

Étude des logiciels de conception et de dessin assistés par ordinateur dans les entreprises en
génie électrique

par

Check-Kay Wong, ing.

Essai présenté au Département d'informatique
en vue de l'obtention du grade de maître en technologies de l'information
(Maîtrise en génie logiciel incluant un cheminement de type cours en technologies de
l'information)

FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Longueuil, Québec, Canada, 2018-07-04

Sommaire

Dans les entreprises, le responsable de projet en génie électrique doit choisir entre deux types de logiciels de dessin : un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO), dont le plus connu est AutoCAD, et un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO), dont un exemple serait AutoCAD Electrical. Les entreprises qui désirent rester concurrentielles doivent savoir lequel des deux types de logiciels (DAO et CAO) permet d'obtenir les délais les plus courts pour la réalisation de projets. La notion de performance d'un projet varie d'une entreprise à une autre parce qu'elle dépend des objectifs qu'elle s'est fixés. Par exemple, la performance peut être attribuée au profit qu'un projet a généré. Autre exemple, la performance peut être la réduction des erreurs et la qualité du produit réalisé. Cette étude s'intéresse à la performance des entreprises qui utilisent les logiciels de DAO et de CAO électrique. Cette performance se définit par la production des documents d'ingénierie en quantité et de qualité suffisante, avec le moins de temps possible consacré à la réalisation d'un ouvrage d'ingénierie.

Lorsque les projets sont réalisés avec une qualité suffisante dans des délais courts, ceci permet généralement de diminuer les coûts et de libérer des ressources humaines.

Cet essai repose sur une recherche auprès des entreprises à l'aide d'un sondage. Sur 150 projets recensés, l'analyse démontre que les temps de réalisation des projets sont semblables, qu'ils soient réalisés en DAO ou en CAO. Pour tirer une telle conclusion, plusieurs aspects sont considérés : le nombre d'heures utilisé, la complexité du projet, et enfin le nombre de systèmes électriques à l'intérieur de chacun des projets.

Remerciements

Je remercie mes directeurs, MM. Claude Cardinal et Patrice Roy de m'avoir permis d'effectuer un travail significatif qui rallie mes intérêts professionnels. Merci aux chargés de cours, M. Vincent Echelard et M^{me} Lynn Legault. Ils ont su me guider dans la rédaction de cet essai, sans oublier l'Université de Sherbrooke et le Centre de formation en technologies de l'information (CeFTI).

Je tiens aussi à dire merci aux professionnels et chargés de cours rencontrés au cours de mes études :

- M. Martin Dozois, pour les interfaces humaines-machine,
- M. Alain Cardinal, pour la conception des systèmes d'information et de leur modélisation,
- M. Richard Fontaine, pour son cours qui sort de l'ordinaire,
- M. Jean-François Leduc pour la passion qu'il démontre dans tout ce qu'il fait.
- Mme Marlène Gagnon et Mme Nadine Kati pour la lecture et la relecture de cet essai.

Aussi, je suis reconnaissant auprès de tous les professionnels qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de cette formation de 2^e cycle. Ce travail est le fruit d'une longue expérience.

Finalement, les remerciements vont aussi à ma famille immédiate, mon épouse et mes enfants. Merci pour vos encouragements.

Table des matières

Sommaire	ii
Remerciements	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	x
Glossaire	xi
Liste des sigles, symboles et des acronymes	xiii
Introduction.....	1
Chapitre 1 Mise en contexte	5
1.1 Notion de performance, effectivité, efficience et efficacité	5
1.1.1 Résultats attendus.....	6
1.1.2 Efficience, efficacité et effectivité	7
1.1.3 Performance des outils logiciels dans l'entreprise.....	8
1.2 Le projet d'ingénierie et le processus multidisciplinaire	9
1.2.1 Document d'ingénierie.....	9
1.3 Le génie électrique en automatisation	11
1.3.1 Processus de l'ingénierie	13
1.3.2 Génie électrique	17
1.4 Logiciel de DAO.....	17
1.5 Logiciel de CAO.....	19
1.6 Automatisation de la production des documents d'ingénierie	22
1.6.1 Exemple de cas : unicité des repérages.....	22
1.6.2 Exemple de cas : unicité des repères dans un projet de réhabilitation.....	23
Chapitre 2 Revue de littérature	26
2.1 Conception assistée par ordinateur des installations électriques	26
2.1.1 Câblage et filerie	27
2.2 Corroboration plus récente.....	28
2.3 CAO pour la qualité	28

2.4	Principe de répétition, de réutilisation et de gestion des erreurs	29
Chapitre 3 Problématique		31
3.1	Question et hypothèse de recherche	35
Chapitre 4 Méthodologie		36
4.1	Enquête	36
4.1.1	Élaboration du plan d'observation (d'analyse de contenu quantitative).....	37
4.1.2	Instrument d'observation	37
4.1.3	Recueil de l'information	37
4.2	Population cible	38
4.2.1	Échantillonnage des entreprises.....	38
4.2.2	Échantillonnages des projets	38
4.2.3	Variables des projets	39
4.3	Démarche, identification et analyse du contenu	43
4.3.1	Détermination de la complexité d'un projet	43
4.3.2	Détermination du nombre de systèmes	44
4.3.3	Détermination du nombre des h-p	45
4.3.4	Identification des logiciels d'ingénierie.....	46
4.3.5	Détermination du logiciel utilisé	48
4.3.6	Mesures d'exception	48
4.4	Analyse des résultats	49
4.4.1	Pondération par unité réduite.....	49
4.4.2	Discrétisation ordinale des niveaux de complexité.....	51
4.4.3	Abstraction des documents d'ingénierie	52
4.5	Validation de la méthode d'analyse	52
4.5.1	Corrélation	52
4.5.2	Exactitude, confirmabilité et intervalle de confiance.....	53
4.5.3	Fidélité et précision	54
4.6	Résultats attendus.....	54
Chapitre 5 Analyse des résultats		56
5.1	Synthèse de l'ensemble des données obtenues	56
5.2	Première étape de l'étude descriptive.....	56
5.2.1	Variance d'un échantillon	57
5.2.2	Écart-type	58
5.2.3	Moyenne.....	58
5.2.4	Premiers résultats de l'analyse descriptive.....	58
5.3	Retour sur l'hypothèse, type de test retenu	63

5.3.1	Test de normalité.....	63
5.3.2	Test de Wilcoxon-Mann-Whitney (test <i>U</i>).....	65
5.4	Résultats obtenus.....	69
5.4.1	Projets électriques de complexité très simple	69
5.4.2	Projets électriques de complexité simple.....	70
5.4.3	Projets électriques de complexité moyenne	71
5.4.4	Projets électriques de complexité complexe	72
5.4.5	Retour à la question de recherche (complexité simple et moyenne confondue).....	73
5.5	Interprétation finale.....	76
5.5.1	Limites des résultats.....	76
5.5.2	Limites de la méthode	77
	Conclusion.....	78
	Liste des références.....	80
	Bibliographie.....	89
Annexe A.	Référence de gestion de projets.....	99
A1	Coûts associés au projet – utilisés pour évaluer l’effort	100
Annexe B.	Données de l’échantillon.....	112
B1	Données de l’échantillon	113
B2	Tableaux de calculs pour la première analyse (analyse descriptive).....	117
B2.1	Projets de complexité niveau très simple en CAO (complexité 1)	118
B2.2	Projets de complexité niveau très simple en DAO (complexité 1)	119
B2.3	Projets de complexité niveau simple en CAO (complexité 2)	120
B2.4	Projets de complexité niveau simple en DAO (complexité 2)	121
B2.5	Projets de complexité niveau moyen en CAO (complexité 3).....	122
B2.6	Projets de complexité niveau moyen en DAO (complexité 3).....	123
B2.7	Projets de complexité niveau complexe en CAO (complexité 4)	124
B2.8	Projets de complexité niveau complexe en DAO (complexité 4)	125
B3	Tableaux de calcul pour la 2 ^e analyse (test <i>U</i>)	126
B3.1	Projets complexité niveau très simple en CAO et DAO (complexité 1)	127
B3.2	Projets complexité niveau simple en CAO et DAO (complexité 2)	128
B3.3	Projets complexité niveau moyen en CAO et DAO (complexité 3).....	130
B3.4	Projets complexité niveau complexe en CAO et DAO (complexité 4)	131
B3.5	Projets complexité niveau simple et niveau moyen en CAO et DAO (complexités 2 et 3).....	132

Annexe C. Questionnaire	135
Annexe D. Vérification des outils de calcul.....	136
D1 Vérification de l'outil pour le test de Henry	137
D2 Vérification du test U	139
Annexe E. Table de références statistiques.....	142
E1.1 Table de la loi normale centrée réduite	143
E1.2 Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance $z=95\%$	144
E1.3 Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance $z=99\%$	145
E1.4 Table de Mann-Whitney pour un niveau de confiance $\alpha = 0.025$ et $\alpha = 0.05$..	146

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples de détermination du nombre de systèmes dans un projet	45
Tableau 2 : Exemple de résultats attendus à l'aide de chiffres fictifs	55
Tableau 3 : Résumé des données de l'échantillon	56
Tableau 4 : Résultats des projets réalisés en CAO et DAO selon leur complexité	62
Tableau 5 : Données de l'échantillon	113
Tableau 6 : Calculs - Projets de complexité niveau très simple en CAO (complexité 1).....	118
Tableau 7 : Calculs - Projets de complexité niveau très simple en DAO (complexité 1).....	119
Tableau 8 : Calculs - Projets de complexité niveau simple en CAO (complexité 2).....	120
Tableau 9 : Calculs - Projets de complexité niveau simple en DAO (complexité 2).....	121
Tableau 10 : Calculs - Projets de complexité niveau moyen en CAO (complexité 3)	122
Tableau 11 : Calculs - Projets de complexité niveau moyen en DAO (complexité 3)	123
Tableau 12 : Calculs - Projets de complexité niveau complexe en CAO (complexité 4).....	124
Tableau 13 : Calculs - Projets de complexité niveau complexe en DAO (complexité 4).....	125
Tableau 14 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau très simple (complexité 1).....	127
Tableau 15 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau simple (complexité 2).....	128
Tableau 16 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité moyenne (complexité 3).....	130
Tableau 17 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau complexe (complexité 4).....	131
Tableau 18 : tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau simple et niveau moyen (complexités 2 et 3).....	132
Tableau 19 : Vérification de l'outil du test de la droite de Henry	137

Tableau 20 : Table de la loi normale centrée réduite	143
Tableau 21 : Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance $z=95\%$	144
Tableau 22 : Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance $z=99\%$	145
Tableau 23 : Table de Mann-Whitney pour un niveau de confiance $\alpha=0.025$ et $\alpha=0.05$	146

Liste des figures

Figure 1.1 : Cycle d'un projet d'ingénierie.....	9
Figure 1.2 : Exemple de départ moteur direct selon CEI/IEC	13
Figure 1.3 : Exemple de départ moteur direct selon ANSI/IEEE.....	13
Figure 1.4 : Diagramme d'activités et processus de maîtrise de la conception	16
Figure 1.5 : Exemple d'un repère unique (R27) affiché à deux endroits à l'aide de symboles IEEE dessinés verticalement	23
Figure 3.1 : Processus de l'approvisionnement (Source : Henry Provost, 1994)	34
Figure 3.2 : Poids relatifs des opérations et logique schématique (Source : Henry Provost, 1994).....	34
Figure 4.1 : Système électrique de référence de base.....	50
Figure 5.1 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité très simple	59
Figure 5.2 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité simple	60
Figure 5.3 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité moyenne	60
Figure 5.4 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité complexe	61
Figure 5.5 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de l'ensemble de l'échantillon	61
Figure 5.6 : Détermination de la normalité de l'échantillon à l'aide de la droite de Henry	65
Figure 5.7 : Vérification de l'outil du test de la droite de Henry	138

Glossaire

Base de données	Ensemble de fichiers de données apparentés
Couche (AutoCAD) (ou calque)	Éléments distincts constituant un niveau de détail d'un dessin, pouvant être édités
Départ moteur	Démarrage de moteur asynchrone triphasé
Échantillon exhaustif	Élément de l'échantillonnage remis dans la population après le relevé de ses caractéristiques
Échantillon non exhaustif	Élément de l'échantillonnage non remis dans la population après le relevé de ses caractéristiques
Efficience	Rapport entre les résultats obtenus et les moyens utilisés
Essai à vide	Test de comportement d'un système sans charge pour un transformateur, un générateur ou un autre appareil
Filerie	Représentation simplifiée d'une pièce électrique avec l'adressage des connexions entre les équipements
Interopérabilité	Capacité que possèdent des systèmes informatiques hétérogènes de fonctionner conjointement
Module d'extension	Élément logiciel qui s'ajoute à une application plus importante pour en étendre les fonctions

Logiciel niche	Un logiciel spécialisé qui s'adresse à un marché restreint
Non intelligent	Classe d'objets informatiques sans propriétés de modélisation d'un objet réel
Cheminement point à point	Cheminement électrique selon le raccordement de fils de deux points de connexion
Réhabilitation	Ensemble des travaux visant à remettre en état un milieu ou à l'aménager pour différents usages après la fin de l'exploitation d'un ouvrage
Schéma	Dessin avec la représentation d'un circuit électrique
Schéma de contrôle	Schéma électrique qui présente la logique de contrôle d'un système
Schéma de puissance	Schéma électrique qui présente des appareils effectuant un travail tel qu'une charge moteur ou de chauffage
Secteur d'activité	Système de classification des industries conçu par les organismes statistiques du Canada, du Mexique et des États-Unis à la suite de l'Accord de libre-échange nord-américain
Système d'information	Ensemble structuré de tous les éléments qui contribuent à la gestion de l'information dans une entreprise

Liste des sigles, symboles et des acronymes

2D	Graphisme en deux dimensions
3D	Graphisme en trois dimensions
AEC	Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry
ANSI	American National Standards Institute
API	Automate programmable industriel
BIM	<i>Building</i> Information Modeling
C.A.	Courant alternatif
C.C.	Courant continu
CAD	<i>Computer-aided drawing</i>
CAM	<i>Computer-assisted manufacturing</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CAPEX	<i>Capital expenditure</i>
CEI	Commission Internationale Électrotechnique
CSA	Association canadienne de normalisation
DAO	Dessin assisté par ordinateur
DWG	Format natif des fichiers de dessins AutoCAD

DXF	Drawing eXchange Format
h-p	Heure-personne
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
IPPI	Indice des prix des produits industriels
Md	Médiane
MIB	Modélisation de l'information sur le bâtiment
MNB	Maquette numérique du bâtiment
MVP	Modèle-vue-présentation
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OIQ	Ordre des ingénieurs du Québec
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PDF	Portable Document Format
PLC	<i>Programmable logic controller</i>
PMI	Project Management Institute
p.u.	<i>Per unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord

SEBJ	Société d'énergie de la Baie James - Hydro-Québec
TI	Technologie de l'information
TIC	Technologie de l'information et des communications
TQC	Tel que construit
VBA	Visual Basic for Applications
VLSI	<i>Very-Large-Scale Integration</i>
WEFA	Wharton Econometric Forecasting Associates
XLS	Format de fichier de Microsoft Excel (1995 à 2003)
XLSM	Fichier Excel avec macro (version 2010 et plus)
XLSX	Format de fichier de Microsoft Excel (2003 à 2017)

Correspondance de symboles statistiques utilisés

	Échantillon	Population
Moyenne	\bar{x}	μ
Mode	Mo	Mo
Médiane	Md	Md
Variance	S^2	σ^2
Écart-type	S	σ
Coefficient de variation	c.v.	c.v.
Proportion calculée	p	Π
Proportion estimée	\hat{p}	\hat{p}

Introduction

L'ingénieur électrique en automatisation ou l'ingénieur électrique en commande et protection [1] doit faire le choix entre deux¹ types de logiciels pour la production de documents d'ingénierie :

1. le logiciel de type dessin assisté par ordinateur (DAO ou CAD) ;
2. le logiciel de type conception assistée par ordinateur (CAO ou CAE).

L'un ou l'autre permet d'effectuer les plans comme les schémas de puissance ou de contrôle avec aisance, fiabilité et efficacité. Ces plans font partie d'un ensemble de types de documents communément appelés les documents d'ingénierie. Ces documents d'ingénierie doivent respecter un ensemble de règles légales, scientifiques et de normalisation. Ce respect signifie que les besoins des documents d'ingénierie dépassent largement les fonctions des logiciels de DAO ou de CAO. Par exemple, pour que l'un de ses plans soit utilisé, l'ingénieur électrique doit d'abord le valider et le vérifier. Une fois validé, ce plan doit être exporté sous la forme d'un fichier en format électronique accepté qui permet la signature électronique. Le format de fichier *portable document format* (PDF/A²) est ensuite scellé et signé à l'aide d'un autre logiciel. C'est seulement après ces deux dernières étapes que le plan pourra être utilisé. En conséquence, un projet de fabrication ou de construction ne peut être livré sans ces interventions de l'ingénieur. En termes clairs, l'ingénieur électrique est responsable à part entière d'un projet et ce, du début à la fin.

Aujourd'hui, l'informatisation des systèmes d'information (SI) en ingénierie entraîne des mutations croissantes, sans que la pratique de l'ingénierie n'en soit modifiée, tant sur les plans juridiques, d'affaires et techniques. Sans avoir révolutionné les processus d'ingénierie, les SI favorisent la collaboration entre les différentes disciplines de génie en apportant de

¹ Certaines personnes intègrent les deux types pour n'en former qu'un pour la conception et le dessin assisté par ordinateur (CDAO)

² Le PDF/A est un format de fichier basé sur le PDF v1.4 standardisé par la norme ISO 19005

l'interopérabilité, de la qualité et de l'efficacité [2]. Ces affirmations sont valables au Canada et ailleurs dans le monde parce que la pratique du génie est réglementée dans de multiples pays [3].

Historiquement, le travail de l'ingénieur s'effectuait sans logiciel. En 1972, au Québec, la commission Castonguay-Nepveu a initié les premières règles légales dans la profession du génie électrique [4]. Dans un système de droit, la conception électrique constitue maintenant un champ de pratique exclusif à la profession de l'ingénieur. Il en est de même pour des actes réservés tels que l'application d'un sceau et l'obligation d'apposer une signature. Depuis les années 1990, le génie logiciel et le génie informatique sont des branches émergentes du génie qui forcent ainsi la modernisation des lois afin de les inclure. Le Texas (États-Unis) est le premier État à avoir adopté de nouvelles lois pour inclure ces génies en 1998 [5].

Le but de cet essai est de comparer l'utilisation d'un logiciel de DAO par rapport à un logiciel de CAO dans un projet de génie électrique, à travers une expérimentation dans un contexte réel et représentatif, puis d'en mesurer le temps de réalisation. Il vise à apporter des résultats scientifiques afin de permettre aux organisations de prendre de meilleures décisions d'affaires en ce qui concerne leur performance, leur compétitivité et leur efficacité dans la réalisation de projets d'ingénierie [6]. Pour mener à bien ce mandat, un sondage a été réalisé auprès d'entreprises qui font des projets en génie électrique.

Étant donné qu'un projet d'ingénierie est multidisciplinaire, la production électrique a besoin de la mécanique, et la mécanique requiert de l'électricité pour effectuer un travail, alors, les projets recherchés doivent nécessairement représenter le travail qu'un ingénieur électrique doit réaliser. C'est pourquoi, dans cet essai, le terme « projet » réfère majoritairement à un projet du domaine de l'électricité ou à un sous-projet à connotation électrique découlant d'un projet plus large. Alors, les projets qui font l'objet de l'étude expérimentale sont de nature électrique, mais sont aussi le reflet d'un travail électrique complet [8]. À titre indicatif, un projet de génie électrique comporte souvent une partie de commande, de mesure et de puissance, mais aussi des éléments de protection comme la sous-tension, la surtension, la surintensité, la protection de température, sans oublier la sécurité, sous forme de circuit redondant, de protection humaine et autres. Cette étude couvre les pratiques de génie électrique liées, par exemple, au domaine industriel et à la production électrique. En fait, l'une des bases communes entre les différentes disciplines électriques est l'utilisation des schémas logiques dessinés en deux

dimensions (2D). Il existe aussi d'autres types d'informations qui sont produits sous une forme différente. Les listes de matériels et les listes de câbles qui sont représentées sous forme de tableaux en sont un premier exemple. Un second exemple : les connexions et les fileries qui peuvent être sous forme de tableaux, de graphiques ou d'adressage. Toutes ces informations font partie de l'ensemble des documents d'ingénierie avec lesquels les ingénieurs électriques doivent composer pour la réalisation de projets. Ces documents d'ingénierie sont aussi appelés, par extension, plans et devis. C'est pourquoi les défis engendrés par la production des documents d'ingénierie manuellement à l'aide de logiciels de DAO ou avec une assistance de la CAO ne peuvent pas être comparés du génie électrique à un autre secteur, comme le génie mécanique. Dans un projet, s'il existe plus d'une discipline de génie, alors il peut exister plusieurs documents avec des normes de représentations d'une même construction. Ces documents présentent l'information des points de vue différents en fonction des normes de représentation de chacune de ces disciplines. Par exemple, un ingénieur électrique lit des schémas électriques d'un moteur de grue alors que l'ingénieur mécanique lit ses schémas de structure de la partie mobile de la masse mobile de cette même grue. Ce concept de présentation de vue différent est commun en ingénierie. C'est aussi fréquent en sciences informatiques, tel qu'énoncé dans la norme ISO/IEC/IEEE 42010:2011, *Systems and software engineering — Architecture description*.

Pour bien situer l'étude, cet essai présente, au premier chapitre, une mise en contexte et une description des enjeux. L'environnement de travail de l'ingénieur y est expliqué. Les parties en cause et les logiciels utilisés sont décrits pour dresser un portrait de la situation.

Au deuxième chapitre, une revue de la littérature est faite pour analyser les écrits pertinents sur le sujet. Il faut connaître la place du DAO et de la CAO dans les domaines de l'ingénierie en général et dans l'automatisation en industrie manufacturière, ainsi que dans la commande et protection en haute-tension. Dans ce but, les termes comme CAO électrique et dessins électriques sont analysés.

Le troisième chapitre décrit la problématique. Les revues scientifiques disent généralement que la CAO donne de meilleurs résultats que le DAO. La quasi-totalité des entreprises en génies produit des dessins en version électronique à l'aide de logiciels spécialisés. Pourtant, force à constater que l'industrie ne s'est pas convertie à la CAO. Alors, l'auteur choisit d'exposer cette problématique et de conduire une étude sur les performances des entreprises

qui utilisent ces outils. Les objectifs et l'hypothèse du travail sont détaillés dans ce même chapitre.

Pour sa part, le quatrième chapitre expose la méthodologie utilisée pour traiter les informations obtenues des entreprises. Les variables retenues sont détaillées pour évaluer qualitativement et quantitativement les données des projets produits en CAO ou en DAO. Les choix de calculs, leurs justifications et les résultats attendus sont présentés pour confirmer l'hypothèse de la question de recherche.

Une fois les données exposées, le dernier chapitre conclut l'étude par l'analyse des résultats et un retour sur l'hypothèse.

Chapitre 1

Mise en contexte

L'introduction décrit le travail de l'ingénieur d'un point de vue technique et de gestion de projet. Elle apporte une saveur régionale dans un contexte de responsabilité légale et un historique des pratiques d'ingénierie. Ce premier chapitre met en évidence le problème de réalisation des documents d'ingénierie à partir des logiciels utilisés sur le marché et qui se catégorisent en deux types : le DAO et la CAO. Ensuite, les forces et les faiblesses de chacun sont contextualisées dans l'environnement d'un ingénieur électrique en automatisme ou d'un ingénieur électrique en commande et protection. Le but est de bien cerner la situation de la pratique de l'ingénieur électrique pour mieux expliquer les deux approches de réalisation des documents. Pour ce faire, il faut définir la notion de performance utilisée dans cet essai. En effet, il faut établir les fondements des livrables recherchés et des résultats attendus pour calculer la performance de l'utilisation des logiciels en entreprises. Ensuite, une description du processus d'un projet d'ingénierie en tant que projet multidisciplinaire est expliquée parce que le processus intègre l'utilisation du logiciel de DAO ou de CAO. Après cela, une description de ce qu'est l'automatisation en génie électrique est présente pour aider le lecteur à situer les particularités de ce métier avec le projet d'ingénierie à réaliser. L'automatisation en génie électrique est parfois connue sous une autre appellation : commande et protection. Finalement, l'étude présente les caractéristiques des deux types de logiciels dans le cadre de la discipline, et explique les forces et les difficultés de chacun.

1.1 Notion de performance, effectivité, efficience et efficacité

La Banque de développement du Canada (BDC), qui est une société de la couronne, décrit l'avantage concurrentiel comme « tout ce qui confère à une entreprise un avantage sur ses

concurrents, l'aidant à attirer plus de clients et à accroître sa part de marché »³. Toujours selon la BDC, l'avantage concurrentiel peut prendre trois formes principales :

1. Avantage de coût : produire un produit ou fournir un service à un coût inférieur à celui des concurrents,
2. Avantage de l'offre : différencier un produit en ajoutant des fonctionnalités très appréciées des clients,
3. Avantage de créneau (ou niche) : servir un segment précis du marché mieux que quiconque.

Lorsque les entreprises veulent rester concurrentielles, elles doivent constamment exceller dans au moins une de ces trois catégories tout en restant concurrentielles dans les deux autres places une entreprise en position de force par rapport à ses concurrents. Si une entreprise n'obtient qu'un rendement moyen dans les trois catégories, elle ne se démarquera pas sur le marché. Elle risque alors d'offrir un sous-rendement et même, d'échouer³. En conséquence, les entreprises peuvent avoir des objectifs différents et des résultats attendus évalués différemment. La mesure de résultats conduit à une notion de performance qui peut varier d'une entreprise à une autre. Cette notion doit être définie dans le cadre de cette étude.

1.1.1 Résultats attendus

Les résultats attendus varient d'une entreprise à une autre. Elles dépendent de la politique à l'intérieur de l'entreprise, mais aussi du mode de réalisation des projets. En effet, la réalisation et la livraison de l'œuvre ne sont pas la même d'un mode à un autre. Selon l'Association des firmes de génies-conseils du Québec (AFG), les entreprises de génies, peuvent rencontrer six modes⁴ : (1) mode traditionnel, (2) mode de gérance, (3) mode ingénierie approvisionnement, gestion de construction (IAGC), (4) mode clefs en main, (5) mode produit en main et (6) partenariat public-privé (PPP).

³ <https://www.bdc.ca/fr/articles-outils/boite-outils-entrepreneur/gabarits-documents-guides-affaires/glossaire/pages/avantage-concurrentiel.aspx>

⁴ <http://afg.quebec/genie-conseil/meilleures-pratiques/mode-de-realisation-de-projet>

Par exemple, dans le cas du mode clefs en main, le propriétaire confie à une seule entreprise ou groupement d'entreprises l'ensemble de l'ingénierie détaillée, l'approvisionnement et la construction. La réalisation des ouvrages est garantie par l'entreprise choisie. Sa responsabilité se termine après la mise en service. Dans un cas du mode clefs en main, les résultats attendus sont décrits dans un devis descriptif. Un devis descriptif décrit les objectifs minimaux à atteindre tels que les critères à respecter, les exigences spatiales à respecter, mais il revient généralement à l'entreprise choisie de déterminer les moyens de l'exécuter. Un devis descriptif est synonyme de devis de performance. Le terme performance utilisé dans le cadre d'un projet clefs en main ne doit pas être confondu à une notion une mesure d'efficacité ni d'efficience. Le devis descriptif ou le devis de performance énumère les objectifs minimaux à atteindre. La notion de performance telle qu'utilisée dans cet essai est définie dans la section 1.1.3.

Dans le cadre de cet essai, indépendamment du mode de réalisation et de la politique à l'intérieur de l'entreprise, le résultat attendu dans un projet d'ingénierie est le livrable de qualité et quantité suffisante afin de réaliser un projet. Le résultat n'a pas besoin d'être parfait ni atteindre un idéal absolu.

Par exemple, un schéma électrique est un livrable. Ce livrable doit contenir des informations correctement présentées en quantité minimale afin de réaliser une œuvre. La présence d'erreurs mineures sur ce livrable n'empêche pas la réalisation de l'œuvre. La présence d'erreurs faciles à déceler peut être interceptée par des intervenants et n'empêche pas non plus à la réalisation de l'œuvre. Quant aux autres formes d'erreurs et inconvénients qui peuvent nuire à la réalisation des résultats attendus, il faut y aller au cas par cas. Finalement, le résultat attendu dans sa forme la plus simple, c'est le résultat en qualité suffisante pour la réalisation d'un ouvrage.

1.1.2 Efficience, efficacité et effectivité

L'efficience est le rapport entre les résultats obtenus et les moyens utilisés (ressources humaines, financières, matérielles...). Dans cette étude, le moyen utilisé est le logiciel : DAO ou CAO

L'efficacité est l'obtention et surtout la conformité des résultats obtenus avec les moyens utilisés.

L'effectivité signifie le moyen qui produit un effet tangible. Dans cette étude, un effet tangible représente les livrables d'un projet.

1.1.3 Performance des outils logiciels dans l'entreprise

La performance est la mesure sur l'efficacité des choix politiques de l'entreprise et de l'efficience des choix de gestions. Autrement dit, la notion de performance est variable selon les objectifs et les résultats attendus à l'intérieur d'une entreprise. Dans le contexte de cet essai, les entreprises en génie doivent être concurrentielles comme toute autre entreprise. Elles doivent toutes faire preuve d'efficience, d'efficacité et d'effectivité dans la réalisation de mandats. Que l'entreprise de génie doive réaliser un projet clefs en main ou tout autre mode de réalisation (traditionnel, gérance, IAGC, produit en main ou partenariat public-privé), elle doit livrer un minimum. Ce minimum est le résultat attendu. Ce résultat attendu signifie que toutes les valeurs ajoutées, aussi intéressantes soient-elles, sont considérées superflues. Afin de mieux comprendre le raisonnement derrière cet énoncé, l'exemple d'un logiciel de CAO est utilisé : un logiciel de CAO commercialisé offre à l'utilisateur la possibilité de donner un grand nombre de renseignements à un câble : matériel conducteur utilisé (cuivre ou aluminium), courant maximum, type de fil conducteur (solide, à brins, ...), grosseur du conducteur (12 AWG, 14 AWG, ...), présence de fil de MALT, type d'isolant (polyvinyl-chloride (PVC), polyethylene (PE), ...), type de produit (AC90, RW90, TECK, ...) voltage (600V, 1000V, ...). Mais tous ces renseignements peuvent avoir très peu d'impact sur le résultat attendu si par exemple l'ingénieur électrique ne désire qu'illustrer un câble informatique avec un connecteur DB25 à une extrémité avec un RJ45 à l'autre. En pratique, la longueur à approvisionner est pratiquement la seule information minimum nécessaire à ajouter. Les caractéristiques citées précédemment ne sont d'aucune utilité. Les présenter constitue un surplus d'information qui n'apporte rien à la qualité du livrable. En d'autres mots, avec cet exemple, un outil qui offre un grand nombre de possibilités ne donne pas nécessairement des résultats attendus avec efficacité, efficience ou effectivité.

1.2 Le projet d'ingénierie et le processus multidisciplinaire

Généralement, un projet peut être divisé en quatre grandes phases [7][8][9] : (1) la phase initiale, (2) la phase de conception, (3) la phase de réalisation et (4) la phase finale. Les projets d'ingénierie ont souvent six grandes phases parce qu'elles introduisent une notion de fabrication pour la construction. En somme, un projet d'ingénierie est un processus qui est mieux représenté avec les six étapes suivantes [2][7][10] : (1) analyse et conception initiale, (2a) plan de fabrication et (2b) sa réalisation, (3a) plan d'installation et (3b) sa construction, ainsi que (4) le tel que construit (TQC) pour son exploitation. Le cycle de projet d'ingénierie en six étapes s'applique aux grands projets d'ingénieries multidisciplinaires. La figure 1.1 illustre ce processus.

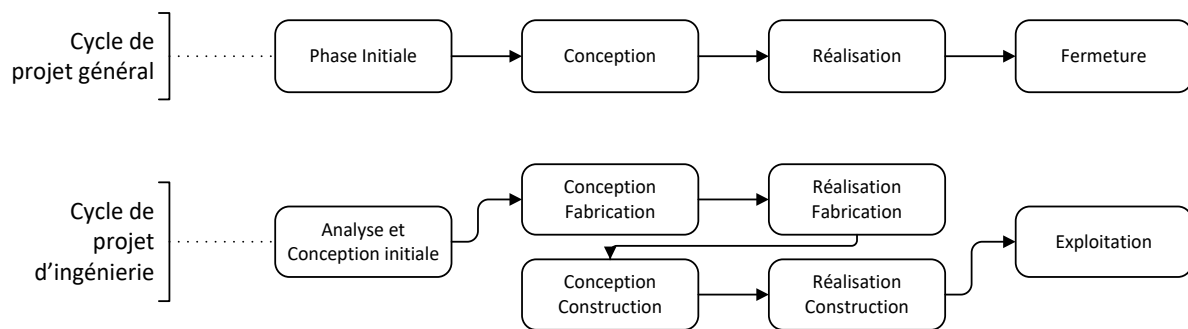


Figure 1.1 : Cycle d'un projet d'ingénierie

Dans un tel projet, le développement s'exécute en cascade et les étapes se suivent séquentiellement. En réalité, aucun développement n'est à l'abri de changements en cours de projet [11][12]. C'est une des raisons pour laquelle les documents d'ingénierie sont passés du format papier au numérique.

1.2.1 Document d'ingénierie

Un document d'ingénierie s'avère essentiel pour la fabrication ou la construction d'une œuvre. Par définition, une œuvre est un travail comme une centrale électrique, un poste de

transformation électrique ou un système de charge rapide pour véhicule électrique. Une mise en œuvre désigne la création d'un produit fini à partir d'un document de conception.

À l'intérieur d'un document d'ingénierie, l'information peut prendre diverses formes telles que le schéma électrique, le plan de disposition, le plan de construction, les notes de calculs, les listes de matériel, les listes de raccordement point à point, les bordereaux d'achat, les attestations de conformité et les avis écrits. Le document d'ingénierie est le principal véhicule de l'information dans l'élaboration et la construction d'une œuvre. Chaque document peut être créé et prendre fin à différentes étapes du projet. Par exemple, une liste des câbles à installer peut être supprimée une fois le projet complété, mais une liste des câbles existants demeure présente depuis l'installation jusqu'à la démolition de l'œuvre. Pendant un projet, l'ingénieur intervient à différentes étapes du développement de ces documents d'ingénierie. Lorsqu'il y a une publication pour la fabrication ou l'installation, il doit signer et sceller ledit document [13]. La signature et le scellage sont des actes réservés à la profession d'ingénieur pour prouver qu'un document est complet et éviter qu'il ne soit modifié. De ce fait, l'intégrité et la gestion des documents sont importantes pendant toute la durée d'un projet et pour l'œuvre [14][15].

Les documents peuvent être modifiés tout au long d'un projet. Les causes en sont multiples et peuvent généralement avoir des incidences sur la performance du travail à accomplir ainsi que sur sa qualité. En conséquence, le contrôle, la gestion du risque, la gestion du changement et le suivi d'un projet d'ingénierie constituent des éléments cruciaux pour assurer le succès d'un projet.

À la fin d'un projet, les documents sont remis à l'exploitant sous différents formats : impression papier, Portable Document Format (PDF)[16], AutoCAD (DWG) et tableur MS-Excel (XLS). Les maquettes 3D et les bases de données au format propriétaire ne sont pas systématiquement exigées par l'exploitant. Une des raisons est que ces bases de données ne sont utilisées qu'en ingénierie et non pour l'exploitation. Lors de la fabrication et de la construction, ces bases de données ne sont pas mises à jour, ce qui rend leur fiabilité nulle [4]. Une seconde raison est que si l'organisation possède une certification de qualité ISO9001 ou est en voie de l'obtenir, la procédure exige de maîtriser tous les documents créés, autant à l'interne qu'à l'externe. Or, les fichiers DWG et PDF sont bien normalisés, ce qui simplifie la revue documentaire. D'ailleurs, l'Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ) oblige la conservation des documents pendant dix ans, selon les termes prévus par la loi [14].

