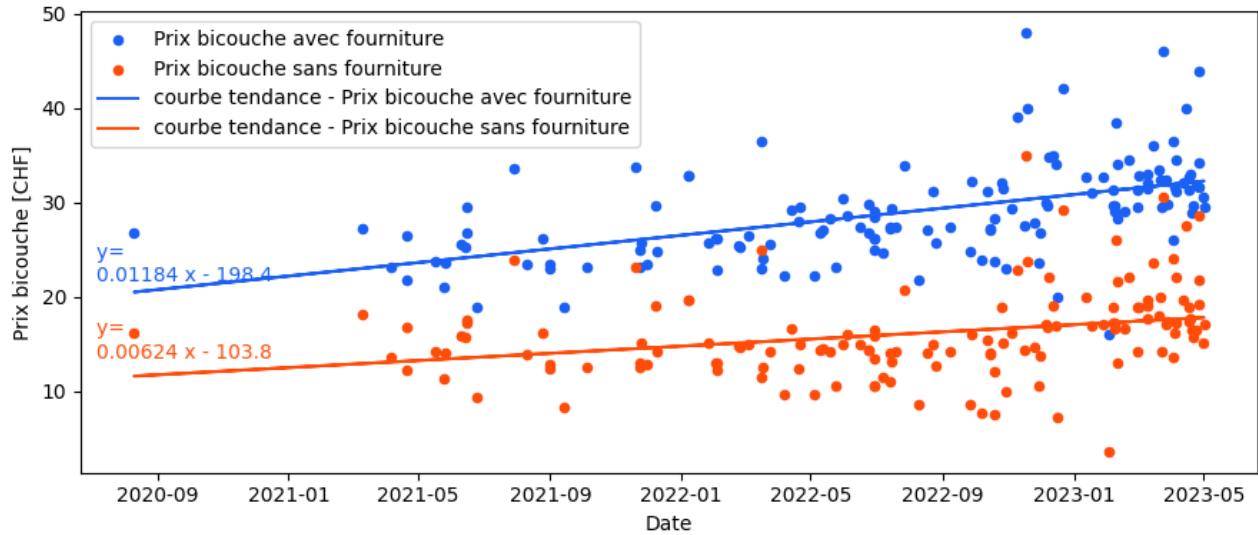


FIGURE 3.15 – Prix du bicouche (avec et sans la fourniture) en fonction de la date

3.3.3 Rabais, Escompte et Prorata

Les rabais, escompte et prorata peuvent être vus comme des facteurs correctifs qui viennent s'appliquer sur l'ensemble de l'offre. Ils sont ajoutés aux cours de discussions afin de rendre l'offre plus attractive, dans le but d'obtenir le chantier. Ils modifient ainsi l'ensemble des prix. Afin de connaître le prix exacte du bicouche sur chantier, il est donc nécessaire de tenir compte de ces ajustements. De manière analogue à la Figure 3.15, il est possible de représenter le prix du bicouche (en tenant compte ou non des rabais, escompte et prorata) en fonction de la date.

Les coefficients des courbes tendances sont relativement proches. En effet, il semble cohérent de penser que ces ajustements s'appliquent indépendamment de la date sur le prix, et n'influencent donc pas le prix en fonction de la date. Toutefois, tenir compte de ces ajustements dans l'étude du prix pourrait être intéressant. Ceci permettrait de s'intéresser au prix de manière plus juste.

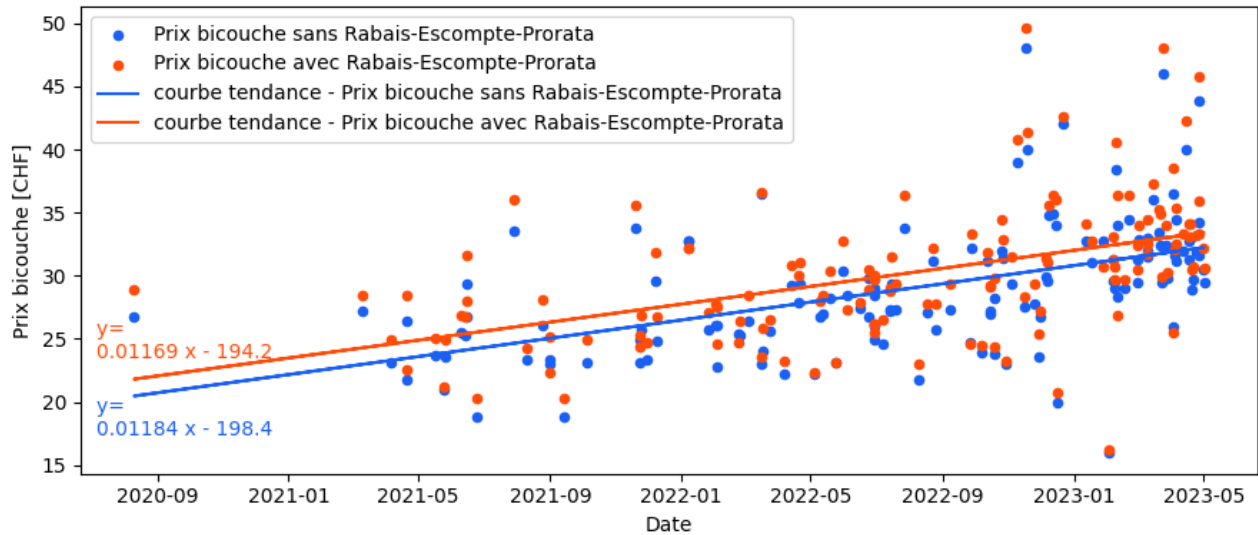


FIGURE 3.16 – Prix du bicouche (avec et sans les rabais, escompte et prorata) en fonction de la date

3.3.4 Comparaison avec les données cantonales

Afin d’avoir un ordre de comparaison, les prix unitaires moyens pour la région lémanique (VD, VS, GE) ont été observés. (OFFICE FÉDÉRAL DE LA STATISTIQUE, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023)

Description	Prix unitaire moyen [CHF/m^2]								
	04/19	10/19	04/20	10/20	04/21	10/21	04/22	10/22	04/23
Isolation ¹	47.55	45.69	46.15	37.89	49.78	47.28	54.81	52.69	54.57
Monocouche ²	16.48	16.78	16.36	14.30	16.93	15.61	17.72	20.38	18.26
Bicouche ³	24.53	24.93	22.21	20.62	23.28	23.32	26.29	27.77	27.16

TABLE 3.3 – Indice suisse des prix de la construction - Prix unitaires moyens dans la région lémanique (VD, VS, GE)

Tout comme pour les données de *PHIDA*, les prix ont fortement augmentés ces dernières années. Afin de comparer cette évolution avec les prix de *PHIDA* il est possible de les repré-

1. 364.321.224. Isolation thermique en panneaux de polystyrène expansé EPS. En 2 couches, pose libre. Panneaux jointifs, joints décalés. Panneaux avec feuillure, sans revêtement. Epaisseur mm 240 (2x mm 120). (Pour une quantité de référence de 500 [m^2])

2. 364.421.114. Pose d’étanchéité en lés de bitume-polymère. En 1 couche. Chevauchements mm 100. Etanchéité soudée en plein. E-P-5,0-af-WF. (Pour une quantité de référence de 500 [m^2])

3. 364.421.212. Pose d’étanchéité en lés de bitume-polymère. 2 couches. 1ère couche posée libre, chevauchements mm 100 soudés ou collés. 2ème couche soudée en plein. 1ère couche E-G-3,0-tt, 2ème couche E-P-4,0-tf-WF. (Pour une quantité de référence de 500 [m^2])

senter sur un graphique en fonction du temps et de trouver les coefficients de la régression. Pour les données cantonales, le prix du bicouche augmente d'environ 0.0077 franc par jour contre 0.0118 franc par jour pour *PHIDA*. Il y a donc une hausse moins conséquente pour les données de l'Office fédérale de la statistique. En Avril 2023, le prix du bicouche est 27.16 [*CHF/m*²] contre environ 30 [*CHF/m*²] pour *PHIDA*. Globalement, *PHIDA* a plus rehaussé ses prix au cours des derniers mois que l'ensemble des entreprises.

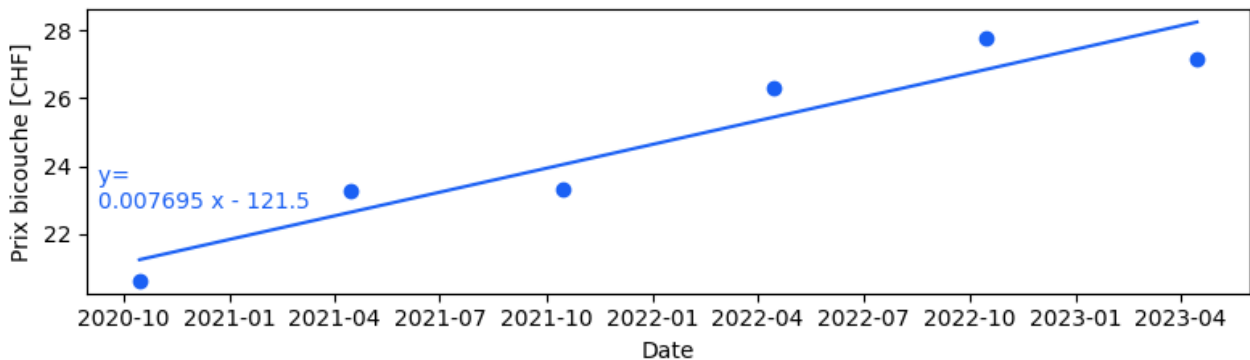


FIGURE 3.17 – Prix du bicouche en fonction de la date - Données de l'Office fédérale de la statistique

3.4 Analyse des paramètres

3.4.1 Étude de corrélation

Avant de réaliser les régressions, il est tout d'abord important d'étudier les paramètres. En effet, il est par exemple nécessaire que les paramètres ne soient pas corrélés. Pour vérifier cela, il a été réalisé la matrice de corrélation des paramètres.

Une matrice de corrélation est une représentation tabulaire qui mesure les relations linéaires entre plusieurs variables. Elle est utilisée pour explorer la structure de dépendance entre les variables et évaluer leur niveau d'association.

Le fonctionnement d'une matrice de corrélation implique le calcul du coefficient de corrélation entre chaque paire de variables. Le coefficient de corrélation est une mesure statistique qui varie entre -1 et 1. Une valeur proche de 1 indique une corrélation positive forte, une valeur proche de -1 indique une corrélation négative forte, et une valeur proche de 0 indique une absence de corrélation linéaire.

Pour créer une matrice de corrélation, chaque variable est placée en ligne et en colonne, et le coefficient de corrélation entre chaque paire de variables est calculé et inséré dans la matrice à l'intersection des lignes et des colonnes correspondantes.

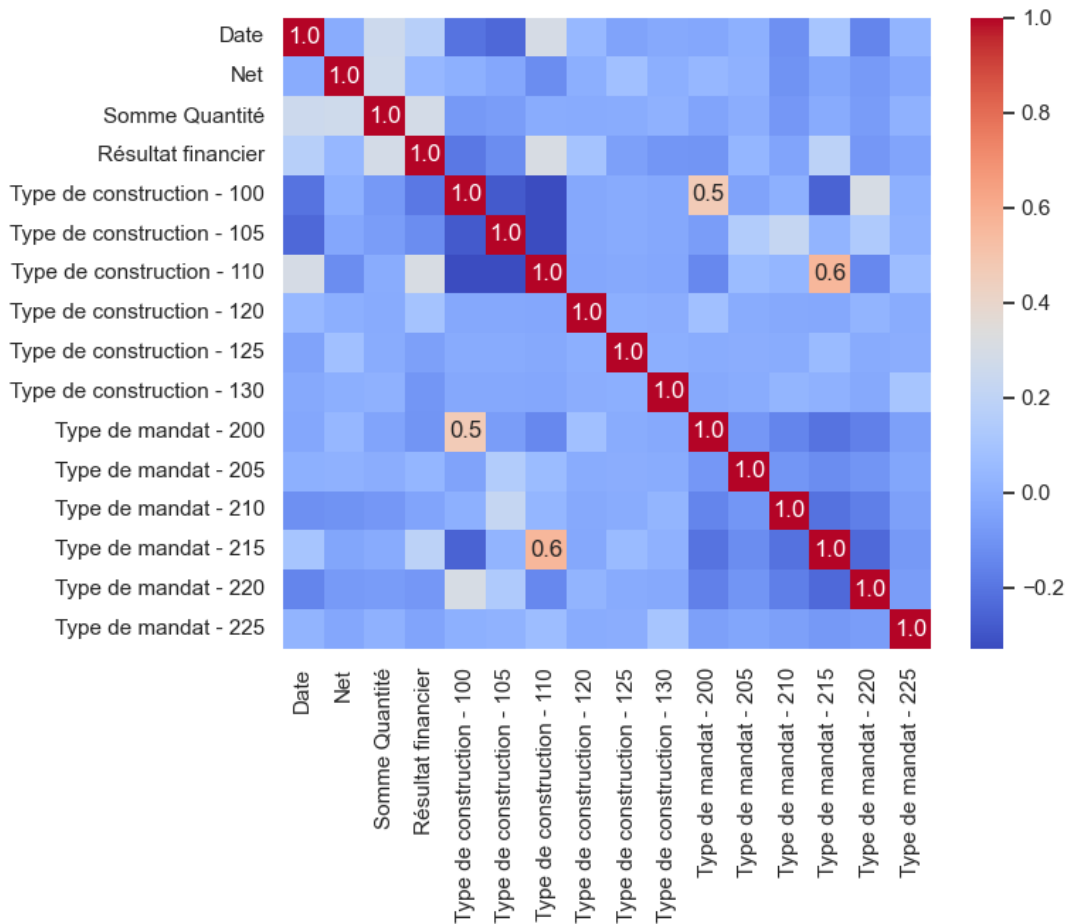


FIGURE 3.18 – Matrice de corrélation des paramètres

Il ne semble pas exister de forte corrélation entre les variables. Les seules corrélations envisageable sont entre entreprise générale et neuf, ainsi que gérances et bricoles. Toutefois, ces corrélations ne sont pas importantes et n'ont pas de réelle signification. Ainsi, il n'y a pas besoin de supprimer un paramètre pour éviter la colinéarité.

3.4.2 Analyse des composantes principales (ACP)

L'analyse des composantes principales (ACP) permet de réunir différentes composantes, afin de réduire le nombre de variables, tout en conservant un maximum d'informations. Après avoir normalisé les paramètres, il est possible de lancer l'ACP.

La première étape consiste en l'observation de la part de la variance expliquée en fonction du nombre de composantes. Les 5 premières composantes permettent de décrire un peu plus de 80 % de la variance. Choisir uniquement ces 5 premières composantes permet ainsi, tout en conservant la majorité des informations, de réduire la dimension de 16 à seulement 5.

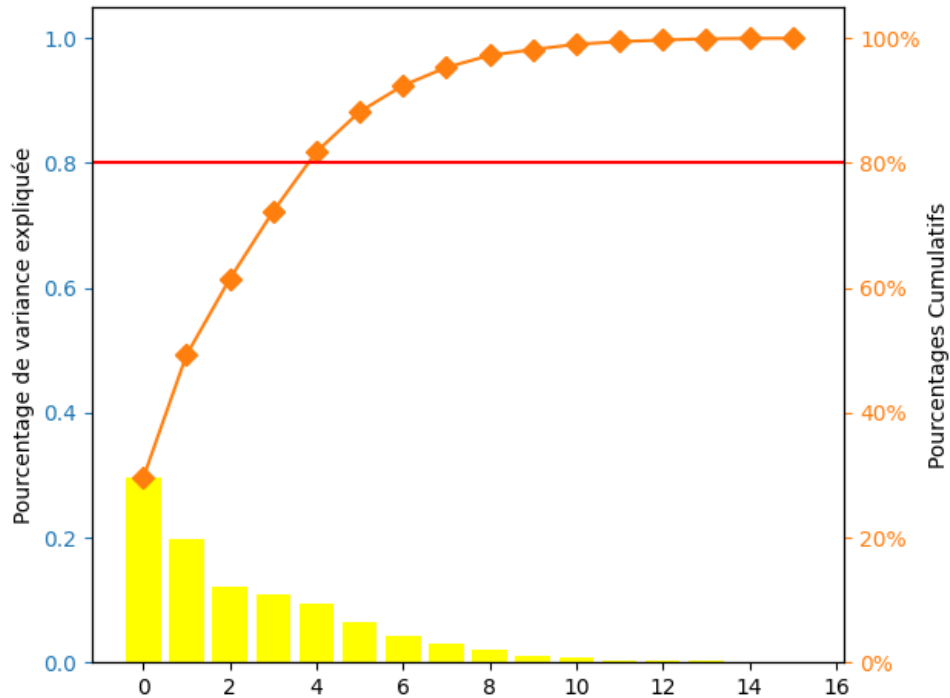


FIGURE 3.19 – Diagramme Pareto de l'importance des composantes de l'ACP

Les composantes principales sont définies à partir de différents paramètres, sous forme d'une combinaison linéaire de ces derniers. La Figure 3.20 représente les différents coefficients de ces combinaisons linéaires pour les 5 premières composantes principales. Par exemple, pour la composante principale 1, le Type de construction - 105 est la variable qui aura le plus fort impact positif (environ 0.7). Le Type de construction - 100 aura quant-à lui un impact négatif.

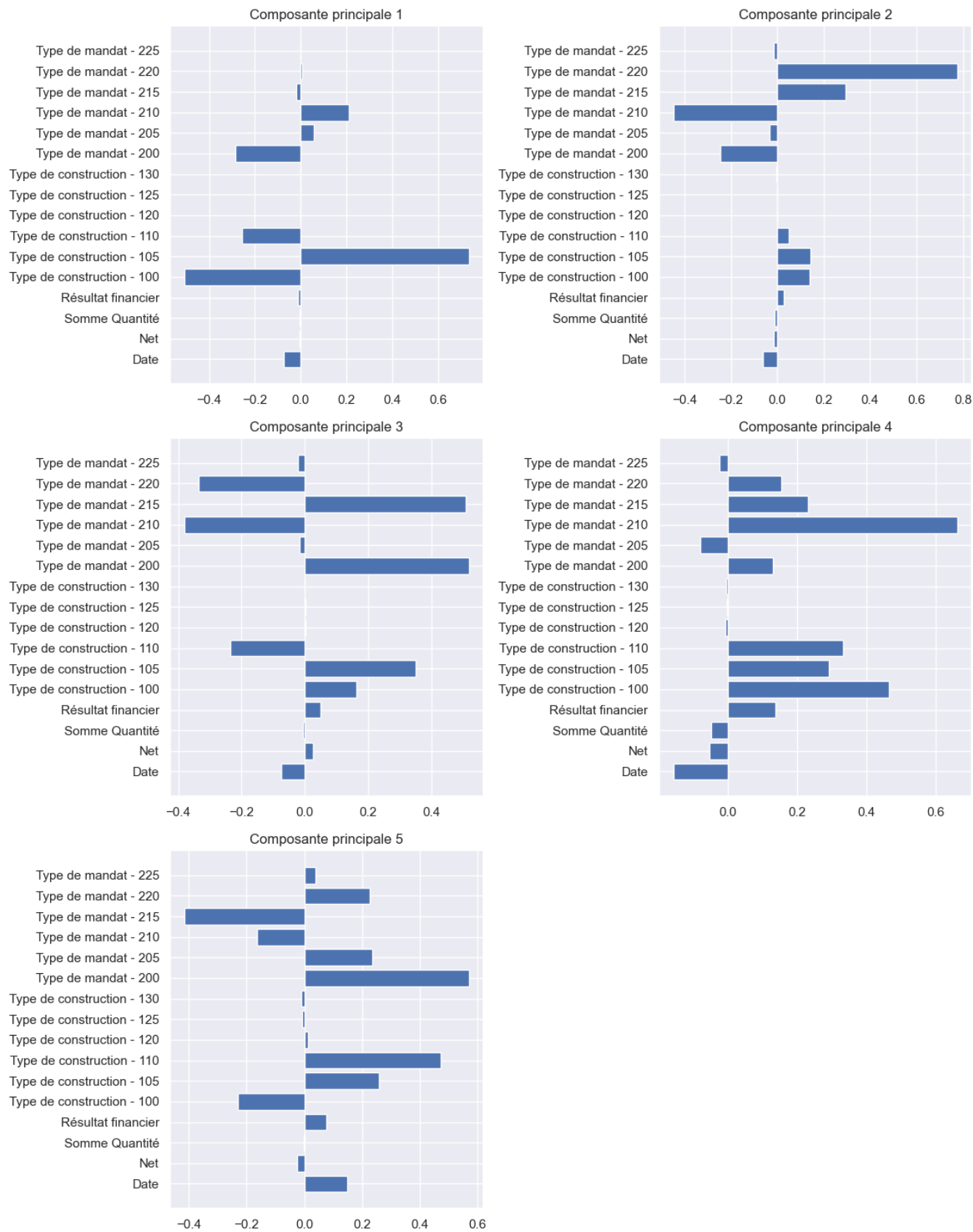


FIGURE 3.20 – Composition des composantes principales

Afin d'illustrer l'intérêt de cette analyse, il est possible de représenter les données en fonction des dimensions. À titre d'exemple, la Figure 3.21 illustre les prix du bicouche en fonction des deux premières composantes. Il est possible d'observer que cette nouvelle représentation permet d'identifier plus facilement les distinctions des données en fonction de leur catégorie de Type de construction - 105.

