

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Eng.

PAR
Gilbert MIGIRDITSIAN

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DU RÉSEAU DE TRANSPORT
D'ÉLECTRICITÉ D'HYDRO-QUÉBEC TRANSÉNERGIE EN FONCTION DE LA
PÉRÉNITÉ DU RÉSEAU ET LA MAINTENANCE BASÉE SUR LA FIABILITÉ

MONTREAL, LE 25 NOVEMBRE 2009

© GILBERT MIGIRDITSIAN, 2009

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Monsieur Antoine Tahan, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Monsieur Jean-Pierre Kenné, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Monsieur Michel Rioux, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Monsieur Éric David, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 23 OCTOBRE 2009

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

L'entreprise Hydro-Québec exploite des réseaux de transport et de distribution d'électricité qui sont utilisés pour acheminer l'énergie produite des différentes centrales de production vers les grands centres de consommation. La maintenance d'un réseau d'électricité, que ce soit au niveau du transport ou de la distribution, a souvent été basée selon des critères globaux établis par les différents manufacturiers. Par conséquent, la maintenance effectuée a souvent été curative ou préventive systématique; en d'autres mots, non prédictive. Les remplacements effectués sont dans la majorité des cas selon des inspections visuelles de la part des ouvriers à pied d'œuvre sur le réseau. L'objectif de cette étude est de présenter une méthode de planification de la maintenance basée sur un concept prédictif. Les données historiques provenant du réseau d'Hydro-Québec sont traitées pour extraire un modèle global pour la fiabilité et la disponibilité opérationnelle. Notre approche vise à court terme, l'amélioration de la planification des opérations de maintenance et par ce mémoire, offrir au gestionnaire un outil de simulation lui permettant d'étudier et envisager différents scénarios pour assurer la pérennité du réseau.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier M. Antoine Tahan, mon directeur de recherche, pour son approche patiente et pour la grande disponibilité qu'il offre pour un étudiant à la maîtrise travaillant à temps plein. Également, j'adresse un remerciement à M. Jean-Pierre Kenné, mon codirecteur pour sa disponibilité et son implication.

J'aimerais également remercier Hydro-Québec pour avoir fourni les données requises pour effectuer cette étude et plus particulièrement la bibliothèque d'Hydro-Québec pour avoir offert leur soutien dans la recherche documentaire de cette étude.

Finalement, j'aimerais particulièrement remercier mon épouse Reena Pinejian pour tout son support et son encouragement dans ce projet. Sans son soutien journalier, jamais je n'y serais arrivé.

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE PRÉDICTIF DU RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ D'HYDRO-QUÉBEC TRANSÉNERGIE EN FONCTION DE LA PÉRÉNITÉ DU RÉSEAU ET LA MAINTENANCE BASÉE SUR LA FIABILITÉ

GILBERT MIGIRDITSIAN

RÉSUMÉ

Lorsqu'on compare les performances économiques de la maintenance prédictive avec celles de la maintenance préventive systématique, un aspect en particulier devient d'une importance primordiale : les prédictions des durées de vie des équipements. Une maintenance dite préventive systématique est basée sur les recommandations d'un manufacturier (fiabilité théorique) alors qu'une maintenance prédictive est basée principalement sur l'historique associé à l'état de l'équipement identifié à partir de mesures quantitatives d'indicateurs qui reflètent l'amplitude et la nature de dégradation de l'équipement (fiabilité opérationnelle). La maintenance prédictive d'un réseau de transport d'électricité débute avec une analyse des données historiques de défaillance menant à un modèle mathématique. Généralement, la distribution de Weibull est employée pour modéliser le comportement statistique de la fiabilité. Les résultats obtenus par une telle analyse sont par la suite utilisés pour prédire le comportement d'un composant, d'un sous-système ou un système. Dans le cas du présent projet, nous employons les données historiques du réseau et nous tenterons d'identifier des modèles de fiabilité pour les différents composants. Par la suite, des modèles à une échelle plus grande seront obtenus par simulation pour prédire la disponibilité opérationnelle du réseau. Ces modèles serviront comme base d'analyse pour optimiser les opérations de maintenance et la politique de remplacement des différents équipements du réseau.

DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE MODEL OF HYDRO-QUÉBEC'S ELECTRICITY TRANSPORTATION GRID BASED ON THE LONGEVITY OF THE GRID AND MAINTENANCE BASED ON RELIABILITY

GILBERT MIGIRDITSIAN

ABSTRACT

When comparing the economic performance of predictive maintenance versus systematic preventative maintenance, one aspect in particular is of paramount importance: the lifetime prediction of equipment. Systematic preventive maintenance is based on the recommendations of a manufacturer (reliability theory), while predictive maintenance is primarily based on the history associated with the state of the equipment or on quantitative measures of indicators reflecting the deterioration of the equipment (operational reliability). Predictive maintenance of an electricity transmission network begins with an analysis of historical failure data leading to a mathematical model. Typically, the Weibull distribution is used to model the statistical behavior of reliability. The results of this analysis are then used to predict the behavior of a component, a subsystem, or system. In the case of this study, we use the historical data of the network and will attempt to identify models of reliability for the various components. Thereafter, models on a larger scale will be obtained by simulation to predict the readiness of the network. These models serve as a basis for analysis to optimize the maintenance and replacement policy of network equipment.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE L'ÉTAT DE L'ART DU DOMAINE	8
1.1 Introduction.....	8
1.2 Notions de fiabilité.....	11
1.2.1 Définition de la fiabilité	11
1.2.2 Méthodes analytique pour l'étude de la fiabilité.....	15
1.2.2.1 Analyse statistique des durées de vie d'équipements	15
1.2.2.2 Fiabilité prévisionnelle.....	17
1.2.2.3 Décomposition par schéma en blocs ou par arbre de défaillance ...	17
1.2.2.4 Conception pour la fiabilité (DFR).....	22
1.2.2.5 Chaîne de Markov et arbres de défaillances	22
1.2.2.6 Analyse AMDEC (FMEA)	25
1.2.3 La distribution de Weibull	28
1.3 Équipements étudiés dans le cadre de cette maîtrise	33
1.3.1 Définition des équipements.....	33
1.4 Méthodes alternatives à la fiabilité prévisionnelle.....	37
1.5 Conclusion	39
CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE LA LOI DE LA FIABILITÉ	40
2.1 Introduction.....	40
2.2 Méthodologie de traitement des données.....	40
2.2.1 Lien entre l'intervalle de confiance du PDF aux paramètres β et η	42
2.2.2 Estimation des probabilités avec un estimateur à vraisemblance maximale (MLE) avec une distribution Weibull à trois paramètres.....	48
2.2.3 Détermination des paramètres par estimation des moindres carrés (<i>Least Square Parameter Estimation</i> – LSPE).....	51
2.3 Exemple d'application	55
2.4 Conclusion	56
CHAPITRE 3 ANALYSE DES DONNÉES.....	57
3.1 Introduction.....	57
3.2 Analyse des données de TransÉnergie.....	57
3.3 Structure des requêtes Microsoft Access®	61
3.4 Résultat de l'analyse des données de TransÉnergie	64
3.5 Conclusion	69
CHAPITRE 4 PRÉDICTION DE LA FIABILITÉ DES SYSTÈMES COMPLEXES ET RÉPARABLES D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT	70
4.1 Introduction.....	70
4.2 Types de schémas unifilaires	70
4.3 Simulation de la disponibilité des configurations de TransÉnergie.....	72

4.3.1	Introduction au logiciel Raptor®	72
4.3.2	Entrée de données pour la simulation	73
4.3.3	Simulations des configurations courantes de TransÉnergie	74
4.3.4	Simulation d'un poste de transport	80
4.3.5	Validation du modèle	86
4.4	Conclusion	87
CONCLUSION.....		88
RECOMMANDATIONS.....		89
ANNEXES.....		91
BIBLIOGRAPHIE.....		175

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Tableau AMDEC25
Tableau 1.2	Grille d'évaluation des critères 'Fréquence', 'Gravité' et 'Détection'26
Tableau 2.1	Grille de comparaison entre les méthodes55
Tableau 3.1	États disponibles à travers le champ « <i>Code_Util</i> »59
Tableau 3.2	Inventaire d'appareillage électrique par « GENRE »60
Tableau 3.3	Répertoire des noms d'équipements62
Tableau 3.4	Analyse préliminaire des équipements de TransÉnergie66
Tableau 3.5	Niveau d'erreur associé aux équipements analysés67
Tableau 3.6	Identification des paramètres Weibull68
Tableau 4.1	Résultat des simulations Raptor [®] pour les différentes configurations79
Tableau 4.2	Résultat des simulations pour le poste 230kV-120kV84