Une fois le projet terminé, il est fermé, conformément aux plans et devis. Les documents d'ingénierie utilisés pour le projet sont alors archivés et protégés contre les modifications, conformément aux règlements en vigueur. La tenue de dossiers fait partie intégrante de la pratique de l'ingénieur⁵. Par contre, les documents d'ingénierie utilisés en exploitation de l'œuvre peuvent être modifiés parce que l'étape de l'exploitation consiste en une série d'activités interdépendantes du projet.

Cette méthode de travail pour les documents d'ingénierie est répandue dans la presque totalité des domaines électriques[17]. L'article *Système d'information de l'ingénierie*, rédigé par Philippe Guillet, en 2016, présente une vue d'ensemble de l'importance des documents d'ingénierie [2].

1.3 Le génie électrique en automatisation

Le génie électrique peut prendre différentes orientations. Cependant, cet essai traite du génie électrique en automatisation. Selon le secteur d'activité, cette discipline du génie électrique peut être nommée sous diverses formes : (1) automatisation, principalement pour les procédés industriels ; (2) commande et protection, pour le domaine de la haute-tension.

L'automatisation est le nom de la discipline peut avoir plusieurs déclinaisons : automatique, automatisme, *protection and control* au Canada-Anglais et *Automation control* ou *Relay protection and control* aux États-Unis. Peu importe leur appellation ou leur pays d'origine, les ingénieurs électriques en automatisation travaillent à partir des mêmes lois et sur les mêmes bases. Peu importe que les techniciens, technologues et ingénieurs travaillent en automatisation électrique industrielle ou en électricité de puissance de transport, de production ou de distribution, tous doivent développer des schémas et des dessins à l'aide de logiciels de DAO ou de CAO. Parfois, ils doivent interpréter des documents mécaniques pour leurs besoins électriques. Ils doivent de plus choisir des produits pour l'assemblage de leurs équipements. Ils participent à la conception et à la programmation des équipements selon l'application [18].

⁵Règlement sur la tenue des dossiers et des cabinets de consultation des ingénieurs (Loi sur les ingénieurs).

Afin de simplifier le lectorat, le seul terme automatiser sera utilisé pour identifier la discipline de génie électrique.

L'automatisation doit travailler avec des schémas, des fileries, des dessins de connexions, des listes des matériels, des listes de câblages, des listes de connexion et des listes d'achats [19]. Parmi ces documents, il peut y avoir des schémas d'architecture de réseaux [20], de logique⁶, d'unifilaires ou triphasés, de câblages, de dessins d'assemblage, de dessins de panneaux de vue avant ou de fond, de légendes, de symboles et de listes de dessins. L'automatisation utilise souvent des langages de programmation tels que le *grafcet*, le *ladder*, les diagrammes de blocs et les listes d'instructions en langage assembleur pour des représentations de séquences en automatisation, souvent associées aux automates industriels. Depuis 2013, la norme CEI61131 définit les standards et les aspects de la programmation, des équipements et des communications des automates programmables industriels : langage de programmation, communications, sécurité fonctionnelle, programmation en logique floue, implantation et application des langages de programmation, interface de communications numériques, point à point pour les petits capteurs et actionneurs⁷ (SDCI).

En génie électrique de l'automatisation, les documents d'ingénierie sont composés de symboles constitués de lignes et de figures géométriques simples [21]. Deux normes de représentation existent [22] : (1) la norme ANSI/NEMA/IEEE Std 315-1975, principalement utilisée en Amérique du Nord [23][24], et (2) IEC-617, dans les pays européens [25]. À ce propos, les figures 1.2 et 1.3 présentent un exemple de départ-moteur avec des symboles électriques pour les deux normes. Ces deux figures présentent des systèmes d'entraînement, et leurs principes s'appliquent à tous les systèmes de commande électrique, quelle que soit leur complexité. Des exemples de systèmes avec un moteur sont les systèmes de pompage, de convoyeur et de ventilation [26][27][28][29].

⁶Par exemple : logique de protection, logique de télédéclenchement, logique de détection.

⁷Aussi appelé en anglais : *single-drop digital communications interface for small sensor and actuator* (SDCI)

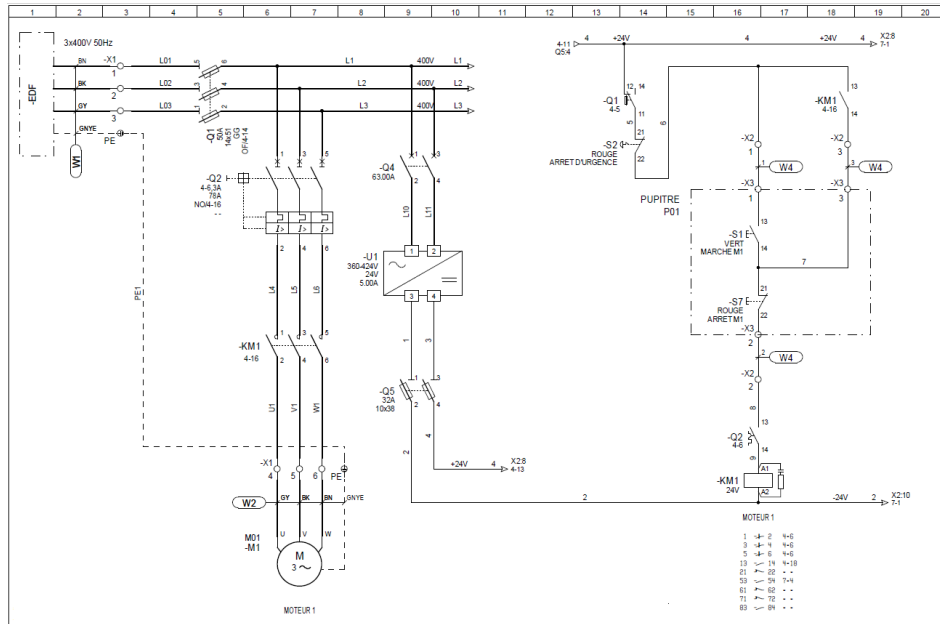


Figure 1.2 : Exemple de départ moteur direct selon CEI/IEC

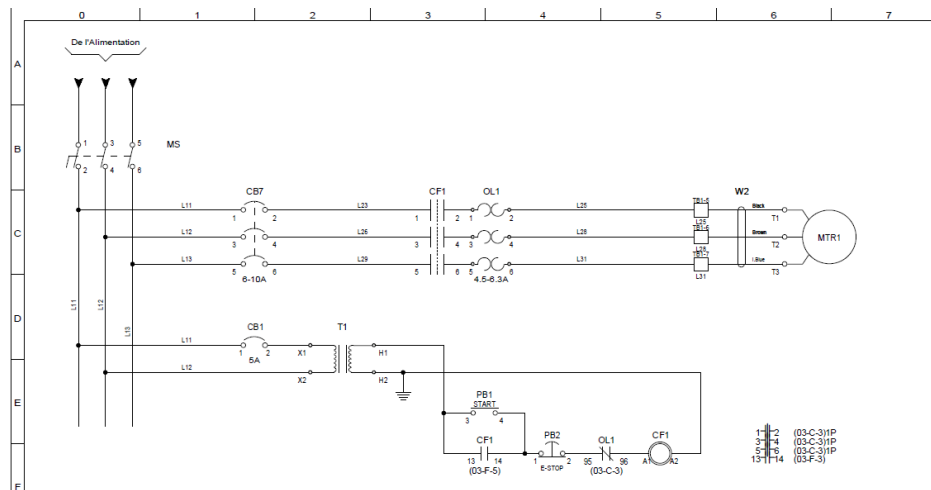


Figure 1.3 : Exemple de départ moteur direct selon ANSI/IEEE

1.3.1 Processus de l'ingénierie

Le processus d'ingénierie n'est pas toujours simple au départ. Le concepteur doit avant tout déterminer la nature des travaux. Par exemple, l'érection d'une nouvelle construction ou la

réhabilitation⁸ d'une construction existante [30]. Une fois la nature des travaux identifiée, le concepteur cherche à identifier les systèmes électriques à concevoir. Par exemple, un système électrique d'un départ moteur direct qui est couramment utilisé dans les systèmes de convoyeurs simples.

Lorsque la nature des travaux ainsi que le système électrique à concevoir sont identifiés, le concepteur commence son travail avec les documents de références [10]. Il existe évidemment un grand nombre de catégories de documents de références. Afin de se limiter à l'essentiel, le document de référence auquel cet essai fait allusion est le fond de plan aussi appelé en anglais *blueprint*. Le fond de plan est un schéma électrique utilisé comme patron de conception et c'est couramment utilisé dans l'industrie.

Si par exemple, le concepteur doit concevoir un nouveau système de départ moteur direct, il devra alors choisir un fond de plan qui sera le plus près du résultat qu'il désire obtenir. Normalement, le choix de fond de plan est celui qui va demander le moins de temps à réaliser. En l'occurrence, il devra sélectionner parmi un vaste choix de fonds de plan disponibles.

Les figure 1.2 et figure 1.3 sont deux exemples de fonds de plans de schémas électriques de départs moteurs directs. Ces deux fonds de plans sont en apparence différents et sont de conception équivalente. La première figure illustre sur une même page un schéma électrique d'un moteur avec son circuit de commande dessiné du haut vers le bas. Le schéma est dessiné selon la norme CEI/IEC couramment utilisé par les concepteurs européens. La deuxième figure redessine le même système électrique que le premier, mais avec comme principale différence qu'elle suit des normes américaines ANSI/IEEE. Le travail du concepteur d'un projet d'ingénierie consiste à sélectionner le fond de plan de départ le plus approprié.

Si, par exemple, la fabrication du convoyeur est attribuée à un tableautier européen, alors le concepteur a intérêt à sélectionner un fond de plan représenté à la figure 1.2 afin de réduire les temps de traitement. En effet, les annotations que le concepteur devrait incorporer dans le fond de plan pour créer un dessin final seront moins nombreuses que s'il avait choisi celui avec les normes américaines.

⁸ Généralement, un projet de réhabilitation consiste à remettre au goût du jour une œuvre qui s'est détériorée par usure ou par effet du temps par le remplacement des équipements sans le dénaturer.

Ce processus est dans l'industrie ainsi que les articles de références utilisés dans cet essai. Dans *Engineering design methods : strategies for product design* publié en 2000, M. Nigel Cross mentionne que les différentes méthodes de travail et ajoute que l'ingénieur peut démarrer une conception avec les fonds de plan d'une norme [31]. Dans un autre article rédigé en 1982 de Fred T. Dawson et Robert H. Philower, les étapes de conception du document sont les mêmes aujourd'hui à l'exception des outils technologiques utilisés [17][32]. Le concepteur analyse et rédige les modifications à apporter dans les cahiers de charges. La conception est réalisée après une revue de la littérature. Des croquis sont produits sur des plans en 2D. Le concepteur complète les modifications aux plans d'ingénieries sur une feuille de papier ou en format électronique PDF pour ensuite les saisir à l'intérieur d'une base de données, à l'aide d'un logiciel de DAO ou de CAO. Une fois la base de données est mise à jour, le logiciel imprime les résultats pour qu'ils soient vérifiés. Lorsque la vérification est satisfaisante, le cycle de vie du document est interrompu jusqu'à la prochaine étape du projet.

Le processus d'ingénierie est souvent plus élaboré et rigoureux que celui décrit au paragraphe précédent. Par exemple, une firme d'ingénierie certifiée ISO9001 possède un guide de conception pour les instructions de travail [33]. Au Canada comme aux États-Unis, les plans doivent être scellés et signés pour la fabrication ou la construction de l'œuvre, selon les lois en vigueur. Une œuvre pourrait être un barrage, un aqueduc, une centrale électrique, une autoroute et un système de protection incendie. La figure 1.4 illustre un exemple de processus des activités d'ingénierie. Cet exemple de processus reste général et commun à l'intérieur de nombreuses entreprises d'ingénierie.

Une discipline en ingénierie évoque un ensemble d'éléments que doit effectuer l'ingénieur ainsi que l'évolution de ses documents d'ingénierie. Évidemment, chacune des étapes nécessite un délai de traitement. Alors que la réduction des délais passe inévitablement par une gestion de projet efficace et l'élimination des temps morts, la durée de réalisation des documents d'ingénierie nécessite un logiciel adapté aux réalités du métier : les changements en cours de projet l'exigent. Ces délais peuvent être majorés ou diminués par de multiples facteurs : l'expérience et la formation des utilisateurs, le nombre d'interventions, la validation des données, l'adaptabilité et le travail en groupe.

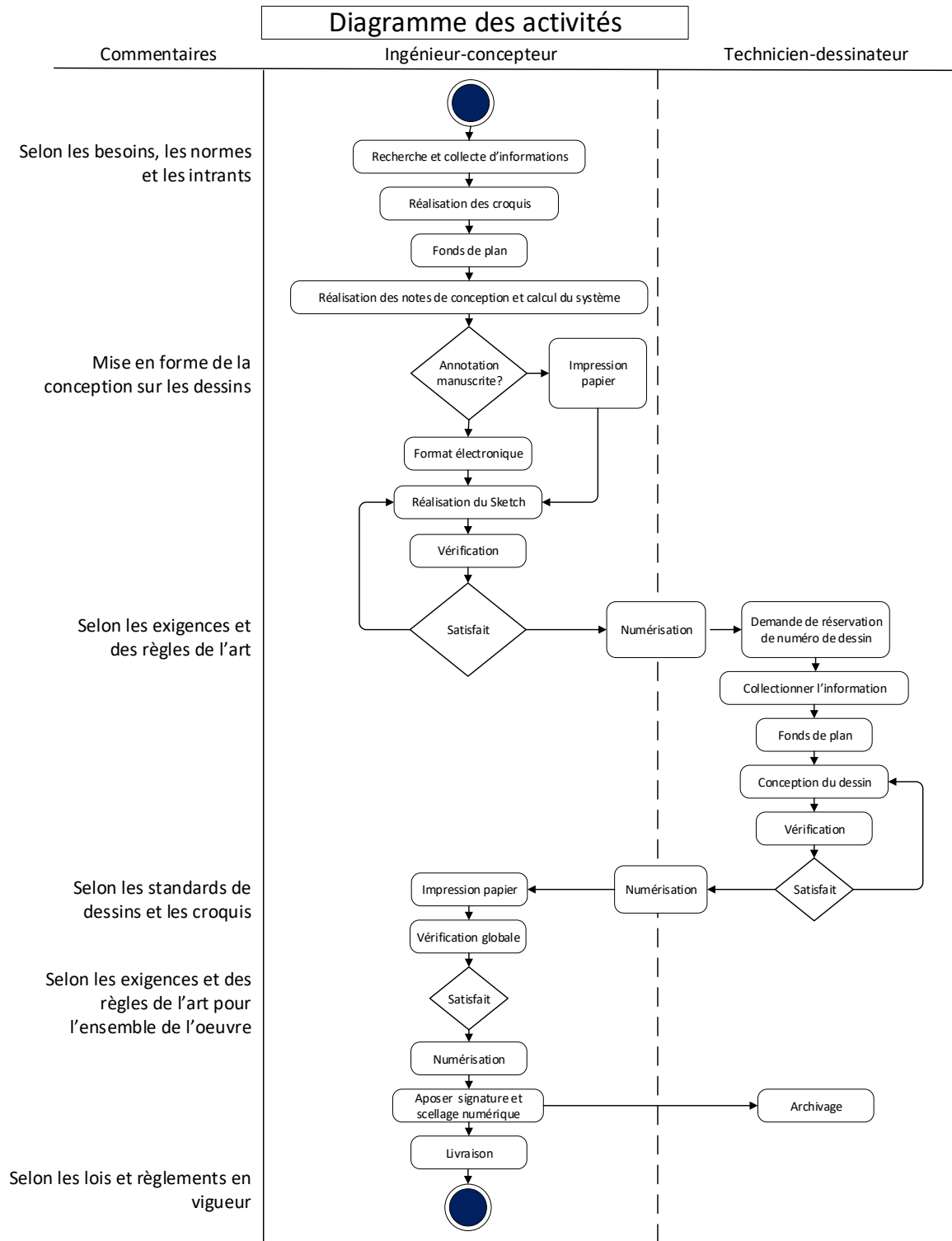


Figure 1.4 : Diagramme d'activités et processus de maîtrise de la conception

1.3.2 Génie électrique

Pour bien exposer la problématique, il faut tenir compte des éléments fondamentaux d'un système électrique afin d'en connaître l'ampleur. La liste suivante n'a pas pour objectif de décrire le travail de l'ingénieur électrique ni l'ensemble des composantes d'un projet électrique, mais plutôt d'en donner un aperçu de ce qu'un projet électrique peut comporter : une source d'alimentation en tension C.A. ou C.C. ; un système de transformation électrique ; un circuit de commande ; des entrées et des sorties avec un système interne ou externe tel qu'un automate, relais intelligent, processeur, contrôleur; une télécommunication interréseaux [34] ; des systèmes de relève ou de sécurité/protection ; un travail mécanique qui se traduit par la présence d'une machine tournante ; et d'autres fonctions : filtre, redresseur, changement de tension, accumulateur, refroidissement, isolation électrique. L'ingénierie comprend : cahier de charges, plans et devis, liste de matériel et de câblage, contrat avec un client. Les ingénieurs électriques doivent aussi composer avec un grand nombre d'intervenants, dont, entre autres : le client (administratif ou technique) ; les ingénieurs des autres disciplines : mécanique, électrique, etc. ; les fournisseurs pour l'approvisionnement de matériels ; les fournisseurs de service comme l'assistance technique des logiciels ; les employés sous leurs responsabilités ; leur employeur ; les instances gouvernementales.

Bref, le génie électrique est une science appliquée complexe, considérable et établie [35][36] [37]. Les deux prochaines sections décrivent les deux types de logiciels utilisés pour la réalisation des documents d'ingénierie, en commençant par le DAO, suivi de la CAO.

1.4 Logiciel de DAO

Le logiciel de DAO le plus populaire est AutoCAD [38]. Il permet de faire du dessin technique de grande qualité et d'une grande fiabilité [39]. Par opposition à un logiciel spécialisé dans une discipline unique d'un génie, il est générique. Conséquemment, il peut aussi bien servir les architectes que les ingénieurs. Bien qu'AutoCAD domine le marché [40][41] pour le 2D [42],

cet essai est une étude des logiciels de DAO et non d'AutoCAD. C'est pourquoi, dans le présent document, les caractéristiques présentées sont communes à l'ensemble des logiciels de DAO.

Les logiciels de DAO sont, typiquement, des logiciels de saisie de commande [43], soit par des lignes de commande ou par une interface graphique (*Graphical User Interface*, GUI). Avec le modèle-vue-présentation (MVP) [44][45], le logiciel de DAO obtient une instruction en provenance de l'utilisateur. Après un traitement, le logiciel affiche résultat à l'utilisateur à travers une interface. Un exemple d'activité liée au dessin est le traçage de ligne sur le plan.

Un premier avantage des logiciels de DAO est sa capacité à traiter les problèmes de calculs mathématiques numériques connus. En mathématiques, il existe plusieurs grands ensembles de base :

1. L'ensemble \mathbb{N}^* pour les nombres naturels (par exemple : 1, 2, 3, 4...)
2. L'ensemble \mathbb{N} pour les nombres naturels avec le zéro (par exemple : 0, 1, 2, 3, 4...)
3. L'ensemble \mathbb{Z} pour les nombres relatifs (par exemple : ..., -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4...)
4. L'ensemble \mathbb{D} pour les nombres décimaux relatifs (par exemple : ..., -3, -2.25, -1.5, -1, 0, 1, 1.5, 2, 2.1, 3...)
5. L'ensemble \mathbb{Q} pour les nombres rationnels (par exemple : ..., -5/4, -1, -1/2, 0, 0.7, 1, 6.75, 21/2, ...)
6. L'ensemble \mathbb{Q}' pour les nombres irrationnels (par exemple : ..., $-\ln 3$, π , $\sqrt[3]{20}$, .)
7. L'ensemble \mathbb{Q}'_+ pour les nombres irrationnels positifs (par exemple : π , $\sqrt[3]{20}$,)
8. L'ensemble \mathbb{R} pour les nombres réels (par exemple : ..., -5/4, $\frac{-2}{\sqrt{3}}$, $-\ln 3$, , -1, -1/2, 0, 0.7, 1, π , 6.75, 21/2, $\sqrt[3]{20}$, ...)
9. L'ensemble $i\mathbb{R}$ pour les nombres imaginaires, aussi appelés nombres complexes (par exemple : $\sqrt{-1}$)

L'ingénieur électrique qui réalise ses calculs à l'aide d'équations mathématiques sans perte de précision sur papier doit être capable d'obtenir des résultats numériques fiables de l'ordinateur. En d'autres termes, l'ingénieur cherche des logiciels capables de faire du traitement d'analyse numérique. Alors, les points forts de ces logiciels de DAO sont leur capacité traiter les nombres à virgules flottantes, la manipulation des nombres dans le domaine de valeurs Réels \mathbb{R} , la

précision des valeurs dans le domaine des nombres réels \mathbb{R} , la gestion des erreurs de représentation dans les grandeurs réelles \mathbb{R} et la facilité de conversion d'échelles.

Un second avantage est la notion de couches, qui permet la superposition des différents groupes de lignes, ce qui favorise la collaboration de multiples disciplines par le biais d'une base de données uniformisée. Un exemple d'application des couches est le passage du système de ventilation calqué sur la vue en plan d'un bâtiment. Un autre exemple est la collection de points d'éclairage d'urgence calqués sur une autre couche dans ce même bâtiment.

Finalement, les bases de données des logiciels de DAO sont très faciles à interpréter par des logiciels tiers. Leurs fichiers d'exportations de types fichiers textes bruts sont répandus et adoptés par l'industrie contrairement aux formats natifs offerts par les logiciels de CAO. Ceci permet le partage des documents à travers toutes les disciplines pour une meilleure collaboration dans un projet. L'esprit de cohésion et le travail d'équipe s'en trouvent donc favorisés [42].

Dans un contexte de projet, bien souvent, l'utilisateur du logiciel utilise un fichier représentatif du travail, effectue les modifications par l'entrée de données, puis sauvegarde le document pour des opérations ultérieures [31]. Dans certains cas, si les fonctions de base du logiciel sont maîtrisées et si les ressources humaines possèdent les aptitudes, alors logiciel de DAO peut être mieux exploité à l'aide des modules d'extension ou des plugiciels pour augmenter sa productivité. Ces modules d'extensions peuvent être développés à l'interne, pour répondre à des besoins spécifiques, ou achetés d'un tiers.

1.5 Logiciel de CAO

La CAO permet de modéliser un sujet, de fournir des objets paramétrables au concepteur et d'offrir des fonctions de calcul appliquées à la science. Voici trois exemples d'objets paramétrables : (1) le symbole qui est une représentation d'une composante électrique. Ce symbole est un modèle qui comporte un graphisme, des attributs, des points de connexions ainsi que des références à des bases de données comme des bases de matériels, des listes de connexion ou des listes d'achats ; (2) le plan qui comporte un cartouche et une collection

de symboles ; et (3) des références croisées. Généralement, les références croisées sont des champs de textes qui font allusion à des renseignements. Dans un cadre plus spécifique, la norme IEC 61082 définit des formats de références croisées selon le type de renseignements tels que les références de symbole, les références de plan et les références de connexion. D'autres normes, comme la NASA (GP-435, Volume 1), considèrent les agrandissements comme des références-croisées de zone⁹. En ce qui concerne le génie électrique, les documents d'ingénierie doivent être produits à partir de schémas. La modélisation des objets et leurs caractéristiques paramétriques sont alors des stratégies aidantes pour l'équipe attirée au projet.

La CAO possède deux caractéristiques qui l'avantagent [46][47]. La première est la présence d'une base de données centralisée. Sa cohésion et son intégrité sont assurées par le logiciel, au même titre qu'un système de gestion de base de données (SGBD). La seconde caractéristique est la présence de fonctions métiers qui permettent de répondre à des besoins spécialisés dans le secteur d'activités des ingénieurs électriques. Par exemple, une fonction offerte dans ce type de logiciel est la génération de documents d'ingénierie comme des listes de matériels, des listes d'achats, des listes de fils ou des listes de câbles. Dans le métier, ce sont les schémas électriques qui servent d'intrants de conception pour l'ingénierie de détails. En CAO, l'utilisateur lance un traitement qui permet d'extraire des données à partir de la base de données pour produire de nouveaux documents d'ingénierie comme un plan de bornes. Des fonctions de détection d'erreurs sont aussi présentes dans ces logiciels telles que la détection de court-circuit et le repère d'équipement invalide. Prises ensemble, la base de données centralisée et les fonctions métiers permettent de contrôler trois facteurs qui influencent la réalisation d'un projet : l'apparition des erreurs liées aux incohérences des données, la réduction de saisie manuelle des données¹⁰ à l'aide d'automatisme et finalement, la réduction de l'effort occasionné par les changements demandés en cours de route [48].

Par contre, ces logiciels sont plus complexes que les logiciels de DAO. D'abord, la CAO offre de nombreuses options pour lesquelles le paramétrage est obligatoire. Les options par défaut

⁹ Traduction libre de *cross-reference zoning*

¹⁰ Par exemple : Sans automatisme, le déplacement d'un symbole électrique peut nécessiter de redessiner et de redisposer des plusieurs lignes.

à l'intérieur du logiciel ne peuvent pas parfaitement correspondre aux processus d'affaires d'une entreprise. Un premier paramétrage est obligatoire. Par exemple, après l'acquisition d'un nouveau logiciel de CAO, paramétrer un cartouche avec les informations spécifiques à l'entreprise, insérer son logo, et choisir la taille de la feuille à utiliser. Ce paramétrage est souvent plus complexe et difficile à implanter au départ comparativement à un logiciel de DAO. Ensuite, un deuxième paramétrage est requis en raison de la spécificité de chaque projet. Finalement, l'ingénieur doit effectuer une validation additionnelle pour les fonctions offertes par le logiciel. Cette opération complexifie le processus, depuis le démarrage jusqu'à la fin du projet. Ce phénomène n'est pas particulier à un domaine spécifique du génie électrique. Il l'est aussi pour l'industrie du moulage. Dans un article, J. Han, S. -H. Lee, et P. Nyamsure indiquent que, malgré l'automatisation de certaines fonctions métiers dans un logiciel, la conception électrique exige tout de même un grand nombre d'ingénieurs expérimentés. De plus, de par sa nature, le logiciel de CAO électrique est spécialisé et il n'est pas capable à lui seul de réaliser des projets multidisciplinaires. La réalisation des projets à l'aide de logiciel de CAO électrique est souvent jumelée avec d'autres logiciels pour couvrir une autre discipline. Par exemple, la réalisation des documents d'ingénierie électrique est souvent combinée avec de l'ingénierie mécanique. Pour faciliter les échanges entre les logiciels de CAO électriques et de CAO mécaniques, des fichiers d'échange STEP de la norme ISO 10303 et IGES de la norme AP202 peuvent être utilisés [49][50][51]. Par contre, ces fichiers se limitent à décrire les modèles mécaniques. Pour ces motifs, les limites de la CAO doivent être compensées par des traitements manuels. Ce fait peut obliger la création de bases de données parallèles sur mesure pour compenser ces lacunes, ce qui aura pour effet de donner des bases de données irrégulières [52]. En conséquence, ces logiciels ne sont alors plus en mesure d'offrir les avantages précédemment cités. Comment un logiciel qui repose sur une base de données modélisée selon sa conception peut-il produire des documents de valeur si des données étrangères y sont ajoutées ? Il s'agit d'une règle absolue : tout système est limité par sa conception initiale, et ceci, tant en informatique [53] qu'en commande de système [54].

1.6 Automatisation de la production des documents d'ingénierie

Idéalement, une organisation devrait utiliser un seul logiciel pour le développement de tous ses documents et ne le paramétrer qu'au départ. Chaque logiciel additionnel implique la duplication de données, l'augmentation de la vérification et entre en contradiction avec le principe de systèmes d'informations en collaboration [2].

Le recours à plusieurs logiciels est tributaire des avantages et inconvénients qu'ils procurent. Un logiciel de CAO permet de profiter de nombreux outils afin d'automatiser des processus, mais ces automatismes ne peuvent pas traiter tous les cas parce qu'ils sont limités par leur conception. Par exemple, les identifiants doivent être uniques et respecter une forme de nomenclature : c'est le repérage des appareils ou des équipements. Étant donné que les exemples sont nombreux et complexes à condenser dans le cadre de cet essai, l'auteur de cette étude n'en a sélectionné qu'un pour illustrer la difficulté, soit l'unicité des repères.

1.6.1 Exemple de cas : unicité des repérages

Les logiciels de CAO offrent *de facto* des automatismes pour gérer l'unicité des repères. Si le repère R27 d'un relais électromécanique¹¹ est utilisé dans le cadre d'un système électrique, il ne peut alors en exister qu'un seul. Ce repère peut être représenté plus d'une fois dans la mesure où ce relais est partiellement représenté dans un document à un autre à condition que sa bobine (BOB), son contact sec normalement fermé (NF), son contact sec normalement ouvert (NO), son contact inverseur¹² (INV) soient séparés. À la figure 1.5, dans sa partie de gauche, la bobine du R27 est représentée sur sa page un. En dessus de ce circuit, il y a des références-croisées. Deux NF et deux NO sont représentés. Dans ces références-croisées, le contact NF avec les bornes sept et huit indique qu'il est représenté à la page deux. Dans la partie à droite, la page deux illustre une deuxième fois le contact NF du relais R27. Cette duplication des informations est permise parce qu'elle représente le même élément électrique.

¹¹ R27 est un cas courant pour signifier un relais avec la lettre R et 27 pour signifier une fonction de sous tension selon la norme ANSI/IEEE Standard C37.2 *Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*.

¹²Un contact inverseur est parfois appelé contact repos travail (RT).

Dans les projets de grande envergure, le repère R27 peut exister plus d'une fois. En l'occurrence, l'utilisateur du logiciel doit donner une spécificité à ce repère afin que le logiciel de CAO le distingue d'un repère à un autre identique. Par exemple, le R27 du circuit A puis le R27 du circuit B.

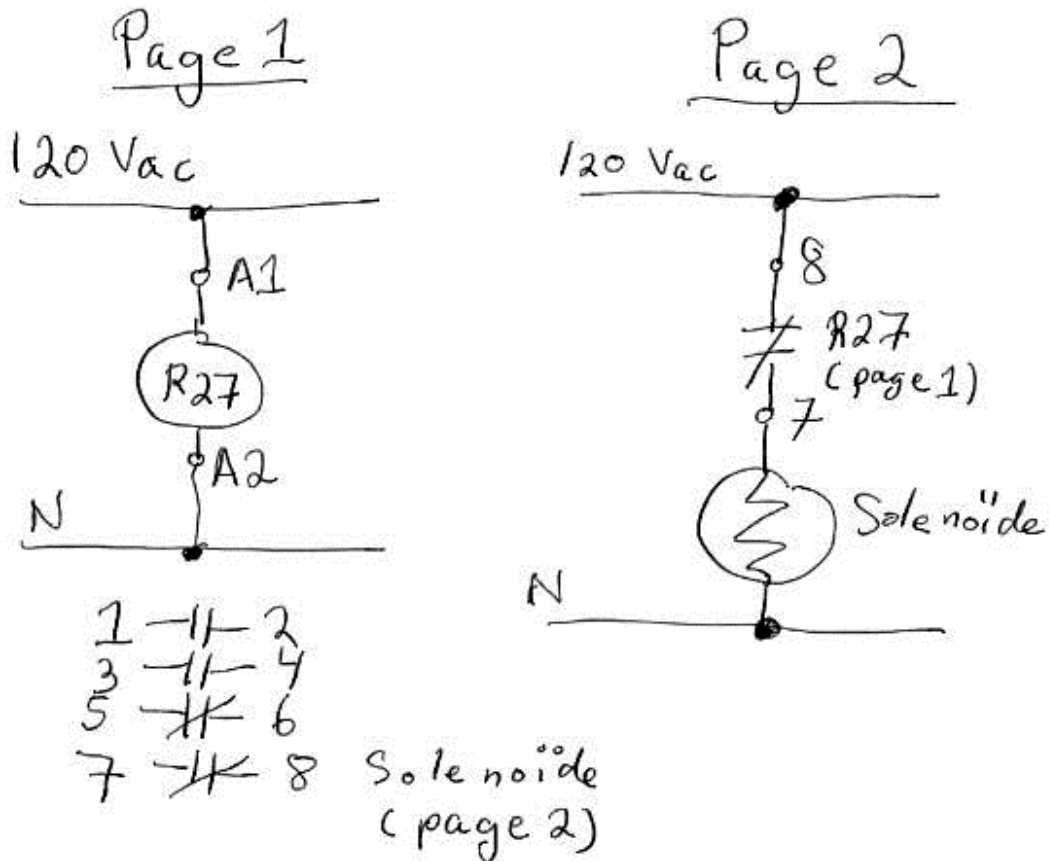


Figure 1.5 : Exemple d'un repère unique (R27) affiché à deux endroits à l'aide de symboles IEEE dessinés verticalement

1.6.2 Exemple de cas : unicité des repères dans un projet de réhabilitation

Un ingénieur électrique dispose d'une BDD en CAO. Il désire faire la réhabilitation d'un système qui comporte un relais R27. Cette réhabilitation commence par le démantèlement de l'ancien R27 et sera suivie par l'installation d'un nouveau R27. Bien que ces deux relais aient le même

repère, ils représentent deux équipements différents qui vont coexister à l'intérieur du projet de réhabilitation.

Le logiciel de CAO doit alors distinguer deux équipements aux repères identiques que l'utilisateur doit lui préciser. L'utilisateur peut renommer le repère R27-A pour l'ancien et R27-N pour le nouveau, mais ce renommage de repère vient probablement contrecarrer les règles de nomenclature existantes. Un contournement et une gestion d'exceptions deviennent nécessaires lors du remplacement. Cette manœuvre est pourtant éphémère puisqu'une fois le projet complété et les documents d'ingénierie remis en exploitation, le relais R27-N doit retrouver le repère initial R27.

Avec un logiciel de DAO, les exceptions n'existent pas puisque ce type de logiciel n'offre aucune fonction ni d'outils d'assurance de qualité. L'ingénieur peut concevoir en toute liberté, par exemple, deux schémas électriques distincts : l'un pour le démantèlement du R27 et un autre pour l'installation d'un autre R27. Malgré que les automatismes d'assurances qualité puissent nuire au travail de l'ingénieur, ces automatismes restent de bons outils dans la majorité des cas pour le travail de l'ingénieur. En effet, l'avènement des erreurs détectées par les automatismes devient des cas spéciaux à traiter par le jugement de l'ingénieur.

1.6.3 Portrait d'une réalité

Le travail d'ingénierie depuis les années 1950 [27][28]. Le processus d'ingénierie présenté à la section 1.3.1 a peu changé. Cependant, les logiciels en DAO et en CAO permettent d'automatiser plusieurs tâches afin de réduire la durée de réalisation des projets, et contribuent à faciliter la production de documents. En pratique, une fois la conception des schémas est réalisée, leur mise en plan ainsi que les activités de conception de séquences en aval peuvent être réalisées à l'aide d'un logiciel de DAO ou de CAO. Les ingénieurs électriques sont alors en mesure d'apporter des correctifs plus rapidement pour répondre aux nombreux besoins répertoriés par les différents domaines du génie, ainsi qu'aux changements de normes de construction et autres conditions. À l'intérieur d'un projet, la gestion du changement est facilitée par la génération automatique à l'aide d'une commande.