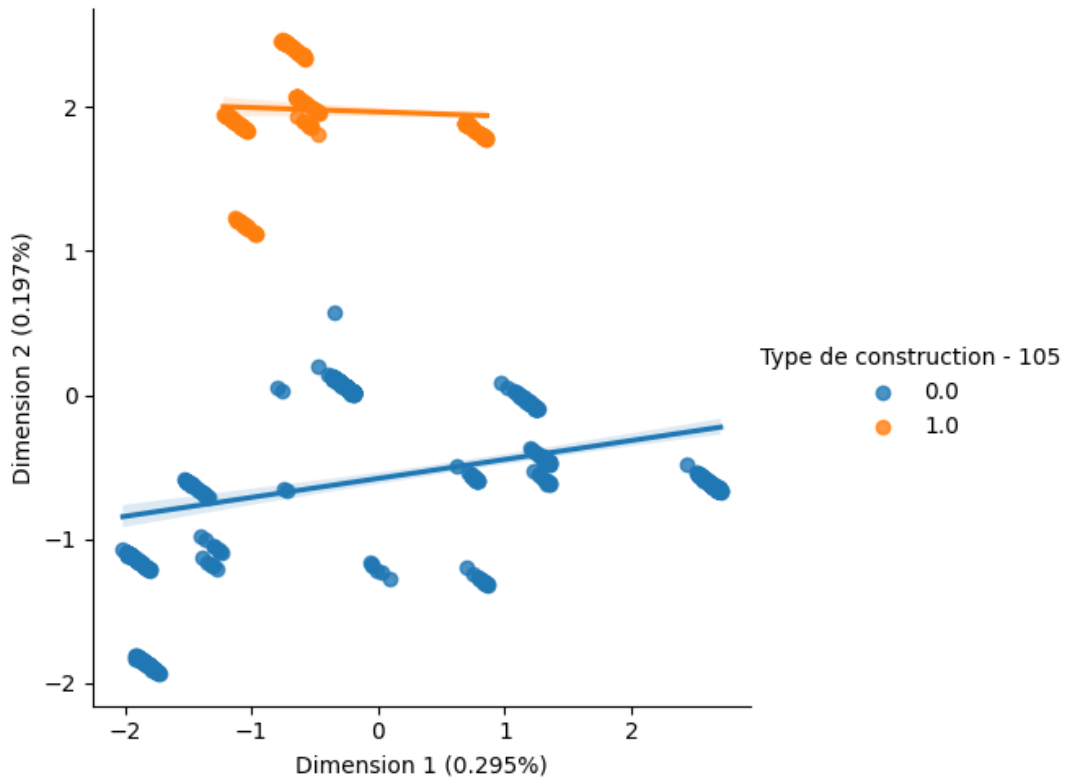


FIGURE 3.21 – Type de construction - 105 en fonction des deux composantes principales de l'ACP

L'utilisation de l'ACP pourrait donc être intéressante afin de réduire le nombre de variable pour la suite du travail.

4 | Développement d'un modèle pour le bicouche

La base de données étant constituées, les données traitées et analysées, il est désormais possible de s'intéresser au coeur de la problématique à savoir ; essayer de développer un modèle permettant d'estimer le plus justement possible le prix du bicouche en fonction des spécificités de chaque chantier.

Différents modèles seront alors étudiés. Puis dans un second temps leurs résultats seront comparés.

Il sera tout d'abord étudié l'impact des paramètres sur le prix afin de voir s'il est possible de diminuer le nombre de variables et ne conserver que les plus significatives.

4.1 Étude des variables

4.1.1 Corrélation

Afin d'appréhender les liens qui pourraient exister entre les variables et le prix de l'article, il est intéressant de réaliser une matrice de corrélation.

Les deux seules variables qui semblent être corrélées avec le prix de l'article sont le prix de fourniture et la date. Comme il a été remarqué précédemment, le prix de fourniture représente en moyenne 55 % du prix du bicouche. Par conséquent, une corrélation entre les deux est plus évidente. Concernant la date, il a été étudié précédemment l'évolution du prix de fourniture en fonction de la date. Il avait alors été remarqué une forte hausse des prix ces dernières années. Ce phénomène explique donc la corrélation positive de 0.7 entre le prix de fourniture et la date. Ainsi la corrélation du prix du bicouche est corrélée à la date, elle même corrélée au prix de fourniture.

Le prix de fourniture est quant à lui également corrélé au numéro de l'article. Chaque article correspond à un type de fourniture différent et donc à un prix spécifique. Cette corrélation a donc tout son sens.

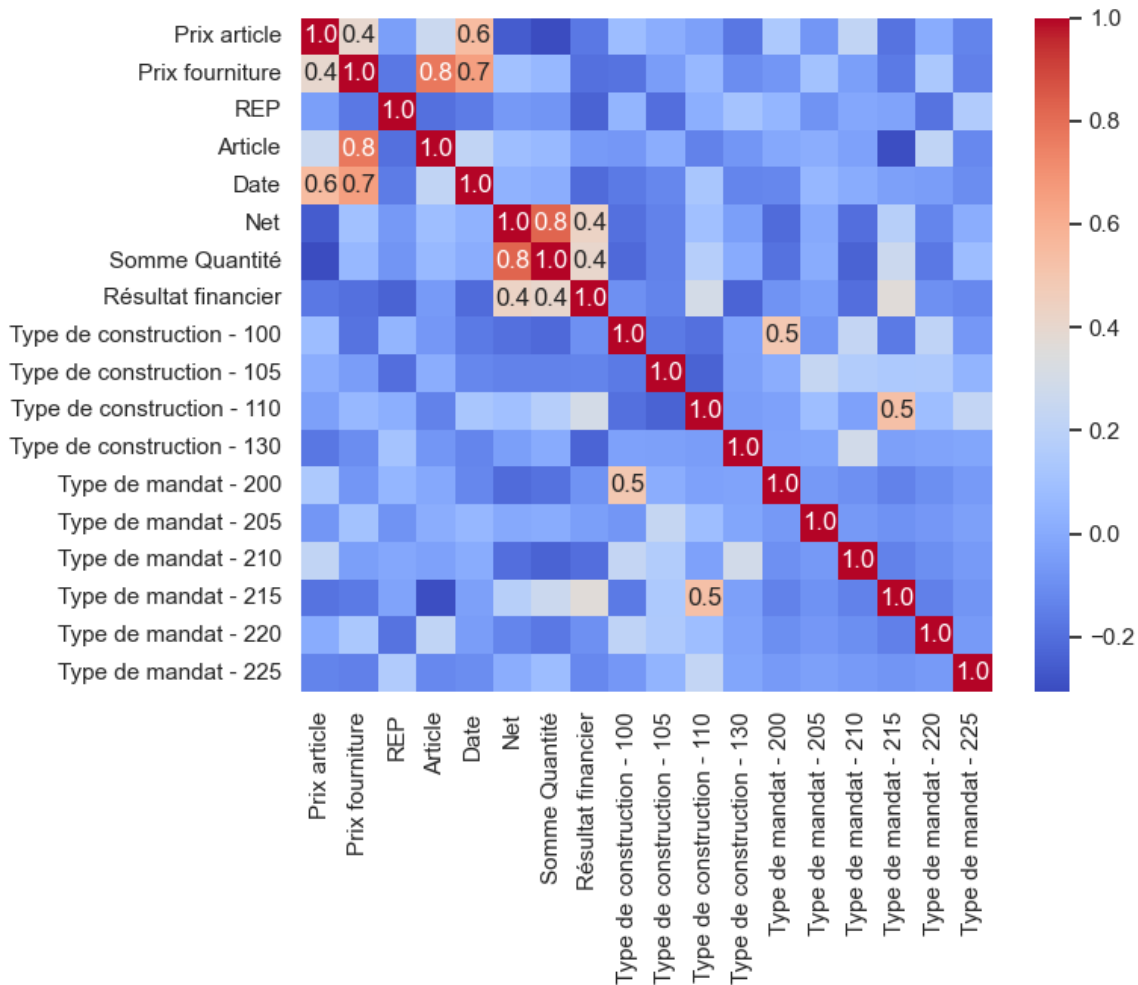


FIGURE 4.1 – Matrice de corrélation entre les paramètres et le prix de l'article

Une autre façon d'observer la corrélation est de représenter les données en fonction des variables 2 à 2. La Figure 4.2 illustre les corrélations identifiées précédemment. Par exemple entre la date et le prix de fourniture, il est possible d'observer que les données sont disposées sur la diagonale du graphique; plus la date est récente et plus le prix de fourniture est important. Il est également possible d'observer ce phénomène mais de manière moins visible entre la date et le prix de l'article.

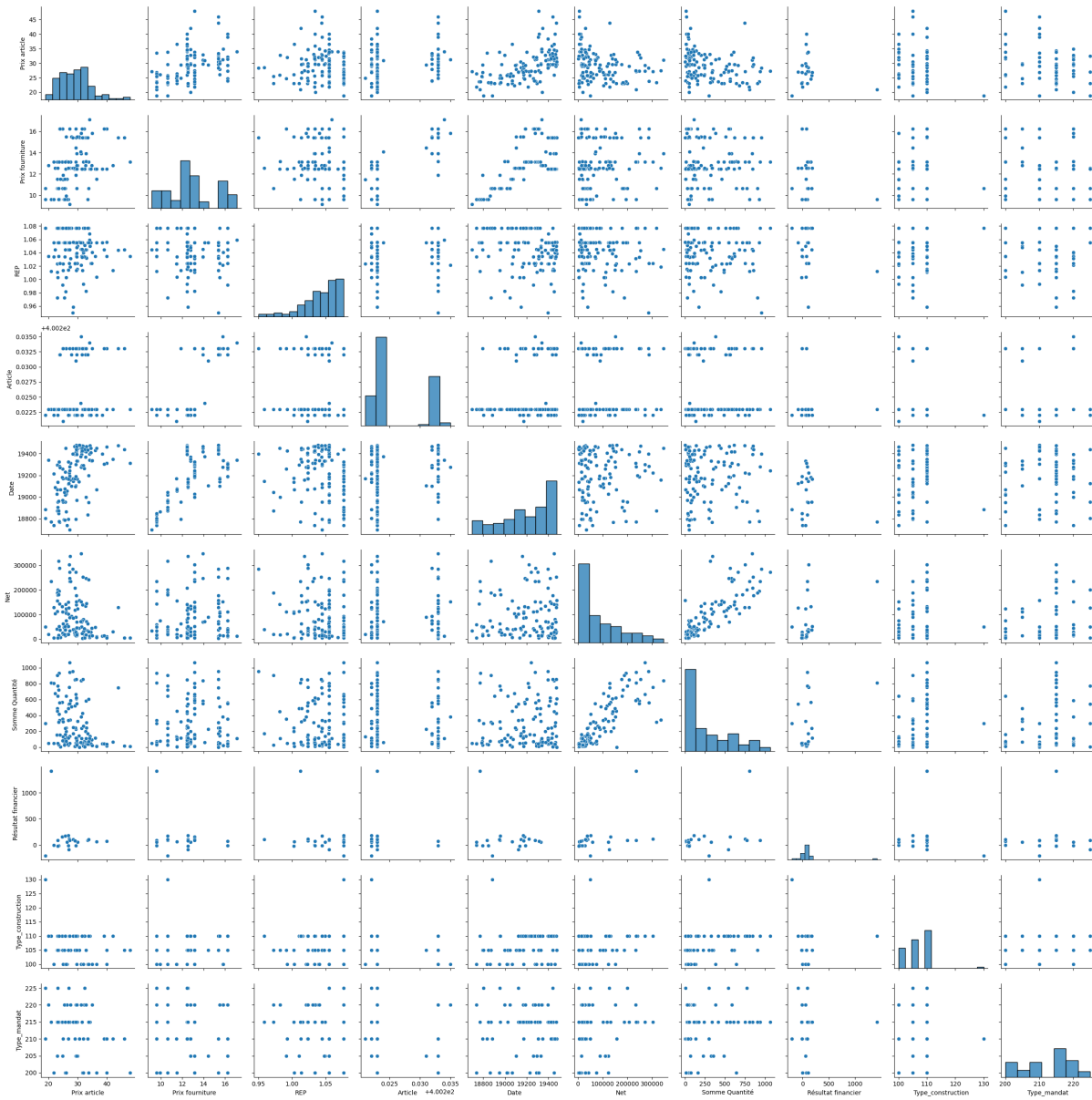


FIGURE 4.2 – Projections des données par variables 2 à 2

4.1.2 Test ANOVA

4.1.2.1 Principe

L'ANOVA (Analyse de variance) est une méthode statistique utilisée pour comparer les moyennes de plusieurs groupes. Son intérêt réside dans sa capacité à déterminer si les différences observées entre les groupes sont statistiquement significatives ou si elles sont simplement le résultat du hasard.

Le fonctionnement de l'ANOVA repose sur la décomposition de la variation totale des données

en deux composantes : la variation entre les groupes et la variation à l'intérieur des groupes. Si les différences entre les moyennes des groupes sont importantes par rapport à la variation à l'intérieur des groupes, cela suggère qu'il existe une différence significative entre les groupes étudiés.

Pour effectuer un test ANOVA, on calcule une statistique appelée F, qui compare la variation entre les groupes à la variation à l'intérieur des groupes. Ensuite, on compare cette statistique à une valeur critique pour déterminer si les différences observées sont statistiquement significatives.

Dans notre étude, détecter la significativité des variables permet d'étudier leur impact sur le prix de l'article. Si une variable est significative, alors il est intéressant de l'étudier dans le modèle de régression ; et inversement. Cela permet ainsi de sélectionner les variables.

Il est tout d'abord possible d'effectuer un test d'indépendance entre une variable quantitative (le prix du bicouche) et une variable qualitative (Type de construction et Type de mandat).

La réalisation du test ANOVA consiste à déterminer si les moyennes des groupes sont significativement différentes. Visuellement, les Figures 4.3 et 4.4 représentent la distribution des données en fonction des groupes.

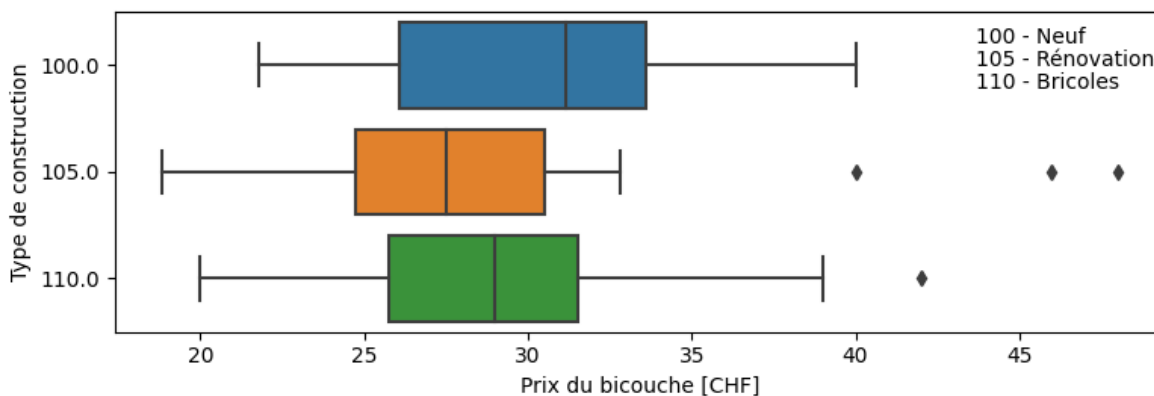


FIGURE 4.3 – Distribution des prix du bicouche en fonction du type de construction

Pour le type de construction, la distributions des données n'est pas très différentes en fonction des groupes. La médiane varie entre environ 27 et 30 francs. Pour le type de mandat, les médianes varient entre 25 et 32 francs environ. Il y a donc plus de différences entre les groupes.

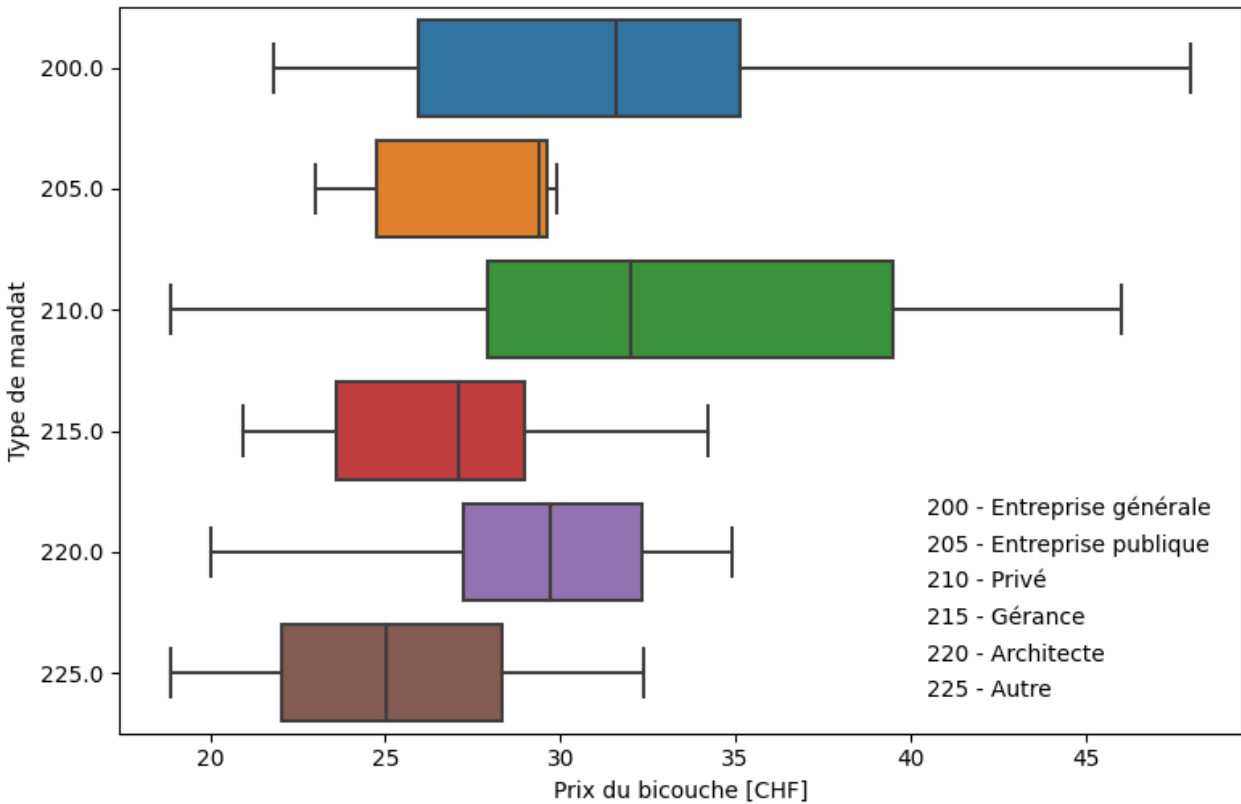


FIGURE 4.4 – Distribution des prix du bicouche en fonction du type de mandat

4.1.2.2 Hypothèses

Étant donné la faible taille de notre échantillon (126 données), la pertinence d'un test ANOVA dépend de 3 hypothèses :

- Indépendance entre les différents groupes
- Homoscédasticité, égalité des variances
- Normalité des résidus

• Indépendance

Chacun des groupes (en fonction du type de construction ou du type de mandat) sont bien distincts. En effet, les chantiers sont distingués en fonction d'une spécificité. Chaque groupe est donc bien indépendant.

- **Homoscédasticité**

Cette condition assure que les variances des différents groupes soient égales. Un contrôle visuel est possible sur les Figures 4.3 et 4.4, l'amplitude des boîtes traduit la variance des groupes.

Afin de comparer les variances, il est possible de réaliser un test de Barlett. Ce test repose sur l'hypothèse nulle selon laquelle les variances des groupes sont égales. Pour effectuer ce test, on calcule une statistique appelée statistique de Bartlett, qui compare la variance totale des données entre les groupes à la variance attendue si les variances étaient égales. Plus précisément, cette statistique est basée sur la somme des écarts quadratiques entre les observations individuelles et les moyennes des groupes.

Il va être comparé la p-value avec une valeur seuil (ici 5 %) afin d'en déduire les résultats. Si la p-value est supérieure au seuil, alors l'hypothèse nulle est validée et les variances des groupes sont égales. En revanche, si la p-value est inférieure au seuil, alors les variances seront considérées comme non égales.

	Type de construction	Type de mandat	Seuil
p-value	10.9 %	1.1 %	5 %
Égalité des variances	oui	non	-

TABLE 4.1 – Résultats du test de Barlett

Les variances sont donc supposées égales pour le Type de construction, mais pas pour le Type de mandat.

- **Normalité des résidus**

La normalité des résidus vise à contrôler que les résidus suivent une loi normale. Ce test permet de s'assurer que les moyennes des différents groupes sont bien dues à une distribution normale, et non au hasard.