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Courbe baignoire.....12
Figure 1.2	États d'un système irréparable13
Figure 1.3	États d'un système réparable14
Figure 1.4	Approche statistique pour la création d'une politique de remplacement...16
Figure 1.5	Schéma en blocs (série)18
Figure 1.6	Schéma en blocs (parallèle)19
Figure 1.7	Redondance de haut niveau20
Figure 1.8	Redondance de bas niveau21
Figure 1.9	Processus de conception pour la fiabilité.....22
Figure 1.10	Graphique d'état d'une composante22
Figure 1.11	États Markoviens d'un système à deux composantes24
Figure 1.12	Probabilité de défaillance sur une période t28
Figure 1.13	Effet de la modification du facteur de forme β30
Figure 1.14	Effet de la modification du facteur d'échelle η31
Figure 1.15	Effet de la modification du facteur de localisation γ31
Figure 2.1	Représentation graphique de $F(t)$ à des valeurs différentes de β et η44
Figure 2.2	Estimation du résultat du MLE d'une distribution GEV50
Figure 2.3	Min. de la somme des carrés (verticale) de la méthode LSPE.....52
Figure 2.4	Min. de la somme des carrés (horizontale) de la méthode LSPE52
Figure 3.1	Hiérarchie de la base de données d'Hydro-Québec TransÉnergie57
Figure 3.2	Conception de la requête globale63
Figure 3.3	Conception de la requête d'un centre de distribution (exemple).....64

Figure 4.1	Configurations courantes du réseau de TransÉnergie.....	71
Figure 4.2	Entrée de données dans Raptor®	73
Figure 4.3	Configuration Raptor® d'un disjoncteur et demi	75
Figure 4.4	Configuration Raptor® de la simulation d'un disjoncteur et demi.....	76
Figure 4.5	Simulation Monte-Carlo d'un disjoncteur et demi	77
Figure 4.6	Résultat de la simulation Monte-Carlo pour un disjoncteur et demi	78
Figure 4.7	Schéma électrique du poste 230kV-120kV.....	81
Figure 4.8	Schéma électrique des sous-systèmes (poste 230kV-120kV).....	82
Figure 4.9	Exemple d'une simulation transférée d'un sous-système à un autre	83
Figure 4.10	Simulation Monte-Carlo finale pour le poste 230kV-120kV	85
Figure 4.11	Modèle de fiabilité du poste 230kV-120kV.....	85

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADP	Analyseur de décharge partielle
AGD	Analyse des gaz dissous
AMDEC	Analyse des modes de défaillance, de leur effets et de leur criticité
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CDF	<i>Cumulative Density Function</i>
CED	Centre d'exploitation de distribution
DPTSO	Direction – Stratégies et services techniques d'Hydro-Québec TransÉnergie
DP	Décharge partielle
EDF	Électricité de France
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
IMAGINE	Implantation de la Maintenance Automatisée et Gestion des Informations Numériques des Équipements
LSPE	<i>Least squares parameter estimation</i>
MDT	<i>Mean Down Time</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimates</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>

MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
MUT	<i>Mean Up Time</i>
NERC	<i>North American Reliability Council</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PMRS	Planification de la maintenance du réseau souterrain
PPM	Parties par million

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

t	Temps (heure, jours, semaine, mois, année)
β	Facteur de forme d'une distribution Weibull
β^-	Facteur de forme d'une distribution Weibull (limite inférieure d'un intervalle de confiance de 95%)
β^+	Facteur de forme d'une distribution Weibull (limite supérieure d'un intervalle de confiance de 95%)
γ	Facteur de localisation d'une distribution Weibull
γ^-	Facteur de localisation d'une distribution Weibull (limite inférieure d'un intervalle de confiance de 95%)
γ^+	Facteur de localisation d'une distribution Weibull (limite supérieure d'un intervalle de confiance de 95%)
η	Facteur d'échelle d'une distribution Weibull
η^-	Facteur d'échelle d'une distribution Weibull (limite inférieure d'un intervalle de confiance de 95%)
η^+	Facteur d'échelle d'une distribution Weibull (limite supérieure d'un intervalle de confiance de 95%)
$R(t)$	Fiabilité
λ_i	Taux de défaillance
$f(t)$	<i>Fonction d'une densité de probabilité / Probability Density Function (PDF)</i>
$\hat{f}$	Approximation de la PDF

$F(t)$ *Fonction de probabilité cumulative / fonction de la probabilité de défaillance / Cumulative Density Function (CDF)*

w_i Poids des données dans une approximation des moindres carrés

INTRODUCTION

Mise en contexte

La planification de la maintenance préventive systématique ou conditionnelle est un sujet d'importance pour toute entreprise exploitant un parc d'équipements quand elle possède une grande quantité d'équipements stratégiques et de natures différentes. Cette étude a pour domaine d'application la fiabilité et la pérennité du réseau de transport régional d'Hydro-Québec TransÉnergie.