Malheureusement, en réalité, l'ingénieur électrique, son équipe et son organisation doivent composer avec une clientèle variée aux prises avec des situations diversifiées. Autrement dit, le processus d'ingénierie demeure le même, mais la composition des projets diffère et ne peut

pas être parfaitement automatisée. Il en résulte que la gestion de projets exige que les besoins énoncés soient clairement définis. La planification [17] et la présence de personnel expérimenté permettent de mieux gérer les imprévus en cours de projet. Ainsi, les itérations de documents seront minimisées. Le génie électrique en automatisation relève d'un génie éprouvé et structuré. Il évolue dans un contexte de projet modélisé en cascades et en étapes. Parallèlement, le logiciel de DAO est avantageux parce qu'il apporte de la fiabilité pour un chargé de projets qui doit composer avec des ressources limitées et de multiples contraintes. Son principal défaut est que les manœuvres sont manuelles et il faut recourir à des personnes qualifiées afin de pallier cet inconvénient. Il se révèle cependant un outil de choix pour le travail en collaboration et pour les mesures de précision qui ne demandent pas la modélisation par objets comme décrit précédemment au début de la section 1.5.

1.6.4 Choix de logiciel

D'un point de vue macroscopique, l'automatisation permet d'accroître la fiabilité et de réduire les délais de réalisation. Aussi, l'automatisation implique des investissements en recherche et du développement afin de maintenir la cadence. Dans le cas où les projets d'ingénierie ne peuvent pas être complètement automatisés, le choix d'un type de logiciel est plus difficile à établir *a priori*.

Le choix de logiciel nécessite une évaluation des besoins et des contraintes de l'entreprise. L'entreprise doit structurer les besoins par degré d'importance et élargir sa vision en fonction de ses ressources humaines, de ses capacités financières ou tout autre élément pertinent dans le processus de réalisation de l'ingénierie.

Normalement, le choix de logiciel est celui qui avantage l'entreprise. C'est cet avantage qui permet à l'entreprise d'être concurrentielle. Par exemple, l'adoption d'un logiciel de CAO spécialisé peut donner un avantage de différenciation par rapport à ses concurrents. Autre exemple : l'adoption d'un logiciel de DAO peut pallier les difficultés d'embauche de personnels qualifiés. Dans tous les cas, le choix de logiciel ne peut pas être pris à la légère puisque son acquisition représente des investissements financiers, opérationnels et matériels.

Chapitre 2

Revue de littérature

Le présent chapitre présente l'état de la littérature disponible sur les concepts de la CAO et de différentes études liées à la production des documents dans un contexte d'ingénierie. Par la suite, il porte sur un domaine plus spécifique dans l'industrie de la construction, soit le génie électrique.

Il existe de nombreux écrits sur l'utilisation de la CAO et du DAO liés au génie mécanique [55][56][57][58][59][60], mais moins en génie électrique. Cet essai s'en tient au génie électrique et écarte ceux qui ne font pas partie de l'industrie de la construction [61][62]. Par exemple, les logiciels de simulations de réseaux, de fabrication de composantes électroniques et de la programmation de contrôleurs ont été exclus.

Les sources de première main sont rares [63][47][64][64]. C'est pourquoi, la recension s'étend sur plusieurs années, en commençant par un article paru en 1982 [17].

2.1 Conception assistée par ordinateur des installations électriques

Un article [17] rédigé par Fred T. Dawson et Robert H. Philower, en janvier 1982, décrit les bénéfices de l'utilisation des logiciels de CAO dans les installations électriques. Ces auteurs avancent des réductions de 10 à 15 % des coûts d'ingénierie sur un budget d'ingénierie de trois millions pour un projet de cent millions. Ces valeurs sont tirées de projets de construction de centrale de production électrique. Dans des ouvrages plus récents, deux publications de la Régie de l'énergie du Québec présentent des estimations similaires quant aux pourcentages de coûts d'ingénierie par rapport à un projet. Le premier est pour le complexe la Romaine, composé de quatre centrales hydroélectriques [65] d'une valeur de 6,4 milliards (2007) et la centrale thermique de Kuujuaq [66] d'une valeur de cinquante millions (2012). Le budget consacré à l'ingénierie pour le premier cas est de 4 % alors que le second équivaut à 6 %.

Certains auteurs utilisent un autre modèle économique pour illustrer les projets, comme le CAPEX et l'OPEX qui englobent les coûts liés à l'exploitation du projet [67][68]. Or, pour donner un ordre de grandeur, les coûts des projets d'ingénierie par rapport à l'ensemble de l'œuvre sont de l'ordre de 10 à 15 % [69][70][71].

Depuis 1989, le métier d'ingénieur électrique n'a pas changé. C'est une occupation stable et établie [72]. La fabrication et l'installation des panneaux électriques ou des équipements par des fils et des câbles sont demeurées les mêmes. Le remplacement des relais électromécaniques par des relais programmables ou l'introduction de protocoles de communication pour remplacer les circuits dédiés ne change en rien la technique du génie électrique : une surintensité reste une surintensité, un court-circuit demeure un court-circuit. Plusieurs observations des auteurs sont toujours valables aujourd'hui ; par exemple, l'automatisation complète par un logiciel ne pourra jamais être atteinte [73].

2.1.1 Câblage et filerie

L'installation de câbles occasionne des coûts importants dans un projet en mode cascades : prix linéaire des conducteurs, passages des câbles, tests de conductivité, raccordement des brins et la mise à la terre [74]. En conséquence, la qualité des documents d'ingénierie est primordiale pour contrôler les dépenses de l'ensemble d'un projet. Il existe deux méthodes dans le câblage et la filerie. La première est la mise en plan du câblage. La seconde est la génération de liste point à point aussi nommée Du Pont en l'honneur de l'entreprise E.I. du Pont de Nemours et compagnie dans un article paru au début des années soixante [75][76][77][78][79][80].

L'article [17] décrit une technique pour entrer les données schématiques, les données de routage, les calibres des câbles ainsi que la disposition des équipements pour produire trois types d'informations : la filerie de point à point [81] ; l'installation et le passage des câbles ; le raccordement des câbles.

Selon les auteurs, si les schémas sont validés et contiennent toutes les informations, alors les autres types de documents sont aussi validés. Ils avancent même l'idée d'imprimer des étiquettes de câbles pour réduire les coûts de fabrication et d'installation.

Toujours selon les mêmes auteurs, la CAO permet d'éliminer les manœuvres manuelles pour la création des listes de câbles et de fileries. Ils affirment aussi, à cette époque, que tous les dessins de distribution seront éliminés et que la modélisation va tendre vers le graphisme en 3D à partir des documents en 2D [55]. Aujourd'hui, cette technologie est appelée modélisation des données du bâtiment (MIB) ou maquette numérique du bâtiment (MNB) [82][83][84].

2.2 Corroboration plus récente

En 2003, Jun Gao, Tihomir Sajko, Slavko Krajcar et Davor Skrllec [52] tirent les mêmes conclusions quant aux avantages de la CAO électrique pour la conception électrique des installations. Essentiellement, leur étude repose sur une base architecturale en 2D dessinée en AutoCAD. Un programme a d'abord été développé pour identifier les équipements électriques, et pour ensuite les analyser. L'algorithme cherche le système de point à point le plus court pour ensuite générer un rapport.

Autrement dit, la CAO permet l'optimisation de l'installation du pontage électrique. Leur programme fonctionne sur un plan de bâtiment et permet de tracer des chemins optimisés. Plusieurs autres écrits corroborent les avantages de la CAO dans les installations électriques et seront présentés dans les deux prochaines sections.

2.3 CAO pour la qualité

Dans un projet, la création d'une base de données normalisée permet la réduction des anomalies et l'élimination des informations répétitives [85][86]. Elle permet aussi de livrer des documents de qualité [46] avec une gestion des informations en provenance des différentes disciplines au cours d'un projet. Un projet multidisciplinaire qui réunit tous les acteurs est appelé ingénierie simultanée, distribuée, collaborative ou concurrente [87][88][89]. Les logiciels de CAO sont une collection de programmes qui permettent la création et la maintenance de bases de données, selon la modélisation offerte par l'éditeur du logiciel. Les ingénieurs utilisent ces logiciels parce que le volume de données à gérer augmente, et qu'ils doivent s'adresser à un grand nombre d'intervenants. Alors, un modèle numérique de l'installation qui représente le

modèle physique favorise la transmission de l'information à différents clients, en fonction de leurs besoins d'affaires. Par exemple, la production d'une liste d'achats pour le département de l'approvisionnement est différente d'une liste de matériel pour un gestionnaire.

L'article intitulé *Les systèmes d'information de l'ingénierie* [2], rédigé par Philippe Guillet, résume les fonctions recherchées dans un logiciel de CAO. Un système d'information de l'ingénierie est un logiciel qui consiste à (1) recevoir et valider les informations de l'ingénierie au cours d'un projet ; (2) modifier et compléter les informations de l'ingénierie, sécuriser la livraison des documents tels que construits (TQC) et (3) offrir une interface de l'information d'ingénierie avec les systèmes d'information. Un système d'information de l'ingénierie regroupe l'ensemble de l'information modélisée pour le projet. Finalement, l'auteur mentionne que les systèmes d'information en ingénierie permettent de simplifier, de consolider et de garantir l'intégrité de leurs interfaces.

L'utilisation d'un modèle numérique permet la réduction des erreurs [90][91] et la qualité de ce dernier aussi [92]. Autrement, les erreurs dans les documents d'ingénierie provoquent des pertes de performance dans un projet. Elles peuvent causer des pertes de temps et un gaspillage des ressources. Cependant, ce ne sont pas tous les types d'erreurs qui provoquent des retards et ces dernières peuvent apparaître sous plusieurs formes telles que les non-conformités, les erreurs typographiques les erreurs de conception et les erreurs de précision.

Les logiciels de CAO se sont perfectionnés depuis les années 1980 [93][94]. Ils permettent de répondre rapidement aux différents besoins professionnels, mais aussi d'assurer une qualité des données à l'intérieur des limites d'un domaine d'étude et en fonction des intervenants externes.

2.4 Principe de répétition, de réutilisation et de gestion des erreurs

La stratégie à adopter pour l'ingénierie consiste en un principe de réutilisation [95], de gestion des erreurs et de répétition [31]. C'est ce que Peter E.D. Love, Jingyang Zhou, Sing, Jane Mattews et David Edwards ont présenté dans un article paru en 2013, au sujet d'une installation électrique. Dans ce cas, ils donnent l'exemple de la protection de trois lignes de 138 kV de la

centrale géothermique Tongonan-1, construite en 1983, aux Philippines. Cette étude a démontré qu'il est possible d'obtenir des réductions de temps de réalisation de l'ingénierie, en identifiant les éléments répétitifs et communs des différentes parties de l'installation. Aussi, l'utilisation de la CAO et de la modélisation permettent la diminution des omissions et des erreurs qui entraînent des problèmes de productivité [90][91][96][97][98].

Enfin, il existe plusieurs études qui traitent de l'utilisation des logiciels de DAO et de CAO. À différents degrés, ces études décrivent les avantages de ces logiciels (réduction des erreurs, l'augmentation de la qualité, etc.) basés sur des exemples ou quelques cas. Malheureusement, aucune n'évalue l'impact du choix de l'utilisation d'un type de logiciel sur le temps de travail basé sur un échantillon de projets. L'absence d'études comparatives entre le DAO et la CAO entraîne des problèmes de planification pour les chargés de projets. Par exemple, trois lignes de 138 kV ont un principe de fonctionnement électrique semblable, mais leur partie mécanique est différente. Ces différences vont apporter une complexité à la partie électrique et vont exiger plus de temps de réalisation. Est-ce que le fait d'utiliser un logiciel de DAO ou de CAO aurait aidé ? Cette problématique sera étudiée au prochain chapitre.

Chapitre 3

Problématique

La problématique à laquelle font face les entreprises d'ingénierie est qu'elles doivent choisir entre deux types de logiciels pour réaliser leurs documents d'ingénierie, soit DAO ou CAO. En retour, les avantages et les inconvénients présentés par les éditeurs de ces logiciels ou par les différentes revues de littératures ne sont pas les seuls critères à considérer.

À moins qu'un logiciel ne soit imposé contractuellement, le responsable d'un projet doit choisir un logiciel l'un ou l'autre de ces deux types. La décision est en fonction : de l'environnement de travail ; des caractéristiques du projet à réaliser ; du personnel à sa disposition ; du niveau de maturité de l'entreprise selon l'Association des professionnels en gestion de projet (PMI) ; des tâches à réaliser ; du nombre de projets à réaliser dans une année ; de la durée des projets et du nombre de projets à réaliser simultanément. Sans compter que le responsable doit assumer les conséquences de son choix, car un changement de type de logiciel entraîne des impacts financiers. Un logiciel est donc considéré comme un investissement.

Après l'acquisition d'un logiciel, une période de rodage et d'apprentissage est nécessaire avant d'en tirer profit. En effet, un logiciel atteint son plein potentiel lorsqu'il est parfaitement adapté à son milieu et qu'il est maîtrisé par ses utilisateurs. Autrement, un logiciel augmente le temps de réalisation du projet si le développement de sa documentation et celui de son paramétrage sont nécessaires. Le fait de devoir s'approprier, apprivoiser et valider les résultats obtenus d'un logiciel par ses utilisateurs constitue une perte d'efficacité.

La revue de littérature révèle que la CAO offre des rendements élevés, car elle a l'avantage d'être spécialisée dans son domaine. Par contre, elle comporte des limites telles que présentées à la section 1.5 de cet essai. Le DAO offre la liberté de dessiner n'importe quoi, sans aucune contrainte, mais n'offre pas de fonctions métiers. Dans une situation où une organisation cherche la compétitivité et où les documents d'ingénierie sont importants à bien des égards, faut-il choisir la CAO ou le DAO ?

En outre, le développement d'un projet et des documents d'ingénierie connexes comporte une série d'étapes ordonnées. Toutefois, sa réalisation se révèle beaucoup plus complexe que son développement. De nombreux éléments peuvent perturber le bon déroulement d'un projet, d'ordre informatique ou non. La dynamique d'un projet se compose de cycles d'intensité variable, passant d'un état de priorité très élevé à une accalmie relative.

Ainsi, les informations présentées aux décideurs d'entreprises ou aux responsables de projets sont davantage axées sur les fonctionnalités offertes par les logiciels que sur leur contribution à un environnement organisationnel. De plus, l'importance globale d'un document d'ingénierie suit une courbe illustrée à la figure 3.2. Celle-ci est la somme d'un ensemble de sous-projets d'ingénierie, qu'il s'agisse des études, de la fabrication, de la construction ou de la mise en route. Elle est maximale lors de la conception de l'ingénierie de fabrication et de construction. À figure 3.1, la partie en haut de la flèche présente la courbe du travail et les relations entre les différentes phases détaillées d'un projet en fonction du temps. La figure 3.1 illustre un processus parallèle de l'approvisionnement pour la construction et si applicable, la fabrication.

L'ingénierie, qui comprend l'étude de base et de procédés ainsi que l'étude des détails, ne représente qu'environ 15 % de l'avancement du travail. Cette ingénierie est préalable aux deux plus grandes phases d'un projet qui sont la fabrication et la construction. Ces dernières représentent 75 % de l'avancement. La mise en route et la mise en service terminent le projet avec le dernier 10 %. Bien que le problème de choisir entre deux types de logiciels touche tous les participants d'un projet, il n'en reste pas moins que les plus concernées sont les équipes qui œuvrent dans l'ingénierie. Une mauvaise ingénierie occasionne une augmentation du temps de réalisation d'un projet pouvant même contribuer à son échec.

Pour comparer des projets réalisés avec un logiciel d'un type ou de l'autre, l'identification d'une variable commune et mesurable est privilégiée. Cette variable est choisie de façon à ce que la question d'étude puisse répondre à la problématique : le DAO est-il préférable à la CAO, plus précisément en génie électrique et dans quelles circonstances ?

Plusieurs éléments de comparaison semblent adéquats en surface, mais ne le sont pas en pratique. Tout d'abord, le coût n'est pas un élément de comparaison adéquat. Bien que les budgets doivent être respectés, et les taux horaires des individus sont très variables (par exemple, selon la région, le pays, la formation et l'ancienneté.). Le contenu du projet n'est pas

une variable à utiliser non plus parce qu'il existe un très grand nombre de type de travaux, avec différents degrés de difficulté. Par exemple, il est difficile de comparer à sa juste valeur la conception d'une centrale électrique thermique au Québec avec une autre située en Arabie saoudite.

Il reste alors à étudier la notion de temps. Elle prend tout son sens lorsqu'elle est multipliée par le nombre d'employés. En conséquence, pour mesurer le travail dans un projet d'ingénierie, l'unité heure-personne (h-p) est un choix valable. Selon l'Office québécois de la langue française, la définition d'heure-personne est :

« Unité de mesure correspondant au travail qui peut être accompli par une personne pendant une heure, par deux personnes pendant une demi-heure et ainsi de suite, et qui sert, dans le budget, à répartir les crédits affectés à la main-d'œuvre. » (L'Office québécois de la langue française, définition d'heure-personne¹³)

Il est aussi dit que :

« Pour calculer des heures-personnes, on multiplie l'unité de temps (qui peut aussi, dans d'autres unités, être l'année, le jour ou le mois, par exemple) par le nombre de personnes au travail pendant ce temps. » (L'Office québécois de la langue française, définition d'heures-personnes)

Cette unité de mesure est adéquate parce qu'elle se prête à n'importe quel projet. Les notions de temps, de travail et de personne sont incontournables. Ce sont aussi des informations disponibles au début d'un projet, par estimation, ou vers la fin, par les rapports de fin de projets.

L'analyse des résultats et les conclusions de cette étude permettent d'informer le décideur technique quant au choix entre le DAO et la CAO.

13

https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_relations_professionnelles/heurepersonne.html

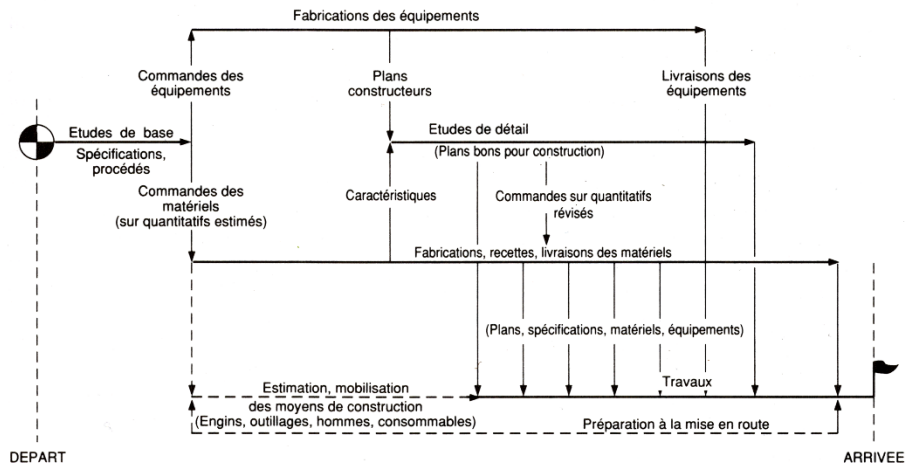


Fig. 4.3 Logique schématique « études, approvisionnements, travaux ».

Figure 3.1 : Processus de l'approvisionnement (Source : Henry Provost, 1994)

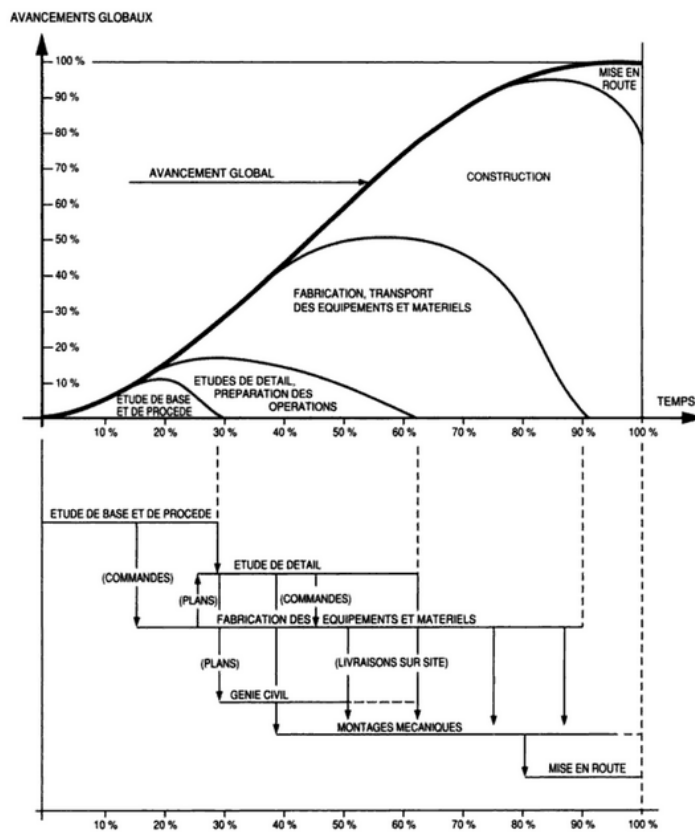


Figure 3.2 : Poids relatifs des opérations et logique schématique (Source : Henry Provost, 1994)

3.1 Question et hypothèse de recherche

La question de recherche se précise avec les deux variables suivantes : un logiciel de type CAO est-il plus performant comparativement au DAO pour l'ingénierie électrique en automatisation en réduisant le temps de travail calculé en heure-personne?

La variable indépendante, c'est-à-dire celle qui a varié durant l'expérimentation, est le type de logiciel. Les types CAO et DAO ont été utilisés.

La variable mesurée est le temps de travail, calculé en heures-personnes par projet. L'étude vérifie si un logiciel de type CAO permet de réduire le temps de travail des équipes de projets. La comparaison de différents projets effectués avec les deux types de logiciels présentés aux sections 1.4 et 1.5 permet de vérifier l'hypothèse selon laquelle un logiciel de type CAO réduit le temps de travail calculé en heures-personnes, comparativement au type DAO, en ingénierie électrique d'automatisation.

Il s'agit d'une recherche quantitative afin d'établir la relation entre le choix de logiciel (la variable indépendante) et les h-p nécessaires pour la réalisation d'un projet en génie électrique (la variable dépendante). La méthodologie ainsi que la stratégie utilisée pour la collecte des données sont expliquées au prochain chapitre.

Chapitre 4

Méthodologie

Les chapitres précédents ont présenté le contexte ainsi que la problématique à laquelle l'ingénierie électrique est confrontée, à savoir déterminer si la CAO permet de gagner du temps par rapport au DAO. Pour y répondre, il a fallu collecter des données provenant des entreprises.

Ce chapitre présente le raisonnement inductif pour répondre à la question de recherche à partir de situations concrètes. D'abord, la méthodologie de recherche consiste à effectuer un recensement chez les entreprises. Ensuite, les données sont utilisées pour confirmer ou d'infirmer l'hypothèse de travail si l'utilisation d'un logiciel de CAO est plus performante qu'au logiciel de DAO chez les entreprises par rapport au temps de réalisation en h-p. La collaboration des entreprises a été importante en raison de la grande variété des projets.

4.1 Enquête

L'auteur de cet essai connaît le sujet de l'étude et ce fait lui donne la capacité d'analyser les résultats qui ne sont pas nécessairement faciles à identifier. Aussi, cela lui permet de réaliser un plan d'observation simplifié afin de lui permettre de valider son hypothèse. Les étapes de l'enquête sont les suivantes : élaboration d'un plan d'observation, accéder à la population, identifier puis déterminer le nombre suffisant de réponses et finalement, traiter les résultats.

Il était nécessaire d'obtenir un grand nombre de projets dans diverses entreprises. Ce nombre n'est pas déterminé au départ, mais parce que l'auteur de cet essai connaît le sujet de l'étude, il est capable de sélectionner ses participants afin de favoriser la représentativité de la population au détriment de la taille de l'échantillon. Les fruits de cette recherche reposent sur des entrevues avec les personnes et les entreprises qui utilisent des logiciels d'ingénierie électrique. Pour alléger le texte, chaque personne interrogée est dénommée expert, sans égard au genre.

4.1.1 Élaboration du plan d'observation (d'analyse de contenu quantitative)

L'importance du plan d'observation est directement reliée à la quantité. Le plan doit dénombrer et identifier les éléments utiles afin de les comparer. Les éléments ne se limitent pas aux variables de premier ordre d'un projet parce que le contenu doit aussi être analysé. Par exemple, certaines variables sont obtenues après un calcul. Les variables sont expliquées dans une section subséquente : 4.3 Démarche, identification et analyse du contenu. L'analyse directe de contenu ne peut donc pas s'appliquer. En effet, la collecte et l'identification des données d'un projet doivent être appuyées par une personne compétente en la matière. Aussi, un système électrique agit comme un déterminant parce qu'il est le système le plus significatif et parce qu'il apparaît le plus souvent dans les projets électriques. Plusieurs sous-étapes doivent être accomplies :

1. Lecture des documents ;
2. Catégorisation ;
3. Réduction unitaire ;
4. Comptabilisation des résultats ;
5. Calcul des h-p moyennes par système ;
6. Calcul des h-p moyennes et médianes par catégorisation ;
7. Conservation et protection des questionnaires.

4.1.2 Instrument d'observation

Un questionnaire structuré a été élaboré en soutien à cette étude. Les connaissances préalables du chercheur ont permis d'identifier les types de données nécessaires pour y parvenir. Les questions ouvertes ont été évacuées afin de permettre d'obtenir les réponses dans le domaine du génie électrique en automatisation. Ce questionnaire se retrouve en annexe C.

4.1.3 Recueil de l'information

Le registre des projets ainsi que les documents ont été consultés sur le terrain, en présence du chercheur et d'un responsable désigné par chaque compagnie. Les projets étant nombreux, la présence du chercheur est nécessaire pour s'assurer du bon fonctionnement de la collecte des données et pour clarifier toute ambiguïté. Ceci assure la bonne compréhension des

questions et du bon fonctionnement des filtres. Aussi, la complexité des projets fournit un grand éventail de réponses et exige des efforts afin de repérer la réponse adéquate dans toute la documentation. Au besoin, des questions du chercheur complètent le recueil d'information.

4.2 Population cible

Dans cette étude, la population à l'étude n'est pas composée de personnes. Ce sont les projets d'ingénierie électrique en provenance des entreprises accessibles qui la constituent.

4.2.1 Échantillonnage des entreprises

Les entreprises participantes ont d'abord été sélectionnées par le chercheur afin de retrouver l'ensemble des éléments qui constitue le sujet de recherche. Chaque entreprise devait aussi répondre à un certain nombre de critères afin que les données recueillies soient valides et représentatives. Ces critères sont :

1. Être établi depuis au moins cinq ans au Québec ;
2. Avoir une présence justifiée d'au moins un ingénieur électrique ;
3. Ne pas œuvrer dans l'ingénierie électrique des véhicules moteurs.

Pour le troisième critère, les entreprises doivent faire partie de l'industrie de l'architecture et de l'ingénierie et la construction des bâtiments (AEC). Bien que les autres industries d'ingénierie électrique aient des similitudes avec les AEC, ces autres industries doivent faire l'objet d'une autre étude parce que cette population est différente des AEC. Ces autres industriels peuvent être les fabricants d'avions, de voitures, de tondeuses, de camion nacelles et d'ambulance. En effet, la population sondée doit appartenir à un même groupe. Aussi, il va de soi que les entreprises participantes devaient être ouvertes à partager les données de leurs projets.

4.2.2 Échantillonnages des projets

Tout d'abord, les projets des entreprises devaient être de nature électrique. Ils devaient être complétés à l'intérieur des huit dernières années. Les documents d'ingénierie électrique d'automatisation usuels sont les suivants (liste non exhaustive) :

- Détails : encombrement, assemblage, perçage ;

- Schémas : unifilaire, architecture réseau / protocole, schéma logique, filerie / branchement / raccordement / connexion, *grafcet* ;
- Listes : de matériel, d'achats, de bordereau, de câblage ;
- Documents : devis, rapports.

La liste des documents à réaliser dépend du mode de réalisation du projet électrique présenté dans la section 1.1.1 : (1) mode traditionnel, (2) mode de gérance, (3) mode ingénierie approvisionnement, gestion de construction (IAGC), (4) mode clefs en main, (5) mode produit en main et (6) partenariat public-privé (PPP).

4.2.3 Variables des projets

Les projets d'ingénierie sont difficiles à étudier en raison de leurs nombreux paramètres. À lui seul, le mode de réalisation d'un projet présenté à la section 1.1.1 peut modifier de nombreux paramètres pour la détermination d'un rendement. Par exemple, la complexité d'un projet est gérée différemment dans un contexte de PPP par rapport à un clefs en main. C'est pourquoi, les valeurs des variables doivent être préparées en fonction de l'étude pour en faire l'analyse. Les catégories retenues pour l'étude sont énumérées dans cette section. Les explications et les détails de chacune de ces variables sont immédiatement présentés après celle-ci. :

1. Complexité du projet : représente le niveau de sophistication du projet en fonction de la commande ;
2. Nombre de systèmes dans le projet : le nombre de systèmes à l'intérieur d'un projet pour représenter la taille du projet ;
3. Nombre des h-p du projet : le nombre des h-p consacrées à la partie électrique ;
4. Logiciel utilisé : le type de logiciel utilisé permet de déterminer s'il est une CAO, un DAO ou une combinaison équilibrée des deux¹⁴.

Plusieurs variables n'ont pas été retenues dans l'étude parce qu'elles ne sont pas pertinentes pour répondre à la question de recherche ou parce qu'elles n'apportent pas de connaissances facilement interprétables dans l'analyse. La liste suivante présente ces variables. Chacune des variables est suivie d'une courte justification.

¹⁴ L'expert ne peut pas départager entre le DAO et la CAO parce que leurs pourcentages d'utilisation sont équivalents, semblables ou égaux.

1. Nature et descriptions des travaux : des projets pour une nouvelle construction, des réaménagements, des mises à niveau, des démantèlements ou des démolitions.
2. Progression et état du projet : les projets peuvent être complétés, en évolution ou en offre de service.
3. L'équipe : les employés ayant participé au projet avec leur ancienneté, leur formation, leurs habiletés avec les logiciels et leur pourcentage d'utilisation du DAO/CAO dans le cadre d'un projet. Bien que le niveau d'expérience d'un utilisateur puisse influencer la vitesse de réalisation des documents d'ingénierie, l'étude n'étudie pas la performance individuelle d'un logiciel vis-à-vis un document, mais de la performance d'un projet. Par exemple, un utilisateur très habile avec un logiciel peut du même coup gaspiller son temps à dessiner des plans inutilement. Un exemple de scénario est présenté à la section 4.2.3.1.

Au sens de la Loi des ingénieurs du Québec, la nature des travaux constitue, par exemple : les travaux électriques, mécaniques, hydrauliques, aéronautiques, électroniques, thermiques, nucléaires, métallurgiques, géologiques ou miniers ainsi que ceux destinés à l'utilisation des procédés de chimie ou de physique appliquée, les ouvrages ou équipements industriels impliquant la sécurité du public ou des employés. La description des travaux permet de mesurer l'ampleur des activités à réaliser : travaux de construction, de démolition, de démontage, de réaménagement, réhabilitation, de restauration, de rénovation, de réfection. L'ampleur des travaux est souvent influencée par des facteurs comme : l'envergure des travaux; la complexité des ouvrages ; le nombre de disciplines et de métiers impliqués ; l'environnement et la situation géographique ; l'impact d'un défaut de construction ou de fabrication sur la pérennité de l'ouvrage sur l'environnement ainsi que sur la vie, la santé et la propriété de toute personne ; l'historique de qualité des travaux ; l'expérience et la capacité d'exécution de l'entrepreneur [99]. Il a été décidé de ne pas considérer la nature et la description des travaux parce que les responsabilités sont les mêmes vis-à-vis la profession, le client et l'encadrement légal du génie. Aussi, les lignes directrices concernant les documents d'ingénierie sont les mêmes.

4.2.3.1 Exemple d'une nouvelle construction et d'une réhabilitation

Dans le cas d'un projet de remplacement d'équipement, par exemple, le remplacement d'une commande à logique à relais électromécanique par un automate, puisque la conception de

départ est déjà réalisée, la nouvelle ingénierie se limite à deux défis : (1) concentrer les efforts sur les changements, (2) discerner la compatibilité entre les nouveaux équipements et ceux existants. La rétro-ingénierie représente alors la principale difficulté.

Dans le cas d'une nouvelle construction, les efforts de conception de haut niveau ainsi que les études initiales sont plus exigeants, tant pour l'effort que pour l'aspect financier. En comparaison avec un réaménagement, il y a peu de rétro-ingénierie. Le choix d'équipement étant de la même génération parce qu'ils normalement sont tous neufs, il y a peu de risques d'incompatibilité entre les divers systèmes.

L'effort consacré à la conception et à la production des documents varie d'un projet à l'autre. Par contre, l'ingénierie met en œuvre le même processus, de la période d'analyse jusqu'à la vérification préopérationnelle (VPO), les essais à vide, les approbations et la mise en service (MES). Pour les projets très complexes comme la construction de poste de transformation électrique ou le raccordement d'une centrale électrique à un réseau électrique, le processus est plus grand avec l'ajout des étapes de mise en route commerciale et de mise sous tension initiale. C'est pourquoi la nature du projet n'est pas prise en compte.

La recherche s'intéresse aux projets complétés : les projets en progression ou non complétés ne possèdent pas un nombre d'h-p fixe, donc ces projets ont été rejetés du processus d'échantillonnage.

En choisissant des projets complétés, le chercheur tient pour acquis qu'une équipe possède toutes les qualifications nécessaires à la réalisation d'un projet, que ce projet s'appuie sur le DAO ou sur la CAO. Un projet complété signifie que cette équipe ainsi que l'organisation possèdent une combinaison adéquate pour la conduite et la gestion de projet dans leur spécialité [100][101]. De plus, cette étude ne considère pas le facteur humain pour répondre à la question de recherche, car cela impliquerait la collecte de nombreuses variables sur trois axes telles que : la formation, l'expérience et sa mobilisation personnelle.

- Axes de la formation en lien avec le DAO/CAO:
 - Les compétences acquises lors d'une formation de base offerte dans les institutions scolaires, collégiale et universitaire ;
 - Les compétences acquises lors qu'une formation à l'adoption ou à l'achat du logiciel de DAO/CAO ;

- Les compétences acquises en formation continue selon le nombre des séances et de leurs fréquences avec le logiciel de DAO/CAO;
- Axe de l'expérience en lien avec le DAO/CAO:
 - L'expérience en génie électrique : capacité de conception, capacité de vérification, capacité en dessin ;
 - L'expérience en informatique : probablement sous-estimés, les logiciels en DAO et en CAO exigent une compréhension du comportement du logiciel afin de le paramétrer soit au niveau du programme lui-même ou avec les nombreux systèmes qui en dépendent. Ces logiciels sont spécialisés à un point tel qu'un département de service informatique dans l'entreprise ne peut pas combler toutes les demandes. Par exemple, le logiciel peut interface avec un serveur d'impression tel qu'un traceur ou imprimante en 3D ;
 - Expérience en programmation : Le niveau d'expérience avec la programmation PLC, SCADA, VBA et tout autre langage de programmation utilisée dans l'industrie. Aussi, l'utilisateur doit être capable intégrer des modules d'extensions, réaliser des projets des développements informatiques dans le logiciel en lien avec les exigences du génie électrique ;
- Axe de la mobilisation personnelle en lien avec le DAO/CAO:
 - Les préférences personnelles ou à l'intérieur de l'équipe de travail entre le DAO et la CA ;
 - État physique et psychique : l'âge, la présence d'un handicap physique, manque d'énergie, surcharge de travail, problème de concentration ;
 - Personnelle et familiale : conflit d'intérêts, absence liée à une personne à sa charge, motivation et démotivation ;
 - L'équipe de travail : l'organisation du travail, l'efficacité de l'échange d'information entre les disciplines, le nombre d'employés qui la composent.

Le facteur humain n'a pas été ignoré, mais plutôt évacué de la question de recherche. Somme toute, l'étude ne porte pas sur les habiletés des employés en matière de DAO/CAO à l'égard de la performance d'un projet. L'étude porte plutôt sur les performances des entreprises qui utilisent des logiciels de DAO ou de CAO plutôt que ses interactions de logiciel avec l'utilisateur.