Pour réaliser ce contrôle, le test de Shapiro-Wilk est utilisé. Ce test repose sur l'hypothèse nulle selon laquelle les données suivent une distribution normale. Pour effectuer ce test, on calcule une statistique de test basée sur les écarts entre les valeurs observées et les valeurs

attendues sous l'hypothèse de normalité. La statistique de test est ensuite comparée à une valeur critique correspondant au niveau de confiance choisi (ici 5%) pour déterminer si les données peuvent être considérées comme normalement distribuées.

Si la statistique de test est supérieure à la valeur critique, cela suggère que les données ne suivent pas une distribution normale et on rejette l'hypothèse nulle. En revanche, si la statistique de test est inférieure à la valeur critique, on ne rejette pas l'hypothèse nulle et on conclut que les données peuvent être considérées comme provenant d'une distribution normale.

	Type de construction	Type de mandat	Seuil
p-value	0.3 %	3.4 %	5 %
Égalité des variances	non	non	-

TABLE 4.2 – Résultats du test de Shapiro-Wilk

Les conditions du test ANOVA ne sont donc pas toutes satisfaites. Les résultats du test ANOVA sont donc discutables.

4.1.2.3 Résultats du test ANOVA

L'objectif du test ANOVA est de déterminer si les moyennes des groupes sont égales. Si c'est le cas, alors il n'est que peu intéressant de conserver la distinction entre les groupes dans un modèle d'estimation du prix pour la suite. Dans le cas contraire, si les moyennes sont différentes, alors distinguer les différents cas en fonction des groupes permettrait au modèle de prédire au mieux les prix.

Le test ANOVA a donc été réalisé pour les types de construction et les types de mandat. L'hypothèse nulle d'un ANOVA est que les moyennes sont égales, si la p-value est supérieure au seuil. Dans le cas contraire, si la p-value est inférieure au seuil, alors les moyennes des groupes ne sont pas toutes égales. (RAKOTOMALALA, 2015)

	Type de construction	Type de mandat	Seuil
p-value	43.2 %	6.1 %	5 %
Égalité des moyennes	non	non	-

TABLE 4.3 – Résultats du test ANOVA

Pour le type de construction, les moyennes sont toutes égales ($43.2 \% > 5 \%$). Ce résultat correspond bien aux attentes qui pouvaient être fondées en observant la distribution des données sur la Figure 4.3.

Concernant le type de mandat, la valeur de la p-value est proche du seuil de 5 %. De plus, pour rappel les hypothèses du test ANOVA n'étaient pas toutes satisfaites ce qui ne permet pas de garantir l'exactitude des résultats. La distinction entre les différents groupe en fonction du type de mandat semble donc être intéressante dans l'estimation des prix.

Afin d'évaluer l'effet des autres variables, il est possible de réaliser ce test pour les autres variables :

	p-value
Type de construction	43.2 %
Type de mandat	6.1 %
Date	$2.9 \cdot 10^{-9} \%$
Net	0.4 %
Somme quantité	0.05 %
Type de construction : Type de mandat	9.5 %

TABLE 4.4 – Résultats du test ANOVA pour toutes les variables

A noter que la combinaison de deux facteurs (type de construction et type de mandat) a été testée, mais sans réel succès.

La date semble être la variable qui a le plus d'effet sur le prix du bicouche. Afin de poursuivre l'étude en ce sens, différentes méthodes de sélections des variables se présentent (ARCADIUS, AKOSSOU et PALM, 2004).

4.1.3 Sélection des variables

Différentes méthodes de sélection des variables ont été étudiées ; la corrélation, Extra Trees Classifier, Lasso et Recursive Feature Elimination (RFE). Le détail de chacune de ces méthodes est présenté à l'Annexe A.1.

Afin de comparer les différentes méthodes, les résultats ont été regroupés dans le Tableau 4.5. Pour chaque méthode, les variables ont été classées en fonction de leur importance (1 pour la variable la plus importante, et 15 pour la variable avec le moins d'effet sur le prix du bicouche).

	Corrélation	Importance	Lasso CV	RFE	Moyenne
Date	1	1	1	1	1.0
Somme Quantité	3	3	2	3	2.8
Article	4	6	3	4	4.2
Net	5	2	9	2	4.5
Prix fourniture	2	5	11	5	5.8
Type de construction - 110	13	7	5	6	7.8
Type de mandat - 210	6	10	4	12	8.0
Type de mandat - 215	7	9	13	8	9.2
Type de construction - 100	10	13	6	9	9.5
Type de mandat - 200	8	12	7	11	9.5
REP	12	4	10	15	10.2
Type de construction - 105	14	8	12	7	10.2
Type de mandat - 205	11	14	8	13	11.5
Type de mandat - 220	15	11	14	10	12.5
Type de mandat - 225	9	15	15	14	13.2

TABLE 4.5 – Classement des variables en fonction des différentes méthodes de sélection des variables

Quelques paramètres ne seront pas utilisés comme variables indépendantes par la suite. Le prix de fourniture et les rabais, escompte et prorata (REP) serviront à ajuster le prix du bicouche, et ne seront donc pas des variables. La variable article décrit quant à elle le numéro

de l'article. Cependant il avait été décidé de traiter l'ensemble des données relatives aux bicouche communément. Introduire cette variable irait donc à l'encontre de cette hypothèse. Les variables les plus intéressantes semblent donc être la date, la somme quantité ainsi que le montant net.

4.2 Régression linéaire multiple

La régression linéaire OLS (Ordinary Least Squares) sera utilisée et implémentée sur *Python*. Il s'agit d'une méthode statistique utilisée pour modéliser la relation linéaire entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. Le principe de fonctionnement de la régression linéaire OLS repose sur la minimisation des erreurs quadratiques entre les valeurs réelles de la variable dépendante et les valeurs prédites par le modèle linéaire.

4.2.1 Équation

L'idée est de pouvoir prédire un prix de bicouche en fonction de plusieurs paramètres. Déterminer les paramètres de la régression revient à estimer les paramètres d'une régression mettant en jeu une variable endogène Y (le prix du bicouche) et p variables exogènes X_j (le nombre de paramètres) (RAKOTOMALALA, 2015). Avec n observations, l'équation est du type :

$$y_i = \alpha + \beta_1 \cdot x_{i,1} + \dots + \beta_p \cdot x_{i,p} + \epsilon_i \quad (4.1)$$

où :

- y_i est la i -ème observation de la variable Y
- $x_{i,j}$ est la i -ème observation de la j -ème variable. $x_{i,j}$ peut être binaire (1 si condition vraie ; 0 sinon), ou continue ($x_{i,j} \in \mathbb{R}$)
- α est une constante ($\alpha \in \mathbb{R}$)
- β_j est le paramètre de la j -ème variable ($\beta_j \in \mathbb{R}$)
- ϵ_i est l'erreur du modèle

4.2.2 Mesures de performance

4.2.2.1 Indicateurs de performance

Une fois les coefficients estimés sur la base des données disponibles, il est nécessaire de calculer la performance du modèle.

Pour calculer cette dernière différents indicateurs sont couramment utilisés :

- **Erreur absolue moyenne**

L'erreur absolue moyenne (Mean absolute error (MAE) en anglais), est une mesure de l'erreur entre les valeurs réelles d'une variable (y_i) et les valeurs prédites par un modèle (\hat{y}). Elle quantifie la moyenne des écarts absolus entre les prédictions et les observations réelles.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.2)$$

- **Erreur absolue moyenne en pourcentage**

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) en anglais, elle permet de quantifier l'erreur moyenne en pourcentage entre les valeurs réelles et les valeurs prédites.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4.3)$$

- **Erreur quadratique moyenne**

Plus cet indicateur est faible et plus le modèle est performant. En effet, il correspond à l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs réelles.

\bar{y} : moyenne de y

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.4)$$

- **Coefficient de détermination linéaire de Pearson**

Le R^2 permet d'expliquer comment les variables indépendantes d'un modèle linéaire permettent d'expliquer la variance de la variable dépendante. En d'autres termes, cet indicateur décrit le pourcentage de la variation de la variable dépendante (le prix ici) en fonction des variables indépendantes (les paramètres). Ainsi cette valeur est comprise entre 0 et 1. Plus la valeur est importante, et plus le modèle permet d'estimer au mieux les valeurs. (RAKOTOMALALA, 2015)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.5)$$

Le R_{adj}^2 tient compte du nombre de paramètres dans le modèle, ce qui permet ainsi d'éviter la sur-évaluation. Cette valeur est toujours inférieure ou égale au R^2 . Si la valeur est nettement inférieure, alors cela implique que plusieurs variables indépendantes du modèle sont redondantes.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (4.6)$$

4.2.2.2 Séparation du jeu de données

Afin que les performances ne soient pas mesurées sur les données d'entraînement de la régression linéaire, il est nécessaire de séparer les données en deux parties ; une première (comportant 80 % des données) permettant d'effectuer la régression linéaire, puis une seconde partie (comportant les 20 % restants des données) permettant d'évaluer les performances du modèle.

Cependant, du fait du peu de données, les performances fluctuent en fonction de la répartition des données entre l'ensemble pour la réalisation de la régression et l'ensemble de données pour le test de performance. Ainsi, il a été décidé d'effectuer plusieurs fois la régression, avec des ensembles de données différents puis de faire la moyenne des performances entre ces différents essais.

Il est alors intéressant d'étudier le nombre d'itérations nécessaires pour que la moyenne des

performances converge. Afin de réaliser ce test de convergence, il a été effectué la moyenne des performances en augmentant successivement le nombre d'itérations. Lorsque la moyenne des performances devient constante, alors on peut dire que ça converge. Le nombre d'itérations correspondant à ces performances peut alors être celui conservé pour la suite du travail.

Sur la Figure 4.5, il est possible d'observer que la moyenne des résultats varie constamment mais converge progressivement en augmentant le nombre d'itérations. Après 1000 itérations, les performances semblent être relativement constantes au dixième près. Ainsi, les régressions seront effectuées en réalisant 1000 fois la régression.

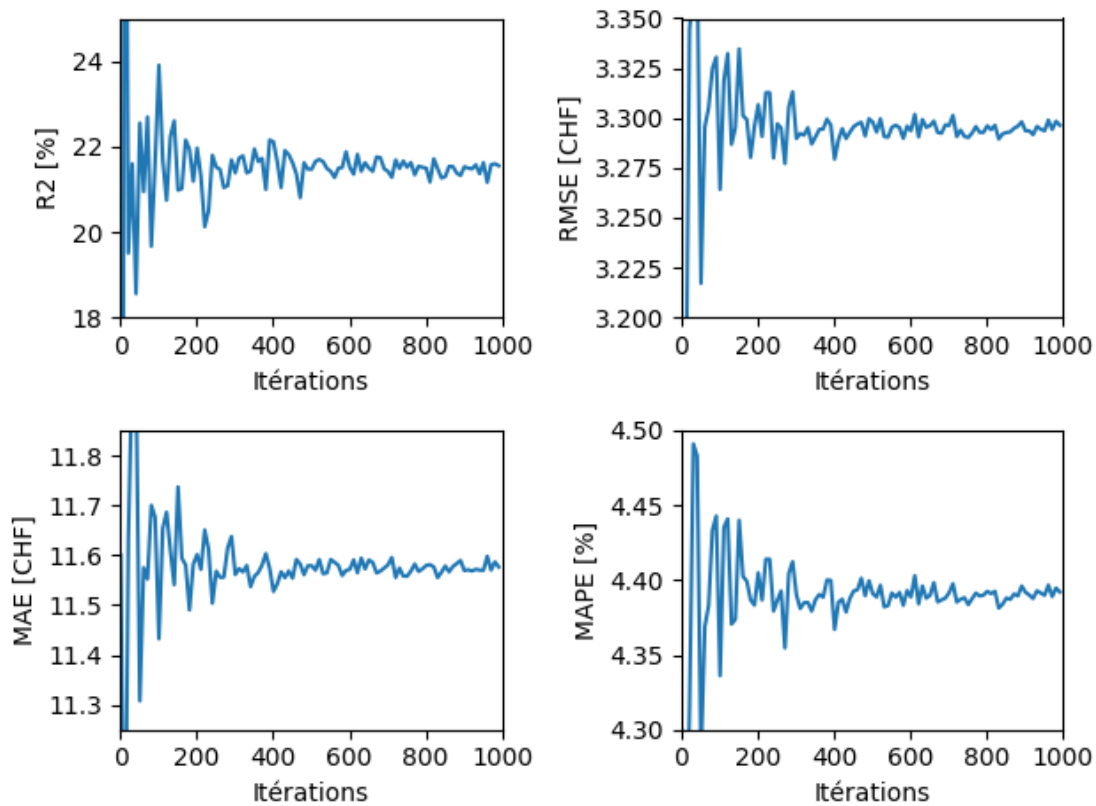


FIGURE 4.5 – Moyenne des indicateurs en fonction du nombre d'itérations - 1000 itérations

4.2.3 Performances

4.2.3.1 Régressions linéaires multiples à 11 variables

Après avoir défini la méthodologie ainsi que les indicateurs de performances, il est désormais possible d'obtenir les premiers résultats.

Au cours de l'analyse des données, il avait été calculé le prix en soustrayant le prix de fourniture. Pour rappel cela permet de ne pas être impacté par les fortes variations de prix dues aux fournitures. De plus, chaque projet a un rabais, escompte et prorata différent (nommé REP dans ce projet), ces derniers peuvent également être déduits afin de n'estimer que le prix de pose, et ainsi d'avoir une correspondance entre l'ensemble des données à estimer.

Différentes régressions ont ainsi été mises en place pour évaluer chacun de ces types de variables à estimer. De plus, du fait des formes de distributions, il pourrait également être intéressant d'estimer le logarithme du prix.

Les régressions ont été effectuées avec les 11 variables indépendantes étudiées précédemment. L'équation de la régression linéaire multiple est de la forme :

$$\begin{aligned}
 \text{prix} = & \text{constante} + \beta_{Date} \cdot Date + \beta_{Net} \cdot Net + \beta_{Somme\ Quantit\acute{e}} \cdot Somme\ Quantit\acute{e} \\
 & + \beta_{Type\ const\ 100} \cdot Type\ const\ 105 + \beta_{Type\ const\ 100} \cdot Type\ const\ 105 \\
 & + \beta_{Type\ const\ 110} \cdot Type\ const\ 110 + \beta_{Type\ mandat\ 200} \cdot Type\ mandat\ 200 \\
 & + \beta_{Type\ mandat\ 205} \cdot Type\ mandat\ 205 + \beta_{Type\ mandat\ 210} \cdot Type\ mandat\ 210 \\
 & + \beta_{Type\ mandat\ 215} \cdot Type\ mandat\ 215 + \beta_{Type\ mandat\ 220} \cdot Type\ mandat\ 220 + \epsilon
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Pour chacune de ces régressions, les résultats moyens pour les 1000 itérations sont résumés dans le Tableau 4.6.

Afin d'améliorer la comparaison des résultats entre les différentes régressions, ces derniers sont également présentés sous forme de graphique (Figure 4.6). Ce dernier permet de comparer les résultats en fonction de type de variable dépendante. Le modèle est meilleur lorsque ; le R^2 est le plus grand, mais avec les RMSE, MAE et MAPE les plus faibles. Sur cette base, la régression avec pour variable à estimer le logarithme du prix de l'article semble la plus performante.

Variable dépendante	R^2_{train}	$R^2_{adj\ train}$	R^2_{test}	$R^2_{adj\ test}$	$RMSE$	MAE	$MAPE$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[CHF]	[CHF]	[%]
Prix	48.7	42.3	21.5	13.2	4.4	3.3	11.6
Log(Prix)	49.7	43.4	23.2	15.0	4.4	3.2	11.2
Prix-Fourniture	35.3	27.2	3.3	-7.0	4.5	3.4	23.5
Log(Prix-Fourniture)	32.4	23.9	5.3	-4.7	4.4	3.3	22.4
Prix/REP	49.5	43.2	22.0	13.7	4.3	3.2	11.7
Log(Prix/REP)	50.4	44.2	23.4	15.3	4.3	3.1	11.3
Prix/REP-Fourniture	34.9	26.7	1.7	-8.7	4.4	3.3	25.0
Log(Prix/REP-Fourniture)	31.6	23.1	3.4	-6.9	4.3	3.3	23.8

TABLE 4.6 – Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 11 variables

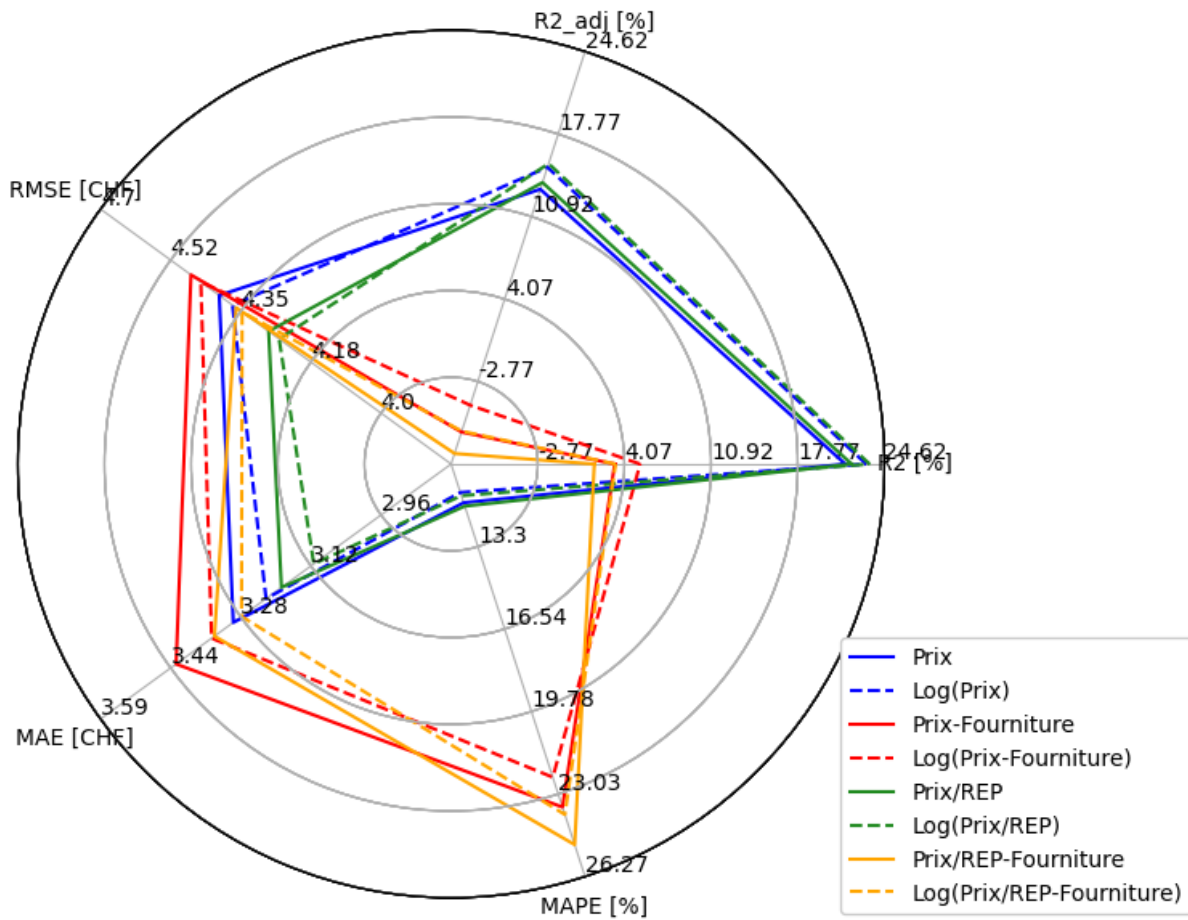


FIGURE 4.6 – Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer

L'indicateur R^2 a été calculé sur l'ensemble de données d'entraînement du modèle (R^2_{train}) ainsi que sur les jeux de données tests (R^2_{test}). Pour une même régression, R^2_{test} est nettement moins important que R^2_{train} . Cela signifie que le modèle n'est pas assez général; du fait du nombre trop important de variables, le modèle est sur-évalué et est donc trop spécifique aux données d'apprentissage. Afin de réduire ce phénomène, il faudrait donc réduire le nombre de variables. Ce problème est également identifiable avec l'écart de valeurs entre R^2 et R^2_{adj} . En effet, R^2_{adj} tient compte du nombre de paramètres dans le modèle. Ainsi, si leurs valeurs sont proches, alors le modèle n'est pas sur-évalué.

Afin de tester l'importance de chaque variable dans un modèle, il est possible d'utiliser sa valeur p (p-value) correspondante.

Dans une régression linéaire multiple, on cherche à établir une relation entre une variable dépendante (la variable que l'on souhaite prédire) et plusieurs variables indépendantes (les variables qui influencent potentiellement la variable dépendante). La p-value est associée à chaque variable indépendante et permet de déterminer si cette variable a un effet significatif sur la variable dépendante.

Pour obtenir la p-value, on effectue un test statistique. Celui-ci compare la contribution de chaque variable indépendante à la variance expliquée par le modèle de régression avec une hypothèse nulle selon laquelle la variable indépendante n'a aucun effet sur la variable dépendante.

La p-value mesure la probabilité d'obtenir une valeur aussi extrême que celle observée dans les données, sous l'hypothèse nulle. Si la p-value est inférieure à un seuil de significativité préalablement défini (ici 5 %), on rejette l'hypothèse nulle et conclut que la variable indépendante a un effet significatif sur la variable dépendante. Il est donc important de conserver cette variable dans le modèle. Si la p-value est supérieure au seuil, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle et conclure que la variable indépendante n'a pas d'effet significatif.