Hydro-Québec produit, transporte et distribue de l'électricité. L'entreprise exploite essentiellement des énergies renouvelables, plus particulièrement l'hydroélectricité. Elle est active dans la recherche scientifique dans les domaines reliés à l'énergie et s'intéresse à l'efficacité énergétique. Elle développe et commercialise des technologies issues de ses recherches¹.

Les activités de transport et de distribution d'énergie sont réglementées au Québec. L'entreprise comprend quatre divisions :

- Hydro-Québec Production produit l'électricité et la commercialise sur les marchés de gros au Québec et hors Québec;
- Hydro-Québec TransÉnergie exploite le plus vaste réseau de transport d'électricité de l'Amérique du Nord pour le bénéfice de ses clients au Québec et hors Québec;
- Hydro-Québec Distribution assure aux québécois un approvisionnement fiable en énergie. Au-delà du volume annuel d'électricité patrimoniale fourni par Hydro-Québec

¹ <http://www.hydroquebec.com/profil/bref.html>, consulté le 8 octobre 2008

Production, elle s'approvisionne sur les marchés. Elle s'emploie à ce que sa clientèle utilise efficacement l'énergie électrique;

- Hydro-Québec Équipement et la Société d'énergie de la Baie James, filiale d'Hydro-Québec, sont les maîtres d'œuvre des projets de construction d'Hydro-Québec Production et d'Hydro-Québec TransÉnergie.

Problématique

Hydro-Québec TransÉnergie est un chef de file dans la conception, l'exploitation et la maintenance de réseaux de transport d'électricité. Cette division d'Hydro-Québec est reconnue mondialement pour la fiabilité de sa conduite de réseaux². Dans le contexte du Québec, Hydro-Québec TransÉnergie a comme rôle, le transport de l'électricité produite par Hydro-Québec Production et de l'acheminer soit directement à des clients ou d'assurer la livraison à Hydro-Québec Distribution qui s'assure d'acheminer l'énergie jusqu'au client.

Avec le développement technologique et l'accroissement des contraintes économiques et environnementales au cours des dernières années, la fiabilité d'un réseau électrique devient encore plus critique. À titre d'exemple, il est estimé que le transit d'une capacité de production de l'ordre de 300 MW demande approximativement 73000 disjoncteurs, d'où l'importance de suivre tous les composants (ou sous-systèmes) d'une manière adéquate (Lu, Du et Luo, 2007).

Toute défaillance ou arrêt non planifié d'un équipement stratégique du réseau du transport se traduit souvent par des coûts importants pour l'entreprise. Or, ce réseau a été construit en grande partie durant les années 1960. Son âge moyen est demeuré sensiblement le même

² <http://www.hydroquebec.com/profil/bref.html>, consulté le 8 octobre 2008

durant les années 1970-1980 simplement par accroissement. L'extension du réseau a maintenu l'âge moyen des équipements quasi stable durant cette période. Depuis les années 1990, le réseau a subi un vieillissement. Ce dernier se traduira inéluctablement par un taux accru de défaillances si une politique efficiente de maintenance et de remplacement systématique des composants n'est pas adoptée. Il est donc indéniable que cette politique soit la pierre angulaire de la pérennité et la disponibilité du transport d'énergie électrique.

Dans ce contexte, l'identification et la modélisation des taux de défaillance opérationnels (et pas théoriques) des composants électromécaniques s'avère être une étape incontournable dans la planification de la maintenance. À Hydro-Québec TransÉnergie, cette planification est actuellement effectuée avec des échéanciers spécifiques et systématiques. On parle donc d'une maintenance préventive systématique. Des inspections ont lieu à différentes périodes préétablies selon le type d'équipement examiné. Si un remplacement d'équipement est requis, il est effectué sur les lieux et l'équipement est mis au rebut ou transféré à un atelier où une remise à neuf est effectuée. Bien que cette approche assure actuellement un réseau relativement fiable et fonctionnel, elle s'avère inadéquate sur le plan d'efficiencia et de compétitivité qui est maintenant des critères essentiels à travers toutes les activités de toutes les divisions d'Hydro-Québec.