En effet, la mesure de performance de l'utilisation d'un logiciel de DAO/CAO sur le plan du facteur humain ne donne pas une vue macroscopique au niveau de l'entreprise. D'ailleurs, quel est l'intérêt d'avoir un employé capable de générer et d'imprimer un très grand nombre de documents d'ingénierie sans erreurs à grande vitesse si, au final, ces documents ne sont pas utilisés, faute de qualité? La qualité citée en exemple est définie selon le logiciel et de sa programmation. Cette qualité n'est pas celle qu'exige l'entreprise. Le plan d'observation ne comporte donc aucun élément sur les personnes.

4.3 Démarche, identification et analyse du contenu

Il est à noter que la collecte des données a représenté la principale difficulté dans cette étude. En effet, trouver des entreprises qui répondent aux critères présentés dans la section 4.2 et qui acceptent de participer à l'étude n'est pas une mince tâche. Ensuite, le dépouillement des données et de déterminer l'exactitude des données secondaires. Par définition, les données sont des données collectées, analysées et traitées par d'autres. Afin de valider l'exactitude de ces données, le chercheur et le sondé vont établir un dialogue en conséquence. La méthode d'analyse choisie par le chercheur est objective et presque statique et comporte des catégories prédéterminées.

4.3.1 Détermination de la complexité d'un projet

La complexité d'un projet soumis par l'entreprise est relative à son contenu et au travail accompli par le responsable du projet, accompagné du chercheur. Sa variable est quantitative et ordinale. Ensuite, le barème est expliqué pour les quatre niveaux de complexité : très simple, simple, moyen et complexe.

Dans cette recherche, chaque projet est catégorisé en quatre niveaux :

1. Très simple : absence de conception ou modification à impact limité ;
2. Simple : commande locale, composantes simples, présence d'une conception ou système simple (ex. : départ moteur avec relais électromécaniques seulement) ;
3. Moyen : commande locale et/ou à distance, composantes électroniques (ex. : variateur de vitesse), système avec fonctions diverses, conception avec plusieurs paramètres ;

4. Complexe : conception avec un grand nombre de paramètres à considérer, composante électronique et un système d'acquisition et de contrôle de données (SCADA), un système de sécurité intelligent, un système et un environnement complexes.

L'augmentation de la complexité implique de plus grands efforts. La corrélation existe entre cette mesure et les h-p nécessaires pour compléter un projet. Les nombreux imprévus rencontrés en cours de projets sont normaux et se traduisent en h-p. Il n'existe pas des projets qui se déroulent parfaitement. Lorsque l'ampleur des imprévus est trop grande, ces projets pourraient ne s'être jamais réalisés. Conséquemment, ces projets avec trop d'imprévus, parce qu'ils ne sont pas terminés, ne seront pas comptabilisés dans l'étude. L'origine et les causes de ces difficultés ne sont pas utiles pour répondre à la question de recherche. Ainsi, même un changement de complexité en cours de projet, causé par l'entreprise ou par son client, sera converti en h-p.

4.3.2 Détermination du nombre de systèmes

Le nombre de systèmes à l'intérieur d'un projet est une mesure de la grandeur du projet : plus le projet comporte de systèmes à concevoir, plus le projet est grand. Est-ce que la grandeur du projet est proportionnelle, logarithmique ou suit une équation polynomiale du second ordre au nombre de systèmes à l'intérieur? Impossible de s'avancer. Par contre, il faut reconnaître que c'est une fonction positive, c'est-à-dire que si le nombre de systèmes augmente, alors la grandeur augmente. La grandeur du projet n'est pas liée à la complexité de ce dernier. Le nombre de systèmes a pour objectifs d'identifier les systèmes répétitifs et distinctifs à l'intérieur d'un projet. Le tableau 1 illustre des exemples de projets ainsi que le nombre de systèmes à l'intérieur. Ce nombre est déterminé par le professionnel interrogé. Le nombre de systèmes est utilisé pour calculer les h-p en unités réduites (section 4.1.1)

La Régie du bâtiment du Québec définit une installation électrique comme l'infrastructure qui sert à acheminer le courant d'un point de la distribution vers un appareillage. Au sens de cette recherche, l'étude définit un système électrique comme un ensemble des composantes électrique servant à effectuer un travail. La liste des composantes peut être celle décrite à la section 1.3.2.

Le nombre de systèmes électriques dans un projet peut correspondre au nombre de systèmes tel que défini dans la section 1.3.2 ou tout simplement correspondre au nombre d'appareillages

dans le projet. Le nombre de systèmes électriques doit être un nombre entier positif. Ce nombre est évalué par un expert, accompagné du chercheur. Au sens de la définition, ce nombre peut être égal à zéro dans l'éventualité où aucun appareillage n'est identifié.

Si l'identification du nombre de systèmes est difficile malgré la présence d'un expert et des définitions, alors celui-ci est écarté de l'étude.

Tableau 1 : Exemples de détermination du nombre de systèmes dans un projet

Numéro d'exemple	Description du projet	Description des systèmes à l'intérieur	Nombre système
1	Installation de quatre convoyeurs dans une usine	<ol style="list-style-type: none"> 1. Convoyeur n° 1 2. Convoyeur n° 2 3. Convoyeur n° 3 4. Convoyeur n° 4 	4
2	Remplacement de la partie hydraulique et électrique du régulateur de vitesse d'une centrale électrique pour deux générateurs	<ol style="list-style-type: none"> 1. Système électrique du générateur n° 1 2. Système de pompe principale de la partie hydraulique du générateur n° 1 3. Système de pompe de maintien de la partie hydraulique du générateur n° 1 4. Système électrique du générateur n° 2 5. Système de pompe principale de la partie hydraulique du générateur n° 2 6. Système de pompe de maintien de la partie hydraulique du générateur n° 2 	6
3	Conception d'un éclairage extérieur d'un grand carrefour giratoire	<ol style="list-style-type: none"> 1. Système d'éclairage des voies de la circulation 2. Système d'éclairage pour piétons et cyclistes 	2

4.3.3 Détermination du nombre des h-p

Le nombre des h-p dans le projet consacré au génie électrique doit être basé sur les registres officiels. Bien que la question soit fermée en ce qui a trait au nombre des h-p, ce n'est pas une

information qui possède la même définition d'une entreprise à une autre. De plus, la réponse pourrait être obtenue par calculs. Dans ce cas, la donnée provient d'une source secondaire. Une reformulation de la question peut être nécessaire pour s'assurer de l'exactitude de la donnée. Dans l'éventualité où le nombre doit être déterminé, il est évalué par un expert accompagné du chercheur. Cette partie est cruciale. Les données peuvent être imprégnées d'informations qui nécessitent une validation à la source. Il faut retenir les informations pertinentes pour l'étude avant de procéder à l'analyse. Pour illustrer son importance, deux exemples de cas pour lesquels l'expert et le chercheur ont dû être attentifs :

- Le nombre des h-p lié à un projet de génie électrique peut comprendre une partie administrative. Bien que la gestion des documents d'ingénierie soit pertinente, la gestion de la facturation ne l'est pas. On peut recourir à un tableau de correspondance typique pour estimer l'effort réel (disponibles en annexe A1) ;
- Le nombre des h-p est anormalement trop bas parce que la participation importante d'un partenaire externe n'a pas été prise en considération. Si les données n'étaient pas complètes pour en faire la somme, alors ce projet a été écarté.

4.3.4 Identification des logiciels d'ingénierie

Cette recherche s'intéresse aux logiciels utilisés dans une discipline spécifique en ingénierie. Pour un projet donné, les documents d'ingénierie électrique peuvent avoir été réalisés avec un logiciel de DAO comme AutoCAD, avec un logiciel spécialisé de CAO électrique ou une combinaison équilibrée des deux. Afin d'éviter de caractériser longuement la population cible à l'étude, la validité d'un logiciel dépend de deux critères :

1. La fonction du logiciel ;
2. L'utilisation du logiciel.

Dans un premier temps, les logiciels en CAO susceptibles de remplir les fonctions exigées en entreprises sont identifiés dans la liste non exhaustive suivante :

1. See Electrical, de la compagnie IGE-XAO ;
2. E-Plan Electric P8, de la compagnie EPlan ;
3. AutoCAD Electrical, de la compagnie AutoDESK ;
4. Catia, de la compagnie Dassault Systèmes ;
5. Solidworks Electrical, de la compagnie Dassault Systèmes ;

6. QElectroTech, de la compagnie Soliton Controles Industriais ;
7. E3-series, de la compagnie Zuken.

Et pour les logiciels de DAO (liste non exhaustive) :

1. AutoCAD, de la compagnie AutoDESK ;
2. Visio, de la compagnie Microsoft ;
3. Drafsight, de la compagnie Dassault Systèmes ;
4. ProfiCAD, de la compagnie ProfiCAD ;
5. Electra-E7 de la compagnie Radica Software ;
6. Cad Pro Platinum, de la compagnie DSI Publishing.

L'étude ne vise pas les logiciels ni les disciplines qui se limitent à une schématisation unifilaire tels que :

1. DOC, de la compagnie ABB ;
2. ETAP, de la compagnie ETAP ;
3. Cyme, de la compagnie Eaton.

L'étude ne vise pas non plus les logiciels ni les disciplines de génie électrique partenaires de l'automatisation tels que :

1. L'appareillage électrique qui se préoccupe des encombrements des équipements électriques dans un bâtiment ;
2. Des simulateurs qui font l'étude des comportements d'un réseau ou opèrent dans un univers virtuel ;
3. Les chercheurs qui sont dans le milieu éducatif et en recherche et développement ;
4. Les logiciels d'aide à l'achat de matériel provenant des distributeurs tels qu'ElecNet, de Lumens ;
5. Les logiciels maison comme ceux utilisés pour réaliser des estimations de longueur de câbles.

Dans un deuxième temps, les documents d'ingénierie font intervenir plusieurs personnes de différentes disciplines à différents degrés. Bien que la contribution individuelle ne soit pas toujours clairement délimitée, l'étude a tenté de cibler la population responsable des documents d'ingénierie de la discipline tels les dessinateurs, les techniciens, les technologues,

les chargés de projet, les ingénieurs. À titre d'exemple, le technicien en tuyauterie ou le téléphoniste (ou la téléphoniste) dans la compagnie n'ont pas été considérés.

4.3.5 Détermination du logiciel utilisé

Dans cette étude, l'identification du type de logiciel utilisé a été un exercice simple. Par contre, la connaissance *a posteriori* tend à démontrer l'utilisation des deux types de logiciels parce que l'un complète l'autre. À cette étape d'évaluation, la difficulté a été de déterminer la majorité acceptable pour affirmer qu'un projet a été réalisé en DAO, en CAO ou avec une combinaison équilibrée des deux. La base du raisonnement est de dégager la tendance centrale de l'utilisation du logiciel à l'intérieur d'un projet. Les calculs statistiques des efforts en h-p pour chaque type de document ne sont pas des tâches réalistes pour cette étude. Heureusement, parmi les documents produits dans le cadre d'un projet, il est possible d'identifier le mode de l'ensemble des documents. Le mode statistique représente le logiciel le plus fréquemment utilisé par type de document. Par exemple, si l'ensemble est réalisé à l'aide d'un logiciel de CAO, à l'exception d'un plan de perçage, alors il est identifié comme un projet réalisé en CAO. Si la tendance est bimodale, alors le projet est reconnu comme étant réalisé en DAO et en CAO. Conséquemment, les projets identifiés avec des distributions bimodales ont été exclus de l'analyse puisque la recherche veut établir la corrélation entre les deux types. Aussi, les documents d'ingénierie qui n'ont pas d'impact pour la détermination DAO ou CAO sont exclus de ce raisonnement tel que les rapports d'inspection, d'essai, ou de vérification préopérationnelle. Ces documents sont communs à l'ensemble des projets et ils sont probablement réalisés par des chiffriers ou des logiciels de traitements de textes. De plus, selon la réglementation, ils ne sont pas exclusifs à la profession d'ingénieur et peuvent être signés par un technologue.

4.3.6 Mesures d'exception

Enfin, les variables ainsi que leurs valeurs doivent être mesurables. Leurs échelles sont différentes d'un projet à un autre. Dans l'éventualité où l'identification d'une information est difficile, cette dernière est appuyée par une justification ou rejetée.

4.4 Analyse des résultats

Pour la méthodologie, l'analyse des résultats étant réalisés par analyse de contenu, trois éléments :

1. L'utilisation d'une pondération par unité réduite ;
2. La discrétisation ordinale des niveaux de complexité;
3. L'abstraction des documents d'ingénierie.

4.4.1 Pondération par unité réduite

Une unité réduite est une unité sans dimension qui peut mesurer n'importe quelle grandeur pourvu qu'elle soit définie avant son usage. Son utilité donne un pouvoir de comparaison aux données numériques différentes autrefois impossible à comparer. L'utilisation des unités réduites est couramment utilisée en astronomie et en électricité. En électrotechnique par exemple, l'unité réduite pour dimensionner un système électrique est le système unitaire et il est exprimé en p.u. pour *power unit* ou en pourcentage (%).

Dans le cadre de cette recherche, il est possible d'appliquer une unité réduite aux systèmes électriques à l'intérieur d'un projet d'ingénierie électrique. Si, un système électrique de base est composé d'une source de tension, d'une commande, d'une protection et d'une charge, alors il est possible de l'utiliser comme référence à un calcul d'unité réduite. Autrement dit, il est possible de normaliser un projet d'ingénierie électrique, de le séparer en un nombre de systèmes électriques, puis de le réduire. Un système électrique peut être représenté par la figure 4.1.

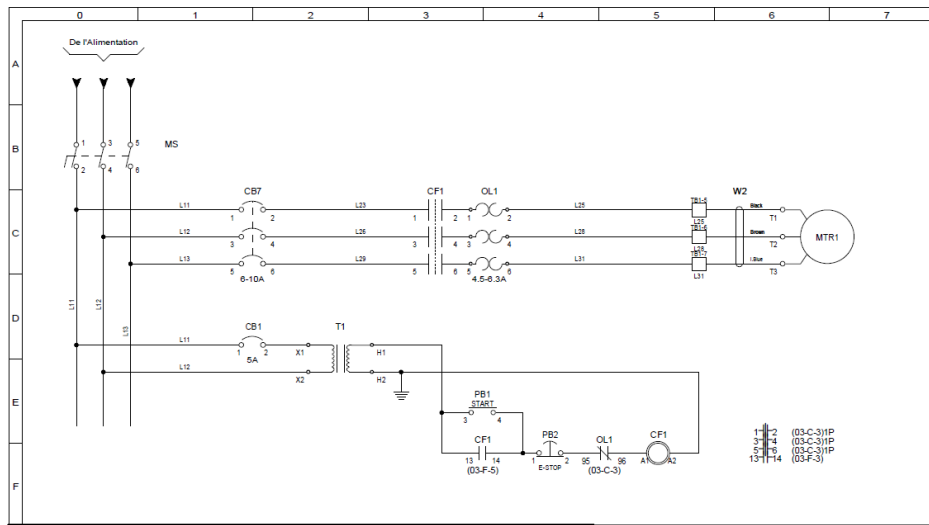


Figure 4.1 : Système électrique de référence de base

S'il faut analyser des données des données numériques de projets différents provenant d'un échantillon, alors les réduire pour pouvoir les comparer. L'utilisation de cette technique se justifie par le fait que les projets ne sont pas homogènes. Le calcul d'un projet en unité réduite se réalise après la détermination du nombre de systèmes dans un projet par un expert.

Premier exemple :

Pour l'installation de quatre moteurs, les heures d'ingénierie électrique se répartissent comme suit : premier système : 1000 h-p ; deuxième système : 500 h-p ; troisième système : 200 h-p ; quatrième système : 200 h-p.

Le nombre total pour le projet est $1000 + 500 + 200 + 200 = 1900$. L'unité réduite pour le projet est $\frac{1900h-p}{4 \text{ systèmes}} = 475 \frac{h-p}{\text{système}}$.

Deuxième exemple :

Les heures requises d'ingénierie pour le remplacement, la fabrication et l'installation de deux systèmes de régulateur de vitesse sont 20 000 h-p. Le nombre de systèmes identifié est six.

L'unité réduite pour le projet est $\frac{20\,000 \text{ h-p}}{6 \text{ systèmes}} = 3333 \frac{h-p}{\text{système}}$.

Troisième exemple :

Les heures d'ingénierie électrique consacrées aux plans et devis pour l'éclairage d'un grand carrefour giratoire sont de 550 heures. Le projet est divisé en deux systèmes. L'unité réduite pour le projet est $\frac{550h-p}{2 \text{ systèmes}} = 275 \frac{h-p}{\text{système}}$.

4.4.2 Discrétisation ordinale des niveaux de complexité

Il existe plusieurs types de moyennes pour la résolution de problème : la moyenne arithmétique, pondérée, harmonique, tronquée ou géométrique. Le choix de type de moyenne dépend des valeurs de l'observation et du problème à résoudre.

Sommairement, à la première observation, la moyenne pondérée est choisie pour les trois raisons suivantes :

1. Le poids est différent, c'est-à-dire que le nombre de systèmes par projet n'est pas la même d'un projet à un autre ;
2. La réduction unitaire revient à la moyenne des h-p/système, hp/sys , pour chaque projet ;
3. La comparaison du DAO et la CAO revient à la moyenne de l'ensemble des hp/sys .

Alors, l'équation de la moyenne pondérée dans le cadre de cette étude est :

$$\frac{\sum_{i=1}^n n_{h-p}}{\sum_{i=1}^n n_{systèmes}} \quad (4.1)$$

Les domaines de valeurs probables pour les deux variables de l'équation sont :

- $n_{h-p} :]0 ; 50000]$
- $n_{systèmes} : [1 ; 20]$

Où :

n_{h-p} est le nombre d'heures en h-p d'un projet selon une catégorie de complexité et du type de logiciel utilisé

$n_{systèmes}$ est un nombre naturel de systèmes recensés dans ce projet, selon une catégorie de complexité et du type de logiciel utilisé.

4.4.3 Abstraction des documents d'ingénierie

L'étude fait abstraction des documents d'ingénierie dans les projets. Des exemples de documents d'ingénierie sont présentés à la section 1.2.1.

Il n'existe pas de quantification linéaire entre le nombre de documents et le nombre de hp/sys . En effet, le nombre de documents d'ingénierie peut passer du simple au double pour deux travaux de construction équivalents. Autrement dit, un même projet peut parfaitement être réalisé avec une cinquantaine de documents ou une centaine, selon le format de la feuille, l'espacement des informations, le choix de représentation de symbole et même, en fonction des facteurs humains. L'analyse de performance des projets est une observation macroscopique et non une analyse microscopique au niveau des documents d'ingénierie.

Les erreurs rencontrées en cours de réalisation peuvent avoir une incidence plus ou plus grande au niveau des hp/sys . Ces erreurs peuvent avoir plusieurs natures : erreur de conception, erreur de quantité, erreur de typographique et erreurs de précision. Les erreurs ont tendance à augmenter les hp/sys associés à un projet parce qu'elle augmente le nombre de documents à modifier. Néanmoins, certaines erreurs n'ont pas d'incidence sur la substance, c'est-à-dire que ce ne sont pas toutes les erreurs qui provoquent une augmentation de hp/sys .

4.5 Validation de la méthode d'analyse

Le but d'une validation de la méthode d'analyse est de démontrer la justesse, la fiabilité et la répétabilité de l'analyse. Trois critères sont considérés : (1) la corrélation, (2) l'exactitude, confirmabilité et intervalle de confiance et (3) la fidélité et la précision.

4.5.1 Corrélation

L'étude vise à établir la corrélation entre les choix de type de logiciel face à la quantité d'h-p nécessaires pour la réalisation d'un projet. Pour mieux répondre à la question, les projets échantillonnés sont divisés en quatre catégories, en fonction de leur complexité : très simple, simple, moyen et complexe. Les projets réalisés en DAO et CAO à proportion équivalentes ont

été exclus. Pour chaque catégorie et pour chaque type de logiciel, les moyennes ont été calculées à partir des h-p, en fonction du nombre de systèmes pour chaque projet recensé. Ce calcul s'effectue par la méthode présentée à la section 4.4.

L'objectif derrière le choix de cette méthode est d'obtenir et de comparer des moyennes ramenées à des grandeurs réduites, selon les types de logiciels utilisés dans des catégories de projets similaires.

4.5.2 Exactitude, confirmabilité et intervalle de confiance

La mesure n'est pas exacte (exactitude), mais le grand nombre d'échantillons étudiés par complexité de projets permet de dégager une tendance suffisante pour répondre à la question de recherche. L'idée est de recueillir les données des rapports de projets complétés des entreprises avec une neutralité du chercheur (confirmabilité). Un second niveau de validation, si disponible, est la présence d'un contrôle de qualité à l'intérieur de l'entreprise comme les certifications ISO 9001-2008 ou ISO 9001-2015.

Quant à la fidélité des résultats, elle dépend de la taille de l'échantillon pour chacun des niveaux de complexité et des types de logiciels (DAO ou CAO). En fonction d'une population mère infinie, et dans le cas d'un échantillon indépendant non exhaustif, la taille d'échantillon n préliminaire se calcule avec la formule suivante [102] :

$$n = \frac{z^2 \hat{p}(1 - \hat{p})}{err^2} \quad (4.2)$$

Où :

n est la taille minimale d'échantillon pour l'obtention de résultats significatifs pour un évènement et un niveau de risque fixé

z est le niveau de confiance. En quelques mots, le niveau de confiance représente un pourcentage de chance à laquelle la valeur soit à l'intérieur d'un intervalle. La valeur type du niveau de confiance est 95 % ce qui signifie que $z = 1.96$. Avec le niveau de confiance, le risque α est déduit avec $\alpha = 1 - z$.

\hat{p} est la proportion estimée de la population qui présente la caractéristique. Cette étude pose comme hypothèse que les projets ont autant de chances d'être réalisé en DAO qu'en CAO. Alors, la proportion \hat{p} équivaut à 50%.

err est la marge d'erreur (généralement fixée à 5 %).

Dans le cas où il y a autant de probabilité qu'un projet soit réalisé en CAO qu'en DAO, alors, l'évènement possède une probabilité de réalisation à 50 %. En tenant compte d'un niveau de confiance de 95 % et d'une marge d'erreur de 5 %, la taille d'échantillon devra être de 384.

$$n = \frac{(1.96)^2 \left(\frac{1}{2}\right) \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)\right)}{(0.05)^2} = \frac{0,9604}{0,0025} = 384.16$$

Dans le cas où le nombre $n = 150$, la marge d'erreur est de 8 %. Une table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance $z = 95$ % est disponible en annexe E1.2.

4.5.3 Fidélité et précision

La fidélité signifie la précision. La fidélité est mesurée dans des conditions idéales et identiques (même procédure et même environnement pour un même système de mesure). L'objectif de la fidélité est de vérifier le bon fonctionnement du système analytique. Contrairement aux sciences pures, les erreurs liées au manipulateur, c'est-à-dire le facteur humain, ne peuvent pas être contrôlées ni réduites. Des impuretés peuvent être introduites dans le recensement des données. Pour obtenir une mesure plus exacte, il faut augmenter le nombre de mesures individuelles. Cependant, au-delà d'un certain nombre, l'ajout de mesures individuelles supplémentaires n'apporte plus d'information significative.

4.6 Résultats attendus

L'étude présente des données classées en quatre catégories : projets très simples, simples, moyens et complexes. La question de recherche répond par oui ou non pour chacune des catégories. Pour y arriver, il faut comparer les données entre les projets de différentes complexités réalisés en DAO et en CAO, puis en faire des moyennes. L'analyse considère que les documents à fournir sont les mêmes en DAO qu'en CAO telle qu'expliquée à la section 4.4.3. Le chargé de projet ou le responsable de la discipline en automatisation interrogé est la personne répondante. Ce dernier détermine le nombre de systèmes à l'intérieur du projet, calcule la somme totale du nombre d'heures travaillées en lien avec l'automatisation et le logiciel de dessins utilisés (DAO ou CAO). Un exemple de résultats sous forme numérique est présenté au tableau 2.

Tableau 2 : Exemple de résultats attendus à l'aide de chiffres fictifs

	Très simples		Simple		Moyens		Complexes		Total
	CAO	DAO	CAO	DAO	CAO	DAO	DAO	CAO	CAO et DAO
Nombre	21	21	21	21	21	21	21	21	168
Nombre de systèmes recensés	63	61	94	88	101	94	112	107	720
Nombre de h-p total des projets recensés	24417	22923	40808	54060	82527	78849	164781	155692	624057
(Moyenne simple pour l'exemple) Nbr heure/Nbr système	387,57	375,79	434,13	614,32	817,09	838,82	1471,26	1455,07	866,75
	DAO est mieux		CAO est mieux		CAO est mieux		DAO est mieux		

Le prochain chapitre présentera les résultats de l'expérimentation.

Chapitre 5

Analyse des résultats

Les résultats attendus sont différents des résultats obtenus. Ce chapitre tente de comprendre les données recueillies dans le but de répondre à la question de recherche.

5.1 Synthèse de l'ensemble des données obtenues

Les données ont été recensées entre le 20 mai et le 29 septembre 2017, auprès de sept entreprises différentes. Les données brutes sont à l'annexe B1 et elles sont résumées au tableau 3.

Tableau 3 : Résumé des données de l'échantillon

	Projets réalisés en		Total
	CAO	DAO	
Nombre de projets	80	70	150
Nombre d'heures-personnes (h-p)	13657,22	25494,50	39151,72
Nombre de systèmes	153	213	366
Moyenne simple (h-p/système)	89,26	119,69	106,97
Moyenne arithmétique	99,70	70,79	86,20
Écart-type	181,30	114,26	51,69

5.2 Première étape de l'étude descriptive

Les données présentées sont impossibles à interpréter dans leur forme actuelle. Elles ne permettent pas d'établir des liens entre les groupes à caractériser. Afin de faciliter leur assimilation, la première étape d'une analyse consiste à mettre en perspective les données recueillies, les séparer en différentes variables et tenter de les relier à l'hypothèse de départ. Les histogrammes, les diagrammes à bâtons et les polygones de fréquence sont des formes classiques. Trois formules de base ont été utilisées pour les mesures : la variance S^2 ,

l'écart-type S et la moyenne. L'utilisation de ces formules de base permet de comprendre répondre à la question de recherche des mesures de dispersion.

5.2.1 Variance d'un échantillon

La variance d'une variable discrète S^2 est composée de n observations est :

$$S^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2 f}{n} \quad (5.1)$$

Avec

$$n = \sum f \quad (5.2)$$

Où :

S^2 est la variance d'un échantillon

S est l'écart-type

f est la fréquence

x est la valeur discrète

\bar{x} est la moyenne

n est le nombre d'observation totale (la somme de tous les effectifs).

Afin d'assurer les résultats de l'analyse, une seconde formule pour la variance est utilisée.

$$S^2 = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{1=p} n_i x_i^2 \right] - \bar{x}^2 \quad (5.3)$$

Où :

x_i est une valeur à d'un caractère à une série.

n_i est un effectif correspondant d'une série.

p est le nombre de caractères dans une série

Cette deuxième équation de la variance permet de limiter les approximations numériques dues à la moyenne.

5.2.2 Écart-type

L'écart-type S s'obtient avec la racine carrée de la variance.

$$S = \sqrt{S^2} \quad (5.4)$$

5.2.3 Moyenne

La moyenne utilisée est :

$$\bar{x} = \frac{n_1x_1 + n_2x_2 + \dots + n_px_p}{n} \quad (5.5)$$

et elle peut aussi s'écrire :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{i=p} \frac{n_i x_i}{n} = \sum_{i=1}^{i=p} f_i x_i \quad (5.6)$$

Une démonstration et une vérification de l'outil du premier test de la moyenne \bar{x} utilisée dans le cadre de l'étude sont présentées en annexe B2. Cet outil permet d'analyser les résultats observés ainsi que leur dispersion pour la population donnée.

5.2.4 Premiers résultats de l'analyse descriptive

Les résultats préliminaires sont divisés en catégories où sont mis en relief les résultats des hp/sys en DAO et en CAO à l'aide d'un graphique et du tableau 4.

- Résultat pour les projets de complexité très simple : figure 5.1;
- Résultat pour les projets de complexité simple : figure 5.2;
- Résultat pour les projets de complexité moyen : figure 5.3;
- Résultat pour les projets de complexité complexe : figure 5.4;
- Résultat pour l'ensemble de l'échantillon : figure 5.5.

En observant les premiers résultats, il est difficile d'affirmer avec certitude que la CAO est plus performante que le DAO. La taille de l'échantillon pour les catégories de projets de complexités très simples et complexes est petite ($n_{DAO} < 10$). Aussi, les valeurs en hp/s_{YS} sur les courbes de distributions sont plus ou moins également dispersées. Cette observation révèle qu'avec cet échantillon de 150 projets, il est impossible d'affirmer avec certitude que les valeurs sont concentrées autour d'une valeur moyenne. De plus, la grande valeur de l'écart-type S obtenue par rapport à la moyenne \bar{x} appuie cette réflexion initiale. Alors, cette méthode de calcul de moyenne ne permet pas d'affirmer ni d'infirmer l'hypothèse de cette recherche.

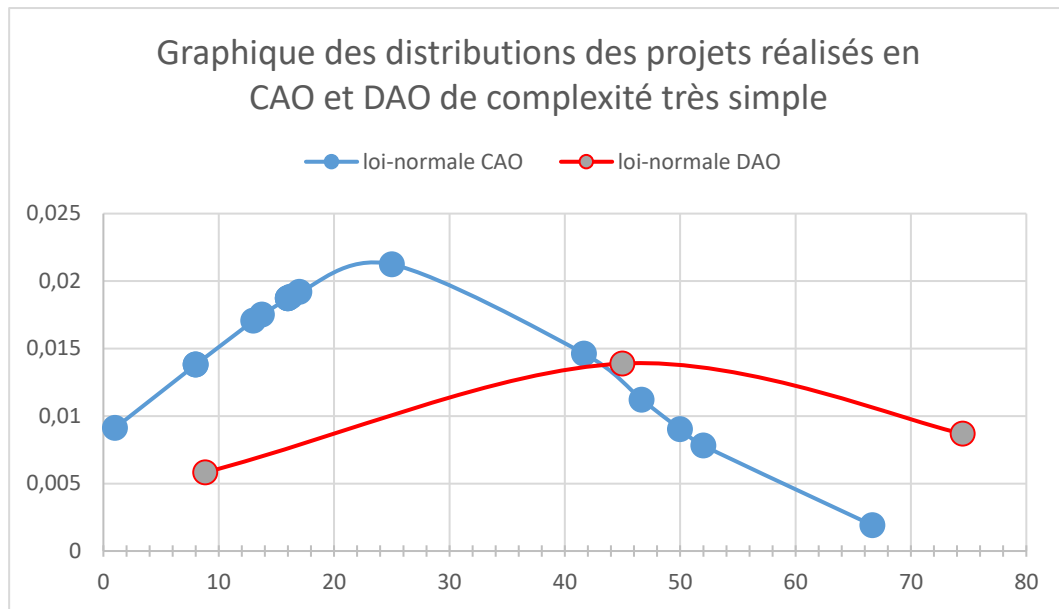


Figure 5.1 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité très simple

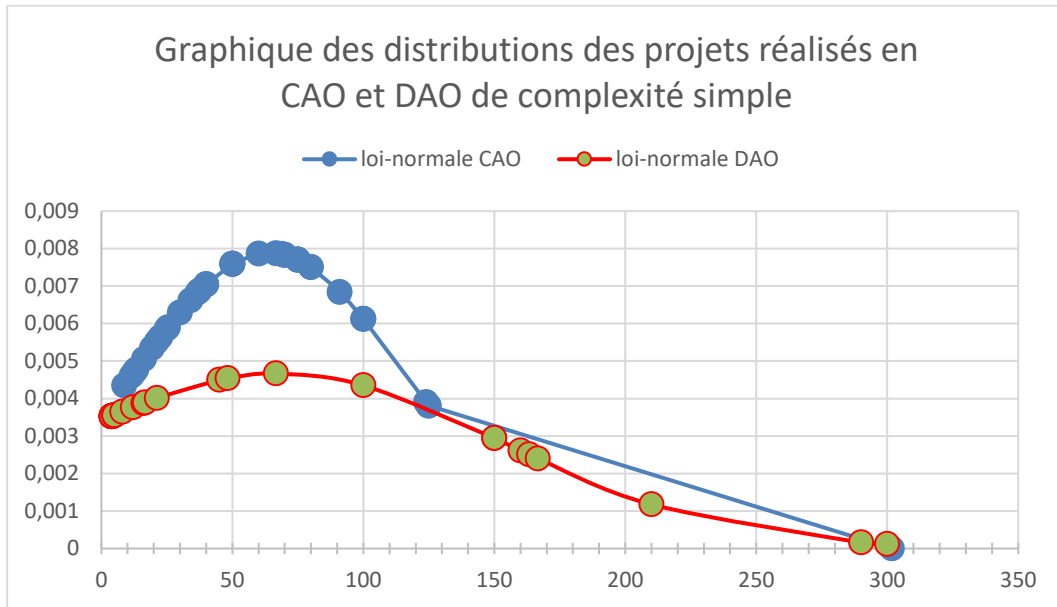


Figure 5.2 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité simple

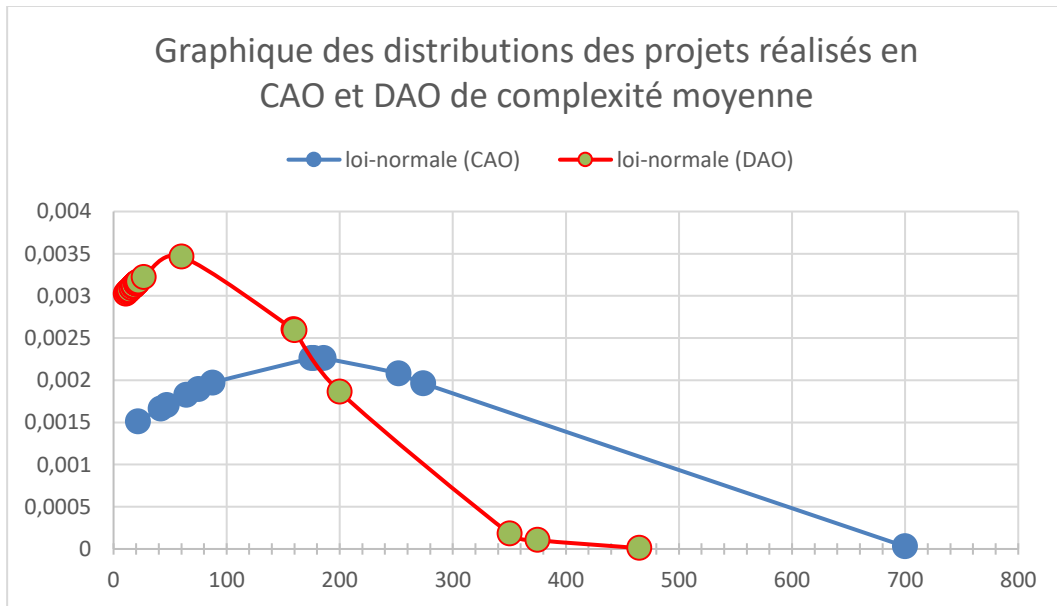


Figure 5.3 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité moyenne

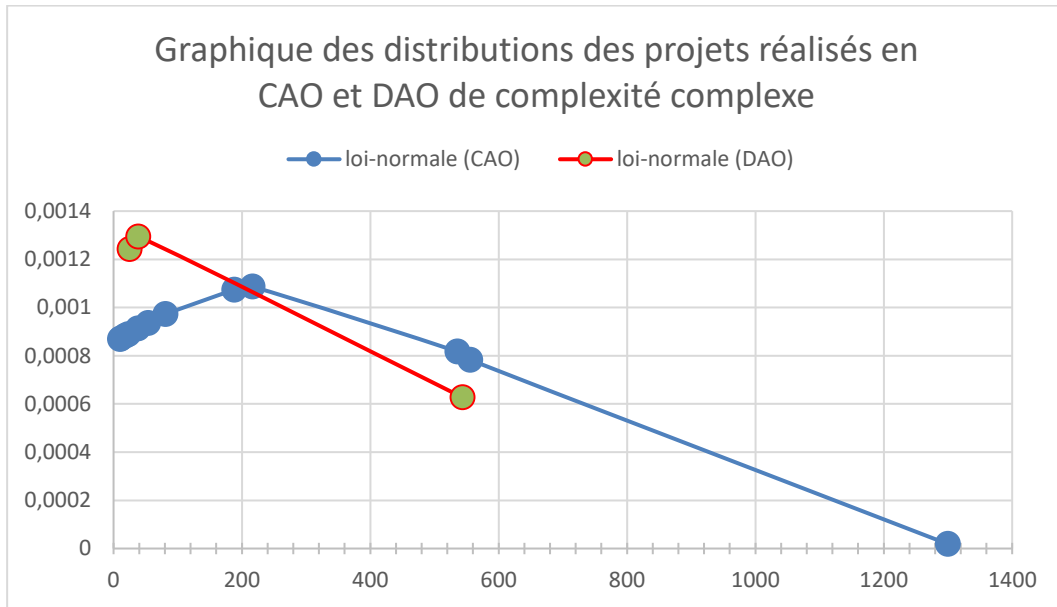


Figure 5.4 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de complexité complexe

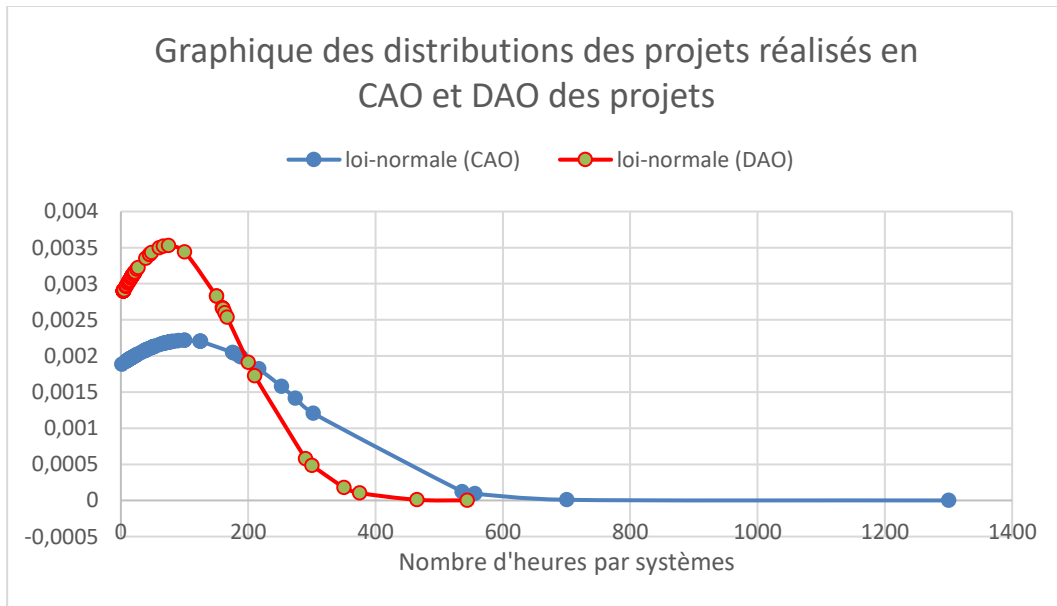


Figure 5.5 : Distributions des projets réalisés en CAO et DAO de l'ensemble de l'échantillon

Tableau 4 : Résultats des projets réalisés en CAO et DAO selon leur complexité

	Très simples		Simple		Moyens		Complexes		Échantillon total	
	CAO	DAO	CAO	DAO	CAO	DAO	CAO	DAO	CAO	DAO
Nombre	16	3	40	31	12	33	12	3	80	70
Moyenne	25,4375	46,6666667	64	68,0645161	180	71,8181818	257,5	206,666667	103,625	74,8571429
Médiane	16,125	45	50	4,5	131,25	18	67,5625	38,8181818	50	18
Écart-type	18,7789707	28,6744176	50,5865595	85,4747408	176,399169	114,533429	365,082753	242,807651	179,737613	113,070684
Variance	352,64974	822,222222	2559	7305,93132	31116,6667	13117,9063	133285,417	58955,5556	32305,6094	12784,9796
Nombre de compagnies différentes	4	1	4	5	3	4	3	2	4	5

5.3 Retour sur l'hypothèse, type de test retenu

Il existe plusieurs tests statistiques pour valider une hypothèse. Le choix dépend de la façon dont l'échantillon a été réalisé, de la nature de la population à laquelle l'échantillon a été tiré et des mesures réalisées¹⁵. Étant donné que le chercheur est face à une modélisation inconnue, le premier réflexe est de déterminer si les données suivent une courbe normale. La première analyse présentée à la section 5.2.4 conclut que la distribution des heures par système ne suit pas une loi normale. De plus, les données risquent fort d'être non appariées parce que chaque projet est par définition unique, et parce que la valeur de l'effort ne peut être reproduite. Autrement dit, le degré de possibilité de reproduire les mêmes résultats avec les mêmes temps de réalisation est difficile, et ce même avec toutes les mêmes conditions réunies. Pour s'en assurer, il faut vérifier sa normalité à l'aide d'une méthode statistique solide.