Variable dépendante	const	Date	Net	Somme Quantité	Type de construction - 100	Type de construction - 105	Type de construction - 110	Type de mandat - 200	Type de mandat - 205	Type de mandat - 210	Type de mandat - 215	Type de mandat - 220
Prix	0.0	0.0	69.0	24.6	62.5	55.1	67.7	26.8	37.7	27.0	55.2	64.8
Log(Prix)	0.0	0.0	71.2	13.2	57.7	54.8	64.2	36.4	38.7	41.4	52.9	60.6
Prix-Fourniture	0.1	0.0	61.2	21.2	46.5	43.7	60.2	50.6	19.4	45.8	56.4	40.9
Log(Prix-Fourniture)	1.7	0.1	69.3	11.8	32.2	40.3	52.1	65.0	16.8	63.4	54.0	34.2
Prix/REP	0.0	0.0	67.3	33.3	60.2	52.5	65.4	21.6	44.0	21.4	59.6	56.3
Log(Prix/REP)	0.0	0.0	70.8	19.4	58.5	51.7	62.4	31.3	44.7	35.2	57.6	54.9
Prix/REP-Fourniture	0.1	0.0	58.7	28.9	50.9	41.7	64.7	45.2	23.8	38.6	61.5	54.4
Log(Prix/REP-Fourniture)	0.9	0.0	68.8	15.9	33.8	36.6	56.1	62.5	22.4	60.0	57.3	43.7

TABLE 4.7 – p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 11 variables

La date contribue donc à décrire la majorité de la variance du modèle. Toutes les autres variables indépendantes ont des valeurs de p-values supérieures au seuil de 5 %. Leur contribution n'est donc pas significative; elles pourraient donc être retirées du modèle.

Dans l'idée d'améliorer la généralisation du modèle, il est indispensable de réduire le nombre de variables indépendantes. Pour ce faire, il est possible de s'appuyer sur l'étude des p-values ainsi que sur les méthodes de sélection des variables (Section 4.1.3). Sur cette base il sera étudié un second modèle avec uniquement 2 variables; la date et la surface de bicouche (variable Somme Quantité).

D'autres régressions ont été effectuées, et leurs résultats sont présentés en annexe. Il y a un modèle avec 3 variables (la date, la surface et le montant net du chantier) (Annexe A.2.1). Les régressions avec uniquement la date comme variable ont également été effectuées (Annexe A.2.2).

4.2.3.2 Régressions linéaires multiples à 2 variables

Sur la base de l'analyse des régressions avec 11 variables, il a été essayé de réduire le nombre de variables à 2 : la date et la surface. Les résultats sont présentés de manière analogue.

Variable dépendante	R_{train}^2	$R_{adj\ train}^2$	R_{test}^2	$R_{adj\ test}^2$	$RMSE$	MAE	$MAPE$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[CHF]	[CHF]	[%]
Prix	40.1	38.9	34.4	32.8	4.1	2.9	10.1
Log(Prix)	42.9	41.7	35.3	33.7	4.0	2.9	9.8
Prix-Fourniture	24.2	22.6	16.6	14.5	4.2	3.1	21.3
Log(Prix-Fourniture)	23.1	21.5	17.5	15.5	4.2	3.0	20.0
Prix/REP	40.3	39.1	34.7	33.1	4.0	2.8	10.2
Log(Prix/REP)	43.4	42.2	35.6	34.0	3.9	2.8	9.8
Prix/REP-Fourniture	23.7	22.1	15.9	13.8	4.1	3.0	22.3
Log(Prix/REP-Fourniture)	22.8	21.2	16.9	14.9	4.1	3.0	21.1

TABLE 4.8 – Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 2 variables

Un aspect important est le fait que les 4 régressions qui sont composées du prix de l'article moins le prix de fourniture, semblent avoir des résultats moins concluants. Ceci est d'autant plus étonnant que ce n'est pas ce qui était attendu. Ces écarts sont surtout visibles pour l'erreur absolue moyenne en pourcentage et le R^2 pour lesquels les écarts de résultats sont très importants. L'erreur absolue moyenne (MAE) est quasiment constante en fonction des résultats. Lorsque le prix de fourniture est soustrait au prix de l'article, alors la valeur à estimer est plus faible (environ de moitié car il avait été remarqué que la fourniture représentait en moyenne 55 % du prix de vente). Ainsi en pourcentage par rapport à cette valeur à estimer, l'erreur devient nettement plus importante.

Un raisonnement similaire permet de comprendre l'écart important pour les résultats du R^2 . Ce dernier est calculé comme 1 moins la somme du ratio entre l'erreur de prédiction et l'écart entre les valeurs et la moyenne (Équation 4.5). L'erreur de prédiction reste quasiment constante alors que l'écart entre les valeurs réelles et leur moyenne est moins important du

fait que ces valeurs sont plus faibles. Ainsi le ratio devient plus important, et par conséquent, la valeur du R^2 diminue.

Il sera donc comparé les différents modèles sur les résultats de l'erreur quadratique moyenne, qui semble être l'indicateur le plus adapté. Avec cet indicateur, les 4 régressions qui tiennent compte du prix de fourniture ont également des erreurs plus importantes. Toutefois, les différences sont du même ordre de grandeur, et donc relativement faibles.

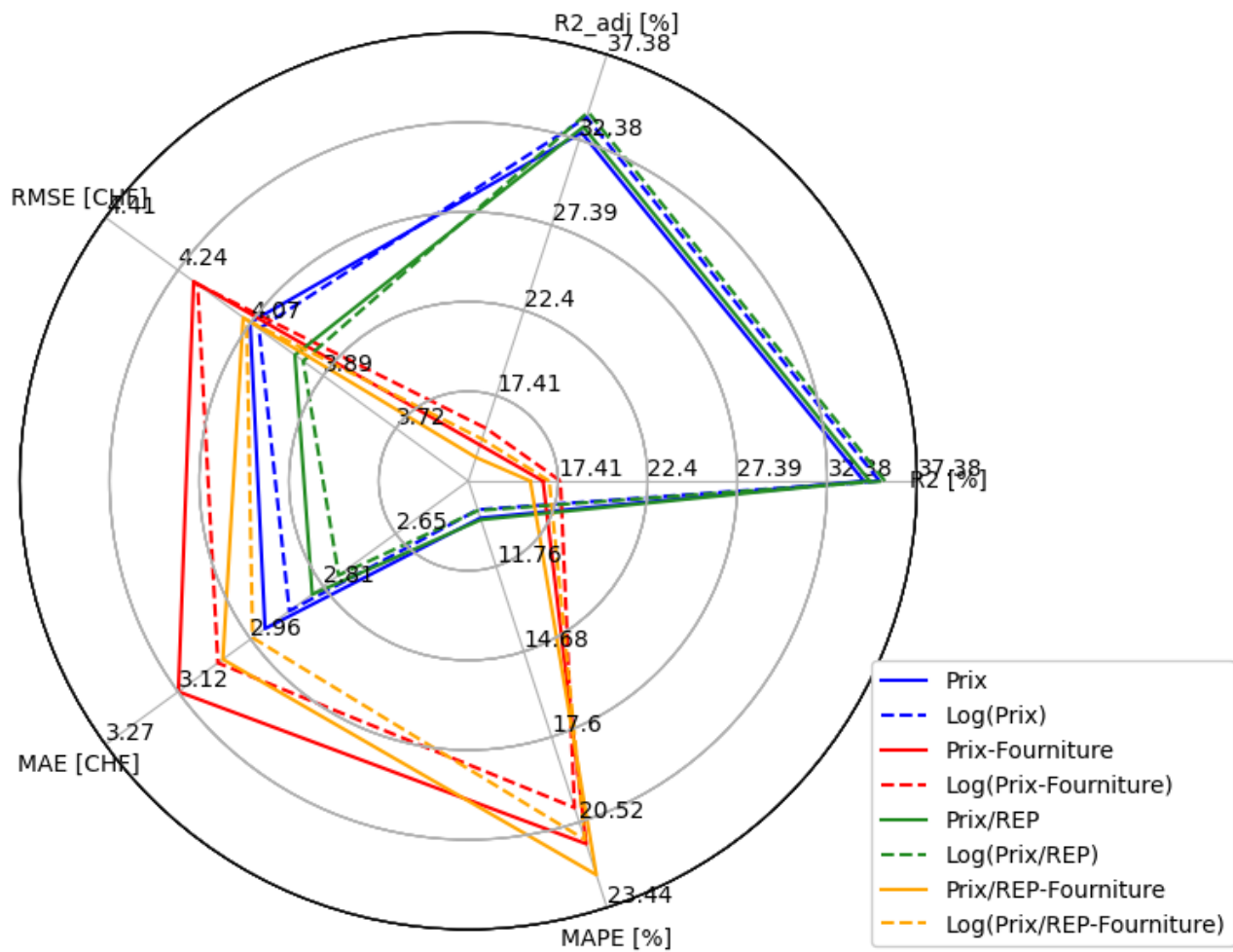


FIGURE 4.7 – Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer - 2 variables

Les p-values pour les variables sont inférieures au seuil de 5 %. Ainsi, la date et la surface sont bien significatives.

Variable dépendante	const	Date	Somme Quantité
Prix	0.000	0.000	0.033
Log(Prix)	0.005	0.000	0.023
Prix-Fourniture	0.262	0.058	0.021
Log(Prix-Fourniture)	3.252	0.111	0.032
Prix/REP	0.000	0.000	0.059
Log(Prix/REP)	0.002	0.000	0.045
Prix/REP-Fourniture	0.202	0.047	0.036
Log(Prix/REP-Fourniture)	1.957	0.074	0.056

TABLE 4.9 – p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 2 variables

Il est plus cohérent d'étudier le prix de l'article en soustrayant le prix de fourniture et le rabais, escompte et prorata. Il a été vu que pour cette régression les résultats ne sont pas plus "mauvais" que pour les autres types de variables à estimer. De plus, pour les données tests, les résultats sont meilleures en appliquant le logarithme. Le modèle est alors :

$$\begin{aligned}
\log(\text{prix}/\text{REP} - \text{prix fourniture}) &= \text{constante} + \beta_{\text{Date}} \cdot \text{Date} \\
&+ \beta_{\text{Somme Quantité}} \cdot \text{Somme Quantité} + \epsilon \\
&= -5.973646 + 0.000455 \cdot \text{Date} \\
&- 0.000364 \cdot \text{Somme Quantité} + \epsilon
\end{aligned} \tag{4.8}$$

4.2.4 Analyse de la régression linéaire multiple conservée

Le modèle étant défini (Équation 4.8), il devient possible d'étudier ses résultats.

Les coefficients de la régression étant estimés, il est possible de prédire pour chaque prix rendu, le prix estimé par le modèle. Les résultats sont représentés sur la Figure 4.8.

Les points bleus correspondent aux prix rendus et les points rouges aux prix estimés. Les prix estimés sont nettement moins dispersés. Le modèle ne permet donc pas de prédire la disparité des prix rendus.

Ce graphique met en lumière l'impact de la date sur l'estimation des prix. En effet, plus la

date devient récente, et plus les prix estimés sont importants. Ceci correspond au fait d'avoir un coefficient positif dans la régression pour la date ($\beta_{Date} = 0.000455$).

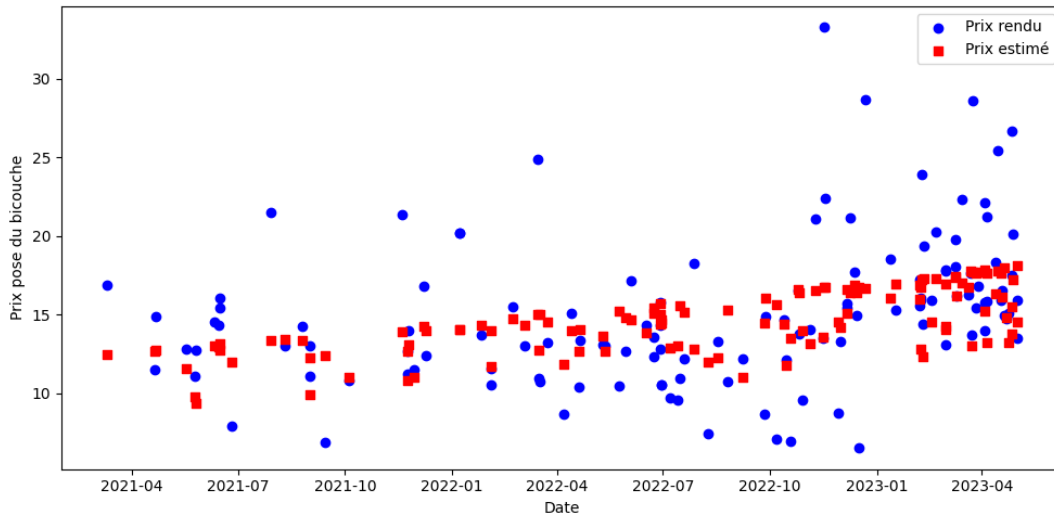


FIGURE 4.8 – Prix rendus et estimés en fonction de la date

La surface a un effet négatif sur le prix ($\beta_{Somme\ Quantité} = -0.000364$).

Le graphique 4.9 permet d'illustrer l'effet des deux variables sur le prix.

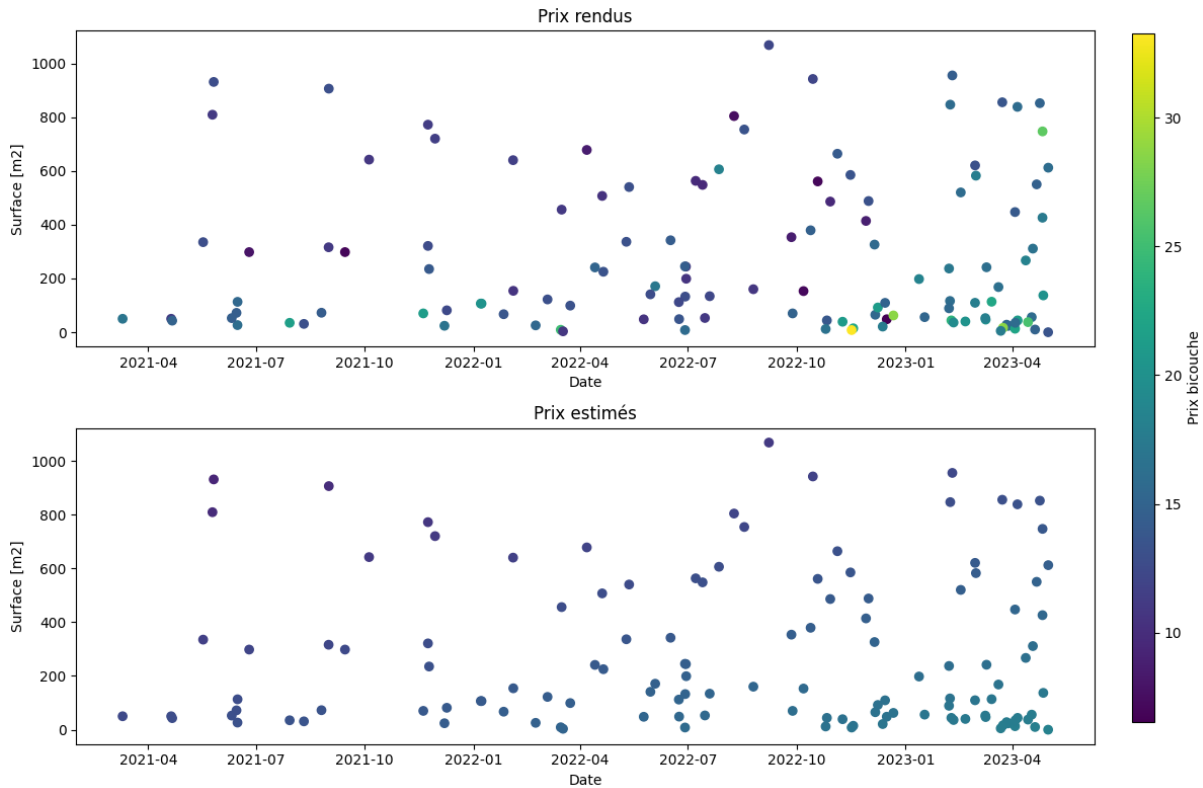


FIGURE 4.9 – Prix rendus et estimés en fonction de la date et de la surface

Pour les prix estimés, plus la date est récente et plus le prix est important (axe des abscisses). Pour la surface, plus elle est importante est plus le prix est faible. Le graphique supérieur représente les prix rendus. Les effets observés avec les estimations se retrouvent également, mais de manière moins prononcée.

Pour illustrer de manière plus parlante l'effet des variables sur le prix estimé du bicouche ; il est possible de réaliser une analyse de sensibilité. La Figure 4.10 représente avec la couleur le prix du bicouche estimé, en fonction de deux paramètres (un selon chaque axe).

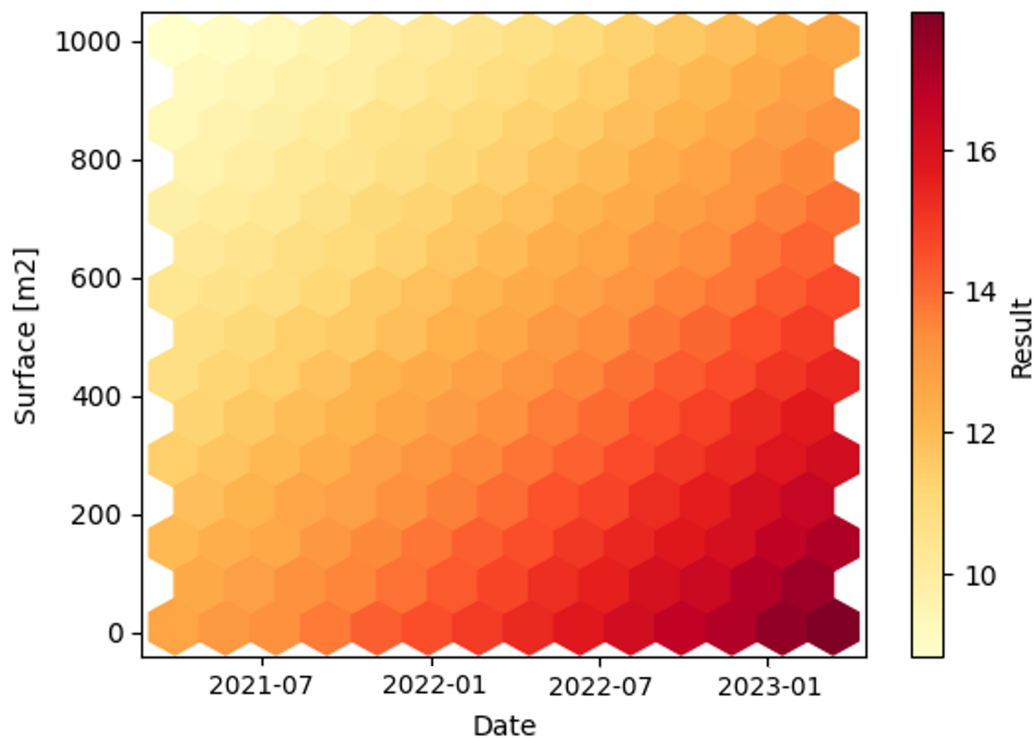


FIGURE 4.10 – Analyse de sensibilité

La régression linéaire permet l'estimation du prix en fonction de paramètres. Cependant, du fait du peu de variables significatives, les performances sont discutables. De plus, ce modèle n'est pas compatible avec l'utilisation du logiciel *BauBit*. Afin de pouvoir améliorer l'utilisation de ce logiciel, il serait nécessaire de connaître les rendements moyens pour les différentes positions.

4.3 Estimation des rendements moyens

Il serait intéressant de calculer les rendements de pose correspondants aux différents prix des articles. Cela revient à faire le travail de calcul dans le sens inverse.

Le rendement peut alors se calculer comme :

$$\text{rendement} = \frac{\frac{\text{prix article}}{REP} - \text{prix fourniture}}{\text{prix ouvrier}} \quad (4.9)$$

Ainsi, pour chaque prix d'article, il est possible de trouver son rendement correspondant. Ce travail a été effectué pour les articles suivants : enduit d'apprêt, pare-vapeur et bicouche. Pour chaque type d'article, les rendements sont présentés sous forme d'histogramme afin d'observer leur distribution.