Également, bien que la procédure à suivre pour la maintenance préventive soit claire et selon un échéancier précis, cette dernière n'est malheureusement pas établie selon l'historique de défaillances des équipements. La planification de la maintenance est effectuée selon une approche qualitative et non quantitative. Elle est donc approximative. Bref, la maintenance n'est pas basée sur la fiabilité opérationnelle de l'équipement, mais plutôt sur des recommandations des équipementiers ou des observations qualitatives *ad hoc* sans tenir en compte des multiples conditions d'opérations (climat, utilisation, montage, etc.).

Présentement, dans le cas où un certain équipement est désigné comme « *ayant des problèmes de fiabilité* », un plan de maintenance plus détaillé est alors défini dans la base de données Maximo® d'Hydro-Québec (Déry et Garant, 2006). Cette base de données est

questionnée régulièrement par les gestionnaires assignés à la maintenance et leur charge de travail est ainsi bâtie.

Le reproche principal de la pratique actuelle est qu'un équipement désigné pour un transfert au « *rebut* » n'est pas nécessairement à la fin de sa vie utile. La décision de remplacer ou non, relève souvent des équipes de métier sans tenir compte du contexte élargi des activités de l'entreprise gérées par l'équipe de planification de la maintenance.

Depuis le début du présent projet de recherche en 2007, Hydro-Québec TransÉnergie a lancé un grand projet **IMAGINE** (**I**mplantation de la **M**aintenance **A**utomatisée et **G**estion des **I**nformations **N**umériques des **É**quipements) qui a précisément le but de remédier à la lacune mentionnée précédemment. Les conclusions de plusieurs projets pilotes ont mené à la mise en place de l'équipement nécessaire pour effectuer une acquisition de données à distance sur les équipements stratégiques et ont permis ainsi une transition graduelle d'une maintenance systématique vers une maintenance conditionnelle et proactive. Cet engagement, étant à long terme, est prévu pour une revue complète lors du prochain dépôt du Plan stratégique (Landry, 2009). De plus, dans ses activités d'exportation vers les voisins immédiats du Québec, TransÉnergie a également adopté plusieurs normes en matière de fiabilité tel que défini par *North American Reliability Council* (NERC) suite à un dépôt officiel à la Régie de l'énergie du Québec (Nouvelle réglementation, 2009).

Objectifs

En collaboration avec la Direction – Stratégies et services techniques (DPTSO) d'Hydro-Québec TransÉnergie, le présent mémoire présente un résumé des travaux effectués dans le cadre d'une maîtrise en milieu industriel. Le déroulement des études a été effectué à temps partiel sur une période de trois ans.

Le projet propose une modélisation de la fiabilité opérationnelle de l'équipement basée sur l'historique des défaillances tel qu'enregistré sur le réseau de transport régional d'Hydro-Québec. Les objectifs spécifiques de ce mémoire de maîtrise sont les suivants :

- Uniformiser et coder les données extraites de la base de données Maximo® relative au suivi historique du parc d'équipements de l'entreprise afin de permettre une analyse fiable et approfondie;
- Présenter un sommaire sur les estimés statistiques (par exemple, le calcul de l'âge de la mise au rebut, la date de mise en service, la date de changement d'état vers le rebut, etc.);
- Identifier un modèle mathématique consistant et non biaisé pour décrire la loi de fiabilité de chaque catégorie d'équipement. Dans ce cadre, la distribution Weibull à trois paramètres (les facteurs de forme, d'échelle et de localisation) sera privilégiée;
- Déterminer le niveau d'incertitude de la courbe de survie des équipements ayant un niveau de confiance jugé adéquat;
- Définir un nouveau taux de mise au rebut par type d'équipement;
- Recommander à l'entreprise des actions et proposer des suggestions dans le but d'optimiser leur politique de maintenance.

Limites de l'étude

Cette étude ne couvre pas les deux éléments suivants :

- Comme il n'existe aucun moyen efficace de déterminer si un équipement a été mis au rebut suite à une réelle non-conformité d'inspection ou un défaut, aucune correction ne sera effectuée aux données brutes utilisées dans l'analyse. Pour nos analyses, une donnée « rebut » sera traitée comme une défaillance. Ceci a pour effet d'altérer les estimateurs statistiques. Nos modèles qui seront identifiés seront par conséquent plus conservateurs qu'optimistes.
- Les données utilisées sont considérées, par hypothèse, comme étant exactes afin de pouvoir présenter la méthodologie de l'analyse. Donc, aucun développement d'un nouveau plan de maintenance spécifique n'est prévu à travers ce mémoire.