5.3.1 Test de normalité

Un test de normalité permet de vérifier si les données sont centrées autour d'une valeur moyenne μ avec un écart-type S . Les premiers tracés des courbes de distribution ne permettent pas d'affirmer avec certitude que c'est positif. Pour en être plus certain, il faut utiliser un test de normalité et l'auteur de l'étude a choisi le test de Henry pour la vérification.

5.3.1.1 Test de Henry

La droite de Henry¹⁶ est une représentation graphique afin d'évaluer la normalité d'une distribution dans le test de Henry. Ce test est utilisé comme test d'ajustement. Les échantillons des distributions à comparer ne sont pas forcément de même taille. Son principe consiste à calculer la fréquence des données par intervalle, et d'utiliser la fonction inverse de la loi Normale, également appelée loi gaussienne ou loi de Laplace-Gauss. Si tous les points se

¹⁵ <http://www.cons-dev.org/elearning/stat/St2b.html>

¹⁶ Aussi appelé en anglais : *normal normality-plot* et *quantile-quantile plot*.

retrouvent sur une même droite, alors les données correspondent aux valeurs tirées de cette loi. La procédure se résume ainsi :

1. Trier les données en ordre croissant. Calculer les fréquences.
2. Calculer les fréquences cumulées, c'est-à-dire l'effectif cumulé divisé par l'effectif total.
3. Déterminer le fractile correspondant pour la loi de Gauss standard.

Alors, si x est une variable gaussienne, x_i une valeur x et la moyenne \bar{x} , et de la variance S^2 , et si N est une variable de loi normale centrée réduite, alors on a les égalités suivantes :

$$P(x < x_i) = P\left(\frac{x - \bar{x}}{S} < \frac{x_i - \bar{x}}{S}\right) = P(N < y) = \phi(t) \quad (5.7)$$

Avec y la droite de Henry :

$$y = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (5.8)$$

Une démonstration et une vérification de l'outil en Excel pour le test de Henry utilisé dans le cadre de l'étude sont présentées en annexe D1.

5.3.1.2 Droite de Henry appliquée à l'étude

Une fois l'outil en Excel pour le test de Henry validé, les données de l'échantillon peuvent être utilisées pour déterminer la normalité. Le graphique qui en résulte est illustré à la figure 5.6 et indique que les données suivent une courbe croissante exponentielle et non une ligne droite. Donc, le résultat du test de Henry démontre que les données de l'échantillon ne suivent pas une loi normale et qu'aucun test paramétrique ne doit être utilisé.

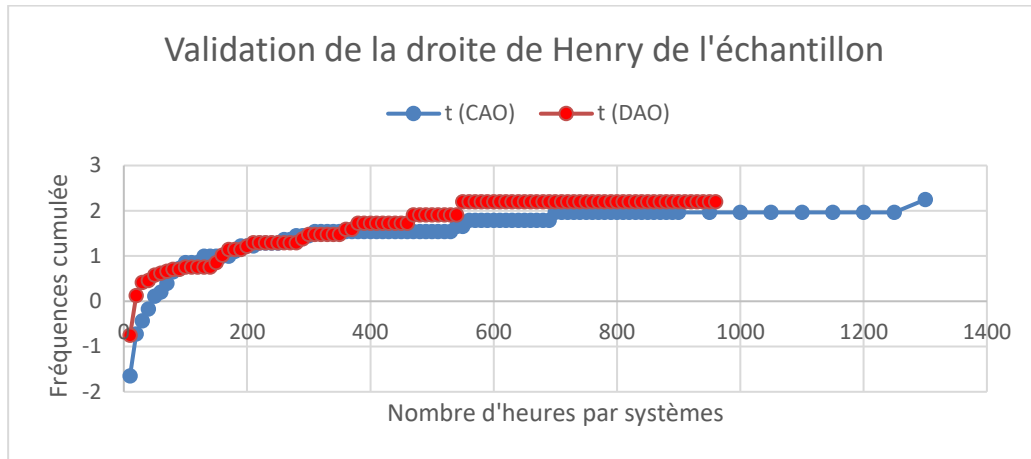


Figure 5.6 : Détermination de la normalité de l'échantillon à l'aide de la droite de Henry

5.3.2 Test de Wilcoxon-Mann-Whitney (test U)

Les premières observations ainsi que l'application du test de la droite de Henry confirment que les moyennes ne peuvent pas être comparées à l'aide de tests reposant sur les lois normales. Autrement dit, les tests paramétriques tels que la loi de Gauss, de la loi de Student, de Cauchy et de Lorentz ne peuvent être utilisés. Il faut donc recourir à des tests non paramétriques, et plus précisément, choisir un test qui traite les échantillons non appariés (indépendants).

Considérant la nature de données recensées, le test Wilcoxon-Mann-Whitney (test U) est un choix approprié. Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney est un test statistique non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse nulle H_0 selon laquelle si la distribution des données est la même dans deux groupes. Cela signifie que chaque valeur de x_i possède autant de chance d'être plus grande et plus petite que y_i . Les tests d'hypothèses s'écrivent alors de la façon suivante :

$$H_0 : P(x_i > y_i) = \frac{1}{2} \quad (5.9)$$

$$H_1 : P(x_i > y_i) \neq \frac{1}{2} \quad (5.10)$$

Son fonctionnement considère deux populations X et Y de taille respective de n_x et n_y . Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney suppose les observations indépendantes et disposant d'une

relation d'ordre. On souhaite tester l'hypothèse alternative H_1 bilatérale : la probabilité qu'une observation de la population X soit supérieure à une observation de la population.

$$P(X > Y) = P(Y > X) \quad (5.11)$$

Le principe du test de Wilcoxon-Mann-Whitney est la sommation par pointage avec comparaison de chaque x_i pour tous les y_i à savoir s'ils sont plus grands ou non pour ainsi obtenir U_x ; et U_y s'obtient de la même façon. Il existe des formules disponibles de U_x et U_y :

$$U_x = R_x - \frac{n_x(n_x + 1)}{2} = n_x n_y + \frac{n_y(n_y + 1)}{2} - R_y \quad (5.12)$$

$$U_y = R_y - \frac{n_y(n_y + 1)}{2} = n_x n_y + \frac{n_x(n_x + 1)}{2} - R_x \quad (5.13)$$

Où :

U_x la variable de décision de X

U_y la variable de décision de Y

n_x le nombre d'éléments dans la population dans X

n_y le nombre d'éléments dans la population dans Y

R_x la somme des n_x rangs des éléments de X

R_y la somme des n_y rangs des éléments de Y

Si les valeurs de x_i sont majoritairement plus grandes que les y_i , alors U_x sera de grande valeur et en contrepartie, U_y de plus petite valeur. Dans les cas extrêmes, si la totalité des éléments de x_i sont plus grands que y_i , alors U_x atteint une valeur maximale de $U_x = n_x n_y$ et $U_y = 0$. Dans le cas où les deux groupes sont identiques, alors les valeurs de U_x et U_y seront voisines avec $U_x = U_y = \frac{n_x n_y}{2}$. Pour aider à la prise de décision dans le test de l'hypothèse, il existe un tableau de Mann-Whitney pour les valeurs critiques U_{crit} à comparer avec les valeurs observées et calculées de U_x et U_y . Le fonctionnement du tableau est le suivant : la valeur extrême la plus petite U doit être plus petite que U_{crit} pour que le test de l'hypothèse H_1 soit significatif. Ainsi, U est la valeur la plus petite entre U_x et U_y :

$$U = \min(U_x, U_y) \quad (5.14)$$

Sinon, H_0 est vrai.

Le tableau de Mann-Whitney est disponible en annexe E1.4, au tableau 23.

5.3.2.1 Égalité et rang identique

Dans l'éventualité où des valeurs des éléments de x_i ou de y_i sont *ex æquo*, le numéro de rang est la moyenne arithmétique de la somme des rangs. Attribuer un même numéro de rang aux *ex æquo* permet d'éviter d'attribuer mathématiquement plus de poids aux éléments x en défaveur de y et vice-versa. Par exemple, s'il existe quatre valeurs identiques au rang 10, 11, 12 et 13, alors le rang à attribuer aux quatre sera 11,5.

5.3.2.2 Taille des échantillons

Lorsque la taille des populations est petite, alors la validité du test U est significative si U est plus grand que la valeur d'un U critique $U_{\alpha=0.05}$. Les valeurs de $U_{\alpha=0.05}$ sont disponibles dans le tableau de Man-Whitney avec un point critique $\alpha = 0.05$ pour un test unilatéral, $\alpha = 0.1$ pour un test bilatéral. (Voir l'annexe E1.4)

Pour des échantillons de $n_x > 10$ ou $n_y > 10$ environ, l'approximation de la loi normale et la table de la loi normale standard peuvent être utilisées. Il y est montré que, sous H_0 , l'évènement suit une distribution connue, tabulée pour de petits échantillons et qui peut être approchée par une loi de probabilité gaussienne de moyenne μ qui sera notée μ_U pour le test U .

$$\mu_U = \frac{n_x n_y}{2} = \frac{U_x + U_y}{2} \quad (5.15)$$

Et l'écart-type σ qui sera noté σ_U

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1)}{12}} \quad (5.16)$$

Pour des échantillons de $n_x > 20$ et $n_y > 20$, on doit utiliser l'approximation de la loi Normale, la table de la loi normale standard et le test paramétrique Z , après l'opération de centrage-réduction.

$$Z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} \quad (5.17)$$

Avec la moyenne μ_U :

$$\mu_U = \frac{n_x n_y}{2} \quad (5.18)$$

L'écart-type σ_U :

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1)}{12}} \quad (5.19)$$

Selon la table de la loi normale centrée réduite, aussi appelée la table Z : $P(Z > 1.96) = 0.025$.

Avec $P(U = z) = \frac{\alpha}{2}$, α est divisé par deux parce que le test est valide pour un test bilatéral.

Alors, toujours avec le même principe utilisé pour U comparé à U_{crit} , c'est maintenant Z comparé à $Z_{crit} = 1.96$ pour un $\alpha = 0.05$ (bilatéral).

- Si $|Z| > 1.96$; alors H_1 est faux et H_0 est vrai au risque $\alpha = 0.05$ (95 % de certitude).
- Si $|Z| < 1.96$; alors H_1 est vrai et H_0 est faux au risque $\alpha = 0.05$ (95 % de certitude).

Finalement, la procédure se résume ainsi :

- 1) Identifier les valeurs appartenant à l'ensemble X ou Y ;
- 2) Compter le nombre de valeurs pour chaque ensemble ;
- 3) Réaliser l'union des deux ensembles $X \cup Y$;
- 4) Trier les valeurs par ordre croissant et les identifier à des rangs ;
- 5) Calculer la somme des rangs de chacun des ensembles (R_x et R_y) ;
- 6) Selon la taille des échantillons ;
 - a. Petites tailles ($n < 10$)
 - i. Calculer la valeur de U , U_x et U_y
 - ii. Comparer U avec U_{crit} .
 - b. Grandes tailles ($n > 20$)
 - i. Calculer la valeur de la moyenne μ_U , de l'écart-type σ_U et Z
 - ii. Comparer la valeur absolue de Z avec $Z_{critique}$ pour un α

- 7) Si U ou Z calculé est plus petit que la valeur critique, alors les résultats sont significatifs pour H_1 , sinon H_1 n'est pas significatif.

Une démonstration et une vérification de l'outil du test U utilisé dans le cadre de l'étude sont présentées en annexe D2.

5.4 Résultats obtenus

Pour chacun des niveaux de complexités des projets, cette section présente les résultats obtenus à l'aide du test U . L'ensemble des données est en annexe B1.

5.4.1 Projets électriques de complexité très simple

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney est utilisé et les calculs donnent des valeurs de $R_{CAO} = 153, R_{DAO} = 37, n_{CAO} = 16, n_{DAO} = 3$.

Calculer la valeur de U_{CAO}

$$U_{CAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{CAO}(n_{CAO} + 1)}{2} - R_{CAO} \quad (5.20)$$

$$U_{CAO} = 16 * 3 + \frac{16(16 + 1)}{2} - 153$$

$$U_{CAO} = 48 + 136 - 153 = 31$$

Calculer la valeur de U_{DAO}

$$U_{DAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{DAO}(n_{DAO} + 1)}{2} - R_{DAO} \quad (5.21)$$

$$U_{DAO} = 16 * 3 + \frac{3(3 + 1)}{2} - 37$$

$$U_{DAO} = 48 + 6 - 37 = 17$$

Déterminer U

$$U = \min(U_{CAO}, U_{DAO}) \quad (5.22)$$

$$U = \min(31, 17)$$

$$U = 17$$

Selon la table de Mann-Whitney en U , pour un $\alpha = 0.05$, $n_{CAO} = 16$ et $n_{DAO} = 3$, $U_{critique} = 6$. Puisque $U > U_{critique}$ avec $17 > 6$, le test H_0 est significatif. Et les valeurs de X ont tendance à être identiques à Y . On ne peut donc pas répondre à la question de recherche pour cette catégorie de complexité.

5.4.2 Projets électriques de complexité simple

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé et les calculs donnent des valeurs de $R_{CAO} = 1639$, $R_{DAO} = 920$, $n_{CAO} = 40$, $n_{DAO} = 31$.

Calculer la valeur de U_{CAO}

$$U_{CAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{CAO}(n_{CAO} + 1)}{2} - R_{CAO} \quad (5.23)$$

$$U_{CAO} = 40 * 31 + \frac{40(40 + 1)}{2} - 1639$$

$$U_{CAO} = 1240 + 820 - 1639 = 421$$

Calculer la valeur de U_{DAO}

$$U_{DAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{DAO}(n_{DAO} + 1)}{2} - R_{DAO} \quad (5.24)$$

$$U_{DAO} = 40 * 31 + \frac{31(31 + 1)}{2} - 920$$

$$U_{DAO} = 1240 + 496 - 920 = 816$$

Déterminer U

$$U = \min(U_{CAO}, U_{DAO}) \quad (5.25)$$

$$U = \min(421 ; 816)$$

$$U = 421$$

Avec $n_{CAO} > 20$ et $n_{DAO} > 20$ qui sont assez grandes, il faut utiliser la table de Z . Alors, le calcul de μ_u est :

$$\mu_u = \frac{n_{CAO}n_{DAO}}{2} = \frac{40 * 31}{2} = 620 \quad (5.26)$$

La variance σ_u :

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1)}{12}} \quad (5.27)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{40 * 31(40 + 31 + 1)}{12}} = \sqrt{\frac{89280}{12}} = \sqrt{7440} = 86.2554$$

Le calcul de Z est :

$$Z = \frac{(U - \mu_u)}{\sigma_u} = \frac{(421 - 621)}{86.2554} = -2.3186 \quad (5.28)$$

Conséquentemnt, même avec des valeurs de $U_{CAO} = 421 < U_{DAO} = 816$, avec la valeur de $|Z| = |-2.3186| > Z_{crit} = 1.96$, l'hypothèse H_1 n'est pas significative avec $\alpha = 0.05$.

5.4.3 Projets électriques de complexité moyenne

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé et les calculs donnent des valeurs de $R_{CAO} = 415, R_{DAO} = 620, n_{CAO} = 12, n_{DAO} = 33$.

Calculer la valeur de U_{CAO}

$$U_{CAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{CAO}(n_{CAO} + 1)}{2} - R_{CAO} \quad (5.29)$$

$$U_{CAO} = 12 * 33 + \frac{12(12 + 1)}{2} - 415$$

$$U_{CAO} = 396 + 78 - 415 = 59$$

Calculer la valeur de U_{DAO}

$$U_{DAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{DAO}(n_{DAO} + 1)}{2} - R_{DAO} \quad (5.30)$$

$$U_{DAO} = 12 * 33 + \frac{33(33 + 1)}{2} - 620$$

$$U_{DAO} = 396 + 561 - 620 = 337$$

Déterminer U

$$U = \min(U_{CAO}, U_{DAO}) \quad (5.31)$$

$$U = \min(59 ; 337)$$

$$U = 59$$

Avec $n_{CAO} > 10$ et $n_{DAO} > 20$, on peut utiliser ta table de Z . Alors, le calcul de μ_u est :

$$\mu_u = \frac{n_x n_y}{2} = \frac{12 * 33}{2} = 198 \quad (5.32)$$

La variance σ_u :

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1)}{12}} \quad (5.33)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{12 * 33(12 + 33 + 1)}{12}} = \sqrt{\frac{18216}{12}} = \sqrt{1518} = 36.9615$$

Le calcul de Z est :

$$Z = \frac{(U - \mu_u)}{\sigma_u} = \frac{(59 - 198)}{36.9615} = -3.7606 \quad (5.34)$$

Conséquemment, même avec des valeurs de $U_{CAO} = 59 < U_{DAO} = 337$, avec la valeur de $|Z| = |-3.7606| > Z_{crit} = 1.96$, l'hypothèse H_1 n'est pas significative avec $\alpha = 0.05$.

5.4.4 Projets électriques de complexité complexe

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé et les calculs donnent des valeurs de $R_{CAO} = 96, R_{DAO} = 25, n_{CAO} = 12, n_{DAO} = 3$.

Calculer la valeur de U_{CAO}

$$U_{CAO} = n_{CAO} n_{DAO} + \frac{n_{CAO}(n_{CAO} + 1)}{2} - R_{CAO} \quad (5.35)$$

$$U_{CAO} = 12 * 3 + \frac{12(12 + 1)}{2} - 95$$

$$U_{CAO} = 36 + 78 - 95 = 19$$

Calculer la valeur de U_{DAO}

$$U_{DAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{DAO}(n_{DAO} + 1)}{2} - R_{DAO} \quad (5.36)$$

$$U_{DAO} = 12 * 3 + \frac{3(3 + 1)}{2} - 25$$

$$U_{DAO} = 36 + 6 - 25 = 17$$

Déterminer U

$$U = \min(U_{CAO}, U_{DAO}) \quad (5.37)$$

$$U = \min(19 ; 17)$$

$$U = 17$$

Selon la table de Mann-Whitney en U, pour un $\alpha = 0,05$, $n_{CAO} = 12$ et $n_{DAO} = 3$, $U_{crit} = 4$.

Puisque $U > U_{critique}$ avec $17 > 4$, le test H_0 est significatif et les valeurs de X ont tendance à être identiques à Y . L'analyse ne peut donc pas répondre à la question de recherche pour cette catégorie de complexité.

5.4.5 Retour à la question de recherche (complexité simple et moyenne confondue)

Les sections précédentes permettent de tirer d'importantes observations intermédiaires afin de répondre à la question de recherche, plus particulièrement pour les projets de complexité niveau très simple et niveau complexe.

5.4.5.1 Remarques pour la complexité très simple

Les projets électriques réalisés de complexité niveau très simple n'ont pas une différence de hp/sys significative entre DAO ou CAO. De plus, la disproportion entre $n_{CAO} = 16$ et $n_{DAO} = 3$ ne permet pas au chercheur de conduire une étude comparative dans cette catégorie. Le ratio favorise trop la CAO pour les projets électriques de complexité très simple.

5.4.5.2 Remarques pour la complexité complexes

Tout comme les projets de complexité niveau très simple, ceux de complexité niveau complexe n'ont pas une différence de hp/sys significative entre DAO et CAO. La disproportion entre les $n_{CAO} = 12$ et $n_{DAO} = 3$ des projets très complexes ne permettent pas au chercheur de conduire une étude comparative. Le ratio favorise beaucoup trop la CAO pour les projets électriques complexes.

5.4.5.3 Projets électriques de complexités simples et complexes

La collecte des données a été réalisée sous un principe d'échantillonnage aléatoire simple sans remplacement, qui fait que chaque résultat a une probabilité égale d'être incluse dans l'étude. La division de l'échantillon en groupes homogènes selon leur complexité a mené à une stratification.

L'omniprésence de la CAO dans les degrés extrêmes de complexité fait que la question de recherche peut se limiter à deux strates de l'échantillonnage. En effet, il n'y a peut-être pas lieu de savoir si la CAO est plus performante que le DAO pour les projets de très grande complexité avec les échantillons et les analyses réalisés jusqu'à présent puisque la CAO y domine. Il en est de même pour les projets électriques de complexité très simple. Si la somme des n_{DAO} de complexité très simple et niveau complexe est égale à six, et que la taille de l'échantillon du DAO n_{DAO} est égale à soixante-dix, alors le DAO pour cette catégorie ne représente que 4 % de l'échantillon.

La question de recherche cherche à savoir si la CAO réduit le temps de travail par rapport au DAO, et ce, sans rapport avec la complexité. En limitant l'étude aux complexités niveau simple et niveau moyen, sans pour autant omettre le niveau très simple et le niveau complexe, la reconduction d'un échantillonnage de mêmes tailles augmentent les probabilités d'obtenir les mêmes conclusions. Autrement dit, l'hypothèse se précise et ses limites sont mieux identifiées. Donc, réaliser le test U sans les données extrêmes des projets de complexité très simple et complexe apparaît comme une nouvelle avenue à emprunter.

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé et les calculs donnent des valeurs $R_{CAO} = 3759, R_{DAO} = 3030, n_{CAO} = 52, n_{DAO} = 64$.

Calculer la valeur de U_{CAO}

$$U_{CAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{CAO}(n_{CAO} + 1)}{2} - R_{CAO} \quad (5.38)$$

$$U_{CAO} = 52 * 64 + \frac{52(52 + 1)}{2} - 3759$$

$$U_{CAO} = 3328 + 1378 - 3759 = 947$$

Calculer la valeur de U_{DAO}

$$U_{DAO} = n_{CAO}n_{DAO} + \frac{n_{DAO}(n_{DAO} + 1)}{2} - R_{DAO} \quad (5.39)$$

$$U_{DAO} = 52 * 64 + \frac{64(64 + 1)}{2} - 3030$$

$$U_{DAO} = 3328 + 2080 - 3030 = 2378$$

Déterminer U

$$U = \min(U_{CAO}, U_{DAO}) \quad (5.40)$$

$$U = \min(947 ; 2378)$$

$$U = 947$$

Avec $n_{CAO} > 20$ et $n_{DAO} > 20$, on ne peut pas utiliser la table de Mann-Whitney en U . Il faut utiliser ta table de Z . Alors, le calcul de μ_u est :

$$\mu_u = \frac{n_x n_y}{2} = \frac{52 * 64}{2} = 1664 \quad (5.41)$$

La variance σ_u :

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1)}{12}} \quad (5.42)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{52 * 64(52 + 64 + 1)}{12}} = \sqrt{\frac{389376}{12}} = \sqrt{32448} = 180.1333$$

Le calcul de Z est :

$$Z = \frac{(U - \mu_u)}{\sigma_u} = \frac{(947 - 1664)}{180.1333} = -3.9804 \quad (5.43)$$

Conséquemment, même avec des valeurs de $U_{CAO} = 947 < U_{DAO} = 2378$, avec la valeur de $|Z| = -3.9804 > Z_{crit} = 1.96$, l'hypothèse H_1 n'est pas significative avec $\alpha = 0.05$.

5.5 Interprétation finale

L'interprétation des tests démontre qu'il n'existe pas de réduction de temps avec l'utilisation de CAO électrique, par rapport au DAO, pour les projets d'ingénierie de complexité comparable en génie électrique d'automatisation. De ce fait, l'interprétation finale permet d'affirmer qu'il n'existe aucun rapport de performance entre la CAO et le DAO. L'hypothèse de départ est donc renversée pour établir une théorie : les temps de réalisation d'un projet en génie électrique d'automatisation sont semblables qu'il soit réalisé en DAO ou en CAO et ce, peu importe la complexité du projet électrique.

La conclusion pour chacune des catégories établit que les moyennes de temps calculées en réalisation de projets en génie électrique sont les mêmes. Autrement dit, leurs valeurs sont beaucoup trop rapprochées entre la CAO et le DAO pour être en mesure d'affirmer qu'un logiciel est plus rapide qu'un autre. L'étude conclut qu'il ne peut être affirmé que la CAO réduit les temps de réalisation des projets de génie électrique en automatisation.

5.5.1 Limites des résultats

Un nouveau recensement de taille $n = 150$ de la population pourrait mener à des résultats différents. La petite taille de l'échantillon par rapport à la population, l'absence de données théoriques sur sa représentativité, la complexité des projets, la réduction de facteurs étudiés ainsi que l'interprétation des données par les experts sont des exemples de facteurs limitatifs. Par contre, les différentes réflexions basées sur une démarche analytique et prudente font que l'interprétation est adéquate. En effet, l'étude ne cherche pas à quantifier l'effort ni à établir un mode de travail dans l'industrie, mais vise plutôt à observer une tendance, basée sur des observations, sur la performance d'un projet pour une discipline bien précise, à savoir qu'il

n'existe aucun rapport de rendement comparatif ni de tendance de performance entre la CAO et le DAO. L'absence d'un avantage de la CAO par rapport au DAO est donc établie.

5.5.2 Limites de la méthode

Des tests préliminaires ont été utilisés afin de déterminer le meilleur test à utiliser pour l'étude. L'analyse a d'abord été réalisée en strates. Puis, après quelques constats, une seconde tentative de validation de l'hypothèse a été menée en analysant les projets de complexités simples et moyennes. Or, écarter la totalité des échantillons des projets de complexité très simple et complexe est justifié parce qu'ils ne sont pas significatifs quantitativement pour l'étude. Traiter toutes les données sans considérer la particularité des caractéristiques des groupes est incorrect et aurait mené à des conclusions prématurées. L'étude en elle-même a été réalisée dans des conditions difficiles puisque les données sont de nature privée, en raison de facteurs économiques, politiques, sociaux et légaux. En résumé, c'est la volonté de mieux comprendre le fonctionnement du phénomène et la recherche d'une tangente plutôt que d'une généralisation d'une population qui doivent être retenues.

Conclusion

Le but de l'essai est de connaître la performance de la CAO par rapport au DAO dans les projets d'ingénierie électrique et d'éclairer les responsables dans le choix d'un logiciel pour la conception, la réalisation et l'implantation de travaux en fonction de leur complexité. L'absence de publication des données privées d'un projet a fait en sorte qu'il était nécessaire de produire des estimations fiables.

L'étude démontre que les données recueillies ne suivent pas la droite de Henry et ressemblent davantage à une loi exponentielle. Ce résultat permet d'identifier la méthode de prise de décision à utiliser pour répondre à la question de recherche. L'application du test de Wilcoxon-Mann-Whitney (test U) et de l'interprétation des résultats ont permis de conclure que :

- Les projets électriques très simples sont majoritairement réalisés en CAO ;
- Les projets électriques complexes sont majoritairement réalisés en CAO ;
- Les projets électriques très simples réalisés en CAO ont une probabilité égale d'être réalisés dans les mêmes délais qu'en DAO ;
- Les projets électriques simples réalisés en CAO ont une probabilité égale d'être réalisés dans les mêmes délais qu'en DAO ;
- Les projets électriques moyens réalisés en CAO ont une probabilité égale d'être réalisés dans les mêmes délais qu'en DAO ;
- Les projets électriques complexes réalisés en CAO ont une probabilité égale d'être réalisés dans les mêmes délais qu'en DAO ;
- Les projets électriques réalisés en CAO ont une probabilité égale d'être réalisés dans les mêmes délais qu'en DAO, même en écartant les extrêmes.

Ces conclusions permettent d'infirmer l'hypothèse de départ et d'affirmer qu'il n'existe aucun avantage quant au temps de réalisation pour un projet électrique réalisé en CAO ou en DAO et ce, peu importe la complexité des projets.

Les conclusions de cette étude ne se sont pas faites sans difficulté. En effet, la collecte des informations auprès des entreprises est essentielle. Sans elles, la notion de représentativité

est absente. Aussi, il n'est pas simple d'obtenir une plus grande quantité de données de projets. C'est pourquoi des outils statistiques ont été utilisés afin de permettre au chercheur de compléter son étude à partir de données fragmentaires et d'extrapoler. Finalement, les justifications et le choix des méthodes de calculs rendent les conclusions de cette étude crédible. En contrepartie, la précision et l'erreur d'échantillonnage des estimations utilisées pour l'enquête font que les conclusions sont limitées,

Il serait possible, à l'aide de mesures statistiques, de mener une nouvelle étude à partir de ces données. Sachant qu'un ajustement exponentiel pourrait mener à une linéarisation des heures d'ingénierie en fonction des projets, il serait possible d'en apprendre d'avantages sur les effets de l'utilisation des logiciels en pratique dans le domaine de l'ingénierie électrique. De ce fait, une étude plus approfondie pourrait faire avancer les connaissances en cette matière étant donné que l'estimation des efforts en ingénierie occupe une part importante dans l'économie d'une entreprise.

Une interprétation non négligeable qui se dégage de l'étude doit aussi être mentionnée et rejoint la littérature existante : les projets électriques complexes sont moins nombreux et, parmi l'échantillon recensé, ils sont réalisés en CAO. Si le DAO est impopulaire pour les projets complexes, se peut-il alors que les entreprises recensées et expérimentées en soient venues aux mêmes conclusions que cette étude ?

Dans un autre ordre d'idées, sachant que la réalisation d'un projet n'est pas uniquement centrée sur une notion de limite de temps, mais relève aussi du budget et du contenu. En gestion de projet, le triangle est souvent utilisé pour représenter les trois principales contraintes d'un projet : temps, budget et contenu. Ce triangle possède de nombreuses appellations : triangle d'or, triangles des contraintes, qualité globale, triangle de projet, triple contrainte, etc. Il serait intéressant de mener une étude sur ces deux aspects : budget et contenu. Ainsi, l'étude serait remplie en totalité pour les projets en ingénierie électrique selon le triangle des contraintes.

Liste des références

- [1] “List_of_engineering_branches @ en.wikipedia.org.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_engineering_branches.
- [2] P. Guillet, “Systèmes d’information de l’Ingénierie,” *Tech. l’Ingénieur*, p. 33, 2016.
- [3] “Regulation_and_licensure_in_engineering @ en.wikipedia.org.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Regulation_and_licensure_in_engineering.
- [4] G. Castonguay, Claude; Nepveu, “Rapport de Commission d’enquête sur la santé et le bien-être social (volume 7, tome1: Les professions et la société),” Québec, Qc, 1967.
- [5] S. Interstate and S. A. G. Provisions, “TEXAS ENGINEERING PRACTICE ACT AND RULES CONCERNING THE PRACTICE OF ENGINEERING AND PROFESSIONAL ENGINEERING LICENSURE,” 2013, pp. 1–32.
- [6] E. Turban and L. Volonino, *Information technology for management: improving performance in the digital economy*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., [2010]., 2010.
- [7] O. des ingénieurs du Québec, *NOTES PRÉPARATOIRES À L’EXAMEN PROFESSIONNEL*, vol. 2015. 2015.
- [8] D. Générale, de la gouvernance des projets D’infrastructure, and et produite par la D. des Communications., *DIRECTIVE SUR LA GESTION DES PROJETS MAJEURS D’INFRASTRUCTURE PUBLIQUE*. Québec: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2016.
- [9] ministère des Transports du Québec, *Guide de réalisation de plans d’infrastructures de transport*. .
- [10] A. OF, P. E. A. GEOSCIENTISTS, and O. B. COLUMBIA, *GUIDELINES FOR ELECTRICAL ENGINEERING SERVICES FOR BUILDING PROJECTS*. Burnaby: ASSOCIATION OF PROFESSIONAL ENGINEERS AND GEOSCIENTISTS OF

BRITISH COLUMBIA, 1993.