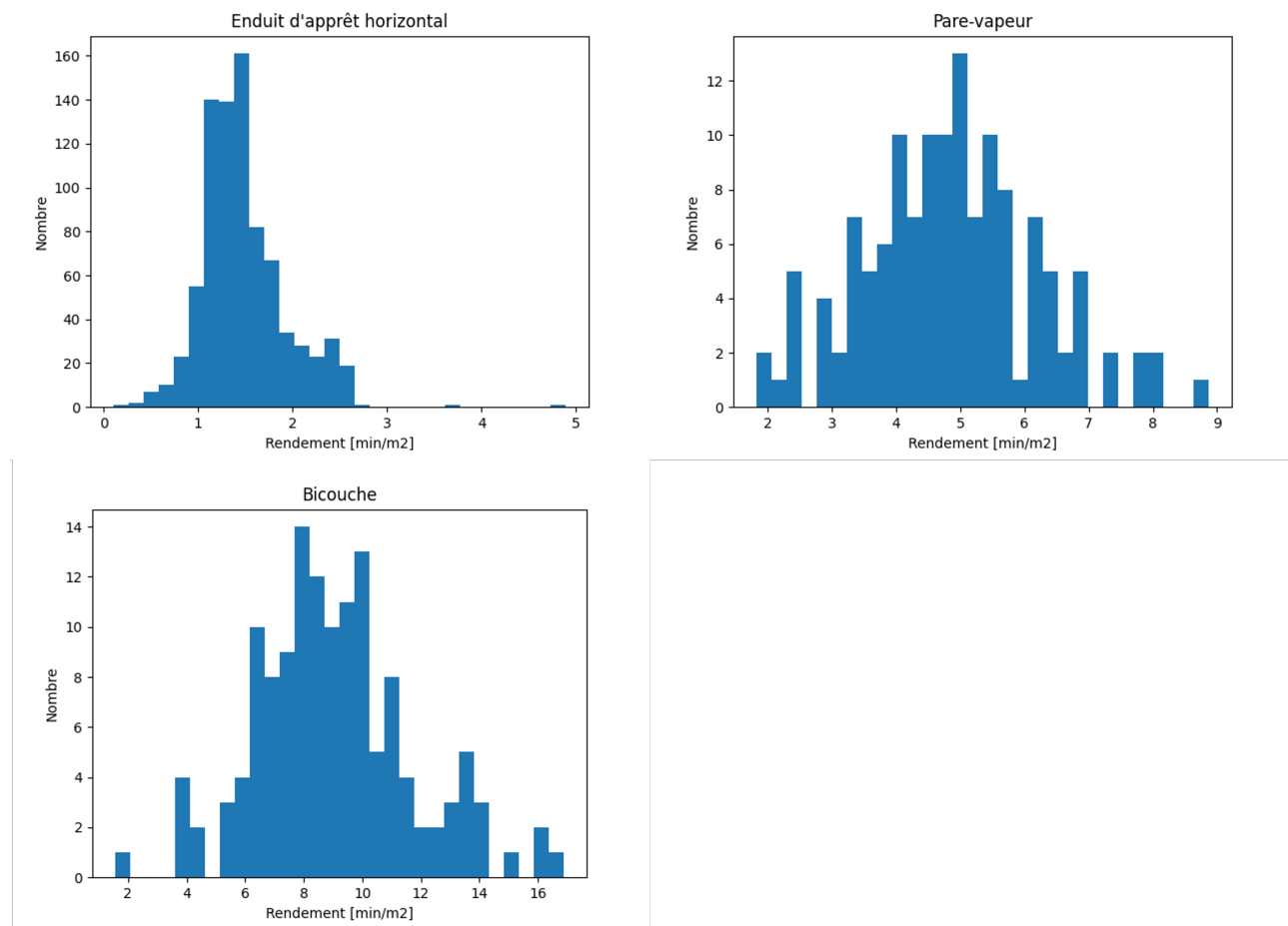


FIGURE 4.11 – Histogrammes du rendement pour les articles principaux

De manière générale, les rendements semblent bien distribués. Pour l'enduit d'apprêt, les rendements ne semblent pas distribués de manière symétrique par rapport à la moyenne. Cela est dû au fait que les prix de l'enduit d'apprêt sont proches de 0.

Afin d'obtenir des valeurs exploitables, les différents percentiles ont été calculés (Tableau 4.10). Les valeurs trouvées pour la médiane (percentile 50 %), correspondent environ aux rendements qui sont couramment utilisés pour la calculation.

Article	Percentile					
	25 %	37.55 %	50 %	62.5 %	75 %	Calculation
Enduit d'apprêt	1.170	1.290	1.430	1.520	1.690	1
Pare-vapeur	4.000	4.420	4.780	5.120	5.630	4
Bicouche	7.420	8.090	8.810	9.630	10.390	8

TABLE 4.10 – Rendements [min/m^2] des articles principaux

Un aspect important à prendre en considération est le prix de l'ouvrier. Ces résultats ont été calculés avec un prix de 90 CHF/h. Cependant, en fonction de la valeur qui est prise, le rendement est fortement impacté.

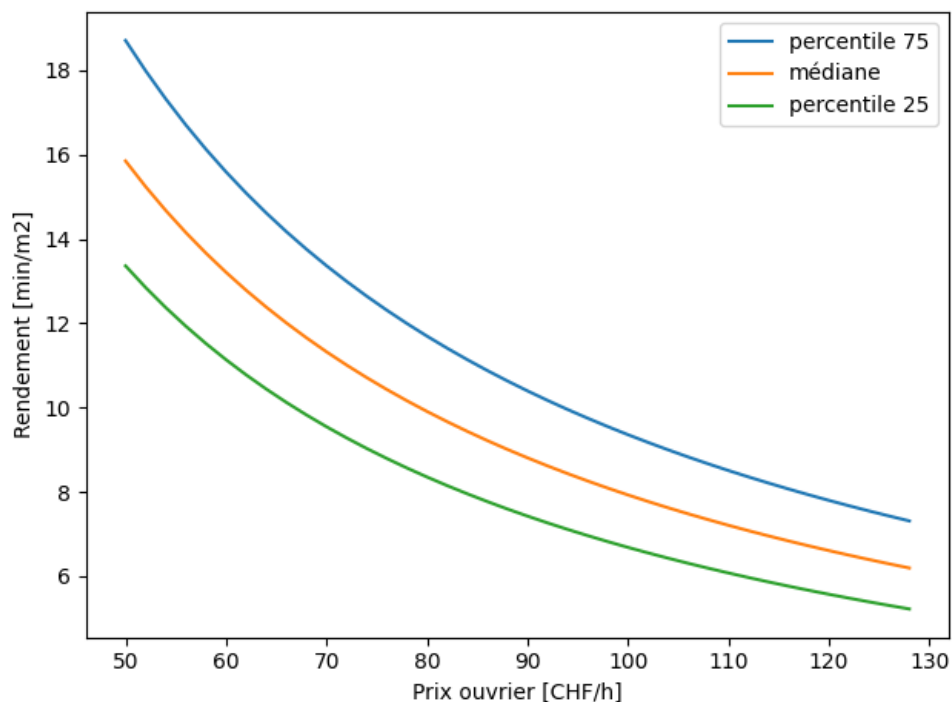


FIGURE 4.12 – Évolution du rendement du bicouche en fonction du prix de l'ouvrier

5 | BauBit

Les calculateurs n'utilisent pas tous *Baubit*. Il y a donc une volonté au sein de *PHIDA* d'harmonisation de son utilisation et des méthodes de calculs. A l'heure actuelle, les calculateurs estiment les prix indépendamment de *Baubit*, puis inscrivent les prix sur *Baubit*. L'idée serait alors de pouvoir exploiter *Baubit* pour l'estimation des prix.

Il sera donc étudié la manière dont ce logiciel fonctionne et comment le travail de calculation peut être simplifié.

5.1 Principe général et étapes

Baubit est un logiciel complet, qui permet la calculation. Il décompose le travail de calculation en plusieurs étapes (qui suivent la logique de la calculation à la main) : (ABBF BAUSOFT AG, 2017)

1. Prix de main-d'oeuvre et de fourniture
2. Rendements pour estimer les prix de main-d'oeuvre, de fourniture etc
3. Coefficients de pondération

Ces différentes étapes seront détaillées. Il sera également présenté la manière dont ces dernières ont été abordées.

5.1.1 Éléments de coûts

Pour estimer le prix d'un article, il est tout d'abord nécessaire de connaître le prix des éléments qui le composent (prix de main-d'oeuvre, prix de fourniture...). Comme présenté précédemment, le calcul s'effectue sur la base d'un prix unitaire, multiplié par la quantité.

Baubit contient une "bibliothèque" des différents éléments qui composent les prix des articles. Cette dernière suit la composition d'un prix expliquée à la section 2.2.1. Ainsi, pour chaque

élément, un prix unitaire peut y être renseigné. À titre d'exemple, il est possible d'y renseigner l'ensemble des isolants et de leur assigner le prix de vente du fournisseur.

↙ Différentes catégories

1 - Salaire		2 - Matériaux		3 - Machines/Engins		4 - Matériaux exploitation		5 - Outillage		6 - Tiers		1...6 - Tous	
Grp. ▲	N° élément	Description	Un. ▲	Mutation de...	Base								
ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	=							
S		Salaire											
S90	100.000	Salaire étancheur	h	31.05.2023	95.00								
S90	101.000	Travaux en régie - Chef d'équipe	h	31.05.2023	103.00								
S90	102.000	Travaux en régie - Ouvrier qualifié	h	31.05.2023	100.00								
S90	103.000	Travaux en régie - Auxiliaire	h	31.05.2023	97.00								

FIGURE 5.1 – Présentation des éléments de coûts sur *Baubit*

Pour le coût de main-d'œuvre (Section : 1-Salaire, dans les Éléments de coûts sur *Baubit*), il est renseigné le prix de base horaire de travail.

La seconde section (2-Matériaux) contient la liste de tous les matériaux utilisables sur chantier. Afin d'avoir une estimation précise du coût de chacun d'eux sur chantier, pour chacun des matériaux différentes informations sont renseignées : prix du fournisseur, rabais, coût de transport. Étant donné qu'il n'y a pas de coût de transport, cette colonne est utilisée pour renseigner les hausses Swisspor. Le prix net des différents matériaux est alors calculé par *Baubit*.

1 - Salaire		2 - Matériaux		3 - Machines/Engins		4 - Matériaux exploitation		5 - Outillage		6 - Tiers		1...6 - Tous	
Grp. ▲	N° élément	Description	Un. ▲	Prix fourn.	Rab. CHF	Rab. %	Trsp. CHF	Trsp. %	Net	Mutation de...			
ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	=	=	=	=	=	=	ABC		
M85	100.071	Bikuplan ECO EGV3 10 x 1 m	m2	7.10	3.40	48.00	1.51	41.00	5.21	23.05.2023			
M85	100.072	Bikuplan ECO EGV3.5 v flam 10 x 1 m	m2	7.80	3.74	48.00	1.66	41.00	5.72	23.05.2023			
M85	100.073	Bikuplan ECO LL Vario v 8 x 1.1 m	m2	12.20	5.85	48.00	2.60	41.00	8.95	23.05.2023			
M80	100.074	Bikuplan EGV3 10 x 1 m	m2	6.90	3.76	54.50	1.28	41.00	4.42	23.05.2023			
M80	100.076	Bikuplan EGV3 speed 10 x 1 m	m2	7.20	3.92	54.50	1.34	41.00	4.62	23.05.2023			

FIGURE 5.2 – Présentation des éléments de coûts (Matériaux) sur *Baubit*

Cependant, une problématique demeure... cet outil n'est utilisable que si les prix sont maintenus à jour. Étant donné la grande quantité de produits, il a été mis en place un outil pour

aider à cette mise à jour. Il existe un fichier *Excel* avec l'ensemble des matériaux Swisspor (qui constituent une grande majorité des produits). Les fichiers *Excel* peuvent être importés sur *Baubit*, mais ils doivent avoir des colonnes spécifiques. Un algorithme *Python* a été pensé pour pallier à cette étape. De plus, afin de rendre son utilisation simple, un raccourci a été créé. Ainsi, il suffit de cliquer sur le raccourci sur le bureau de l'ordinateur et de sélectionner le fichier *Excel*. Le code va alors générer un nouveau fichier, prêt à être importé sur *Baubit*. Une fiche décrivant cette procédure a été réalisée. Elle est présentée à l'Annexe A.3.

De manière analogue il serait possible de compléter les informations pour les Machines/Engins, Matériaux d'exploitation, Outillage et Tiers.

Tous ces éléments de base peuvent ensuite être utilisés pour définir le prix unitaire des différents articles du CAN ou du catalogue libre.

5.1.2 Analyse

Sur la base des éléments de coûts présentés précédemment, il est possible de calculer le prix de chaque article. Pour ce faire, il faut réaliser une analyse de prix pour un article. Dans cette analyse de prix, il faut tout d'abord renseigner tous les éléments qui composent ce prix. Par exemple, s'il y a de la main-d'œuvre, alors il faut importer le prix de main-d'œuvre depuis les "Éléments de coûts" et renseigner le rendement de pose. *Baubit* va alors calculer le prix de main-d'œuvre pour la pose du matériaux pour une quantité unitaire. De même pour les matériaux, il est possible d'inscrire la liste des matériaux utilisés. Le prix unitaire de fourniture étant contenu dans les "Éléments de coûts", ce prix est automatiquement renseigné. Ce travail permet d'avoir pour chaque article un prix unitaire.

Rendement de pose

Récapitulation						
Gr. obj.	Rend.éq.	h/m2	Salaire	Matériaux	Inventaire	Tiers
Mo...	6.000	0.167	15.83	18.05		

Différents éléments

Analyse												
Élément de coûts	Description	Un.	Un...	IdCI	Quantité	Chute	FC	Base	Total	Quantité tot.	Mutation de...	Remarque
M56 650.000 02	Gaz propane (10.5KG)	Pi...	Piè...		0.043		1	21.05	0.91	44.548	05.04.2022	
S90 100.000	Salairé étancheur	h	h		1.000		1	95.00	15.83	172.667	31.05.2023	
M80 100.130	Bikutop EP5 WF S flam 8 x 1 m	m2	m2		1.000	15.00	1	7.15	8.22	1'191.400	23.05.2023	
M75 100.089	Bikuplan LL VARIO v 8 x 1.1 m	m2	m2		1.000	15.00	1	7.76	8.92	1'191.400	23.05.2023	

FIGURE 5.3 – Analyse de prix d'un article

5.1.3 Facteurs de calcul

Une fois les prix calculés, comme somme des différents éléments qui le compose, il est possible d'appliquer des facteurs. Ces derniers s'appliquent directement sur la décomposition des prix. En effet, il est possible de renseigner des facteurs différents en fonction du type de prix (Main-d'oeuvre, Fourniture, Engins, etc). Ces facteurs peuvent ainsi prendre en compte la marge de l'entreprise, les risques, les frais généraux etc. Ceci présente donc l'avantage de pouvoir les ajuster en fonction de la stratégie de l'entreprise. En effet, si une année le travail a été plus important que prévu et que les frais généraux ont donc déjà été remboursés, il est possible de ne plus les imputer aux chantiers sur le reste de l'année. Ceci permet de pouvoir avoir des prix plus bas. Cet outil permet donc une grande flexibilité.

5.2 Utilisation

L'utilisation de *Baubit* offre de nombreux avantages. En voici quelques-uns (mais il en existe d'autres...) :

- Système de calculation harmonisé
- Tenir compte des évolutions des prix des matériaux
- Flexibilité sur les facteurs de calcul en fonction du carnet de commande de l'entreprise
- Améliorer la passation vers l'exploitation, avec le détail des calculs
- Avoir un historique des prix rendus

Passer à la calculation serait donc bénéfique. De plus, son utilisation est relativement simple. Il est possible d'utiliser des analyses de prix déjà existantes. Ainsi, *Baubit* va proposer un prix (calculé par l'analyse de prix). Libre au calculateur de le modifier par la suite. Ce dernier peut modifier l'analyse de prix pour un article dans son projet (ce qui ne va pas modifier l'analyse de prix pour tous les autres projets) ou bien simplement mettre un prix fixe. (A noter que lorsqu'une analyse de prix est modifiée pour un projet, il est possible de l'exporter vers les données de base afin qu'elle soit disponible pour tous les autres projets.)

Un schéma présentant les liens entre les différentes étapes du fonctionnement de *Baubit* a été réalisé.

ÉLÉMENTS DE COÛTS

1 - Salaire	2 - Matériaux	3 - Machines/Engins	4 - Matériaux exploitation	5 - Outillage	6 - Tiers	...	8 - Tous													
N° élément	Type	Description	Base	Prix four.	Rab. CHF	Rab. %	Trsp. CHF	Trsp. %	Un. com.	Net	Frais fixes	Rép./Rév.	Energie	Lubrifi.	Usure	Engage.	Valeur neu.	Mutation de	Aktiv	
S10	100.100.01	Salaire	Salaire	Heures travail étancheur	h	35.00			1.0000										08.05.2023	
M90	200.105	Matériaux	Matériaux	Tôle inox, développement 300 mm	ml		7.20	4.22	54.10	1.72	48.00	0.8695	6.10						15.03.2023	
M90	200.106	Matériaux	Matériaux	Bikuplan LL EVA ép. 3.5 mm	m2		10.90	5.90	54.10	2.40	48.00	0.8695	8.51						08.05.2023	
M90	200.107	Matériaux	Matériaux	Bikuplan LL Vario Flam ép. 3 mm	m2		11.70	6.33	54.10	2.58	48.00	0.8695	9.14						08.05.2023	
M90	200.108	Matériaux	Matériaux	Bikuplan LL Vario ép. 3 mm	m2		12.00	6.49	54.10	2.64	48.00	0.8695	9.37						08.05.2023	
M90	200.109	Matériaux	Matériaux	Bikuplan EGV3 ép. 3 mm	m2		7.60	4.14	54.50	1.66	48.00	0.8695	5.89						08.05.2023	
M20	202.012.75	Matériaux	Matériaux	Pare-vapeurs ou Couches inférieures	m²		3.46	-1.56	-45.00		0.8695	5.77							08.05.2023	
M20	202.012.85	Matériaux	Matériaux	Couches supérieures, BIKUTOP EPS WF	m²		5.19	2.80	54.00	1.15	48.00	0.8695	4.07						08.05.2023	
M25	202.521.14	Matériaux	Matériaux	swesporEndurt d'apprêt VS 10 L	Litres		2.98				3.3333	0.89	0.00						15.03.2023	
M56	650.000.02	Matériaux	Matériaux	Gaz propane (10.5KG) - Pose libre - Sou	m²		2.18				2.2222	0.98							08.05.2023	
I		Machines/Eng...	Machines/Engins																	
I		Matériaux ex...	Matériaux exploitation																	
I		Outillage	Outillage																	
T		Tiers	Tiers																	

ANALYSE

Elément de coûts	Description	Un.	Un...	IdCI	Quantité	Chute	CPE	FC	Base	Total	Quantité tot.	Mutation de...	Remarque
S10 100.100.01	Heures travail étancheur	h	h		1.000				35.00		1.333	08.05.2023	
M56 650.000.02	Gaz propane (10.5KG) - Pose libre - Soudée en plein	m²	m²		1.000				0.98	0.98	10.000	08.05.2023	
M20 202.012.85	Couches supérieures, BIKUTOP EPS WF 5 Flam (ard. gris/flamm) d'épaisseur ...	m²	m²		1.000	15.00			3.54	4.075	11.500	08.05.2023	
M90 200.107	Bikuplan LL Vario Flam ép. 3 mm	m2	m2		1.000	15.00			7.95	9.14	11.500	08.05.2023	

Récapitulation					
Gr. obj.	Rend.éq.	h/m2	Salaire	Matériaux	Inventaire...
Mo...	7.500	0.133	4.67	14.19	

FACTEURS DE CALCUL

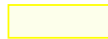
Texte	Référen...	Nombre / Part %	Tarif CHF/h	Part CHF/h
Salairé moyen		1.00	35.00	35.00
Chef d'équipe V		1.00	35.00	35.00
Frais production 1		142.85	50.00	50.00
Charges sur salaire de base	Bas.	42.85	42.85	15.00
Frais production 2		142.85	50.00	50.00
Majorations finales		257.13	90.00	90.00
Majoration Frais fixes	FP 2	70.00	100.00	35.00
Risque / Bénéfice	FP 2	10.00	14.29	5.00
Facteur de calcul			2.5713	

Texte	Référen...	Op	%	%
Coûts de base				100.00
Frais production 1				100.68
Frais magasin/atelier	Bas.		0.00	0.00
Pertes et risques de quantités	Bas.		0.00	0.00
Supplément pour transports de petites quantités	Bas.		0.00	0.00
Taxe RPLP	Bas.		0.68	0.68
Frais production 2				100.68
Surveillance et conduite de chantier sur frais production 1	FP 1		0.00	0.00
Majorations finales				120.82
Base d'imputation	BI			100.00
Frais généraux sur frais de production 2		+		0.00
Frais financiers sur frais de production 2		+		0.00
Prix de revient		=		100.00
Risque et bénéfice / perte en % sur PR	P	+	20.00	20.00
A déduire base d'imputation		-		100.00
Majorations finales sur frais de production 2	FP 2	==	20.00	20.14
Facteur de calcul				1.2082

PRIX DE L'OFFRE

PO3	400.180.27	BIKUTOP LL VARIO / RENO							
PO3	400.180.28	Surface développée	m2	10.000	29.10	291.00	<input checked="" type="checkbox"/>	A	
PO3	400.180.40	Surface développée	m2				<input type="checkbox"/>	A	
PO3	400.190.01	Plus-value pour raccord de la 1ère couche...	ml		0.00		<input checked="" type="checkbox"/>	A	
PO2	452.000	Plus-value pour relevés et retombées d'ét...							

Légende :



Paramètre non modifiable

Paramètre adaptable en cas de besoin

Paramètre à choisir

6 | Pour aller plus loin...