Structure du mémoire

Ce mémoire sera divisé en 4 chapitres qui couvrent l'état de l'art, analysent les données de TransÉnergie et appliquent les différentes méthodes d'analyse sur des exemples concrets à Hydro-Québec.

Le premier chapitre présente une analyse de la littérature et l'état actuel de l'art du domaine. Dans ce chapitre, il sera question essentiellement des notions de fiabilité incluant la définition d'une distribution de Weibull où cet outil a été abondamment utilisé dans le traitement des données. De plus, une comparaison est effectuée entre les pratiques actuelles d'Hydro-Québec Distribution et celles d'Hydro-Québec TransÉnergie, car les approches envers la maintenance sont différentes dans les deux cas.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie de traitement utilisée avec les données d'Hydro-Québec TransÉnergie. L'analyse des données est détaillée, la structure des requêtes est présentée et, finalement, la méthodologie derrière l'estimation des paramètres y est exposée.

Le troisième chapitre présente l'analyse quantitative des données, la structure des requêtes programmées dans Microsoft Access® ainsi que les paramètres descriptifs du parc d'équipements du réseau de transport régional de TransÉnergie.

Finalement, le dernier chapitre est une étude de cas. Nous appliquons les différents concepts détaillés dans ce mémoire sur les données de TransÉnergie avec deux applications concrètes faisant part des activités d'Hydro-Québec.

Nous concluons le mémoire avec une synthèse de nos travaux et nos recommandations pour Hydro-Québec TransÉnergie.

CHAPITRE 1

REVUE DE L'ÉTAT DE L'ART DU DOMAINE

1.1 Introduction

Avec la progression des exigences de sécurité et de productivité dans les activités d'une entreprise, la pérennité des équipements devient un enjeu économique et sécuritaire incontournable. Plus spécifiquement, ceci vise les entreprises qui sont dans une démarche d'amélioration continue ou à la recherche d'une diminution des coûts globaux de production. Malheureusement, des coûts extravagants sont souvent associés aux interventions d'urgence sur des équipements, surtout ceux qui sont localisés dans des régions difficilement accessibles. C'est précisément le cas étudié dans le présent mémoire.

L'analyse de la fiabilité et de la disponibilité d'un équipement ou d'un système devient essentielle dans une multitude de domaines associés à l'ingénierie. Divers applications sont présentes quotidiennement dans notre société. Par exemple, les équipements du transport, de la santé et de la sécurité, les systèmes informatiques, les circuits électroniques, etc. Les modèles mathématiques issus de l'étude de la fiabilité trouvent même des applications en biométrie pour comprendre, par exemple, la propagation des tumeurs. De tous les modèles mathématiques employés, la distribution de *Weibull* demeure l'outil privilégié. Cette distribution 'caméléon' est d'une flexibilité grandement utile; elle permet de prédire, dans un sens probabiliste, le comportement d'un composant ou équipement en période de mortalité infantile, de maturité ou de vieillissement. C'est donc, sans surprise, que dans tout le développement du présent mémoire, nous avons adopté cette fonction. Bien que notre

champ d'étude dans ce mémoire est du domaine essentiellement électrique³, une modélisation effectuée dans un domaine différent : par exemple, l'utilisation d'une version modifiée à deux paramètres afin de modéliser la fissuration des composantes en céramiques. L'analogie entre un modèle Weibull utilisé d'un domaine à un autre est l'étude probabiliste du comportement de cet équipement à travers son cycle de vie. Il est donc clair que cet outil s'avère d'une grande utilité dans plusieurs domaines variés (Griggs et Yunlong, 2003).