- [11] P. Bernus *et al.*, “Enterprise engineering and management at the crossroads,” *Comput. Ind.*, vol. 79, no. Special Issue on Future Perspectives On Next Generation Enterprise Information Systems, pp. 87–102, Jun. 2016.
- [12] J. Bröchner and U. Badenfelt, “Changes and change management in construction and IT projects,” *Autom. Constr.*, vol. 20, pp. 767–775, Jan. 2011.
- [13] É. officiel du Québec, “LOI SUR LES INGÉNIEURS,” 2016.
- [14] “Conservation des documents d’ingénierie @ gpp.oiq.qc.ca.” 2011.
- [15] É. officiel du Québec, “chapitre C-1.1, LOI CONCERNANT LE CADRE JURIDIQUE DES TECHNOLOGIES DE L’INFORMATION,” pp. 1–24, 2016.
- [16] T. Guidelines, “Adobe Trademark Guidelines.” Adobe Systems Incorporated, p. 13, 2004.
- [17] Fred T. Dawson and R. H. Philhower, “Computer-Aided Design of Plant Electrical Systems,” *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–37, 1982.
- [18] “Engineers.,” *Occup. Outlook Handb.*, pp. 1–9, Jan. 2006.
- [19] “Protection and Control of Modern Power Systems,” 2016.
- [20] P. Nachtwey, “A systems approach to Electronic control.,” *Hydraul. Pneum.*, vol. 55, no. 3, p. 50, Mar. 2002.
- [21] P. K. Jha and S. Devisetty, “Orthogonal drawings and crossing numbers of the Kronecker product of two cycles,” *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 72, pp. 195–204, Jan. 2012.
- [22] J. F. Bloodgood, “Comparisons of the IEC and NFPA/ANSI Electrical Standards for Industrial Machines and Equipment.,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 5, p. 1146, Jan. 1984.
- [23] I. of E. and E. Engineers, *315-1975 - IEEE Standard American National Standard Canadian Standard Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Including Reference Designation Letters)*. IEEE-SASB, 1993.
- [24] I. of E. and E. Engineers, *Supplement to Graphic Symbols for Electrical and Electronics*

Diagrams (Supplement to ANSI Y32.2-1975, ANSI/IEEE Std 315-1975). [ressource électronique]. [Piscataway, NJ] : IEEE, 1986., 1986.

- [25] A. Fornalski; and A. Grossnikalu, *Manuel de référence pour schémas électriques*, vol. 1998. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein (SEV), 1998.
- [26] T. E. Kissell, *Modern Industrial/electrical Motor Controls: Operation, Installation, and Troubleshooting*, Université. Michigan: Prentice Hall, 1990.
- [27] T. Wildi and G. Sybille, *Electrotechnique*. De Boeck, 2000.
- [28] R. P. Bouchard and G. Olivier, *Électrotechnique*. Presses internationales Polytechnique, 1999.
- [29] R. P. Bouchard and G. Olivier, *Conception de moteurs asynchrones triphasés*. Montréal, Qc: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1997.
- [30] O. P. Rahi and A. K. Chandel, "Refurbishment and uprating of hydro power plants—A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 726–737, Aug. 2015.
- [31] N. Cross, *Engineering design methods: strategies for product design*. Chichester, England ; New York : Wiley, c2000., 2000.
- [32] Y. Xu, A. Bernard, N. Perry, J. Xu, and S. Sugimoto, "Knowledge evaluation in product lifecycle design and support," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 70, pp. 256–267, Nov. 2014.
- [33] G. Miron, *Guide de conception - Instruction de travail*. Sherbrooke, Qc: EXP, Les Services, 2015.
- [34] C. électrotechnique Internationale, *Matériels et systèmes de téléconduite - Partie 5-104: Protocoles de transmission – Accès aux réseaux utilisant des profils de transport normalisés pour la CEI 60870-5-101*. Genève, Suisse: Internationale, Commission électrotechnique, 2006.
- [35] D. Landes, *L'Europe technicienne, Coll "Bibliothèque des histoires,"* Gallimard. Paris, France, 1968.
- [36] M. Salomon, J.-J.; Landes, D.; Grosland, M; Bourdieu, P.; Chartrand L., Duchesne R., Gingras, Y.; Gagnon, Robert; Godin, Benoit, Trépanier, *HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES, 2e Édition*, 2nd ed. Montréal, Qc: École Polytechnique de Montréal,

1996.

- [37] D. H. K.E. BOLLINGER, IAN CUMMING, “Génie électrique,” *Encyclopédie canadienne*. Encyclopédie canadienne, 2006.
- [38] “2007 IW/MPI Census: Who’s Using CAD, CAE?,” *Ind. Week/IW*, vol. 256, no. 11, p. 53, Nov. 2007.
- [39] J. Schlabbach, “AutoCAD application upgrades power system analysis programs.,” *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 4, no. 2, p. 11, Jan. 1991.
- [40] “Autodesk Is No Blueprint For Gains,” 2013. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/zacks/2013/09/06/autodesk-is-no-blueprint-for-gains/#18df260522c2>. [Accessed: 05-Mar-2017].
- [41] G. Tremblay, “DESSIN ASSISTÉ PAR ORDINATEUR: POUR UNE UTILISATION OPTIMISÉE,” *Bull. TP EXPRESS*, p. 1, 2009.
- [42] M. H. | R. E. Knox, “Choosing the Right Data Formats to Share Product Content,” *Gartner*, 2003.
- [43] K. E. Sibbald, “Computer-aided design/drafting on personal computers.,” *Proc. IEEE*, vol. 73, no. 12, p. 1807, Jan. 1985.
- [44] Pau Valentin Corneliu, Mihailescu Marius Iulian, and Stanescu Octavian, “Model View Presenter Design Pattern,” *J. Comput. Sci. Control Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 173–176, 2010.
- [45] M. Potel, “MVP: Model-View-Presenter The Taligent Programming Model for C++ and Java,” *Taligent Inc*, no. C, pp. 1–14, 1996.
- [46] “Electrical CAD Software produces accurate circuit drawings.,” *ThomasNet News*. Thomas Industrial Network Inc., p. 1, Sep-2014.
- [47] “CAD Software aids detailed electrical engineering.,” *ThomasNet News*. Thomas Industrial Network Inc., p. 1, 12-Mar-2014.
- [48] J. Han, S.-H. Lee, and P. Nyamsuren, “An integrated engineering change management process model for a project-based manufacturing.,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 28, no. 7, pp. 745–752, Jul. 2015.

- [49] M. P. Bhandarkar, B. Downie, M. Hardwick, and R. Nagi, "Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data," *Comput. Ind.*, vol. 41, pp. 261–277, Jan. 2000.
- [50] D. Basu and S. S. Kumar, "Importing mesh entities through IGES/PDES," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 23, no. 3, pp. 151–161, 1995.
- [51] K. G. Pasquill, "Practical uses of IGES," pp. 358–359, 1988.
- [52] J. Gao, T. Ji, and G. Zhao, "Drawing Process Design Based on Fuzzy Knowledge Reasoning," *2009 Int. Conf. Artif. Intell. Comput. Intell.*, pp. 73–77, 2009.
- [53] N. Berbiche and J. El Alami, "Laboratoire d'Analyse des Systèmes, Traitement de l'Information et Management Intégré (LASTIMI).," *E-Ti E-Review Technol. Inf.*, no. 8, pp. 82–84, Nov. 2015.
- [54] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*. Prentice Hall, 2001.
- [55] J. D. Manrique, M. Al-Husseini, A. Bouferguene, and R. Nasser, "Automated generation of shop drawings in residential construction," *Autom. Constr.*, vol. 55, pp. 15–24, Jul. 2015.
- [56] N. Puodžiūnienė, "Review of Contemporary CAD Systems in Industry and Education.," *Mechanika*, vol. 18, no. 2, pp. 246–250, Apr. 2012.
- [57] G. Todorov, "'CAD/CAM/CAE IN INDUSTRY' - LABORATORY PROFILE.," *Adv. Bulg. Sci.*, vol. 1, pp. 70–72, Dec. 2010.
- [58] H.-S. Park and X.-P. Dang, "Structural optimization based on CAD–CAE integration and metamodeling techniques," *Comput. Des.*, vol. 42, pp. 889–902, Jan. 2010.
- [59] O. Hamri, J.-C. Léon, F. Giannini, and B. Falcidieno, "Software environment for CAD/CAE integration," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 41, pp. 1211–1222, Jan. 2010.
- [60] "CAD/CAM Software Helps Company Grow Customer Base, Product Offerings.," *Mod. Mach. Shop*, vol. 89, no. 6, pp. 126–132, Nov. 2016.
- [61] E. Irmak, R. Bayındır, and A. Köse, "Design and experimental analysis of an advanced static VAR compensator with computer aided control.," *ISA Trans.*, vol. 64, pp. 384–393, Sep. 2016.

- [62] K. S. R. Rao, T. Sunderan, and M. R. Adiris, "Performance and design optimization of two model based wave energy permanent magnet linear generators," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 196–203, Feb. 2017.
- [63] I. Benfatto *et al.*, "Tools for the design integration of the ITER power supplies and electrical installations," *Fusion Eng. Des.*, vol. 86, no. Proceedings of the 26th Symposium of Fusion Technology (SOFT-26), pp. 1537–1540, Jan. 2011.
- [64] J. Hauck, *Electrical design of commercial and industrial buildings*. Toronto: Jones & Bartlett Publishers, 2011.
- [65] H.-Q. Production, "Complexe de la Romaine," *Étude D'Impact Sur L'Enviornnement*, vol. 1, pp. 1–2542, 2007.
- [66] "Projet de construction de la nouvelle centrale thermique de kuujuaq," pp. 4–7, 2013.
- [67] C. Qin, E. Innes-Wimsatt, and E. Loth, "Hydraulic-electric hybrid wind turbines: Tower mass saving and energy storage capacity," *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 69–79, Dec. 2016.
- [68] F. Klumpp, "Comparison of pumped hydro, hydrogen storage and compressed air energy storage for integrating high shares of renewable energies—Potential, cost-comparison and ranking," *J. Energy Storage*, vol. 8, pp. 119–128, Nov. 2016.
- [69] D. Shermom and M. Gilmour, *Cost engineering health check. how good are those numbers?* New York Routledge, 2017, 2017.
- [70] W. R. Wessels and D. S. Sillivant, *Affordable reliability engineering : life-cycle cost analysis for sustainability and logistical support*. Boca Raton, FL : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015., 2015.
- [71] X. Zhao, W. J. C. Verhagen, and R. Curran, "Estimation of aircraft component production cost using knowledge based engineering techniques," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 29, pp. 616–632, Aug. 2015.
- [72] R. C. C. ; K. J. Munson, "ELECTRICAL DRAWINGS DESIGNED TO SUPPORT NUCLEAR PLANT," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 34, no. 1, pp. 623–629, 1987.
- [73] V. Litvinov, "INVESTIGATION OF EMERGENCY AUTOMATION FAILURES

- INFLUENCE ON THE POWER SYSTEM ACCIDENT RISK.," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 6, no. 8, pp. 47–56, Dec. 2014.
- [74] W. Verly, L. R. de Araujo, and D. R. R. Penido, "Practical tool to aid the planning of complex electrical industrial systems—Oil and gas industry," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 163–173, Feb. 2017.
- [75] J. F. Aliquo Jr. and Zhiwei, "DuPont Drives Continuous Improvement With COBIT 5 Process Assessment Model.," *COBIT Focus*, vol. 2, pp. 1–7, Apr. 2014.
- [76] "Pierre Samuel Du Pont de Nemours.," *Columbia Electronic Encyclopedia, 6th Edition JN - Columbia Electronic Encyclopedia, 6th Edition*. Columbia University Press, p. 1, Apr-2016.
- [77] G. Colby, *Du Pont: behind the nylon curtain*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1974., 1974.
- [78] P. Groenewegen, "Part III: Chapter 14: Du Pont de Nemours on the origins and progress of a new science.," *Eighteenth Century Econ.*, pp. 263–269, May 2002.
- [79] "E. I. du Pont de Nemours and Co.," *Corp. Philanthr. Rep.*, vol. 29, no. 8, pp. 6–7, Aug. 2014.
- [80] "E. I. duPont de Nemours & Company SWOT Analysis.," *E. I. duPont Nemours Co. SWOT Anal.*, pp. 1–8, Mar. 2016.
- [81] G. Hemond, *Initiation aux techniques industrielles*. 1982.
- [82] M. Matsubayashi and S. Watanabe, "Generating two-dimensional schematic diagrams of mechanical, electrical, and plumbing systems from three-dimensional building information models," *Int. J. Archit. Comput.*, vol. 14, no. 3, pp. 219–232, 2016.
- [83] K. Lane, "Modeling Electrical Distribution Systems with 3-D CAD.," *Consult. Specif. Eng.*, vol. 41, no. 2, pp. 27–47, Feb. 2007.
- [84] K. Lane, "3D CAD Drawings for the Electrical Contractor.," *EC&M Electr. Constr. Maint.*, vol. 105, no. 8, pp. C34–C36, Aug. 2006.
- [85] R. Elmasri and S. Navathe, *Fundamentals of database systems*. Boston: Addison-Wesley, c2011., 2011.

- [86] G. Miaoulis, D. Plemenos, D. Magos, and C. Skourlas, "The MultiCAD Project : toward an intelligent multimedia information system for CAD," *Pennsylvania State Univ. CiteSeerX Arch.*, 2011.
- [87] Gott, "Computer Graphics for Quality Assurance," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 1, no. 1, p. 39, Jan. 1981.
- [88] Frédéric Demoly, "Conception intégrée et gestion d'informations techniques: application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage," Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.
- [89] Z. Niu, R. R. Martin, F. C. Langbein, and M. A. Sabin, "Rapidly finding CAD features using database optimization," *Comput. Des.*, vol. 69, pp. 35–50, Dec. 2015.
- [90] P. E. D. Love, J. Zhou, C. Sing, and J. T. Kim, "Documentation errors in instrumentation and electrical systems: Toward productivity improvement using System Information Modeling," *Autom. Constr.*, vol. 35, pp. 448–459, Nov. 2013.
- [91] P. E. D. Love, J. Zhou, J. Matthews, and M. C. P. Sing, "Retrospective future proofing of a copper mine: Quantification of errors and omissions in 'As-built' documentation," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 43, pp. 414–423, Sep. 2016.
- [92] Andi and T. Minato, "Design documents quality in the Japanese construction industry: factors influencing and impacts on construction process," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 21, pp. 537–546, Jan. 2003.
- [93] J. Marshall and R. N. Clasper, "CAD application: Computer-aided control of electrical supply operations," *Comput. Des.*, vol. 17, pp. 273–276, Jan. 1985.
- [94] "CAD in industry: Electrical installation aid for construction system," *Comput. Des.*, vol. 21, p. 64, Jan. 1989.
- [95] A. Chikh, "ARBRE : une méthodologie de réutilisation en ingénierie du document," *Sci. Electron. Technol. Inf. Telecommun.*, vol. 6, p. 10, 2005.
- [96] P. E. D. Love, J. Zhou, C. Sing, and J. Tai, "Automation in Construction Documentation errors in instrumentation and electrical systems : Toward productivity improvement using System Information Modeling," *Autom. Constr.*, vol. 35, pp. 448–459, 2013.

- [97] P. E. D. Love, J. Zhou, J. Matthews, and D. Edwards, "Moving beyond CAD to an object-oriented approach for electrical control and instrumentation systems," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 99, pp. 9–17, Sep. 2016.
- [98] J. Zhou, P. E. D. Love, J. Matthews, B. Carey, and C. P. Sing, "Object-oriented model for life cycle management of electrical instrumentation control projects," *Autom. Constr.*, vol. 49, no. Part A, pp. 142–151, Jan. 2015.
- [99] O. des ingénieurs du Québec, *Guide de pratique professionnelle*. Montréal, Qc: Ordre des ingénieurs du Québec, 2017.
- [100] P. NDJAMBOU, "UNE ÉTUDE EMPIRIQUE DU SUCCÈS DES SYSTÈMES D'INFORMATION DE GESTION DE PROJET DANS LES ENTREPRISES QUÉBÉCOISES," UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, 2005.
- [101] S. Belhaj, "Les facteurs et les axes-clés de succès d'un projet GRC : la combinaison adéquate d'axe humain, processus et technologique," UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, 2013.
- [102] S. Canada, *Méthodes et pratiques d'enquête*. Ottawa, 2003.

Bibliographie

- “2007 IW/MPI Census: Who’s Using CAD, CAE?” *Industry Week/IW* 256.11 (2007): 53. Print.
- Aliquo Jr., James F, and Zhiwei. “DuPont Drives Continuous Improvement With COBIT 5 Process Assessment Model.” *COBIT Focus* 2 (2014): 1–7. Web.
- Andi, and Takayuki Minato. “Design Documents Quality in the Japanese Construction Industry: Factors Influencing and Impacts on Construction Process.” *International Journal of Project Management* 21 (2003): 537–546. Web.
- ASME. “Reference Designations for Electrical and Electronics Parts and Equipments.” (2008): n. pag. Print.
- Balakrishna, A. et al. “Integration of CAD/CAM/CAE in Product Development System Using Integration of CAD/CAM/CAE in Product Development System Using.” *Concurrent Engineering* 14.2 (2006): 121–128. Web.
- Benzakoun, Joseph et al. “Computer-Aided Diagnosis (CAD) of Subsolid Nodules: Evaluation of a Commercial CAD System.” *European Journal of Radiology* 85 (2016): 1728–1734. Web.
- Berbiche, Naoual, and Jamila El Alami. “Laboratoire d’Analyse Des Systèmes, Traitement de l’Information et Management Intégré (LASTIMI).” *E-Ti: E-Review in Technologies Information* 8 (2015): 82–84. Web.
- Bernus, Peter et al. “Enterprise Engineering and Management at the Crossroads.” *Computers in Industry* 79. Special Issue on Future Perspectives On Next Generation Enterprise Information Systems (2016): 87–102. Web.
- Bhandarkar, Mangesh P et al. “Migrating from IGES to STEP: One to One Translation of IGES Drawing to STEP Drafting Data.” *Computers in Industry* 41 (2000): 261–277. Web.
- Bianconi, Francesco, Paolo Conti, and L Di Angelo. “Interoperability among CAD/CAM/CAE Systems: A Review of Current Research Trends.” *Proceedings of the Geometric Modeling and Imaging - New Trends* January (2006): n. pag. Web.

Bloodgood, John F. "Comparisons of the IEC and NFPA/ANSI Electrical Standards for Industrial Machines and Equipment." *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-20.5 (1984): 1146. Web.

Bordas, Stéphane et al. "Multi-Scale Fracture, Model Reduction, CAD and Image as a Model." St-Petersburg: N.p., 2015. Web.

Bouchard, R P, and G Olivier. *Conception de Moteurs Asynchrones Triphasés*. Ed. Presses inter Polytechnique. Montréal, Qc: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1997. Web.

Bröchner, Jan, and Ulrika Badenfelt. "Changes and Change Management in Construction and IT Projects." *Automation in Construction* 20 (2011): 767–775. Web.

"CAD/CAM Software Helps Company Grow Customer Base, Product Offerings." *Modern Machine Shop* 89.6 (2016): 126–132. Web.

"CAD in Industry: Electrical Installation Aid for Construction System." *Computer-Aided Design* 21 (1989): 64. Print.

"CAD Software Aids Detailed Electrical Engineering." *ThomasNet News* Mar. 2014: 1. Print.

Camba, Jorge D, Manuel Contero, and Pedro Company. "Parametric CAD Modeling: An Analysis of Strategies for Design Reusability." *Computer-Aided Design* 74 (2016): 18–31. Web.

Chen, Chin-Sheng, and Khokiat Kengskool. "An AutoCAD-Based Expert System For Plant Layout." *Computers & Industrial Engineering* 19.1–4 (1990): 299. Web.

Chikh, Azzeddine. "ARBRE : Une Méthodologie de Réutilisation En Ingénierie Du Document." *Science of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications* 6 (2005): 10. Web.

Colby, Gerard. *Du Pont : Behind the Nylon Curtain*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1974., 1974. Web.

Craveur, J.-C, and Dominique Marceau. *De La CAO Au Calcul*. Paris : Dunod, 2014., 2014. Web. Collection Technique & Ingénierie. Mécanique et Matériaux.

Cross, Nigel. *Engineering Design Methods : Strategies for Product Design*. Chichester, England ; New York : Wiley, c2000., 2000. Web.

Deschênes, Gilles, Pierre Cloutier, and Benoit Huot. Technologie de Systèmes Ordins. [Ressource Électronique] : Programme D'études Techniques, 243-AO. [Québec] : Ministère de l'éducation, du loisir et du sport, Formation professionnelle et technique et formation continue, Direction générale de la formation professionnelle et technique, 2008, 2008. Print.

Development, Energy, and Power Generation Committee. IEEE Guide for the Commissioning of Electrical Systems in Hydroelectric Power Plants. Piscataway, NJ, USA, USA: Energy Development and Power Generation Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1998. Print.

Díaz Lantada, Andrés et al. "Comparative Study of CAD-CAE Programs Taking Account of the Opinions of Students and Teachers." Computer Applications in Engineering Education 21.4 (2013): 641–656. Web.

Doré, Claude. "Enseignement de Systèmes Ordins En Milieu industriel." Université de Sherbrooke, 1989. Print.

Dorf, R C, and Robert H Bishop. Modern Control Systems. Prentice Hall, 2001. Web. Pearson Education.

"E. I. Du Pont de Nemours and Co." Corporate Philanthropy Report 29.8 (2014): 6–7. Web.

"E. I. duPont de Nemours & Company SWOT Analysis." E. I. duPont de Nemours & Company SWOT Analysis (2016): 1–8. Web.

Elmasri, Ramez, and Sham Navathe. Fundamentals of Database Systems. Boston : Addison-Wesley, c2011., 2011. Web.

"Engineers." Occupational Outlook Handbook (2006): 1–9. Web.

Engineers, Institute of Electrical and Electronics. Supplement to Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Supplement to ANSI Y32.2-1975, ANSI/IEEE Std 315-1975). [Ressource Électronique]. [Piscataway, NJ] : IEEE, 1986., 1986. Web. IEEE Xplore.

Faghihi, Vahid et al. "Automation in Construction Scheduling: A Review of the Literature." International Journal of Advanced Manufacturing Technology 81.9–12 (2015): 1845–1856. Web.

Faure, Jean-marc et al. "Génération de La Commande Des Systèmes de Production En Ingénierie Intégrée Produit / Processus Génération de La Commande Des Systèmes de Production En Ingénierie Intégrée Produit / Processus." (2009): 12. Web.

Foucault, Gilles, and Jean-Claude Léon. "Enriching Assembly Cad Models with Functional and Mechanical Informations to Ease CAE." Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Vol. 3. GRENOBLE France: ASME, 2010. 341–351. Web.

Gilles Foucault, Jean.-Claude Léon, G. "Enriching Assembly Cad Models with Functional and Mechanical Informations to Ease CAE ." 3.PARTS A AND B (2010): 341–351. Web.

Gharib, Islam, and Shengfeng Qin. "Integration of Sketch-Based Conceptual Design and Commercial CAD Systems for Manufacturing." International Journal of Advanced Manufacturing Technology 68.9–12 (2013): 2669–2681. Web.

Gott. "Computer Graphics for Quality Assurance." IEEE Computer Graphics and Applications 1.1 (1981): 39. Print.

Grillo, Joseph, and Robert Sweeney. "Innovation Improves CapEx Decisions." Nuclear Plant Journal 34.2 (2016): 40–42. Web.

Groenewegen, Peter. "Part III: Chapter 14: Du Pont de Nemours on the Origins and Progress of a New Science." Eighteenth Century Economics (2002): 263–269. Web.

Gujarathi, G P, and Y.-S. Ma. "Technical Paper: Parametric CAD/CAE Integration Using a Common Data Model." Journal of Manufacturing Systems 30 (2011): 118–132. Web.

Hamri, Okba et al. "Software Environment for CAD/CAE Integration." Advances in Engineering Software 41 (2010): 1211–1222. Web.

Han, Jinteck, Soo-Hong Lee, and Purevdorj Nyamsuren. "An Integrated Engineering Change Management Process Model for a Project-Based Manufacturing." International Journal of Computer Integrated Manufacturing 28.7 (2015): 745–752. Print.

Hauck, John. Electrical Design Of Commercial And Industrial Buildings. 1st ed. Chapter 1. N.p., 2009. Web.

Hégron, Gérard. "De La Modélisation À La Conception Assistée Par Ordinateur. La Modélisation Déclarative." *Annales des Ponts et Chaussées* 2003 (2003): 19–26. Web.

Hepworth, Ammon I et al. "Scalable Integration of Commercial File Types in Multi-User CAD." *Computer-Aided Design & Applications* 11.4 (2014): 459–467. Web.

Hobman, G. "Electrical and Instrumentation CAD Improve Plant Design." *Hydrocarbon Processing* 75.3 (1996): 133. Web.

IEEE. "Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams." 1975.Reaffirmed (1993): n. pag. Print.

Irmak, Erdal, Ramazan Bayındır, and Ali Köse. "Design and Experimental Analysis of an Advanced Static VAR Compensator with Computer Aided Control." *ISA Transactions* 64 (2016): 384–393. Web.

Jha, Pranava K, and Savitri Devisetty. "Orthogonal Drawings and Crossing Numbers of the Kronecker Product of Two Cycles." *Journal of Parallel and Distributed Computing* 72 (2012): 195–204. Print.

Kalta, Mohamad. "Integration of Computer Aided Process Planning with a Commercial CAD System." 1991. Web.

Karimi, Hassan A, and Burcu Akinci. *CAD and GIS Integration*. Boca Raton : CRC Press, c2010., 2010. Web.

Kerr, Norbert L. "HARKing: Hypothesizing After the Results Are Known." *Personality & Social Psychology Review (Lawrence Erlbaum Associates)* 2.3 (1998): 196. Print.

Kissell, Thomas E. *Modern Industrial/electrical Motor Controls: Operation, Installation, and Troubleshooting*. Université. Michigan: Prentice Hall, 1990. Print.

Kitchley, J Jinu Louishidha, and A Srivathsan. "Generative Methods and the Design Process: A Design Tool for Conceptual Settlement Planning." *Applied Soft Computing Journal* 14.Part C (2014): 634–652. Web.

Klumpp, Florian. "Comparison of Pumped Hydro, Hydrogen Storage and Compressed Air Energy Storage for Integrating High Shares of Renewable energies—Potential, Cost-Comparison and Ranking." *Journal of Energy Storage* 8 (2016): 119–128. Web.

Knox, Marc Halpern | Rita E. "Choosing the Right Data Formats to Share Product Content." Gartner August 2003 (2003): n. pag. Print.

Lane, Keith. "3D CAD Drawings for the Electrical Contractor." EC&M Electrical Construction & Maintenance 105.8 (2006): C34–C36. Print.

---. "Modeling Electrical Distribution Systems with 3-D CAD." Consulting-Specifying Engineer 41.2 (2007): 27–47. Web.

Latulipe, Fran. "La CAO : Une Histoire Ancienne ? @ Wwww.journaldunet.com." 2015. Web.

Leboyer, Gil et al. "Systèmes D'Énergie Électrique, Guide de Référence, Les Postes THT et HT." (1998): 44. Web.

LOPEZ, Clara I.; Julio C.; PINILLOS, and Juan C MORENO. "Comparación De Dos Métodos De Diseño De Implantes Basados En Tecnologías De Ingeniería Inversa, Diseño E Ingeniería, Biocad/Cad/Cae." Revista Ingeniería y Competitividad 16.1 (2014): 61–68. Print.

Markets, Research and. "Research and Markets: North America CAD (3D CAD and 2D CAD) Electrical and Electronics Market 2015-2019." Business Wire (English) 21 Oct. 2015: 1. Web.

Marshall, John, and R N Clasper. "CAD Application: Computer-Aided Control of Electrical Supply Operations." Computer-Aided Design 17 (1985): 273–276. Print.

Matsubayashi, Michio, and Shun Watanabe. "Generating Two-Dimensional Schematic Diagrams of Mechanical, Electrical, and Plumbing Systems from Three-Dimensional Building Information Models." International Journal of Architectural Computing 14.3 (2016): 219–232. Web.

Messerli, R. UTILISATION DES LOGICIELS D'INGENIERIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR DANS LA DIVISION ST. N.p., 2001. Web.

Mills, Albert J, Elden Wiebe, and Gabrielle Durepos. Encyclopedia of Case Study Research. [Ressource Électronique]. Thousand Oaks, Calif. : Sage Publications, 2010., 2010. Web. Sage eReference.

Mitta, Deborah A, and Patricia L Flores. "User Productivity as a Function of AutoCAD Interface Design." Applied Ergonomics 26.6 (1995): 387–395. Web.

Nachtwey, Peter. "A Systems Approach to Electronic Control." *Hydraulics & Pneumatics* (1996) 55.3 (2002): 50. Web.

National Electrical Manufacturers Association. *Diagrams, Device Designations, and Symbols for Industrial Control and Systems*. Vol. 2002. Rosslyn, Virginia: N.p., 2007. Web.

Ncnorta, V, N Puodliilniene, and T Pilkaitc. "Automation of Parametrical Part Design Using Its' Two-Dimensional Drawing Data." (2007): 195–200. Print.

Niu, Zhibin et al. "Rapidly Finding CAD Features Using Database Optimization." *Computer-Aided Design* 69 (2015): 35–50. Web.

"North America CAD (3D CAD and 2D CAD) Electrical and Electronics Market 2015-2019." *M2PressWIRE* 21 Oct. 2015. Web.

Olivier, Guy, and Réal-Paul Bouchard. *Électrotechnique*. Ed. Presses inter Polytechnique. Presses in. Montreal, Que., Canada: Presses internationales Polytechnique, 1999. Web.

"Pierre Samuel Du Pont de Nemours." *Columbia Electronic Encyclopedia*, 6th Edition JN - *Columbia Electronic Encyclopedia*, 6th Edition Apr. 2016: 1. Web.

Pollard, Jeremy et al. "Short Industrial Paper EPLAN E-CAE." *MECHATRONIC SYSTEMS* 1.1 (2009): 2. Print.

Potel, Mike. "MVP: Model-View-Presenter The Taligent Programming Model for C++ and Java." *Taligent Inc C* (1996): 1–14. Web.

Provost, Henry. *La Conduite de Projet : De La Conception À L'exploitation Des Réalisations Industrielles*. Paris : Editions Technip, 1994., 1994. Web.

Qin, Chao, Elijah Innes-Wimsatt, and Eric Loth. "Hydraulic-Electric Hybrid Wind Turbines: Tower Mass Saving and Energy Storage Capacity." *Renewable Energy* 99 (2016): 69–79. Web.

Rahi, O P, and A K Chandel. "Refurbishment and Uprating of Hydro Power plants—A Literature Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48 (2015): 726–737. Print.

Rao, K S Rama, T Sunderan, and M Ref'at Adiris. "Performance and Design Optimization of Two Model Based Wave Energy Permanent Magnet Linear Generators." *Renewable Energy* 101 (2017): 196–203. Web.

“RETRACTION: Letafatkar A, Amirsasan R, Abdolvahabi Z, Hadadnezhad M. Reliability and Validity of the AutoCAD Software Method in Lumbar Lordosis Measurement. J Chiropr Med 2011;10:240-7.” Journal Of Chiropractic Medicine 11.3 (2012): 230. Web.

SAINT-MARTIN, Bertrand. “DEFSI @ Saintmartin.bertrand.free.fr.” N.p., 2008. Web.

Sajko, T., S. Krajcar, and D. Skrlec. “Computer Design of Electrical Installations.” The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool., EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8, EUROCON 2003 computer as a tool VO - 2 2003: 273. Web.

Segal, Richard. “Design Automation and Engineering Organization Structures.” ACM SIGDA Newsletter 13.2 (1983): 12. Web.

Shermon, Dale, and Mark Gilmour. Cost Engineering Health Check. How Good Are Those Numbers? New York Routledge, 2017, 2017. Web.

Sibbald, K E. “Computer-Aided Design/drafting on Personal Computers.” Proceedings of the IEEE 73.12 (1985): 1807. Print.

Simmonds, Paul, and Peter Senker. “Managing CAD in Heavy Electrical Engineering.” Computer-Aided Engineering Journal 6.5 (1989): 181. Web.

Solutions, Elmo. “Elmo Solutions Introduces New, Improved ERP Integration for AutoCAD Electrical CAD Software.” Business Wire (English) Apr. 2015. Web.

Standard, American National. “Supplement to Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Supplement to ANSI Y32.2-1975, ANSI/IEEE Std 315-1975).” ANSI/IEEE Std 315A-1986 1986 (1986): 64. Web.

Stewart, Rodney A, Sherif Mohamed, and Raul Daet. “Strategic Implementation of IT/IS Projects in Construction: A Case Study.” Automation in Construction 11 (2002): 681–694. Web.

Stiharu-Alexe, I., and J. O’Shea. CSDS-Programme de Conception Assistée Par Ordinateur Pour Les Systèmes de Commande. Montréal, Que., Canada: N.p., 1995. Web.

Strand, Niklas et al. “Semi-Automated versus Highly Automated Driving in Critical Situations Caused by Automation Failures.” Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour 27. Part B (2014): 218–228. Web.

Taraud, Dominique, and Gilles Glemarec. *Le Guide de La CAO : Guide Visuel En Couleurs*. Paris : Dunod, 2008, 2008. Web. Sciences SUP: Sciences de L'ingénieur.

Theodorou, Petros, and Giannoula Florou. "Manufacturing Strategies and Financial performance—The Effect of Advanced Information Technology: CAD/CAM Systems." *Omega* 36 (2008): 107–121. Web.

Tian, Fengnian, and Mark Voskuil. "Knowledge Based Engineering to Support Electric and Electronic System Design and Automatic Control Software Development." 2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC) (2013): 7A4-1-7A4-9. Web.

Todorov, Georgi. "'CAD/CAM/CAE IN INDUSTRY' - LABORATORY PROFILE." *Advances in Bulgarian Science* 1 (2010): 70–72. Web.

Turban, Efraim, and Linda Volonino. *Information Technology for Management : Improving Performance in the Digital Economy*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc., [2010]., 2010. Web.

"Un Logiciel de CAO / DAO : A Quoi Ça Sert ? Principaux Critères de Choix Pour Un Logiciel de CAO." N.p., 2017. Print.

VanDerSchouw, Martin. "Use the Right Project Management Method." *Supervision* 78.2 (2017): 3–5. Web.

Veloz, Frank. "AutoCAD-Compatible Ergonomics Software." *IIE Solutions* 29.9 (1997): 64. Web.

Wang, Shuhong et al. "A New Parametric Finite Element Analysis Software for Electrical Machine Electromagnetic Fields and Its Implementation." *ICEMS 2001 - Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Machines and Systems* 2 (2001): 1098–1101. Web.

Warrier, Sanu. "Why Are You Using AutoCAD for Electrical Design?" N.p., 2015. Web.

Wessels, William R, and Daniel S Sillivant. *Affordable Reliability Engineering : Life-Cycle Cost Analysis for Sustainability and Logistical Support*. Boca Raton, FL : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015., 2015. Web.

Wijk, V A N. "PLM Interopérable Pour La Conception Intégrée et Le Travail Collaboratif En Aéronautique." (2001): n. pag. Print.

Wildi, T, and G Sybille. Electrotechnique. De Boeck, 2000. Web.