6.1 Abaque sur les rendements

Une première mise en application du travail effectué sur les rendements a été la conception d'un abaque. Ce dernier a pour objectif de pouvoir déterminer le rendement à avoir sur chantier afin d'être rentable en fonction du prix rendu dans l'offre. Différentes fiches ont alors été constituées en fonction des couches. Pour l'enduit d'apprêt, le pare-vapeur et la seconde couche d'étanchéité un raisonnement analogue a été appliqué. En ce qui concerne la pose de l'isolation et de la première couche d'étanchéité (qui doivent se poser simultanément sur chantier) la démarche est plus complexe.

Pour l'enduit d'apprêt, le pare-vapeur et la seconde couche d'étanchéité le calcul est relativement simple. En connaissant le prix de fourniture, il est possible de le soustraire au prix déposé afin d'en déduire le prix de pose. Ce dernier constitue ainsi le reste du prix qui peut être utilisé pour la pose. Ainsi, plus le prix de pose est élevé et plus il est possible d'avoir un rendement plus faible (travail plus lent sur chantier).

$$\begin{aligned} \text{prix déposé} &= \text{prix fourniture} + \text{rendement}_{\text{pose}} \cdot \text{prix de vente} \\ \Leftrightarrow \text{rendement}_{\text{pose}} &= \frac{\text{prix déposé} - \text{prix fourniture}}{\text{prix de vente}} \end{aligned} \quad (6.1)$$

En ce qui concerne l'isolation et la première couche, un raisonnement différent a dû être appliqué. En effet, à la fin de chaque journée il est impératif d'avoir recouvert l'isolation de la première couche. Il est donc intéressant de déterminer la surface optimale de pose. Cela revient à trouver l'équilibre entre le temps passé à poser l'isolation et le temps passé à la pose de la première couche d'étanchéité. La somme des heures de pose d'isolation et d'étanchéité

doit être égale aux heures de travail de la journée. Cette première contrainte peut se traduire mathématiquement par :

$$nb \ h_{pose \ isolation} + nb \ h_{pose \ 1couche} = nb \ h_{jour} \quad (6.2)$$

D'autre part, le fait que toute la surface d'isolation doive être recouverte d'étanchéité à la fin de la journée impose une seconde contrainte ; la surface posée d'isolation et de première couche doit être la même.

$$\begin{aligned} surface_{isolation} &= surface_{1couche} \\ \Leftrightarrow \frac{nb \ h_{pose \ isolation}}{rendement_{pose \ isolation}} &= \frac{nb \ h_{pose \ 1couche}}{rendement_{pose \ 1couche}} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Ce problème est donc un système à deux équations, en le résolvant on obtient une formule pour exprimer la surface à poser par jour (pour l'isolation et la première couche) en fonction des prix déposés pour l'isolation et le bicouche.

$$surface_{isolation} = surface_{1couche} = \frac{nb \ h_{jour}}{1 + \frac{rendement_{pose \ 1couche}}{rendement_{pose \ isolation}}} \cdot rendement_{pose \ isolation} \quad (6.4)$$

Cet abaque permet ainsi aux conducteurs de travaux de faciliter l'interprétation des prix déposés dans l'offre, et ainsi d'estimer plus rapidement le temps de travail nécessaire qu'ils doivent planifier afin que les objectifs budgétaires soient accomplis. Cet abaque est présenté à l'Annexe A.4.

6.2 Impact de la part de toiture sur le prix de vente

Les rendements sont plus faibles pour de petites surfaces. En effet, cela nécessite davantage de manutention, de découpes etc. Il serait donc intéressant de pouvoir quantifier cette baisse de rendement.

Chaque chantier est composé de différentes parties d'ouvrage. Ces différentes parties peuvent être regroupées en deux catégories : les petites surfaces (terrasses, balcons, loggias etc) et les grandes surfaces (toiture, radier, dalle de parking). Afin de quantifier la part de grandes

surfaces par rapport aux petites surfaces, il est défini la part que représente la toiture (grandes surfaces) par rapport à l'ensemble du chantier.

$$\% \text{ toiture} = \frac{\text{surface toiture}}{\text{surface toiture} + \text{surface petites surfaces}} \cdot 100 \quad (6.5)$$

Le prix de vente (PV) du chantier est l'indicateur qui permet de mesurer le succès ou non du chantier. Ainsi, l'idée est d'observer différents chantiers afin de trouver ou non un lien entre la part de toiture et le prix de vente du chantier.

Ce travail a été effectué pour 66 chantiers. Les résultats semblent correspondent aux attentes. Le prix de vente moyen pour les chantier avec uniquement de la toiture est de 76 francs contre seulement environ 62 francs pour les autres chantiers.

	$\%toiture > 95\%$	$95\% \geq \%toiture > 70\%$	$70\% \geq \%toiture > 25\%$	$\%toiture \leq 25\%$
Nb données	24	13	16	13
PV moyen	78	60	67	58
PV médian	73	54	66	53
Ecart-type	29	38	25	29

TABLE 6.1 – Prix de vente en fonction des catégories de part de toiture

La présence de petites surfaces n'a pas d'impact linéaire sur le prix de vente. Il semblerait que juste la présence de quelques petites surfaces diminuent le prix de vente. Bien que ce travail ne permettent pas de quantifier précisément l'impact des petites surfaces sur le prix de vente, il permet néanmoins de le mettre en évidence.

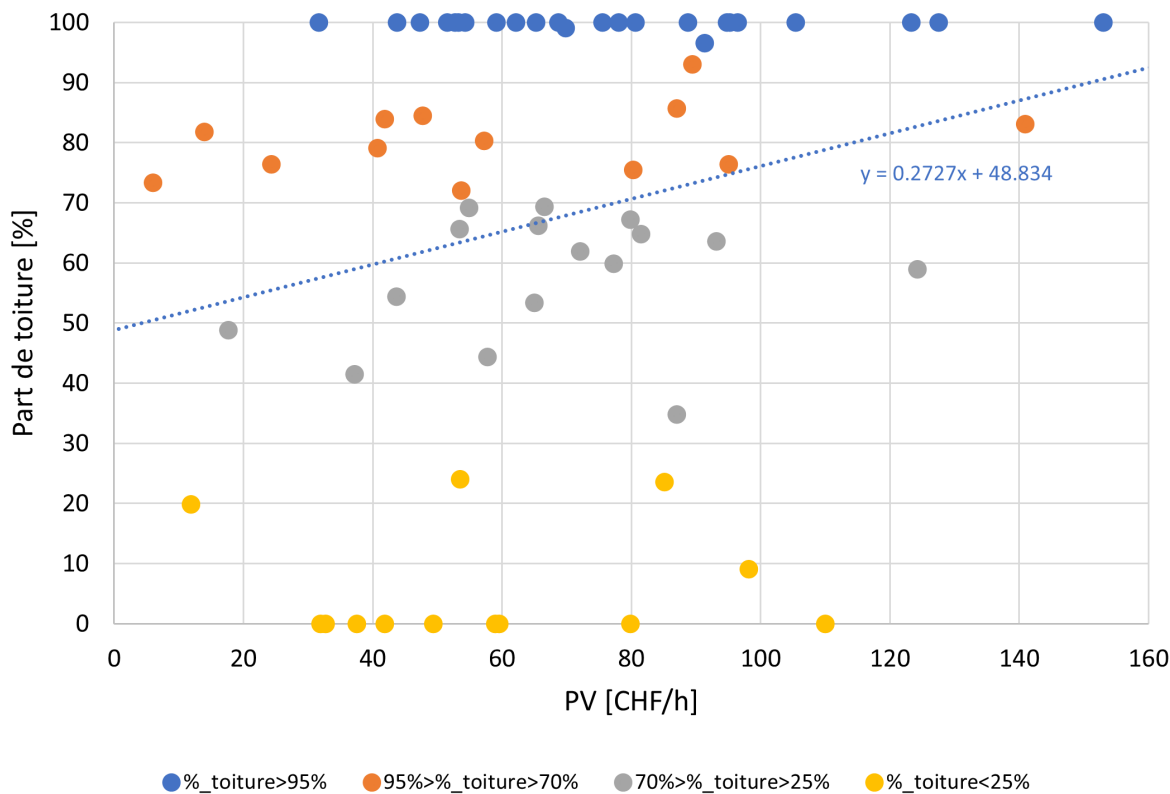


FIGURE 6.1 – Part de toiture en fonction du prix de vente

6.3 Calculation et écologie

Dès le commencement de ce projet, *PHIDA* avait pour idée de pouvoir intégrer à ses devis les émissions de CO2 prévues. Ainsi, cela permettrait de pouvoir comparer les émissions en fonction de différentes variantes, et pourquoi pas proposer un système peut être plus cher, mais moins polluant.

Au cours de discussions avec la personne en charge de ce projet au sein de l'entreprise, il a été réfléchi de la manière la plus intéressante de mettre en place ce système. Étant donné la volonté d'effectuer la calculation sur *BauBit*, cela avait tout son sens d'essayer d'intégrer cette étude des émissions de carbone au sein de ce logiciel. Ainsi, lorsqu'un calculateur effectue son offre, les émissions pourraient se calculer également automatiquement.

Il a donc été proposé de procéder de manière analogue à l'analyse des prix sur *BauBit*; à savoir, constituer une "bibliothèque" des données avec pour chaque élément ses émissions de

carbone correspondantes. Au cours de l'analyse de prix, à la place de sommer les différents coûts, le logiciel pourrait sommer les différentes émissions.

Cette idée a été expliquée au support technique de *BauBit*, mais selon eux cette procédure n'est pas réalisable. Il leur a donc été demandé dans quelles mesures le développement de cette procédure serait possible.

7 | Conclusion

Le secteur concurrentiel de la construction nécessite une connaissance pointue des prix afin de pouvoir être compétitif. Chaque prix peut être décomposé. Toutefois une fois sur le chantier la réalité peut être tout autre... La complexité réside donc en cette adaptation entre la théorie et la pratique. Cette dualité a d'ailleurs été un aspect important de ce projet, afin de tenter de joindre les deux.

Un premier travail a consisté en l'étude du fonctionnement des systèmes d'étanchéité. La compréhension des différentes phases de travail, matériaux, etc., a été indispensable afin de pouvoir comprendre par la suite le fonctionnement de la calculation. Il a ensuite été possible d'étudier la composition des prix, à la base de la calculation. L'importance des différents rendements a trouvé toute sa place dans ce projet.

Ce travail a été pensé pour apporter un fonctionnement plus théorique dans les méthodes de calcul. C'est ainsi qu'une grande majorité du projet a consisté en l'étude de données. Constitution d'une base de données, étude des données à disposition, analyse des méthodes d'estimations... voici à quoi ce travail a dû faire face. Ces différentes analyses ont permis de mettre en lumière différents aspects des prix et d'étudier leur composition.

L'étude des paramètres à disposition a permis de mettre en avant l'importance de la fourniture dans le prix. Les hausses de prix sont liées à la date de remise de l'offre.

L'étude de différentes régressions linéaires multiples a ensuite été effectuée, avec pour objectif d'estimer le prix du bicouche en fonction des paramètres. Différentes méthodes de sélection des variables ont alors été testées. La date de l'offre est la variable qui a le plus d'effet sur le prix (même en ne tenant pas compte du prix de fourniture). La régression linéaire retenue contient deux variables : la date et la surface. Le prix va être plus important lorsque la date est plus récente, et diminuer pour des surfaces de travail plus importantes. Néanmoins, du

fait de la carence en paramètres significatives, le modèle ne permet pas de décrire précisément les prix comme il avait été espéré.

L'intérêt a également été porté sur l'étude des rendements. En effet, pour l'utilisation du logiciel *BauBit*, il est nécessaire d'y intégrer le rendement dans l'analyse de prix. Le travail inverse de la calculation a alors été effectué. En partant des prix rendus, il a été calculé les rendements. Ces derniers sont relativement conformes aux attentes.

L'utilisation du logiciel *BauBit* a également été une partie importante de ce projet. En effet, à termes l'ambition de l'entreprise est de pouvoir réaliser l'ensemble des calculations par ce biais. Cet outils, permet de contenir la liste de prix de fourniture, puis de calculer les prix des différents éléments qui composent un article.

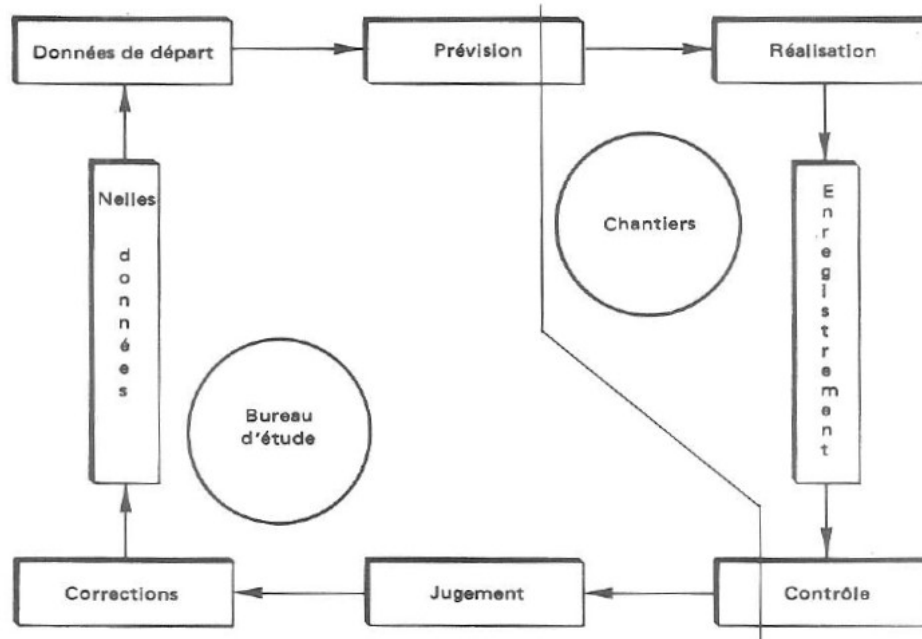


FIGURE 7.1 – Schéma du processus de cycle d'étude des prix (PAULOUZ et LIÉBENS, 1990)

L'étude des prix est un travail complexe qui nécessite une mise à jour régulière. Il est nécessaire de « veiller à ce que la réalisation ne diffère pas, en mal, de la prévision. L'enregistrement, puis le contrôle permettent d'émettre un jugement. » Il faut ensuite « corriger ses données, élaborer de nouvelles statistiques pour que les études futures soient encore plus proches de la réalité ». (PAULOUZ et LIÉBENS, 1990)

A | Annexes

A.1 Différentes méthodes de sélection des variables

A.1.0.1 Importance des variables avec Extra Trees Classifier

La détection de l'importance des facteurs avec Extra Trees Classifier est une technique utilisée pour évaluer l'importance des variables.

Le fonctionnement de l'Extra Trees Classifier est basé sur un algorithme d'apprentissage automatique appelé "Extra Trees" (Extreme Randomized Trees). Il s'agit d'une variante de l'algorithme des arbres de décision.

Pour mesurer l'importance des facteurs, l'algorithme Extra Trees Classifier utilise une métrique appelée "importance des variables". Cette métrique quantifie l'impact de chaque variable sur la précision des prédictions du modèle.

L'algorithme évalue l'importance des variables en effectuant plusieurs itérations du processus d'apprentissage et en mesurant à chaque itération l'effet de permutation de chaque variable sur la précision du modèle. Plus précisément, il mesure comment la suppression ou la permutation d'une variable affecte la performance du modèle.

Une fois que toutes les itérations sont terminées, l'importance des variables est calculée en moyennant les effets de permutation sur toutes les itérations. Les variables qui ont un impact plus significatif sur la précision du modèle obtiennent une importance plus élevée.

Avec cette méthode, la date est la variable qui a le plus d'effet sur le prix du bicouche. Ce résultat correspond à la forte corrélation observée dans la matrice de corrélation à la Figure 4.1. Les variables suivantes sont le montant net du chantier ainsi que la surface de bicouche à poser. Ces trois premières variables semblent cohérentes et conformes aux attentes.

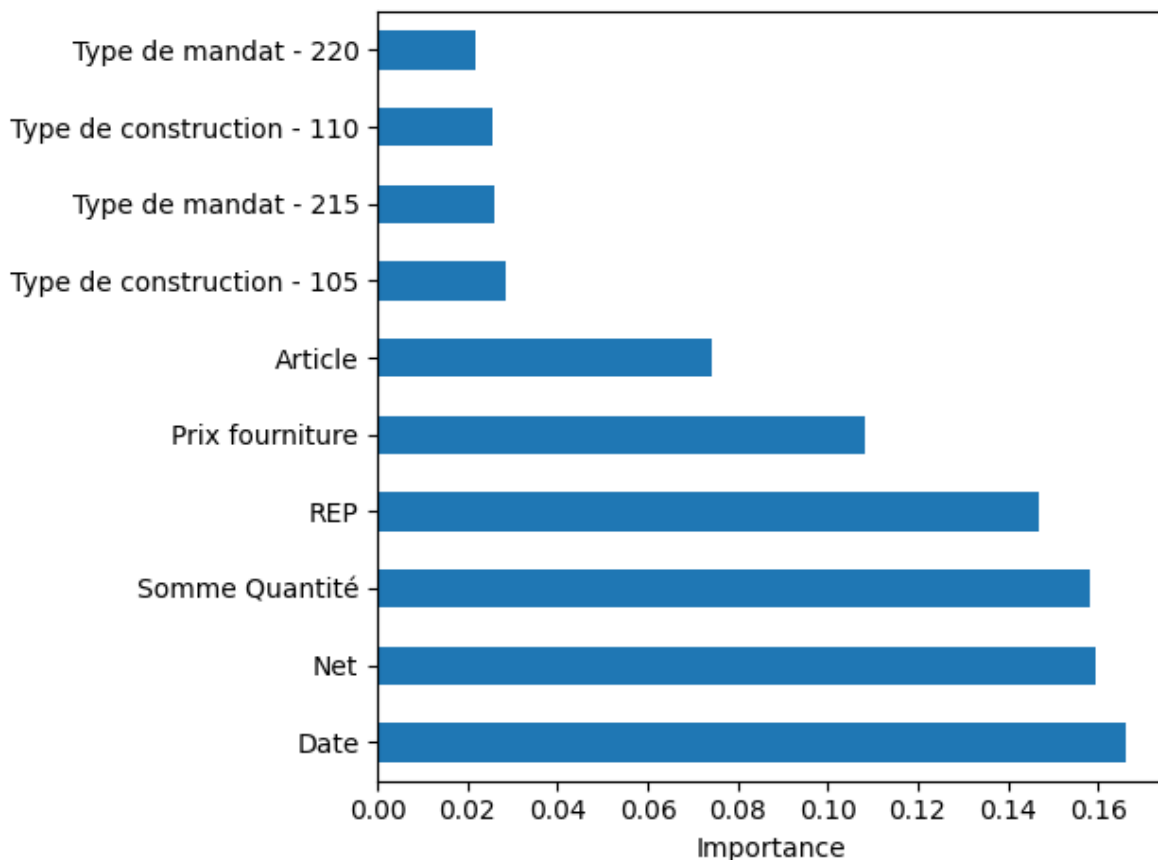


FIGURE A.1 – 10 variables les plus importantes selon Extra Trees Classifier

A.1.0.2 Méthode Lasso CV

La sélection des variables avec la méthode Lasso CV (Lasso Cross-Validation) est une technique utilisée pour choisir les variables les plus pertinentes et effectuer une régularisation dans un modèle de régression linéaire.

Le fonctionnement de la sélection des variables avec la méthode Lasso CV repose sur l'algorithme du Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) combiné avec une procédure de validation croisée.

Le Lasso est un algorithme de régularisation qui pénalise les coefficients des variables moins importantes en les réduisant vers zéro. Il favorise donc la sélection automatique des variables les plus importantes et permet de réduire la dimensionnalité des données.

La validation croisée est une technique qui consiste à diviser l'ensemble des données en

plusieurs sous-ensembles pour évaluer les performances du modèle de régression. Elle permet de mesurer la capacité de généralisation du modèle.

Dans la méthode Lasso CV, le processus se déroule de la manière suivante :

- L’algorithme Lasso est appliqué en ajustant le modèle de régression linéaire avec différentes valeurs de pénalisation (α) pour régulariser les coefficients des variables.
- Pour chaque valeur d’ α , la validation croisée est utilisée pour évaluer les performances du modèle en termes d’erreur de prédiction.
- Les variables ayant les coefficients non nuls dans au moins une itération sont considérées comme sélectionnées.
- La valeur d’ α qui minimise l’erreur de validation croisée est choisie comme paramètre de pénalisation optimale.
- Enfin, un modèle de régression linéaire est ajusté en utilisant toutes les données avec la valeur optimale d’ α , et seules les variables sélectionnées sont incluses dans le modèle final.

Les résultats de l’implémentation de cette méthode sur *Python* sont les suivants :

	coefficient
Article	1.03
Date	2.53
Somme Quantité	-1.05
Type de construction - 100	0.24
Type de construction - 110	-0.27
Type de mandat - 200	0.19
Type de mandat - 205	-0.05
Type de mandat - 210	0.51

TABLE A.1 – Résultats de la méthode Lasso CV

L’interprétation des coefficients dans la méthode Lasso CV pour la sélection des variables est légèrement différente de celle dans une régression linéaire classique. Dans la méthode Lasso

CV, les coefficients des variables sélectionnées sont réduits vers zéro, ce qui permet de mettre en évidence les variables les plus importantes pour la prédiction.