Le processus de déterminer les critères de renouvellement d'un parc d'équipement est une analyse qui est à la fois complexe et effectué sur une longue période de temps. Une entreprise comme Hydro-Québec se doit d'être à l'affût du travail effectué par des entreprises œuvrant dans un domaine comme le leur. Un bon exemple est l'entreprise Électricité de France (EDF). Le travail d'EDF dans le domaine est bien connu et se reflète par leur très faible taux de panne. Selon EDF, leur taux de panne moyen est égal à 0.07 panne/heure pour la partie en amont du réseau de distribution et il est égal à 2.07 pannes/heure pour le réseau de distribution. Le total donne l'équivalent de 2.14 heures d'interruption de service pour l'année 2008 (Durée moyenne de coupure par client basse tension arrondie à la minute (2008-2009), 2009). Les critères de renouvellement d'EDF sont basés sur deux grandes catégories soit des critères qualitatifs et quantitatifs. L'aspect qualitatif comprend une analyse politique alors que l'aspect quantitatif comprend une analyse à la fois financière et technique. Afin de considérer la vétusté et l'obsolescence technologique, il est requis d'utiliser le **taux de défaillance constaté** ainsi que les coûts d'entretien associé à chaque équipement. Ces critères techniques sont par la suite associés à des critères qui sont de nature plus qualitative soit l'amélioration de la qualité du service et le souci d'équité entre les clients sans considération aux grandes disparités géographiques entre ces dernières. Ce dernier point reflète une situation typique et vécue au Québec et elle est régie par la loi

³ Pour les équipements électriques, il est d'usage d'employer la distribution exponentielle pour modéliser la loi de défaillance.

provinciale. Cet aspect est particulièrement reflété à travers les tarifs résidentiels uniformes de la clientèle à travers le territoire géographique du Québec (*Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes canadiennes et américaines*, 2008).

L'approche préconisée par EDF est d'identifier les points faibles sur leur réseau, de les classer en termes de probabilité de défaillance et de proposer des actions d'entretien à chaque point faible. Lorsqu'on considère la complexité associée à un réseau de transport ou de distribution d'électricité, il est nécessaire de faire appel à des outils probabilistes d'estimation de la fiabilité, car on fait face à un système qui est composé d'un grand nombre d'éléments hétérogènes compris à l'intérieur d'un système ouvert. Les différentes étapes associées à ce type d'analyse sont les suivantes :

1. Déterminer les critères qui seront utilisés pour chaque type d'équipement;
2. Analyser de manière quantitative chaque type d'équipement;
3. Déterminer les solutions d'entretien;
4. Préparer les procédures de maintenance appropriées.
5. Les étapes 2 à 4 seront répétées au besoin et en fonction de la fiabilité opérationnelle des équipements.

Comme ce type d'analyse dynamique comprend une certaine incertitude par rapport à l'analyse effectuée par le fabricant initial de l'équipement, il est également important de pouvoir présenter un intervalle de confiance par rapport à chaque élément traité dans l'analyse (Messenger et Turpin, 1993). L'analyse qui sera effectuée dans le cadre du présent projet de recherche sera, en grande partie, similaire à l'approche préconisée par EDF.

1.2 Notions de fiabilité

1.2.1 Définition de la fiabilité

La fiabilité d'un équipement à l'étude est considérée comme le niveau de confiance qui s'attache à un composant, un circuit ou un système pour son aptitude à fonctionner sans défaillance pendant une période de temps donnée et sous certaines conditions préalables (Grand dictionnaire terminologique de l'Office de la langue française (OLF), 2009). La fiabilité peut être de deux (2) types différents : une fiabilité qui est observée et une qui est prédite à partir d'une fonction de probabilité connue *a priori*. La première situation se produit lorsque la maintenance est effectuée, ou lorsque plusieurs composants identiques sont installés et une différence en termes de durée de vie peut être observée facilement sous des situations similaires (mêmes conditions d'utilisation). La deuxième situation est le sujet de cette étude. Dans ce cas, un historique de défaillances d'équipements est exploité pour construire des modèles statistiques cohérents et non biaisés. Ces derniers sont employés à leur tour pour prédire le taux de panne d'équipements qui sont toujours en service, le risque couru avant une opération de maintenance et d'autres indicateurs utiles pour un programme de gestion des risques (sécurité, économique, etc.).

Nous signalons au lecteur, qu'à ce stade, il est important de différencier un équipement qui fait défaut d'un équipement qui est réellement en panne (Komljenovic et Rioux, 2007). La nuance entre un équipement ayant fait défaut et un équipement en panne est d'une importance particulière dans cette étude. Ce fait est associé au fait que la politique de remplacement d'équipement selon un mode d'inspections suggérées par le manufacturier est différente d'une approche basée sur l'historique de défaillance de ce même équipement. De plus, les critères d'inspection varient selon l'emplacement où un équipement est installé et la criticité de l'application.