Xu, Yang et al. "Knowledge Evaluation in Product Lifecycle Design and Support." Knowledge-Based Systems 70 (2014): 256–267. Print.

Zacks.com. "Autodesk Is No Blueprint For Gains." N.p., 2013. Web.

Zhao, Xiaojia, Wim J C Verhagen, and Richard Curran. "Estimation of Aircraft Component Production Cost Using Knowledge Based Engineering Techniques." Advanced Engineering Informatics 29 (2015): 616–632. Web.

Annexe A. **Référence de gestion de projets**

A1 Coûts associés au projet – utilisés pour évaluer l'effort

Source :

http://www.regie-energie.gc.ca/audiences/3512-03/Requete3512/HQT/HQT-6-Doc-1_4avril03.pdf

Coûts associés au projet

PREUVE EN CHEF DE TRANSÉNERGIE

TABLE DES MATIÈRES

1	COÛTS ASSOCIÉS AU PROJET	5
1.1	Sommaire des coûts	5
1.2	Gestion des projets à Hydro-Québec Équipement	6
1.3	Principales composantes du coût du projet	8
1.3.1	Approvisionnement, déboisement et construction (incluant le service clé en main pour la compensation série de Waskaganish)	9
1.3.2	Ingénierie et frais de gérance.....	9
1.3.3	Frais financiers	11
1.3.4	Frais généraux	11
1.3.5	Contingence	11

Tableau

Tableau 1 : Coûts de raccordement du village Waskaganish au réseau de transport d'Hydro-Québec (en milliers de dollars de réalisation)	5
---	---

Graphique

Graphique 1 : Répartition des coûts en %	8
--	---

Annexes

Annexe A	Coûts annuels par projet
Annexe B	Processus de réalisation d'un projet local
Annexe C	Directive – Acquisition de biens meubles et de services et administration de contrats
Annexe D	Directive – Acquisition et administration des contrats de services professionnels

1 **1 COÛTS ASSOCIÉS AU PROJET**

2 **1.1 Sommaire des coûts**

3 Le coût total des divers travaux associés au raccordement du village
 4 Waskaganish au réseau de transport s'élève à 64,0 M\$. Le tableau 1 suivant
 5 présente une ventilation générale des coûts par projet, soit pour le poste de
 6 Waskaganish, le poste de la Nemiscau et la ligne Nemiscau-Waskaganish.

7 **Tableau 1 : Coûts de raccordement du village Waskaganish au réseau de transport**
 8 **d'Hydro-Québec (en milliers de dollars de réalisation)**

	Volet postes		Volet ligne	Total
	Poste Waskaganish	Poste Nemiscau	Ligne Nemiscau-Waskaganish	
Coûts de l'avant-projet				
Études d'avant-projet	644,4 k\$	12,0 k\$	837,6 k\$	1 494,0 k\$
Frais généraux	8,7 k\$		16,7 k\$	25,4 k\$
Frais financiers	19,2 k\$		35,3 k\$	54,5 k\$
Sous-total	672,3 k\$	12,0 k\$	889,6 k\$	1 573,9 k\$
Coûts du projet				
Ingénierie	1 113,9 k\$	240,8 k\$	6 804,1 k\$	8 158,8 k\$
Approvisionnement	2 561,0 k\$	194,6 k\$	8 383,5 k\$	11 139,1 k\$
Déboisement			4 440,6 k\$	4 440,6 k\$
Construction	2 698,1 k\$	368,1 k\$	18 288,7 k\$	21 354,9 k\$
Géranche de projets	687,4 k\$	242,0 k\$	3 001,0 k\$	3 930,4 k\$
Mise en valeur	N/A	N/A	N/A	
Contingence	1 692,6 k\$	108,2 k\$	5 596,9 k\$	7 397,7 k\$
Frais généraux	162,6 k\$	23,1 k\$	907,3 k\$	1 093,0 k\$
Frais financiers	700,5 k\$	84,5 k\$	4 147,5 k\$	4 932,5 k\$
Sous-total	9 616,1 k\$	1 261,3 k\$	51 569,6 k\$	62 447,0 k\$
TOTAL	10 288,4 k\$	1 273,3 k\$	52 459,2 k\$	64 020,9 k\$

9

10 Par ailleurs, les tableaux détaillés des coûts annuels par projet sont présentés à
 11 l'annexe A.

12 Chaque rubrique est indexée suivant le taux d'inflation applicable de l'année de sa
 13 réalisation. Les taux d'inflation utilisés pour l'établissement du coût des projets
 14 proviennent de l'indice des prix des produits industriels (IPPI) émis par WEFA

1 GROUP. Les taux utilisés sont les suivants : 2,2 % pour 2002, 2,1 % pour 2003,
2 2,2 % pour 2004, 0,7 % pour 2005 et 1,9 % pour 2006¹.

3 Le Transporteur souligne que les coûts du projet ne doivent pas dépasser de
4 15 % ou 25 M\$ le montant autorisé par le conseil d'administration. Pour tout
5 dépassement supérieur à ces balises, TransÉnergie doit obtenir une nouvelle
6 autorisation du conseil d'administration. Le cas échéant, le Transporteur s'engage
7 à en informer la Régie en temps opportun.

8 La section suivante présente le processus général suivi à Hydro-Québec
9 Équipement afin d'assurer l'efficacité de la gestion de chacune des étapes de la
10 réalisation d'un projet. Les principales composantes du coût du raccordement du
11 village de Waskaganish au réseau de transport sont ensuite expliquées.

12 **1.2 Gestion des projets à Hydro-Québec Équipement**

13 Hydro-Québec gère le plus grand réseau de transport d'électricité sur le continent
14 nord-américain et c'est à la division Hydro-Québec Équipement que revient la
15 responsabilité de mener à bien les projets de construction de lignes et de postes
16 et de renforcement du réseau. Le déploiement d'un tel réseau a permis à cette
17 division de former des professionnels chevronnés dont les compétences et
18 l'expertise sont reconnues.

19 Hydro-Québec Équipement réalise ses projets selon le « processus de réalisation
20 d'un projet local », certifié ISO 9001. Ce processus est présenté schématiquement
21 à l'annexe B.

22 Hydro-Québec Équipement assure la réalisation de toutes les activités de projet,
23 de la demande de TransÉnergie jusqu'au transfert des installations à cette
24 division. Les activités en cause incluent l'ingénierie, l'approvisionnement, la
25 construction et le contrôle des coûts et de l'échéancier du projet, dans le respect
26 des exigences techniques, administratives, réglementaires et légales en vigueur.

¹ Source : WEFA, U.S. Economic Outlook 2000-2006, avril 2001.

1 Ces activités sont réalisées par des spécialistes en ingénierie et en
2 approvisionnement, en gestion de travaux de construction et en estimation et
3 contrôle des coûts de projet. S'adjoignent à eux, au besoin, des spécialistes en
4 environnement et en autorisations gouvernementales.

5 L'acquisition du matériel et des équipements requis se fait conformément aux
6 encadrements administratifs de l'entreprise. Au terme de l'étape d'acquisition du
7 matériel, les appels d'offres sont lancés afin d'obtenir les services d'entrepreneurs
8 externes pour réaliser les travaux de construction et ce, aux meilleures conditions
9 possibles. En l'occurrence, une partie des travaux de construction est octroyée à
10 des entreprises crie hors du processus d'appel d'offres tel que stipulé à la pièce
11 HQT-3, document 1.

12 Le contrôle des coûts et de l'échéancier est ensuite mis en œuvre afin d'assurer le
13 respect des engagements de TransÉnergie.

14 La réalisation d'un projet met en cause plusieurs unités administratives
15 d'Hydro-Québec qui oeuvrent dans différents secteurs spécialisés :

- 16 • relations avec le milieu;
- 17 • à TransÉnergie :
 - 18 - planification ;
 - 19 - expertise technique ;
 - 20 - maintenance ;
 - 21 - conduite du réseau ;
 - 22 - expertise immobilière.
- 23 • à Hydro-Québec Équipement :
 - 24 - environnement ;
 - 25 - ingénierie ;
 - 26 - gérance de projet.

27 L'organisation et la gérance d'un projet requièrent un personnel chevronné qui
28 connaît à fond le fonctionnement et les missions des unités administratives
29 d'Hydro-Québec. Plus de 120 avant-projets et projets de transport sont

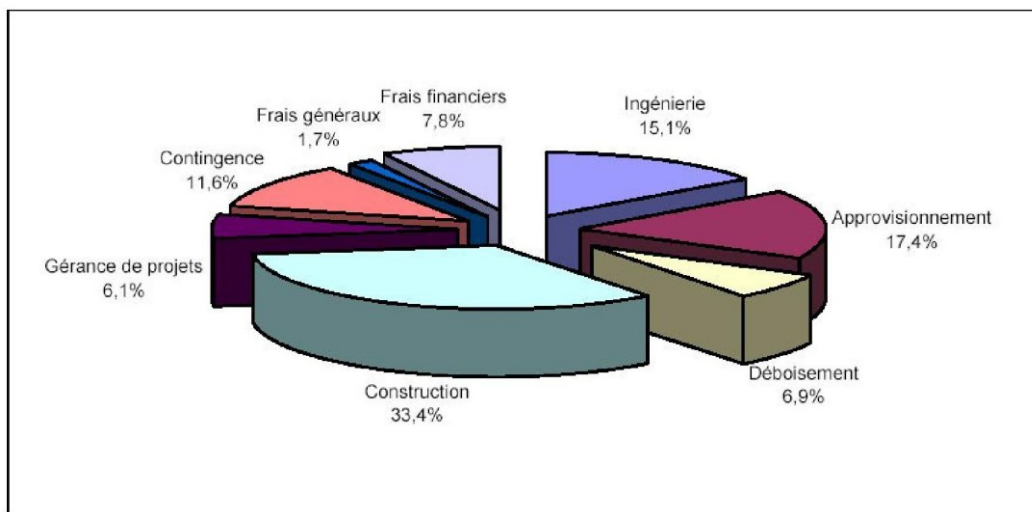
1 actuellement en cours de réalisation. Il est fréquent que deux ou même trois
2 projets se déroulent simultanément dans une même installation. Il est également
3 primordial d'avoir une vision globale et intégrée des interventions sur le territoire et
4 sur le réseau de transport. Hydro-Québec Équipement procède donc
5 fréquemment au regroupement des approvisionnements et des travaux de divers
6 projets afin d'obtenir une réduction significative des coûts au bénéfice des clients
7 du Transporteur.

8 Enfin, compte tenu du grand nombre d'interfaces internes entre les divers
9 intervenants mobilisés pour réaliser un projet et des fréquentes interrelations entre
10 les projets réalisés simultanément, il est de rigueur de confier à une même unité
11 administrative interne le soin de gérer la réalisation des projets.

12 **1.3 Principales composantes du coût du projet**

13 Le graphique 1 ci-dessous présente la répartition des coûts entre les diverses
14 activités requises pour la réalisation du projet.

15 **Graphique 1 : Répartition des coûts en %**



16

1 **1.3.1 Approvisionnement, déboisement et construction**
2 **(incluant le service clé en main pour la compensation série**
3 **de Waskaganish)**

4 Les activités reliées à l'approvisionnement, au déboisement et à la construction
5 dans le cadre du présent projet s'élèvent à 36,9 M\$, soit 57,7 % du coût total du
6 projet.

7 Ces composantes constituent une part importante du coût total du projet. Afin de
8 s'assurer de réaliser ses activités au meilleur coût possible et de s'assurer du
9 respect de sa politique d'acquisition de biens meubles et de services,
10 Hydro-Québec s'est dotée de directives corporatives claires et précises. Les
11 directives suivantes sont présentées aux annexes C et D respectivement :

12 *DIR-08 : Acquisition de biens meubles et de services et administration de*
13 *contrats*

14 *DIR-09 : Acquisition et administration des contrats de services professionnels*

15 Le respect de ces directives garantit à Hydro-Québec Équipement une gestion
16 efficace, équitable et transparente de ses relations avec l'ensemble de ses
17 fournisseurs.

18 **1.3.2 Ingénierie et frais de gérance**

19 Les frais d'ingénierie, incluant les frais des études d'avant-projet, et les frais de
20 gérance s'élèvent à 13,6 M\$, soit 21,2 % du coût total du projet.

21 La facturation des services d'ingénierie se fait par les salaires des ingénieurs et du
22 personnel de soutien. À Hydro-Québec Équipement, le taux de prestation horaire
23 chargé à chaque projet comprend le salaire, les vacances, etc. Ce coût complet
24 correspond à un taux de majoration d'environ 2,25 depuis quelques années,
25 conformément à la pratique de l'industrie dans ce domaine.

26 À des fins de comparaison, précisons qu'Hydro-Québec rémunère les firmes
27 d'ingénierie sur les projets d'envergure en multipliant le coût des salaires des

1 employés de la firme par 2,35. Cette majoration sert à couvrir les frais généraux
2 de la firme et ses bénéfices. Ce taux de majoration se situe généralement entre
3 2,00 et 2,80 dans le marché de l'ingénierie, selon le volume d'affaires généré par
4 le client, la complexité des travaux, la rentabilité des projets et la disponibilité de la
5 main-d'œuvre.

6 À productivité égale, il en coûte donc moins cher d'utiliser, lorsque c'est possible,
7 les employés d'Hydro-Québec Équipement plutôt que des employés de firmes
8 externes.

9 Une autre façon d'évaluer si le coût de l'ingénierie d'un projet est raisonnable, est
10 de calculer le rapport entre le coût de l'ingénierie et le coût total. Ce ratio se situe
11 normalement entre 5 et 10 % suivant la complexité et l'ampleur du projet. Hydro-
12 Québec se situe à l'intérieur de cette fourchette lorsque l'on tient compte de
13 l'ingénierie réalisée à l'interne et à l'externe.

14 Toutefois, ce ratio peut fluctuer suivant les caractéristiques du projet. En effet, le
15 fait d'investir davantage en ingénierie en amont dans un projet permet de réduire
16 substantiellement les coûts directs du projet. Une efficacité accrue de l'ingénierie
17 sur un projet peut donc induire une augmentation du ratio global d'ingénierie dudit
18 projet tout en réduisant le coût total de ce dernier.

19 Quant aux frais de gérance, c'est-à-dire tous les frais relatifs à la gestion de projet
20 auxquels s'ajoutent les frais généraux de la division, ils sont composés
21 majoritairement des frais de main-d'œuvre et des frais qui y sont relatifs comme
22 l'informatique et les espaces de bureau.

23 On mesure les frais de gérance en pourcentage du coût total des projets. Depuis
24 1999, le ratio des frais de gérance se situe autour de 12 % globalement. Ce taux
25 était de 14 % à la SEBJ pour les projets majeurs de la Baie-James.

26 Il est malheureusement difficile d'obtenir des points de comparaison sur le
27 marché, les firmes d'ingénierie refusant généralement, pour des raisons de
28 concurrence, de divulguer le ratio de leurs frais de gérance.

1 Hydro-Québec surveille étroitement les frais de gérance par projet.

2 **1.3.3 Frais financiers**

3 Les frais financiers s'élèvent à 5,0 M\$, soit 7,8 % du coût total du projet.

4 Conformément à la décision de la Régie de l'énergie, la capitalisation des frais
5 financiers aux immobilisations en cours est réalisée au taux du coût en capital de
6 l'année témoin projetée 2001 de 9,723 %²

7 **1.3.4 Frais généraux**

8 Les frais généraux regroupent les coûts suivants :

- 9 • Gestion des matières dangereuses
- 10 • Fourniture de matériel (différent de l'entrepôt du Bout de l'Île)
- 11 • Matériel à projets et guichet unique (entrepôt Bout de l'Île)
- 12 • Revalorisation des biens meubles excédentaires
- 13 • Frais d'acquisition des biens et services
- 14 • Gestion des données et des documents (originaux et géomatique)

15 Ces frais s'élèvent à 1,1 M\$ et représentent 1,7 % du coût total du projet.

16 **1.3.5 Contingence**

17 La valeur de la contingence s'élève à 7,4 M\$, soit 11,6 % du coût total du projet.
18 Les éléments de base servant à la préparation d'une estimation de projet
19 comportent une part d'imprécision et de risque qui doit normalement être calculée
20 afin de déterminer le coût total du projet.

² *Décision D-2002-95, Décision concernant la demande révisée relative à la modification des frais de transport d'électricité, 30 avril 2002, page 91.*

1 La contingence est un coût inclus dans une estimation pour couvrir les incertitudes
2 imputables aux risques et aux imprécisions associés aux durées, aux quantités,
3 aux prix du marché ainsi qu'à tout autre élément défini dans l'étendue des travaux
4 du projet.

5 Conformément à la pratique généralement suivie dans l'industrie, la méthodologie
6 de calcul de la contingence est basée sur la fiabilité de la source de données, le
7 degré de détail du contenu, les facteurs de risque inhérents à chaque étape de
8 réalisation du projet ainsi que le degré de risque que l'organisation est prête à
9 supporter.

10 Les principaux facteurs de risque et d'imprécision reliés à une estimation sont les
11 suivants :

- 12 • Contenu technique ;
- 13 • Mode d'approvisionnement ;
- 14 • Concurrence sur le marché (fournisseurs, entrepreneurs) ;
- 15 • Conditions climatiques et géographiques ; et
- 16 • Contexte social, économique et (ou) politique.

17 Aucune contingence n'est calculée sur les frais généraux d'entreprise, les frais
18 financiers et les taux d'inflation applicables.

19 Par ailleurs, il est à noter qu'Hydro-Québec Équipement déploie tous les efforts
20 requis et agit avec la plus grande diligence afin de réaliser le projet de manière à
21 en minimiser les coûts. Une fois le projet complété, il importe de préciser que le
22 Transporteur paie le coût réel du projet. Ainsi, advenant le cas où le projet est
23 réalisé sans recourir à la provision, le Transporteur versera à Hydro-Québec
24 Équipement la somme correspondant au coût réel des travaux excluant le montant
25 de cette provision. Il en va de même pour les autres éléments de coûts des
26 différentes composantes du projet. Par exemple, si le coût réel de la ligne
27 Némiscau-Waskaganih est inférieur au montant originalement estimé et présenté
28 à la Régie, le Transporteur paiera ce coût inférieur et non le montant estimé.

- 1 Enfin, quant aux contrôles internes mis en place par le Transporteur afin de
2 contrôler les coûts des projets d'investissements, il est à noter qu'Hydro-Québec
3 Équipement doit fournir au Transporteur un rapport détaillé de gestion à tous les
4 mois. Ce rapport présente l'état d'avancement du projet. Hydro-Québec
5 Équipement présente également les faits saillants, le suivi de l'échéancier, le suivi
6 des coûts (engagement encouru, tendances, etc.), les ressources utilisées et les
7 contrats octroyés à l'externe.
- 8 De plus, des réunions techniques de suivi sont tenues régulièrement tout au long
9 de la réalisation du projet avec tous les intervenants impliqués.
- 10 Toute modification du contenu, du coût ou de l'échéancier doit être préalablement
11 approuvé par Hydro-Québec TransÉnergie.

Annexe B. **Données de l'échantillon**

B1 Données de l'échantillon

Tableau 5 : Données de l'échantillon

Numéro de ligne	Compagnie	Complexité	DAO/CAO	Heures	Nombre système	Heures/System
1	A	1	CAO	50	1	50
2	A	1	CAO	8	1	8
3	A	1	CAO	25	1	25
4	A	1	CAO	16	1	16
5	A	1	CAO	8	1	8
6	A	1	CAO	16	1	16
7	A	1	CAO	16	1	16
8	A	2	DAO	100	1	100
9	A	2	CAO	80	1	80
10	A	2	CAO	125	1	125
11	A	2	CAO	75	1	75
12	A	2	CAO	80	2	40
13	A	2	CAO	150	2	75
14	A	2	CAO	75	1	75
15	A	2	CAO	75	1	75
16	A	2	CAO	200	3	66,6666667
17	A	2	CAO	50	1	50
18	A	2	CAO	40	3	13,3333333
19	A	2	CAO	80	1	80
20	A	2	CAO	70	1	70
21	A	2	CAO	50	1	50
22	A	2	CAO	70	1	70
23	A	2	CAO	100	1	100
24	A	2	CAO	50	1	50
25	A	2	CAO	40	1	40
26	A	2	CAO	50	1	50
27	A	2	CAO	50	2	25
28	A	2	CAO	75	2	37,5
29	A	2	CAO	30	1	30
30	A	2	CAO	100	8	12,5
31	A	2	CAO	60	1	60
32	A	2	CAO	40	1	40
33	A	2	CAO	125	1	125
34	A	2	CAO	200	2	100
35	A	3	CAO	450	7	64,2857143
36	A	3	CAO	700	8	87,5
37	A	3	CAO	350	2	175
38	A	3	CAO	150	2	75
39	A	4	CAO	650	3	216,666667
40	B	1	CAO	1	1	1
41	B	2	CAO	124	1	124
42	B	2	CAO	91	1	91
43	B	2	CAO	75	2	37,5
44	B	3	CAO	252	1	252
45	B	3	CAO	700	1	700
46	B	3	CAO	274	1	274

Numéro de ligne	Compagnie	Complexité	DAO/CAO	Heures	Nombre système	Heures/System
47	B	3	CAO	177	1	177
48	B	4	CAO	536	1	536
49	B	4	CAO	1112	2	556
50	B	4	CAO	1300	1	1300
51	B	4	CAO	564,8	3	188,266667
52	C	1	CAO	13	1	13
53	C	1	CAO	52	1	52
54	C	1	CAO	17	1	17
55	C	1	CAO	13,75	1	13,75
56	C	1	CAO	16,25	1	16,25
57	C	2	CAO	22,5	1	22,5
58	C	2	CAO	36,75	1	36,75
59	C	2	CAO	8,75	1	8,75
60	C	2	CAO	21,25	1	21,25
61	C	2	CAO	34	1	34
62	C	2	CAO	16,25	1	16,25
63	C	2	CAO	11,5	1	11,5
64	C	2	CAO	25,5	1	25,5
65	C	2	CAO	19,42	1	19,42
66	C	2	CAO	68,75	1	68,75
67	C	3	CAO	47,25	1	47,25
68	C	3	CAO	43	2	21,5
69	C	3	CAO	41,75	1	41,75
70	C	4	CAO	81	1	81
71	C	4	CAO	10,25	1	10,25
72	C	4	CAO	55	3	18,33333333
73	C	4	CAO	108,25	2	54,125
74	C	4	CAO	76,5	2	38,25
75	C	4	CAO	160,5	7	22,9285714
76	C	4	CAO	154,25	13	11,8653846
77	D	2	DAO	8	1	8
78	D	2	DAO	5	1	5
79	D	2	DAO	5	1	5
80	D	2	DAO	4	1	4
81	D	2	DAO	4	1	4
82	D	2	DAO	12	1	12
83	D	2	DAO	5	1	5
84	D	2	DAO	4	1	4
85	D	2	DAO	4	1	4
86	D	2	DAO	4	1	4
87	D	2	DAO	4	1	4
88	D	2	DAO	4	1	4
89	D	2	DAO	16	1	16
90	D	2	DAO	4	1	4
91	D	2	DAO	4	1	4
92	D	2	DAO	4	1	4
93	D	2	DAO	4	1	4
94	D	3	DAO	60	3	20
95	D	3	DAO	40	2	20
96	D	3	DAO	35	2	17,5

Numéro de ligne	Compagnie	Complexité	DAO/CAO	Heures	Nombre système	Heures/System
97	D	3	DAO	80	3	26,6666667
98	D	3	DAO	120	2	60
99	D	3	DAO	18	1	18
100	D	3	DAO	22	2	11
101	D	3	DAO	14	1	14
102	D	3	DAO	13	1	13
103	D	3	DAO	18	1	18
104	D	3	DAO	21	1	21
105	D	3	DAO	18	1	18
106	D	3	DAO	18	1	18
107	D	3	DAO	18	1	18
108	D	3	DAO	18	1	18
109	D	3	DAO	18	1	18
110	D	3	DAO	21	1	21
111	D	3	DAO	18	1	18
112	D	3	DAO	16	1	16
113	D	3	DAO	28	2	14
114	D	3	DAO	24	2	12
115	D	3	DAO	18	1	18
116	D	3	DAO	16	1	16
117	D	3	DAO	22	1	22
118	E	2	DAO	2900	10	290
119	E	2	DAO	360	8	45
120	E	2	DAO	300	2	150
121	E	2	DAO	300	1	300
122	F	1	DAO	53	6	8,833333333
123	F	1	DAO	149	2	74,5
124	F	1	DAO	45	1	45
125	F	2	DAO	169,5	8	21,1875
126	F	2	DAO	337	7	48,1428571
127	F	2	DAO	117	7	16,7142857
128	F	2	DAO	200	3	66,6666667
129	F	3	DAO	200	10	20
130	F	3	DAO	205	10	20,5
131	F	3	DAO	203	10	20,3
132	F	4	DAO	427	11	38,8181818
133	F	4	DAO	200	8	25
134	G	4	DAO	5980	11	543,636364
135	G	3	DAO	3854	11	350,363636
136	G	3	DAO	800	4	200
137	G	3	DAO	480	3	160
138	G	3	DAO	2790	6	465
139	G	3	DAO	1500	4	375
140	G	3	DAO	796	5	159,2
141	G	3	CAO	743	4	185,75
142	G	2	DAO	320	2	160
143	G	2	DAO	490	3	163,3333333
144	G	2	DAO	300	2	150
145	G	2	DAO	630	3	210
146	G	2	DAO	500	3	166,666667

Numéro de ligne	Compagnie	Complexité	DAO/CAO	Heures	Nombre système	Heures/System
147	G	2	CAO	1509	5	301,8
148	G	1	CAO	125	3	41,6666667
149	G	1	CAO	200	3	66,6666667
150	G	1	CAO	140	3	46,6666667

B2 Tableaux de calculs pour la première analyse (analyse descriptive)

B2.1 Projets de complexité niveau très simple en CAO (complexité 1)

Tableau 6 : Calculs - Projets de complexité niveau très simple en CAO (complexité 1)

i	ID	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale CAO	loi-normale-cumul
1	A	50	1	1	1	1	1	1	597,1914063	1	0,0091099	0,096574
2	A	8	1	8	8	8	2	16	608,1328125	128	0,0138041	0,1765572
3	A	25	1	8	8	8	0	0	0	0	0,0138041	0,1765572
4	A	16	1	13	13	13	1	13	154,6914063	169	0,0170603	0,2538863
5	A	8	1	13,75	13,75	13,75	1	13,75	136,5976563	189,0625	0,0175036	0,2668487
6	A	16	1	16	16	16	3	48	267,1992188	768	0,0187238	0,3076379
7	A	16	1	16	16	16	0	0	0	0	0,0187238	0,3076379
8	B	1	1	16	16	16	0	0	0	0	0,0187238	0,3076379
9	C	13	1	16,25	16,25	16,25	1	16,25	84,41015625	264,0625	0,0188479	0,3123345
10	C	52	1	17	17	17	1	17	71,19140625	289	0,0192044	0,3266055
11	C	17	1	25	25	25	1	25	0,19140625	625	0,0212383	0,4907065
12	C	13,8	1	41,6666667	41,6666667	41,6666667	1	41,6666667	263,3858507	1736,111111	0,0146237	0,8062665
13	C	16,3	1	46,6666667	46,6666667	46,6666667	1	46,6666667	450,6775174	2177,777778	0,0112132	0,870862
14	G	125	3	50	50	50	1	50	603,3164063	2500	0,0090311	0,9045598
15	G	200	3	52	52	52	1	52	705,5664063	2704	0,0078123	0,9213897
16	G	140	3	66,6666667	66,6666667	66,6666667	1	66,6666667	1699,844184	4444,444444	0,0019078	0,985936
				médiane				Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
				16,125			16	407	5642,395833	15995,45833		
								Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N- moy^2		
								25,4375	352,6497396	352,6497396		
									écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)		
									18,77897067	18,77897067		

B2.2 Projets de complexité niveau très simple en DAO (complexité 1)

Tableau 7 : Calculs - Projets de complexité niveau très simple en DAO (complexité 1)

i	ID-	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale DAO	loi-normale-cumul
1	F	53	6	8,83333333	0	0	0	0	0	0	0,00582634	0,093515923
2	F	45	1	45	10	10	1	10	1344,444444	100	0,013889348	0,476825001
3	F	149	2	74,5	20	20	0	0	0	0	0,008686008	0,83414313
					30	30	0	0	0	0		
					40	40	0	0	0	0		
					50	50	1	50	11,11111111	2500		
					60	60	0	0	0	0		
					70	70	0	0	0	0		
					80	80	1	80	1111,111111	6400		
					90	90	0	0	0	0		
					100	100	0	0	0	0		
					110	110	0	0	0	0		
					120	120	0	0	0	0		
					130	130	0	0	0	0		
					140	140	0	0	0	0		
					150	150	0	0	0	0		
			médiane					Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
			45					3	140	2466,666667		9000
								Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2		
								46,66666667	822,222222	822,222222		
								écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)			
								28,67441756	28,67441756			

B2.3 Projets de complexité niveau simple en CAO (complexité 2)

Tableau 8 : Calculs - Projets de complexité niveau simple en CAO (complexité 2)

i	ID-compagnie	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale CAO	loi-normale-cumul
1	C	8,75	1	8,75	0	0	0	0	0	0	0,00434356	0,137375382
2	C	11,5	1	11,5	10	10	1	10	2916	100	0,004602457	0,14967575
3	A	100	8	12,5	20	20	5	100	9680	2000	0,004696938	0,154325439
4	A	40	3	13,3333333	30	30	5	150	5780	4500	0,004775726	0,158272381
5	C	16,25	1	16,25	40	40	7	280	4032	11200	0,005051232	0,172603574
6	C	19,42	1	19,42	50	50	4	200	784	10000	0,005348519	0,189088082
7	C	21,25	1	21,25	60	60	1	60	16	3600	0,005518166	0,199031375
8	C	22,5	1	22,5	70	70	4	280	144	19600	0,005632889	0,206000893
9	A	50	2	25	80	80	6	480	1536	38400	0,005858798	0,220366574
10	C	25,5	1	25,5	90	90	0	0	0	0	0,005903325	0,223307114
11	A	30	1	30	100	100	3	300	3888	30000	0,006291889	0,250755152
12	C	34	1	34	110	110	0	0	0	0	0,00661461	0,276576221
13	C	36,75	1	36,75	120	120	0	0	0	0	0,006821248	0,295053619
14	A	75	2	37,5	130	130	3	390	13068	50700	0,006875188	0,30018985
15	B	75	2	37,5	140	140	0	0	0	0	0,006875188	0,30018985
16	A	80	2	40	150	150	0	0	0	0	0,007046893	0,317595112
17	A	40	1	40	160	160	0	0	0	0	0,007046893	0,317595112
18	A	40	1	40	170	170	0	0	0	0	0,007046893	0,317595112
19	A	50	1	50	180	180	0	0	0	0	0,007590023	0,39098475
20	A	50	1	50	190	190	0	0	0	0	0,007590023	0,39098475
21	A	50	1	50	200	200	0	0	0	0	0,007590023	0,39098475
22	A	50	1	50	210	210	0	0	0	0	0,007590023	0,39098475
23	A	60	1	60	220	220	0	0	0	0	0,007861714	0,468487523
24	A	200	3	66,6666667	230	230	0	0	0	0	0,00787538	0,521020476
25	C	68,75	1	68,75	240	240	0	0	0	0	0,00785164	0,537405091
26	A	70	1	70	250	250	0	0	0	0	0,007831052	0,547207266
27	A	70	1	70	260	260	0	0	0	0	0,007831052	0,547207266
28	A	75	1	75	270	270	0	0	0	0	0,007702067	0,586070801
29	A	150	2	75	280	280	0	0	0	0	0,007702067	0,586070801
30	A	75	1	75	290	290	0	0	0	0	0,007702067	0,586070801
31	A	75	1	75	300	300	0	0	0	0	0,007702067	0,586070801
32	A	80	1	80	310	310	1	310	60516	96100	0,007501562	0,624108628
33	A	80	1	80							0,007501562	0,624108628
34	B	91	1	91							0,006839348	0,703238804
35	A	100	1	100							0,006122111	0,76165969
36	A	200	2	100							0,006122111	0,76165969
37	B	124	1	124							0,003902944	0,882205792
38	A	125	1	125							0,003811752	0,886063086
39	A	125	1	125							0,003811752	0,886063086
40	G	1509	5	301,8							1,25415E-07	0,999998705

médiane
50

N=	Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2
40	2560	102360	266200
	Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2
	64	2559	2559
		écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)
		50,58655948	50,58655948

B2.4 Projets de complexité niveau simple en DAO (complexité 2)

Tableau 9 : Calculs - Projets de complexité niveau simple en DAO (complexité 2)

i	ID-compagnie	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale-DAO	loi-normale-cumul
1	D	4	1	4	0	0	0	0	0	0	0,0035244	0,226773728
2	D	4	1	4	10	10	15	150	50572,3205	1500	0,0035244	0,226773728
3	D	4	1	4	20	20	3	60	6930,593132	1200	0,0035244	0,226773728
4	D	4	1	4	30	30	1	30	1448,907388	900	0,0035244	0,226773728
5	D	4	1	4	40	40	0	0	0	0	0,0035244	0,226773728
6	D	4	1	4	50	50	2	100	652,653486	5000	0,0035244	0,226773728
7	D	4	1	4	60	60	0	0	0	0	0,0035244	0,226773728
8	D	4	1	4	70	70	1	70	3,746097815	4900	0,0035244	0,226773728
9	D	4	1	4	80	80	0	0	0	0	0,0035244	0,226773728
10	D	4	1	4	90	90	0	0	0	0	0,0035244	0,226773728
11	D	4	1	4	100	100	1	100	1019,87513	10000	0,0035244	0,226773728
12	D	5	1	5	110	110	0	0	0	0	0,003555197	0,230313544
13	D	5	1	5	120	120	0	0	0	0	0,003555197	0,230313544
14	D	5	1	5	130	130	0	0	0	0	0,003555197	0,230313544
15	D	8	1	8	140	140	0	0	0	0	0,003646218	0,241116202
16	D	12	1	12	150	150	2	300	13426,84703	45000	0,003763995	0,255938085
17	D	16	1	16	160	160	1	160	8452,133195	25600	0,003877076	0,2712219
18	F	117	7	16,7142857	170	170	2	340	20781,68574	57800	0,003896725	0,273998268
19	F	169,5	8	21,1875	180	180	0	0	0	0	0,004015683	0,291697923
20	E	360	8	45	190	190	0	0	0	0	0,004500502	0,39364162
21	F	337	7	48,1428571	200	200	0	0	0	0	0,004542306	0,407853247
22	F	200	3	66,6666667	210	210	1	210	20145,68158	44100	0,004666746	0,49347601
23	A	100	1	100	220	220	0	0	0	0	0,004352708	0,645658264
24	E	300	2	150	230	230	0	0	0	0	0,002948055	0,831118077
25	G	300	2	150	240	240	0	0	0	0	0,002948055	0,831118077
26	G	320	2	160	250	250	0	0	0	0	0,002617324	0,858943903
27	G	490	3	163,333333	260	260	0	0	0	0	0,002507902	0,867485732
28	G	500	3	166,666667	270	270	0	0	0	0	0,002399403	0,875664277
29	G	630	3	210	280	280	0	0	0	0	0,001175713	0,951598545
30	E	2900	10	290	290	290	1	290	49255,359	84100	0,000160362	0,995291106
31	E	300	1	300	300	300	1	300	53794,06868	90000	0,000117545	0,996671145
					310	310	0	0	0	0		
					320	320	0	0	0	0		
					330	330	0	0	0	0		
					340	340	0	0	0	0		
					350	350	0	0	0	0		
			médiane				N=	Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
			4,5				31	2110	226483,871	370100		
								Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2		
								68,06451613	7305,931322	7305,931322		
								écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)			
								85,47474084	85,47474084			

B2.5 Projets de complexité niveau moyen en CAO (complexité 3)