Lorsque le coefficient d'une variable est non nul, cela signifie que cette variable a été sélectionnée comme contribuant de manière significative à la prédiction dans le modèle. La magnitude du coefficient indique l'importance relative de cette variable par rapport aux autres variables sélectionnées.

L'interprétation des coefficients peut être plus simple dans le cas d'une régression linéaire classique, où un coefficient positif indique une relation positive entre la variable indépendante et la variable dépendante, et un coefficient négatif indique une relation négative. Cependant, dans la méthode Lasso CV, l'accent est davantage mis sur la présence ou l'absence de la variable plutôt que sur la direction de la relation.

La date est de nouveau la variable avec le plus d'importance, suivie de la surface (Somme Quantité) et de l'article (numéro de l'article).

A.1.0.3 Méthode Recursive Feature Elimination (RFE)

La sélection des variables avec la méthode Recursive Feature Elimination (RFE) est une approche itérative utilisée pour identifier les variables les plus importantes dans un modèle prédictif.

Le fonctionnement de la sélection des variables avec la méthode RFE peut être décrit en plusieurs étapes :

- Un modèle prédictif est construit en utilisant l'algorithme d'apprentissage automatique.
- L'importance des variables est évaluée en utilisant les coefficients, les scores d'importance ou d'autres métriques spécifiques à l'algorithme utilisé.
- Les variables les moins importantes sont éliminées du modèle.
- Le modèle est ré-entraîné avec les variables restantes.
- Les étapes 2 à 4 sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint, par exemple lorsque le nombre souhaité de variables est atteint ou lorsque la performance du modèle ne s'améliore plus.

- Les variables retenues à la fin du processus sont considérées comme les variables les plus importantes pour le modèle.

La méthode RFE évalue l'importance des variables en les éliminant de manière itérative et en observant les effets sur les performances du modèle. Les variables qui, lorsqu'elles sont éliminées, entraînent une diminution significative de la performance du modèle sont considérées comme importantes.

Une des approches couramment utilisées dans la méthode RFE est le "backward elimination" (PARDOUX, 1982), où l'on commence avec toutes les variables du modèle, puis à chaque itération, la variable la moins importante est éliminée.

	Rang
Date	1
Net	2
Somme Quantité	3
Article	4
Prix fourniture	5
Type de construction - 110	6
Type de construction - 105	7
Type de mandat - 215	8
Type de construction - 100	9
Type de mandat - 220	10

TABLE A.2 – Résultats de la méthode RFE

Les trois variables principales sont de nouveau : la date, le montant net du chantier et la quantité de travail (Somme quantité).

A.2 Résultats de la régression linéaire multiple

A.2.1 Régression avec 3 variables

Variable dépendante	R_{train}^2	$R_{adj\ train}^2$	R_{test}^2	$R_{adj\ test}^2$	$RMSE$	MAE	$MAPE$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[CHF]	[CHF]	[%]
Prix	40.3	38.4	33.5	31.3	4.1	3.0	10.2
Log(Prix)	43.0	41.2	34.4	32.2	4.1	2.9	9.9
Prix-Fourniture	24.6	22.3	15.3	12.5	4.2	3.2	21.6
Log(Prix-Fourniture)	23.4	21.0	16.4	13.6	4.2	3.1	20.3
Prix/REP	40.5	38.6	33.8	31.6	4.0	2.9	10.3
Log(Prix/REP)	43.5	41.7	34.7	32.5	4.0	2.8	10.0
Prix/REP-Fourniture	24.1	21.8	14.7	11.8	4.1	3.1	22.8
Log(Prix/REP-Fourniture)	23.0	20.6	15.7	12.9	4.1	3.0	21.4

TABLE A.3 – Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 3 variables

Variable dépendante	const	Date	Net	Somme Quantité
Prix	0.000	0.000	69.037	7.104
Log(Prix)	0.006	0.000	75.791	3.341
Prix-Fourniture	0.262	0.059	54.715	10.095
Log(Prix-Fourniture)	3.321	0.117	68.131	6.507
Prix/REP	0.000	0.000	67.178	9.524
Log(Prix/REP)	0.002	0.000	75.421	4.747
Prix/REP-Fourniture	0.200	0.047	51.952	13.193
Log(Prix/REP-Fourniture)	2.011	0.078	68.194	8.047

TABLE A.4 – p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 3 variables

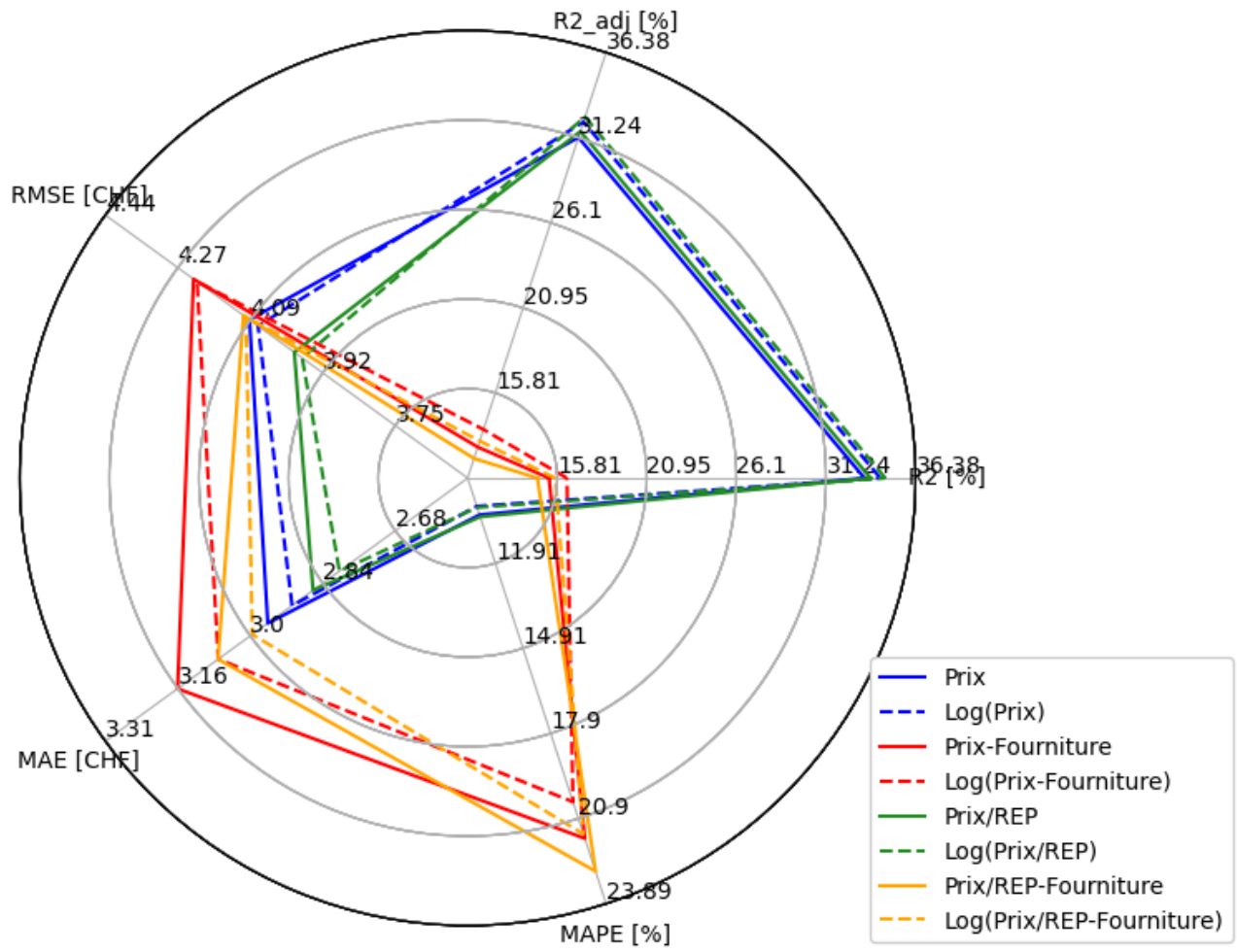


FIGURE A.2 – Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer - 3 variables

A.2.2 Régression avec 1 variable

Variable dépendante	R_{train}^2	$R_{adj\ train}^2$	R_{test}^2	$R_{adj\ test}^2$	$RMSE$	MAE	$MAPE$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[CHF]	[CHF]	[%]
Prix	30.2	29.5	24.8	23.6	4.4	3.2	11.1
Log(Prix)	32.9	32.2	25.8	24.6	4.3	3.2	10.8
Prix-Fourniture	10.9	10.0	4.1	2.5	4.5	3.4	22.7
Log(Prix-Fourniture)	10.1	9.2	4.3	2.8	4.5	3.2	21.2
Prix/REP	31.4	30.7	26.3	25.1	4.2	3.1	11.1
Log(Prix/REP)	34.5	33.8	27.3	26.1	4.2	3.0	10.7
Prix/REP-Fourniture	11.4	10.5	4.5	3.0	4.4	3.3	23.9
Log(Prix/REP-Fourniture)	11.0	10.1	5.0	3.4	4.4	3.1	22.2

TABLE A.5 – Résultats moyens des régressions linéaires multiples avec 1000 itérations - 1 variable

Variable dépendante	const	Date
Prix	0.000	0.000
Log(Prix)	0.018	0.000
Prix-Fourniture	0.540	0.166
Log(Prix-Fourniture)	4.777	0.275
Prix/REP	0.000	0.000
Log(Prix/REP)	0.006	0.000
Prix/REP-Fourniture	0.401	0.126
Log(Prix/REP-Fourniture)	2.909	0.176

TABLE A.6 – p-values moyennes [%] des variables pour la régression linéaire multiple avec 1 variable

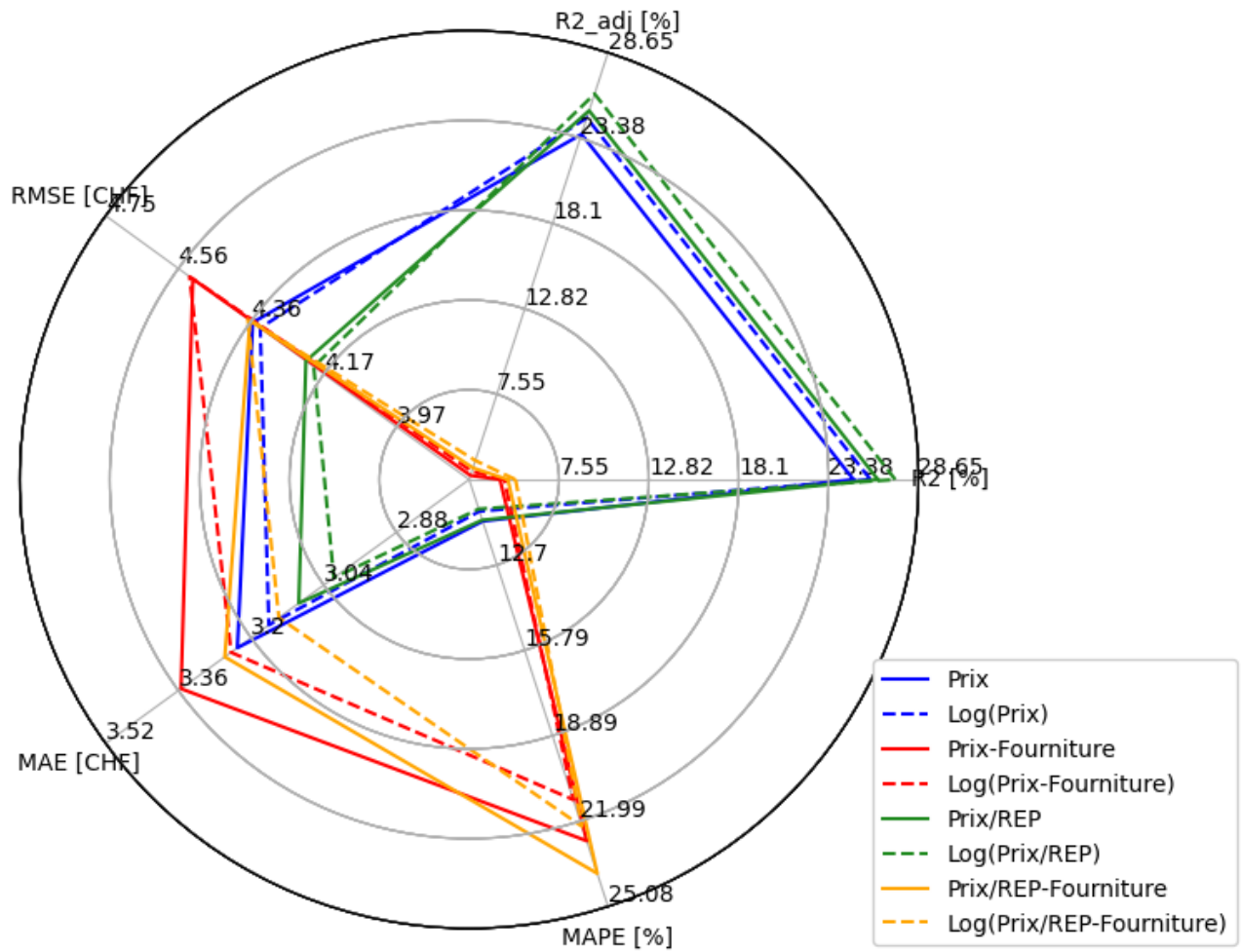
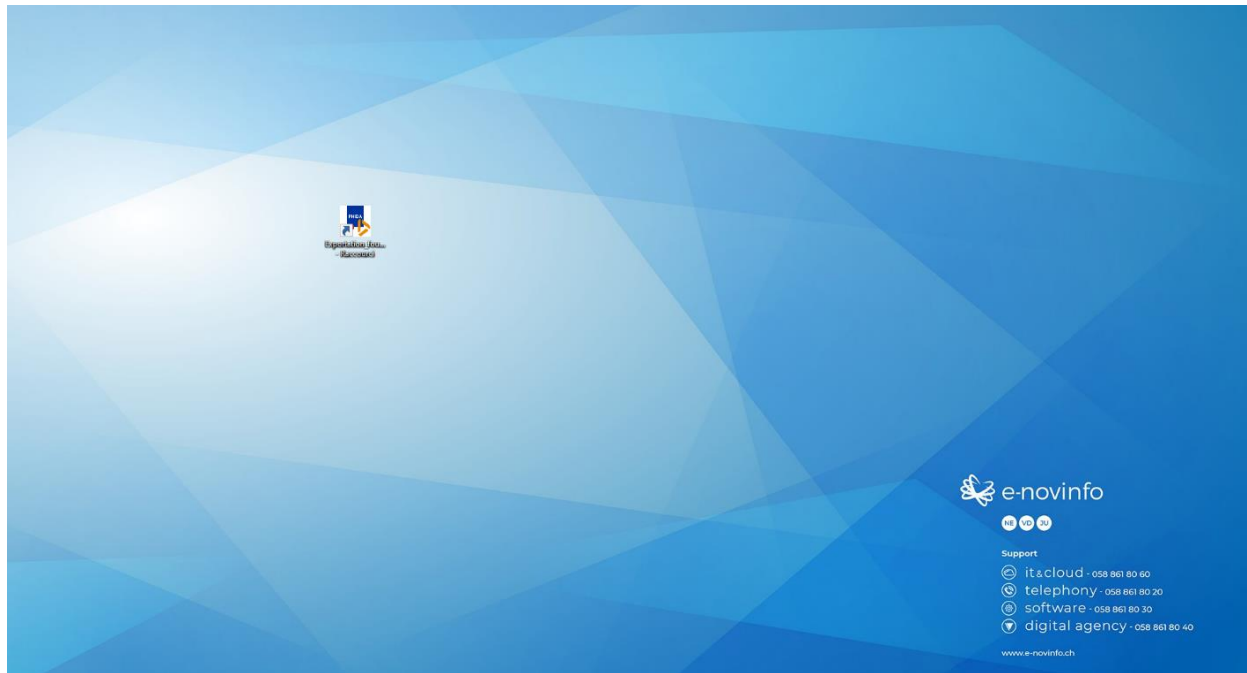


FIGURE A.3 – Résultats de la régression en fonction du type de valeur à estimer - 1 variable

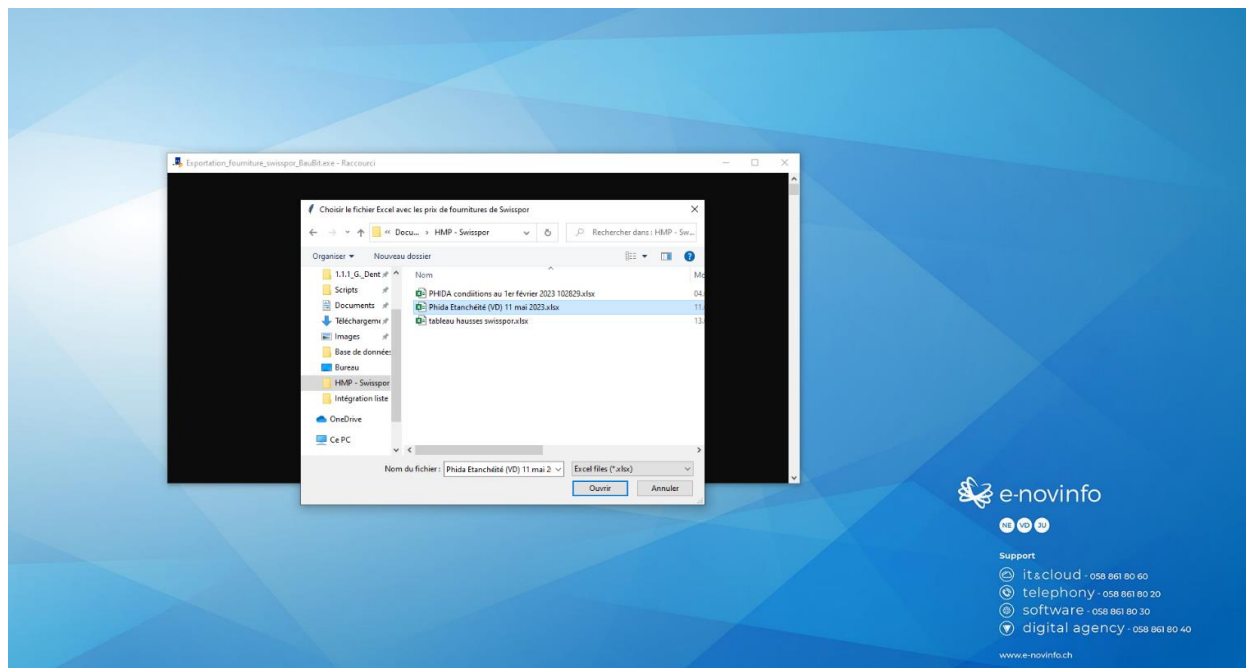
A.3 Fiche méthode d'importation des fournitures Swispor sur *BauBit*

Création du fichier Excel pour l'actualisation des prix de Swisspor sous BauBit

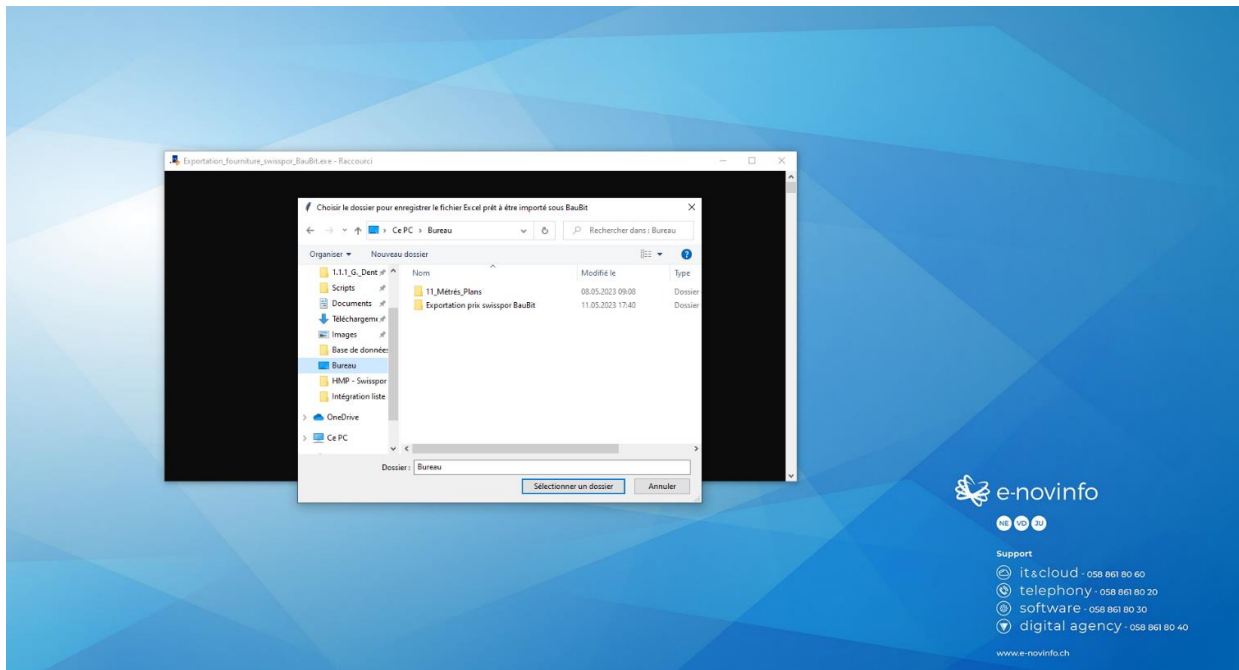
Étape 1 : Ouvrir du Raccourci *Exportation_fourniture_swisspor_BauBit.exe – Raccourci*