Tableau 10 : Calculs - Projets de complexité niveau moyen en CAO (complexité 3)

i	ID-compagnie	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale (CAO)	loi-normale-cumul
1	C	43	2	21,5	0	0	0	0	0	0	0,001510422	0,184451446
2	C	41,75	1	41,75	10	10	0	0	0	0	0,00166354	0,216598147
3	C	47,25	1	47,25	20	20	0	0	0	0	0,001703863	0,225858814
4	A	450	7	64,2857143	30	30	1	30	22500	900	0,001823782	0,255918571
5	A	150	2	75	40	40	0	0	0	0	0,001894418	0,275841227
6	A	700	8	87,5	50	50	2	100	33800	5000	0,001971078	0,300007518
7	A	350	2	175	60	60	0	0	0	0	0,00226068	0,488693573
8	B	177	1	177	70	70	1	70	12100	4900	0,002261261	0,493215562
9	G	743	4	185,75	80	80	1	80	10000	6400	0,002260387	0,51300183
10	B	252	1	252	90	90	1	90	8100	8100	0,002080832	0,658423798
11	B	274	1	274	100	100	0	0	0	0	0,001962238	0,702942481
12	B	700	1	700	110	110	0	0	0	0	2,9338E-05	0,998400089
					120	120	0	0	0	0		
					130	130	0	0	0	0		
					140	140	0	0	0	0		
					150	150	0	0	0	0		
					160	160	0	0	0	0		
					170	170	0	0	0	0		
					180	180	2	360	0	64800		
					190	190	1	190	100	36100		
					200	200	0	0	0	0		
					210	210	0	0	0	0		
					220	220	0	0	0	0		
					230	230	0	0	0	0		
					240	240	0	0	0	0		
					250	250	0	0	0	0		
					260	260	1	260	6400	67600		
					270	270	0	0	0	0		
					280	280	1	280	10000	78400		
					290	290	0	0	0	0		
					300	300	0	0	0	0		
					680	680	0	0	0	0		
					690	690	0	0	0	0		
					700	700	1	700	270400	490000		
					710	710	0	0	0	0		
					720	720	0	0	0	0		
					730	730	0	0	0	0		
					740	740	0	0	0	0		
					750	750	0	0	0	0		
			médiane				N=	Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
			131,25				12	2160	373400	762200		
							Moyenne		variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2		
								180	31116,66667	31116,66667		
									écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)		
									176,3991686	176,3991686		

B2.6 Projets de complexité niveau moyen en DAO (complexité 3)

Tableau 11 : Calculs - Projets de complexité niveau moyen en DAO (complexité 3)

i	ID-compagnie	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale (DAO)	loi-normale-cumul
1	D	22	2	11	0	0	0	0	0	0	0,003025164	0,29770657
2	D	24	2	12	10	10	0	0	0	0	0,00303911	0,30073872
3	D	13	1	13	20	20	20	400	53702,47934	8000	0,00305288	0,30378473
4	D	14	1	14	30	30	6	180	10492,56198	5400	0,00306648	0,30684442
5	D	28	2	14	40	40	0	0	0	0	0,00306648	0,30684442
6	D	16	1	16	50	50	0	0	0	0	0,00309316	0,31300419
7	D	16	1	16	60	60	1	60	139,6694215	3600	0,00309316	0,31300419
8	D	35	2	17,5	70	70	0	0	0	0	0,00311270	0,31765863
9	D	18	1	18	80	80	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
10	D	18	1	18	90	90	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
11	D	18	1	18	100	100	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
12	D	18	1	18	110	110	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
13	D	18	1	18	120	120	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
14	D	18	1	18	130	130	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
15	D	18	1	18	140	140	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
16	D	18	1	18	150	150	0	0	0	0	0,00311912	0,31921659
17	D	18	1	18	160	160	2	320	15552,06612	51200	0,00311912	0,31921659
18	D	60	3	20	170	170	0	0	0	0	0,00314434	0,32548018
19	D	40	2	20	180	180	0	0	0	0	0,00314434	0,32548018
20	F	200	10	20	190	190	0	0	0	0	0,00314434	0,32548018
21	F	203	10	20,3	200	200	1	200	16430,57851	40000	0,00314806	0,32642404
22	F	205	10	20,5	210	210	0	0	0	0	0,00315053	0,32705390
23	D	21	1	21	220	220	0	0	0	0	0,00315667	0,32863070
24	D	21	1	21	230	230	0	0	0	0	0,00315667	0,32863070
25	D	22	1	22	240	240	0	0	0	0	0,00316880	0,33179344
26	D	80	3	26,6666667	250	250	0	0	0	0	0,00322278	0,34670884
27	D	120	2	60	260	260	0	0	0	0	0,00346470	0,45890790
28	G	796	5	159,2	270	270	0	0	0	0	0,00260365	0,77724959
29	G	480	3	160	280	280	0	0	0	0	0,00258975	0,77932695
30	G	800	4	200	290	290	0	0	0	0	0,00186206	0,86846515
31	G	3854	11	350,363636	300	300	0	0	0	0	0,00018098	0,99249217
32	G	1500	4	375	310	310	0	0	0	0	0,00010481	0,99594077
33	G	2790	6	465	320	320	0	0	0	0	0,00000961	0,99970142
					330	330	0	0	0	0		
					340	340	0	0	0	0		
					350	350	0	0	0	0		
					360	360	1	360	83048,76033	129600		
					370	370	0	0	0	0		
					380	380	1	380	94976,03306	144400		
					390	390	0	0	0	0		
					400	400	0	0	0	0		
					410	410	0	0	0	0		
					420	420	0	0	0	0		
					430	430	0	0	0	0		
					440	440	0	0	0	0		
					450	450	0	0	0	0		
					460	460	0	0	0	0		
					470	470	1	470	158548,7603	220900		
			médiane				N=	Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
			18				33	2370	432890,9091	603100		
								Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2		
								71,81818182	13117,90634	13117,90634		
									écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)		
									114,5334289	114,5334289		

B2.7 Projets de complexité niveau complexe en CAO (complexité 4)

Tableau 12 : Calculs - Projets de complexité niveau complexe en CAO (complexité 4)

i	ID-compagnie	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale (CAO)	loi-normale-cumul
1	C	10,25	1	10,25	0	0	0	0	0	0	0,000868805	0,249125668
2	C	154,25	13	11,8653846	10	10	0	0	0	0	0,000871404	0,250531222
3	C	55	3	18,3333333	20	20	3	60	169218,75	1200	0,000881714	0,256200844
4	C	160,5	7	22,9285714	30	30	1	30	51756,25	900	0,000888944	0,260269175
5	C	76,5	2	38,25	40	40	1	40	47306,25	1600	0,000912437	0,274070283
6	C	108,25	2	54,125	50	50	0	0	0	0	0,000935693	0,288741345
7	C	81	1	81	60	60	1	60	39006,25	3600	0,000972223	0,314387404
8	B	564,8	3	188,266667	70	70	0	0	0	0	0,001073272	0,424796651
9	A	650	3	216,666667	80	80	0	0	0	0	0,001085931	0,455472444
10	B	536	1	536	90	90	1	90	28056,25	8100	0,000816874	0,777220811
11	B	1112	2	556	100	100	0	0	0	0	0,000782266	0,793213711
12	B	1300	1	1300	110	110	0	0	0	0	1,85313E-05	0,997851659
					120	120	0	0	0	0		
					180	180	0	0	0	0		
					190	190	1	190	4556,25	36100		
					200	200	0	0	0	0		
					210	210	0	0	0	0		
					220	220	1	220	1406,25	48400		
					230	230	0	0	0	0		
					530	530	0	0	0	0		
					540	540	1	540	79806,25	291600		
					550	550	0	0	0	0		
					560	560	1	560	91506,25	313600		
					570	570	0	0	0	0		
					1300	1300	1	1300	1086806,25	1690000		
					1310	1310	0	0	0	0		
			médiane				N=	Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
			67,5625				12	3090	1599425	2395100		
								Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2		
								257,5	133285,4167	133285,4167		
									écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)		
									365,0827532	365,0827532		

B2.8 Projets de complexité niveau complexe en DAO (complexité 4)

Tableau 13 : Calculs - Projets de complexité niveau complexe en DAO (complexité 4)

i	ID-compagnie	h-p	nombre de syst	valeur brute	intervalle	xi	ni	xi*ni	ni(xi-moy)^2	niXi^2	loi-normale (DAO)	loi-normale-cumul
1	F	200	8	25	0	0	0	0	0	0	0,001241912	0,227172272
2	F	427	11	38,8181818	10	10	0	0	0	0	0,001293837	0,244694266
3	G	5980	11	543,636364	20	20	0	0	0	0	0,000627222	0,917401799
					30	30	1	30	31211,11111	900		
					40	40	1	40	27777,77778	1600		
					50	50	0	0	0	0		
					530	530	0	0	0	0		
					540	540	0	0	0	0		
					550	550	1	550	117877,7778	302500		
					560	560	0	0	0	0		
					570	570	0	0	0	0		
					740	740	0	0	0	0		
					750	750	0	0	0	0		
			médiane				N=	Somme des XiNi	Somme des ni(xi-moy)^2	somme des niXi^2		
			38,8181818				3	620	176866,6667	305000		
								Moyenne	variance= [somme des ni(xi-moy)^2]/N	variance= [somme des niXi^2]/N-moy^2		
								206,6666667	58955,55556	58955,55556		
									écart-type = racine(variance)	écart-type = racine(variance)		
									242,8076514	242,8076514		

B3 Tableaux de calcul pour la 2^e analyse (test U)

B3.1 Projets complexité niveau très simple en CAO et DAO (complexité 1)

Tableau 14 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau très simple (complexité 1)

Rang	groupe	Valeur
1	CAO	1
2	CAO	8
3	CAO	8
4	DAO	8,83333
5	CAO	13
6	CAO	13,75
8	CAO	16
8	CAO	16
8	CAO	16
8	CAO	16
10	CAO	16,25
11	CAO	17
12	CAO	25
13	CAO	41,6667
14	DAO	45
15	CAO	46,6667
16	CAO	50
17	CAO	52
18	CAO	66,6667
19	DAO	74,5

Rang	groupe	Valeur
1	CAO	1
2	CAO	8
3	CAO	8
5	CAO	13
6	CAO	14
8	CAO	16
8	CAO	16
8	CAO	16
10	CAO	16
11	CAO	17
12	CAO	25
13	CAO	42
15	CAO	47
16	CAO	50
17	CAO	52
18	CAO	67
153		

Rang	groupe	Valeur
4	DAO	8,83
14	DAO	45
19	DAO	74,5
37		

B3.2 Projets complexité niveau simple en CAO et DAO (complexité 2)

Tableau 15 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau simple (complexité 2)

Rang	groupe	Valeur	Rang	groupe	Valeur	Rang	groupe	Valeur
6	DAO	4	16	CAO	8,75	6	DAO	4
6	DAO	4	17	CAO	11,5	6	DAO	4
6	DAO	4	19	CAO	12,5	6	DAO	4
6	DAO	4	20	CAO	13,33333333	6	DAO	4
6	DAO	4	22	CAO	16,25	6	DAO	4
6	DAO	4	24	CAO	19,42	6	DAO	4
6	DAO	4	26	CAO	21,25	6	DAO	4
6	DAO	4	27	CAO	22,5	6	DAO	4
6	DAO	4	28	CAO	25	6	DAO	4
6	DAO	4	29	CAO	25,5	6	DAO	4
6	DAO	4	30	CAO	30	6	DAO	4
6	DAO	4	31	CAO	34	6	DAO	4
13	DAO	5	32	CAO	36,75	13	DAO	5
13	DAO	5	33,5	CAO	37,5	13	DAO	5
13	DAO	5	33,5	CAO	37,5	13	DAO	5
15	DAO	8	36	CAO	40	15	DAO	8
16	CAO	8,75	36	CAO	40	18	DAO	12
17	CAO	11,5	36	CAO	40	21	DAO	16
18	DAO	12	36	CAO	40	23	DAO	16,7
19	CAO	12,5	41,5	CAO	50	25	DAO	21,2
20	CAO	13,3333	41,5	CAO	50	38	DAO	45
21	DAO	16	41,5	CAO	50	39	DAO	48,1
22	CAO	16,25	41,5	CAO	50	45,5	DAO	66,7
23	DAO	16,7143	44	CAO	60	58	DAO	100
24	CAO	19,42	45,5	CAO	66,6666667	63,5	DAO	150
25	DAO	21,1875	47	CAO	68,75	63,5	DAO	150
26	CAO	21,25	48,5	CAO	70	65	DAO	160
27	CAO	22,5	48,5	CAO	70	66	DAO	163
28	CAO	25	51,5	CAO	75	67	DAO	167
29	CAO	25,5	51,5	CAO	75	68	DAO	210
30	CAO	30	51,5	CAO	75	69	DAO	290
31	CAO	34	51,5	CAO	75	70	DAO	300
32	CAO	36,75	55,5	CAO	80	920		
33,5	CAO	37,5	55,5	CAO	80			
33,5	CAO	37,5	56	CAO	91			
36	CAO	40	58	CAO	100			
36	CAO	40	58	CAO	100			
36	CAO	40	60	CAO	124			
38	DAO	45	61,5	CAO	125			
39	DAO	48,1429	61,5	CAO	125			
41,5	CAO	50	71	CAO	301,8			
41,5	CAO	50	1639					
41,5	CAO	50						
41,5	CAO	50						
44	CAO	60						
45,5	CAO	66,6667						
45,5	DAO	66,6667						
47	CAO	68,75						

Rang	groupe	Valeur
48,5	CAO	70
48,5	CAO	70
51,5	CAO	75
51,5	CAO	75
51,5	CAO	75
51,5	CAO	75
55,5	CAO	80
55,5	CAO	80
56	CAO	91
58	CAO	100
58	CAO	100
58	DAO	100
60	CAO	124
61,5	CAO	125
61,5	CAO	125
63,5	DAO	150
63,5	DAO	150
65	DAO	160
66	DAO	163,333
67	DAO	166,667
68	DAO	210
69	DAO	290
70	DAO	300
71	CAO	301,8

Rang	groupe	Valeur
------	--------	--------

Rang	groupe	Valeur
------	--------	--------

B3.3 Projets complexité niveau moyen en CAO et DAO (complexité 3)

Tableau 16 : Tableaux de calculs pour test *U* pour les projets complexité moyenne (complexité 3)

Rang	groupe	Valeur	Rang	groupe	Valeur	Rang	groupe	Valeur
1	DAO	11	25	CAO	21,5	1	DAO	11
2	DAO	12	28	CAO	41,75	2	DAO	12
3	DAO	13	29	CAO	47,25	3	DAO	13
4,5	DAO	14	31	CAO	64,2857143	4,5	DAO	14
4,5	DAO	14	32	CAO	75	4,5	DAO	14
6,5	DAO	16	33	CAO	87,5	6,5	DAO	16
6,5	DAO	16	36	CAO	175	6,5	DAO	16
8	DAO	17,5	37	CAO	177	8	DAO	17,5
13	DAO	18	38	CAO	185,75	13	DAO	18
13	DAO	18	40	CAO	252	13	DAO	18
13	DAO	18	41	CAO	274	13	DAO	18
13	DAO	18	45	CAO	700	13	DAO	18
13	DAO	18	415			13	DAO	18
13	DAO	18				13	DAO	18
13	DAO	18				13	DAO	18
13	DAO	18				13	DAO	18
13	DAO	18				13	DAO	18
13	DAO	18				13	DAO	18
19	DAO	20				19	DAO	20
19	DAO	20				19	DAO	20
19	DAO	20				19	DAO	20
19	DAO	20				19	DAO	20
21	DAO	20,3				21	DAO	20,3
22	DAO	20,5				22	DAO	20,5
23,5	DAO	21				23,5	DAO	21
23,5	DAO	21				23,5	DAO	21
25	CAO	21,5				26	DAO	22
26	DAO	22				27	DAO	26,7
27	DAO	26,6667				30	DAO	60
28	CAO	41,75				34	DAO	159
29	CAO	47,25				35	DAO	160
30	DAO	60				39	DAO	200
31	CAO	64,2857				42	DAO	350
32	CAO	75				43	DAO	375
33	CAO	87,5				44	DAO	465
34	DAO	159,2				620		
35	DAO	160						
36	CAO	175						
37	CAO	177						
38	CAO	185,75						
39	DAO	200						
40	CAO	252						
41	CAO	274						
42	DAO	350,364						
43	DAO	375						
44	DAO	465						
45	CAO	700						

**B3.4 Projets complexité niveau complexe en CAO et DAO
(complexité 4)**

Tableau 17 : Tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau complexe (complexité 4)

Rang	groupe	Valeur
1	CAO	10,25
2	CAO	11,8654
3	CAO	18,3333
4	CAO	22,9286
5	DAO	25
6	CAO	38,25
7	DAO	38,8182
8	CAO	54,125
9	CAO	81
10	CAO	188,267
11	CAO	216,667
12	CAO	536
13	DAO	543,636
14	CAO	556
15	CAO	1300

Rang	groupe	Valeur
1	CAO	10,25
2	CAO	11,8653846
3	CAO	18,3333333
4	CAO	22,9285714
6	CAO	38,25
8	CAO	54,125
9	CAO	81
10	CAO	188,266667
11	CAO	216,666667
12	CAO	536
14	CAO	556
15	CAO	1300
95		

Rang	groupe	Valeur
5	DAO	25
7	DAO	38,8
13	DAO	544
25		

B3.5 Projets complexité niveau simple et niveau moyen en CAO et DAO (complexités 2 et 3)

Tableau 18 : tableaux de calculs pour test U pour les projets complexité niveau simple et niveau moyen (complexités 2 et 3)

Rang	groupe	Valeur	Rang	groupe	Valeur	Rang	groupe	Valeur
6	DAO	4	16	CAO	8,75	6	DAO	4
6	DAO	4	18	CAO	11,5	6	DAO	4
6	DAO	4	21	CAO	12,5	6	DAO	4
6	DAO	4	23	CAO	13,33333333	6	DAO	4
6	DAO	4	29	CAO	16,25	6	DAO	4
6	DAO	4	41	CAO	19,42	6	DAO	4
6	DAO	4	50	CAO	21,25	6	DAO	4
6	DAO	4	51	CAO	21,5	6	DAO	4
6	DAO	4	53	CAO	22,5	6	DAO	4
6	DAO	4	54	CAO	25	6	DAO	4
6	DAO	4	55	CAO	25,5	6	DAO	4
13	DAO	5	57	CAO	30	13	DAO	5
13	DAO	5	58	CAO	34	13	DAO	5
13	DAO	5	59	CAO	36,75	13	DAO	5
15	DAO	8	60,5	CAO	37,5	15	DAO	8
16	CAO	8,75	60,5	CAO	37,5	17	DAO	11
17	DAO	11	63	CAO	40	19,5	DAO	12
18	CAO	11,5	63	CAO	40	19,5	DAO	12
19,5	DAO	12	63	CAO	40	22	DAO	13
19,5	DAO	12	65	CAO	41,75	24,5	DAO	14
21	CAO	12,5	67	CAO	47,25	24,5	DAO	14
22	DAO	13	70,5	CAO	50	27	DAO	16
23	CAO	13,3333	70,5	CAO	50	27	DAO	16
24,5	DAO	14	70,5	CAO	50	27	DAO	16
24,5	DAO	14	70,5	CAO	50	30	DAO	16,7
27	DAO	16	73	CAO	60	31	DAO	17,5
27	DAO	16	75	CAO	64,2857143	36	DAO	18
27	DAO	16	76,5	CAO	66,6666667	36	DAO	18
29	CAO	16,25	78	CAO	68,75	36	DAO	18
30	DAO	16,7143	80,5	CAO	70	36	DAO	18
31	DAO	17,5	80,5	CAO	70	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	36	DAO	18
36	DAO	18	83	CAO	75	43	DAO	20
36	DAO	18	86,5	CAO	80	43	DAO	20
36	DAO	18	86,5	CAO	80	43	DAO	20
36	DAO	18	88	CAO	87,5	45	DAO	20,3
36	DAO	18	89	CAO	91	46	DAO	20,5
41	CAO	19,42	91	CAO	100	47,5	DAO	21
43	DAO	20	91	CAO	100	47,5	DAO	21
43	DAO	20	93	CAO	124	49	DAO	21,2
43	DAO	20	94,5	CAO	125	52	DAO	22
45	DAO	20,3	94,5	CAO	125	56	DAO	26,7
46	DAO	20,5	103	CAO	175	66	DAO	45

Rang	groupe	Valeur
47,5	DAO	21
47,5	DAO	21
49	DAO	21,1875
50	CAO	21,25
51	CAO	21,5
52	DAO	22
53	CAO	22,5
54	CAO	25
55	CAO	25,5
56	DAO	26,6667
57	CAO	30
58	CAO	34
59	CAO	36,75
60,5	CAO	37,5
60,5	CAO	37,5
63	CAO	40
63	CAO	40
63	CAO	40
65	CAO	41,75
66	DAO	45
67	CAO	47,25
68	DAO	48,1429
70,5	CAO	50
70,5	CAO	50
70,5	CAO	50
70,5	CAO	50
73	CAO	60
74	DAO	60
75	CAO	64,2857
76,5	CAO	66,6667
76,5	DAO	66,6667
78	CAO	68,75
80,5	CAO	70
80,5	CAO	70
83	CAO	75
83	CAO	75
83	CAO	75
83	CAO	75
83	CAO	75
86,5	CAO	80
86,5	CAO	80
88	CAO	87,5
89	CAO	91
91	CAO	100
91	CAO	100
91	DAO	100
93	CAO	124
94,5	CAO	125
94,5	CAO	125
96,5	DAO	150
96,5	DAO	150
98	DAO	159,2
99,5	DAO	160

Rang	groupe	Valeur
104	CAO	177
105	CAO	185,75
108	CAO	252
109	CAO	274
112	CAO	301,8
116	CAO	700
3759		52

Rang	groupe	Valeur
68	DAO	48,1
74	DAO	60
76,5	DAO	66,7
91	DAO	100
96,5	DAO	150
96,5	DAO	150
98	DAO	159
99,5	DAO	160
99,5	DAO	160
101	DAO	163
102	DAO	167
106	DAO	200
107	DAO	210
110	DAO	290
111	DAO	300
113	DAO	350
114	DAO	375
115	DAO	465
3030		64

Rang	groupe	Valeur
99,5	DAO	160
101	DAO	163,333
102	DAO	166,667
103	CAO	175
104	CAO	177
105	CAO	185,75
106	DAO	200
107	DAO	210
108	CAO	252
109	CAO	274
110	DAO	290
111	DAO	300
112	CAO	301,8
113	DAO	350,364
114	DAO	375
115	DAO	465
116	CAO	700

Rang	groupe	Valeur
------	--------	--------

Rang	groupe	Valeur
------	--------	--------

Annexe C. Questionnaire

Ce questionnaire inscrit dans le cadre d'un essai en TI qui porte sur le thème de la DAO/DAO en ingénierie électrique.

Description	Questions	
Année du projet	Est-ce que le projet a été réalisé depuis moins de 10 ans ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Progression et état du projet	Est-ce que le projet est complété ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Complexité du projet :	Quel est le niveau de complexité ?	<input type="checkbox"/> Complexité 1 <input type="checkbox"/> Complexité 2 <input type="checkbox"/> Complexité 3 <input type="checkbox"/> Complexité 4
Nombre de système :	Combien est le nombre de systèmes ?	
Le nombre d'heure-personne (en h-p)	Combien est le nombre d'heures-personnes ?	
Logiciel utilisé :	Est-ce que le projet a été réalisé en DAO ou en CAO ?	<input type="checkbox"/> DAO <input type="checkbox"/> CAO

Annexe D. **Vérification des outils de calcul**

D1 Vérification de l'outil pour le test de Henry

Le logiciel Excel™ est utilisé pour le test d'Henry. Afin de valider son fonctionnement, des valeurs d'essai sont utilisées afin de le valider. La fonction `loi.normale.standard.inverse` de Excel™ est directement utilisée pour obtenir les valeurs de t_i

Tableau 19 : Vérification de l'outil du test de la droite de Henry

Valeur (intervalle)	Nombre x_i	Fréquence $P(X < x_i)$	Cumulatif	$t_i =$ <code>loi.normale.standard.inverse</code> (du Cumulatif)
5	8	0,00799201	0,00799201	-2,40928031
5,5	15	0,01498501	0,02297702	-1,99581516
6	33	0,03296703	0,05594406	-1,58976355
6,5	57	0,05694306	0,11288711	-1,21131624
7	97	0,0969031	0,20979021	-0,80714939
7,5	195	0,19480519	0,4045954	-0,24147007
8	228	0,22777223	0,63236763	0,33813065
8,5	180	0,17982018	0,81218781	0,88598729
9	105	0,1048951	0,91708292	1,38571428
9,5	42	0,04195804	0,95904096	1,73966373
10	23	0,02297702	0,98201798	2,09733381
10,5	13	0,01298701	0,995005	2,5761749
11	4	0,003996	0,999001	3,09052914

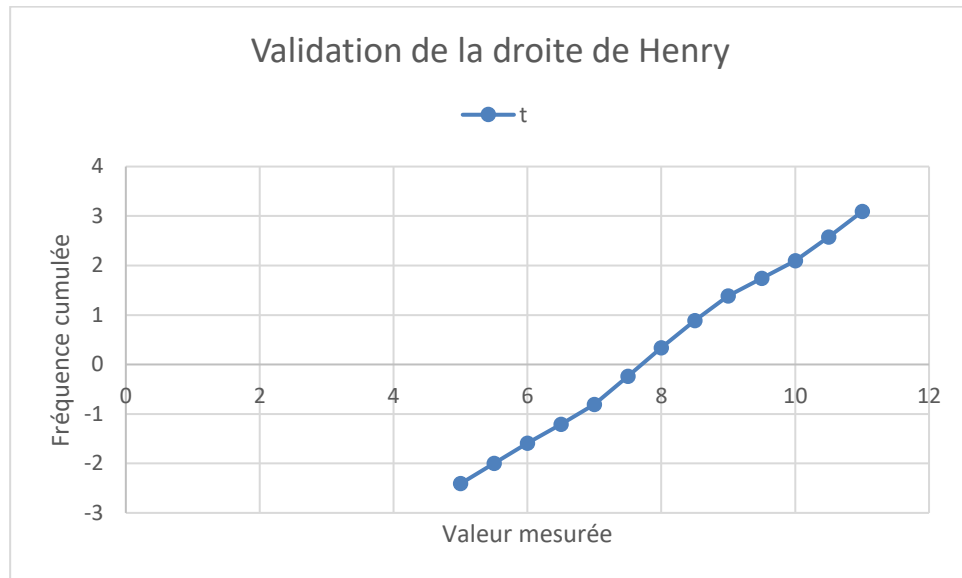


Figure 5.7 : Vérification de l'outil du test de la droite de Henry

D2 Vérification du test U

Le logiciel Excel™ est utilisé pour le test Wilcoxon-Mann-Whitney (test U). Afin de valider son fonctionnement, des valeurs d'essai sont utilisées afin de le valider. Voici les données bidon qui sont utilisées.

X	15	Y	16
X	18	Y	17
X	19	Y	21
X	20	Y	22
X	21	Y	23
X	25	Y	24
X	31	Y	28

Nous avons donc des tailles de population $n_x = 7$ et $n_y = 7$

L'union, la fusion et la numérotation des rangs donnent le tableau suivant :

1	X	15
2	Y	16
3	Y	17
4	X	18
5	X	19
6	X	20
7,5	X	21
7.5	Y	21
9	Y	22
10	Y	23
11	Y	24
12	X	25
13	Y	28
14	X	31

Calculer la somme des rangs :

1 X 15	2 Y 16
4 X 18	3 Y 17
5 X 19	7.5 Y 21
6 X 20	9 Y 22
7.5 X 21	10 Y 23
12 X 25	11 Y 24
14 X 31	13 Y 28
49.5	55.5

Alors, $R_x = 49.5$ et $R_y = 55.5$

Calculer la valeur de U_x

$$U_x = n_x n_y + \frac{n_x(n_x + 1)}{2} - R_x \quad (\text{D2.1})$$

$$U_x = 7 * 7 + \frac{7(7 + 1)}{2} - 49.5$$

$$U_x = 49 + 28 - 49.5 = 27.5$$

Calculer la valeur de U_x :

$$U_x = R_y - \frac{n_y(n_y + 1)}{2} \quad (\text{D2.2})$$

$$U_x = 55.5 - 28 = 27.5$$

Calculer la valeur de U_y

$$U_y = n_x n_y + \frac{n_y(n_y + 1)}{2} - R_y \quad (\text{D2.3})$$

$$U_y = 7 * 7 + \frac{7(7 + 1)}{2} - 55.5$$

$$U_y = 49 + 28 - 55.5 = 21.5$$

Calculer la valeur de U_y :

$$U_y = R_x - \frac{n_x(n_x + 1)}{2} \quad (\text{D2.4})$$

$$U_y = 49.5 - 28 = 21.5$$

Déterminer U

$$U = \min(U_x, U_y) \quad (\text{D2.5})$$

$$U = (27.5, 21.5)$$

$$U = 21.5$$

Selon, la table de Mann-Whitney en U , pour un $\alpha = 0.05$, $n_x = 7$ et $n_y = 7$, $U_{critique} = 8$.

Puisque $U > U_{critique}$ avec $21.5 > 8$, le test H_0 est significatif. Et les valeurs de X ont tendance à être identique à Y .

Pour se prêter à l'exercice et dans l'éventualité où $n_x > 20$ et $n_y > 20$, le calcul de μ_u est :

$$\mu_u = \frac{n_x n_y}{2} = \frac{7 * 7}{2} = 24.5 \quad (\text{D2.6})$$

La variance σ_u :

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1)}{12}} \quad (\text{D2.7})$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{7 * 7 (7 + 7 + 1)}{12}} = \sqrt{\frac{735}{12}} = \sqrt{61,25} = 7,826$$

Le calcul de Z est :

$$Z = \frac{(U - \mu_u)}{\sigma_u} = \frac{(28 - 24,5)}{7,826} = 0,4472 \quad (\text{D2.8})$$

Avec la valeur de $|Z| < 1.96$, l'hypothèse d'égalité H_0 est significatif.

Annexe E. **Table de références statistiques**

E1.1 Table de la loi normale centrée réduite

Pour la lecture de gauche à droite, en jaune souligné, $P(Z > 1,96) = 0,025$

Tableau 20 : Table de la loi normale centrée réduite

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990

E1.2 Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance z=95 %

Tableau 21 : Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance z=95%

		Niveau de confiance 95% z= 1,96									
		Marge d'erreur									
p	q=1-p	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
0,0	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,9	3 457	864	384	216	138	96	71	54	43	35
0,2	0,8	6 147	1 537	683	384	246	171	125	96	76	61
0,3	0,7	8 067	2 017	896	504	323	224	165	126	100	81
0,4	0,6	9 220	2 305	1 024	576	369	256	188	144	114	92
0,5	0,5	9 604	2 401	1 067	600	384	267	196	150	119	96
0,6	0,4	9 220	2 305	1 024	576	369	256	188	144	114	92
0,7	0,3	8 067	2 017	896	504	323	224	165	126	100	81
0,8	0,2	6 147	1 537	683	384	246	171	125	96	76	61
0,9	0,1	3 457	864	384	216	138	96	71	54	43	35
1,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

E1.3 Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance z=99 %

Tableau 22 : Table des tailles n des échantillons pour un niveau de confiance z=99 %

		Niveau de confiance 95% z= 2,57									
		Marge d'erreur									
p	q=1-p	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
0,0	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,9	5 944	1 486	660	372	238	165	121	93	73	59
0,2	0,8	10 568	2 642	1 174	660	423	294	216	165	130	106
0,3	0,7	13 870	3 468	1 541	867	555	385	283	217	171	139
0,4	0,6	15 852	3 963	1 761	991	634	440	324	248	196	159
0,5	0,5	16 512	4 128	1 835	1 032	660	459	337	258	204	165
0,6	0,4	15 852	3 963	1 761	991	634	440	324	248	196	159
0,7	0,3	13 870	3 468	1 541	867	555	385	283	217	171	139
0,8	0,2	10 568	2 642	1 174	660	423	294	216	165	130	106
0,9	0,1	5 944	1 486	660	372	238	165	121	93	73	59
1,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

E1.4 Table de Mann-Whitney pour un niveau de confiance $\alpha = 0.025$ et $\alpha = 0.05$

Tableau 23 : Table de Mann-Whitney pour un niveau de confiance $\alpha=0.025$ et $\alpha=0.05$

440 Statistical Tables

Table A-5 Critical U-values of the Mann-Whitney distribution ($\alpha = .025$ and $\alpha = .05$)

n_1	α	n_2																	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	.025	0	0	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9
	.05	1	1	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11	12
4	.025	0	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	10	11	12	12	13	14	15
	.05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19
5	.025	1	2	3	4	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	18	19	20	21
	.05	2	3	5	6	7	9	10	12	13	14	16	17	19	20	21	23	24	26
6	.025	2	3	4	6	7	9	11	12	14	15	17	18	20	22	23	25	26	28
	.05	3	4	6	8	9	11	13	15	17	18	20	22	24	26	27	29	31	33
7	.025	2	4	6	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35
	.05	3	5	7	9	12	14	16	18	20	22	25	27	29	31	34	36	38	40
8	.025	3	5	7	9	11	14	16	18	20	23	25	27	30	32	35	37	39	42
	.05	4	6	9	11	14	16	19	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	48
9	.025	3	5	8	11	13	16	18	21	24	27	29	32	35	38	40	43	46	49
	.05	5	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55
10	.025	4	6	9	12	15	18	21	24	27	30	34	37	40	43	46	49	53	56
	.05	5	8	12	15	18	21	25	28	32	35	38	42	45	49	52	56	59	63
11	.025	4	7	10	14	17	20	24	27	31	34	38	41	45	48	52	56	59	63
	.05	6	9	13	17	20	24	28	32	35	39	43	47	51	55	58	62	66	70
12	.025	5	8	12	15	19	23	27	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70
	.05	6	10	14	18	22	27	31	35	39	43	48	52	56	61	65	69	73	78
13	.025	5	9	13	17	21	25	29	34	38	42	46	51	55	60	64	68	73	77
	.05	7	11	16	20	25	29	34	38	43	48	52	57	62	66	71	76	81	85
14	.025	6	10	14	18	23	27	32	37	41	46	51	56	60	65	70	75	79	84
	.05	8	12	17	22	27	32	37	42	47	52	57	62	67	72	78	83	88	93
15	.025	6	11	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	71	76	81	86	91
	.05	8	13	19	24	29	34	40	45	51	56	62	67	73	78	84	89	95	101
16	.025	7	12	16	22	27	32	38	43	48	54	60	65	71	76	82	87	93	99
	.05	9	15	20	26	31	37	43	49	55	61	66	72	78	84	90	96	102	108
17	.025	7	12	18	23	29	35	40	46	52	58	64	70	76	82	88	94	100	106
	.05	10	16	21	27	34	40	46	52	58	65	71	78	84	90	97	103	110	116
18	.025	8	13	19	25	31	37	43	49	56	62	68	75	81	87	94	100	107	113
	.05	10	17	23	29	36	42	49	56	62	69	76	83	89	96	103	110	117	124
19	.025	8	14	20	26	33	39	46	53	59	66	73	79	86	93	100	107	114	120
	.05	11	18	24	31	38	45	52	59	66	73	81	88	95	102	110	117	124	131
20	.025	9	15	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	99	106	113	120	128
	.05	12	19	26	33	40	48	55	63	70	78	85	93	101	108	116	124	131	139

Source: Verdooren, L. R. (1963). Extended tables of critical values for Wilcoxon's test statistic. *Biometrika*, 50(1/2), 177-186.

Note. To reject the null hypothesis at the level of significance α , the critical value of U provided in this table must be greater than the computed value of U (the smaller number of U_1 and U_2 — see Formulas 12.1 and 12.2, respectively, in Chapter 12). Keep in mind that (a) $\alpha = .025$ is used for one-sided test with $\alpha = .025$ or two-sided test with $\alpha = .05$, and (b) $\alpha = .05$ is used for one-sided test with $\alpha = .05$ or two-sided test with $\alpha = .10$.