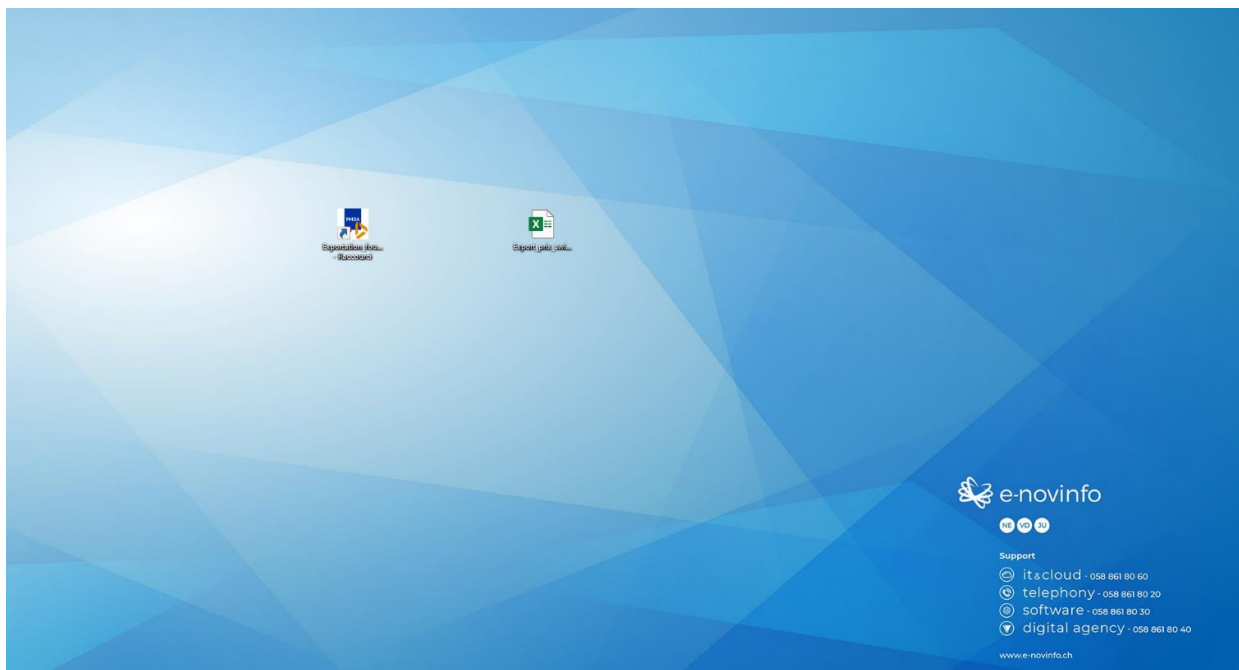
Étape 2 : Sélectionner le fichier Excel (fournit par Swisspor) avec l'ensemble de leurs prix. Puis cliquez sur *Ouvrir*



Étape 3 : Sélectionner le dossier où vous souhaitez enregistrer le nouveau fichier Excel. Puis cliquez sur *Sélectionner un dossier*.

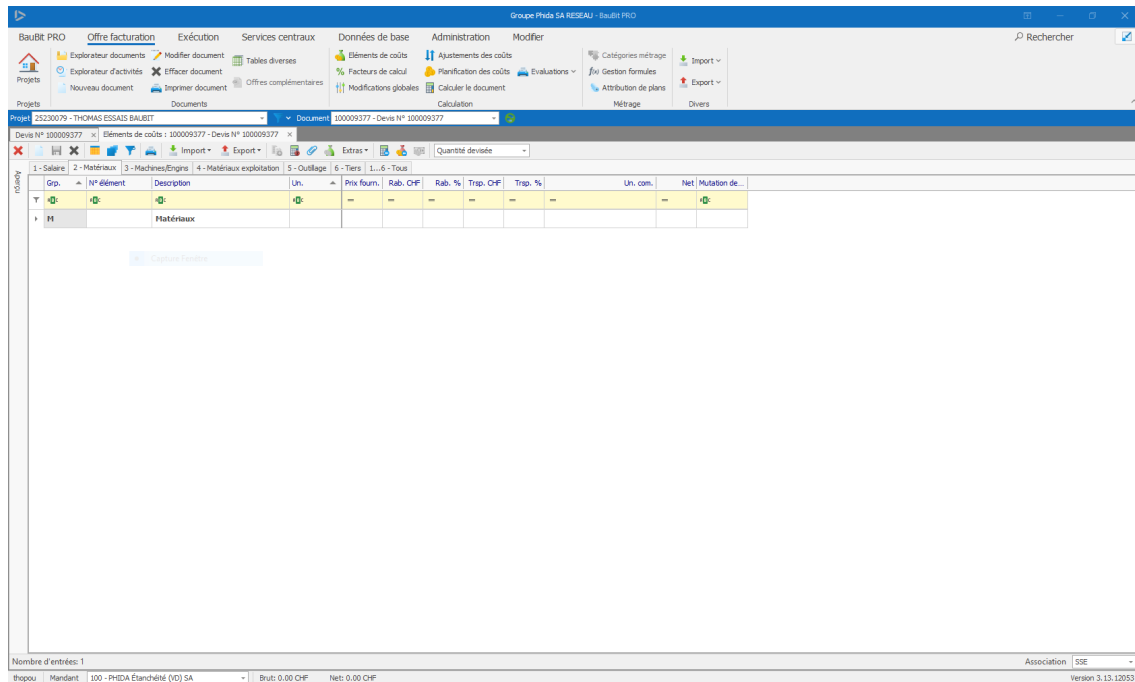


Étape 4 : LE fichier Excel se trouve dans le dossier sélectionné (ici le Bureau).

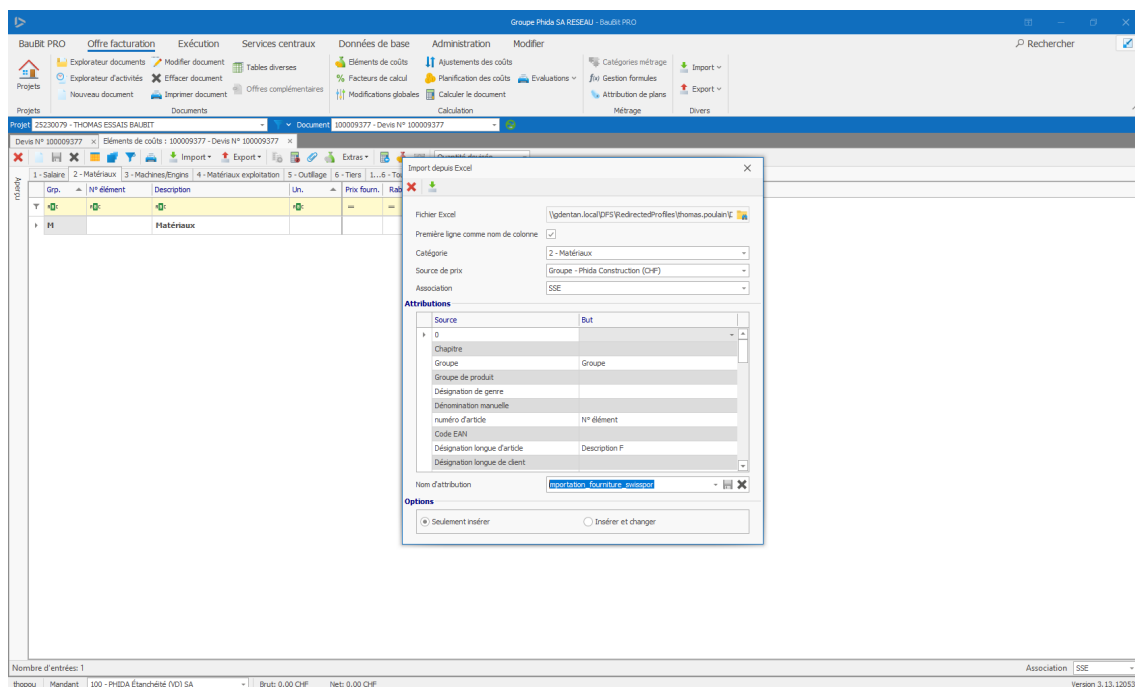


Importation des éléments de coûts dans un projet BauBit

Étape 1 : Ouvrir le projet (ou le catalogue) et cliquer sur *Éléments de coûts*



Étape 2 : Sélectionner *Import*, remplir les différents paramètres et choisir comme Nom d'attribution : *Importation_fourniture_swisspor*



A.4 Abaque sur les rendements

ABAQUE

RENDEMENTS [m²/j] EN FONCTION DES PRIX RENDUS

Sommaire

Fournitures	page 2
Enduit d'apprêt	page 3
Pare-vapeur	page 4
Bicouche	page 6
2 ^{ème} couche	page 8

Fournitures

	Prix brut [CHF]	Rabais [%]	Hausse [%]	Prix Net [CHF]	Chute [%]	Prix [CHF/m2]
Enduit d'apprêt	3.5	15.0%	10.0%	3.27	0%	0.65
LL EVA 3.5	7.9	54.1%	48.0%	5.37	15%	6.17
LL Vario Stria 3.5	11.9	54.1%	48.0%	8.08	15%	9.30
LL Vario v 3.5	12	54.1%	48.0%	8.15	15%	9.37
EGV3.5	7.6	54.5%	48.0%	5.12	15%	5.89
LL VARIO flam	11.7	54.1%	48.0%	7.95	15%	9.14
EP4 / EP 4 S	9.5	54.5%	48.0%	6.40	15%	7.36
EP4 WF / EP4 WF S	9.8	54.5%	48.0%	6.60	15%	7.59
EP5 / EP 5 S	11	54.5%	48.0%	7.41	15%	8.52
EP5 WF / EP5 WF S	11.4	54.5%	48.0%	7.68	15%	8.83
Gaz - Pose libre				2.18	5%	0.11
Gaz - Soudé en plein				2.18	40%	0.87

Rabais	Escompte	Prorata
0%	0%	0%

Nb heures par jour
8

Enduit d'apprêt [m²/j] (par homme)

Enduit d'apprêt	Prix de vente [CHF]	85	90	95	100	105
	Prix couche d'apprêt [CHF/m ²]					
	0.7	14945	15824	16703	17582	18462
	0.8	4674	4948	5223	5498	5773
	0.9	2770	2933	3096	3259	3422
	1	1968	2084	2200	2315	2431
	1.1	1526	1616	1706	1796	1886
	1.2	1247	1320	1393	1467	1540
	1.3	1053	1115	1177	1239	1301
	1.4	912	966	1019	1073	1127
	1.5	804	852	899	946	993
	1.6	719	762	804	846	888
	1.7	650	689	727	765	803
	1.8	594	629	663	698	733
	1.9	546	578	610	642	674
	2	505	535	565	595	624
	2.1	470	498	526	553	581
	2.2	440	466	492	518	544
	2.3	413	438	462	486	510
	2.4	390	412	435	458	481
	2.5	368	390	412	433	455
	2.6	350	370	391	411	432
	2.7	332	352	372	391	411
	2.8	317	336	354	373	392
	2.9	303	321	338	356	374
	3	290	307	324	341	358
	3.1	278	294	311	327	343
	3.2	267	283	299	314	330
	3.3	257	272	287	302	318
	3.4	248	262	277	291	306
	3.5	239	253	267	281	295
	3.6	231	244	258	272	285
	3.7	223	236	250	263	276
	3.8	216	229	242	254	267
	3.9	210	222	234	246	259
	4	203	215	227	239	251
	4.1	197	209	221	232	244
	4.2	192	203	214	226	237
	4.3	187	198	208	219	230
	4.4	182	192	203	214	224
	4.5	177	187	198	208	218

Pare-vapeur [m²/j] (par homme)

Prix de vente [CHF]		85	90	95	100	105
		Prix BV [CHF/m ²]				
LL EVA 3.5	10	230	244	257	271	284
	10.2	215	228	241	253	266
	10.4	203	215	226	238	250
	10.6	191	202	214	225	236
	10.8	181	192	202	213	224
	11	172	182	192	202	212
	11.2	164	173	183	192	202
	11.4	156	165	174	184	193
	11.6	149	158	167	176	184
	11.8	143	151	160	168	177
	12	137	145	153	161	169
	12.2	132	140	147	155	163
	12.4	127	134	142	149	157
	12.6	122	130	137	144	151
	12.8	118	125	132	139	146
	13	114	121	128	134	141
	13.2	110	117	123	130	136
	13.4	107	113	120	126	132
13.6	104	110	116	122	128	
13.8	101	107	112	118	124	
14	98	104	109	115	121	
LL Vario Stria 3.5	14	177	188	198	209	219
	14.2	169	179	189	198	208
	14.4	161	170	180	189	199
	14.6	153	162	171	181	190
	14.8	147	155	164	173	181
	15	141	149	157	166	174
	15.2	135	143	151	159	167
	15.4	130	138	145	153	161
	15.6	125	133	140	147	155
	15.8	121	128	135	142	149
	16	117	123	130	137	144
	16.2	113	119	126	133	139
	16.4	109	116	122	128	135
	16.6	106	112	118	124	131
	16.8	103	109	115	121	127
	17	100	105	111	117	123
	17.2	97	102	108	114	119
	17.4	94	100	105	111	116
17.6	92	97	102	108	113	
17.8	89	94	100	105	110	
18	87	92	97	102	107	

Pare-vapeur [m²/j] (par homme)

Prix BV [CHF/m ²]		Prix de vente [CHF]				
		85	90	95	100	105
LL Vario v 3.5	13.6	203	215	227	239	250
	13.8	191	203	214	225	236
	14	181	192	202	213	224
	14.2	172	182	192	202	212
	14.4	164	173	183	193	202
	14.6	156	165	175	184	193
	14.8	149	158	167	176	184
	15	143	151	160	168	177
	15.2	137	145	153	162	170
	15.4	132	140	147	155	163
	15.6	127	134	142	149	157
	15.8	122	130	137	144	151
	16	118	125	132	139	146
	16.2	114	121	128	134	141
	16.4	111	117	124	130	137
	16.6	107	113	120	126	132
	16.8	104	110	116	122	128
	17	101	107	113	118	124
17.2	98	104	109	115	121	
17.4	95	101	106	112	117	
17.6	92	98	103	109	114	
EGV3.5	9.6	239	253	267	281	296
	9.8	224	237	250	263	276
	10	210	222	234	247	259
	10.2	198	209	221	232	244
	10.4	187	198	209	220	231
	10.6	177	187	198	208	219
	10.8	168	178	188	198	208
	11	160	170	179	189	198
	11.2	153	162	171	180	189
	11.4	146	155	164	172	181
	11.6	140	149	157	165	173
	11.8	135	143	151	159	167
	12	130	137	145	153	160
	12.2	125	132	140	147	154
	12.4	121	128	135	142	149
	12.6	116	123	130	137	144
	12.8	113	119	126	132	139
	13	109	115	122	128	135
13.2	106	112	118	124	130	
13.4	102	108	114	120	126	
13.6	99	105	111	117	123	

2^{ème} couche [m²/j] (par homme)

Prix de vente [CHF]		85	90	95	100	105
Prix bicouche [CHF/m2]						
EP4 / EP 4 S	24	92	98	103	109	114
	24.4	89	94	100	105	110
	24.8	86	91	96	101	106
	25.2	83	88	93	98	103
	25.6	81	86	90	95	100
	26	78	83	88	92	97
	26.4	76	81	85	90	94
	26.8	74	78	83	87	91
	27.2	72	76	80	85	89
	27.6	70	74	78	82	86
	28	68	72	76	80	84
	28.4	66	70	74	78	82
	28.8	65	69	72	76	80
	29.2	63	67	71	74	78
	29.6	62	65	69	73	76
	30	60	64	67	71	75
	30.4	59	62	66	69	73
	30.8	58	61	64	68	71
31.2	56	60	63	66	70	
31.6	55	58	62	65	68	
32	54	57	60	64	67	
EP4 WF / EP4 WF S	24	95	101	106	112	118
	24.4	92	97	103	108	114
	24.8	89	94	99	104	110
	25.2	86	91	96	101	106
	25.6	83	88	93	98	103
	26	81	85	90	95	100
	26.4	78	83	87	92	97
	26.8	76	80	85	89	94
	27.2	74	78	82	87	91
	27.6	72	76	80	84	89
	28	70	74	78	82	86
	28.4	68	72	76	80	84
	28.8	66	70	74	78	82
	29.2	65	68	72	76	80
	29.6	63	67	71	74	78
	30	62	65	69	72	76
	30.4	60	64	67	71	74
	30.8	59	62	66	69	73
31.2	58	61	64	68	71	
31.6	56	60	63	66	70	
32	55	58	62	65	68	

2^{ème} couche [m²/j] (par homme)

Prix de vente [CHF]		85	90	95	100	105
Prix bicouche [CHF/m2]						
EP5 / EP 5 S	24	110	116	122	129	135
	24.4	105	111	117	124	130
	24.8	101	107	113	119	125
	25.2	97	103	109	114	120
	25.6	94	99	105	110	116
	26	91	96	101	107	112
	26.4	88	93	98	103	108
	26.8	85	90	95	100	105
	27.2	82	87	92	97	101
	27.6	80	84	89	94	98
	28	77	82	86	91	95
	28.4	75	79	84	88	93
	28.8	73	77	81	86	90
	29.2	71	75	79	83	88
	29.6	69	73	77	81	85
	30	67	71	75	79	83
	30.4	66	69	73	77	81
	30.8	64	68	71	75	79
31.2	62	66	70	73	77	
31.6	61	65	68	72	75	
32	60	63	67	70	74	
EP5 WF / EP5 WF S	24	115	122	129	136	142
	24.4	110	117	123	130	136
	24.8	106	112	118	125	131
	25.2	102	108	114	120	126
	25.6	98	104	110	115	121
	26	94	100	106	111	117
	26.4	91	97	102	107	113
	26.8	88	93	98	104	109
	27.2	85	90	95	100	105
	27.6	83	87	92	97	102
	28	80	85	89	94	99
	28.4	78	82	87	91	96
	28.8	75	80	84	89	93
	29.2	73	78	82	86	91
	29.6	71	75	80	84	88
	30	69	73	78	82	86
	30.4	68	72	76	80	84
	30.8	66	70	74	78	81
31.2	64	68	72	76	79	
31.6	63	66	70	74	77	
32	61	65	68	72	76	

References

- ABBF BAUSOFT AG (2017). *BauBit PRO - Manuel d'utilisation* (cf. p. 68).
- AHUJA, Hira et Walter CAMPBELL (1988). *Estimating : from concept to completion*. Prentice-Hall, p. 26-44 (cf. p. 10).
- ARCADIUS, Yves, Justin AKOSSOU et Rodolphe PALM (2004). *Conséquences de la sélection de variables sur l'interprétation des résultats en régression linéaire multiple*. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (cf. p. 51).
- CONFÉDÉRATION SUISSE (2023). *Exigences légales concernant les procédures d'adjudication*. <https://www.eda.admin.ch/deza/fr/home/partenariats-mandats/mandats-contributions/mandats/exigences/exigences-procedures-adjudication.html> (cf. p. 12).
- DOURNOW, Roland (2014). *Le livre de l'étanchéité*. GeneuxDancet SA (cf. p. 3, 5).
- OFFICE FÉDÉRAL DE LA STATISTIQUE (2019, 2020, 2021, 2022, 2023). « Indice suisse des prix de la construction - Prix unitaires moyens en suisse et dans les grandes régions ». In : URL : <https://www.astra.admin.ch/astra/fr/home/themes/routes-nationales/reseau/rapport-d-etat-des-routes-nationales.html> (cf. p. 38).
- OPPER, Christina (2009). *Addenda au manuel « Descriptifs et coûts de construction »*. Centre suisse d'étude pour la rationalisation de la construction CRB (cf. p. 9).
- OPPER, Christina et Jean TSCHOPP (2008). *Descriptifs et coûts de construction*. Centre suisse d'étude pour la rationalisation de la construction CRB, p. 88-89 (cf. p. 6).
- PARDOUX, C (1982). *Sur la sélection de variables en régression multiple : une mise au point*. Institut de statistique de l'université de Paris (cf. p. 84).
- PAULOZ, Claude et Jacques LIÉBENS (1990). *L'étude des coûts et des prix dans le bâtiment*. Eyrolles (cf. p. 14, 15, 17, 79).
- RAKOTOMALALA, Ricco (2015). *Pratique de la Régression Linéaire Multiple - Diagnostic et sélection de variables*. Université Lumière Lyon 2 (cf. p. 50, 53, 55).
- SIA, Société suisse des ingénieurs et des architectes (2021). *SIA 271 - Etanchéité pour bâtiments* (cf. p. 3).
- SIA 506 511 (2020). *Code des coûts de construction par éléments - Bâtiment eCCC-Bât*. Centre suisse d'étude pour la rationalisation de la construction CRB (cf. p. 9).