La fiabilité est quantifiée mathématiquement par la fonction qui exprime le taux de défaillance $\lambda(t); \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ [panne/unité de temps] et lorsque, représentée sur un graphique

du temps, la Figure 1.1 est généralement obtenue⁴. Cette figure illustre les différentes « périodes de vie » d'un équipement ou d'un système :

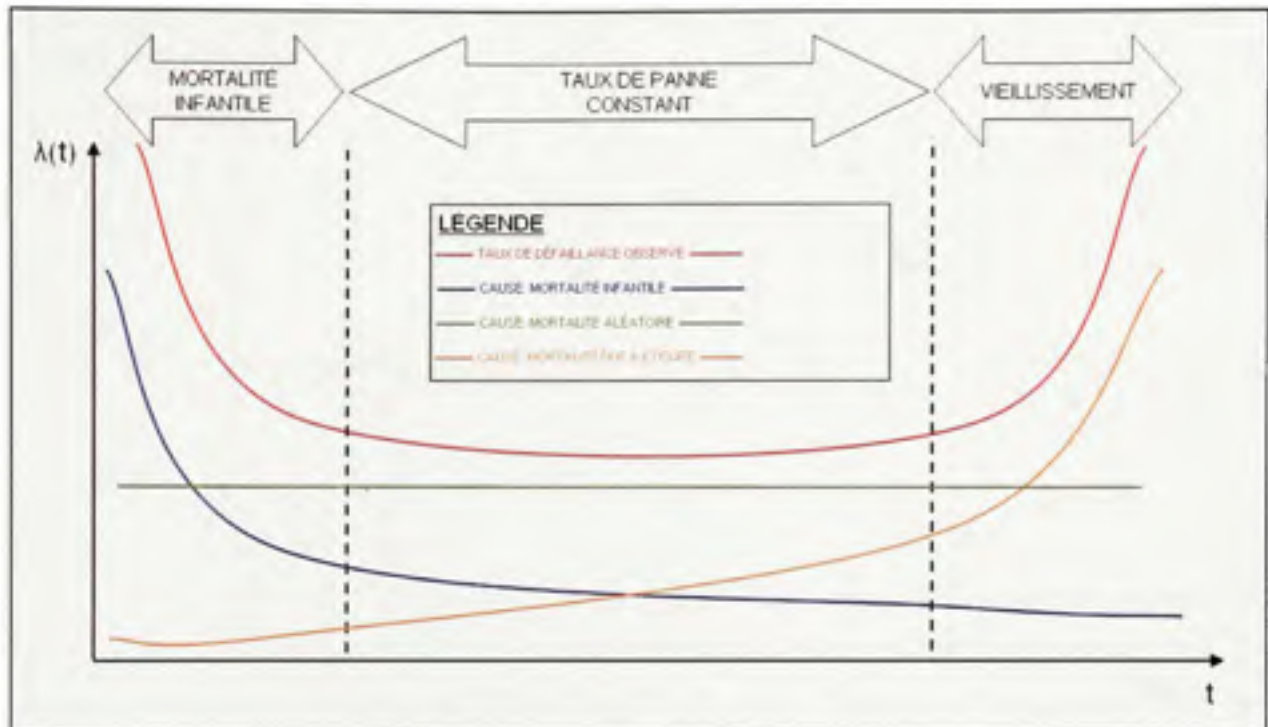


Figure 1.1 Courbe baignoire

Il existe deux types de systèmes soit **réparable** (dans ce cas, nous parlerons plutôt de la disponibilité ou de la fiabilité) et **irréparable** (nous parlerons dans ce cas de la non-fiabilité). L'effet de la maintenance est identifié par l'évaluation du temps où un système est en opération (*Up Time*) ou en panne (*Down Time*). L'activité de maintenance assure que le temps d'opération est prolongé et des tâches bien planifiées assurent que le temps d'arrêt est

⁴ La figure présentée est avant tout conceptuelle. Nous reconnaissons que certains types d'équipements peuvent avoir un comportement différent de celui qui est « typique ». Dans un souci de généralité, nous retenons le cas de cette courbe, car elle peut présenter pratiquement tous les périodes de vie d'un équipement en fonction.

minimisé. L'état d'un système irréparable et réparable est donné dans la Figure 1.2 et la Figure 1.3 respectivement (Lyonnet, 2006; Puccini, 2006).

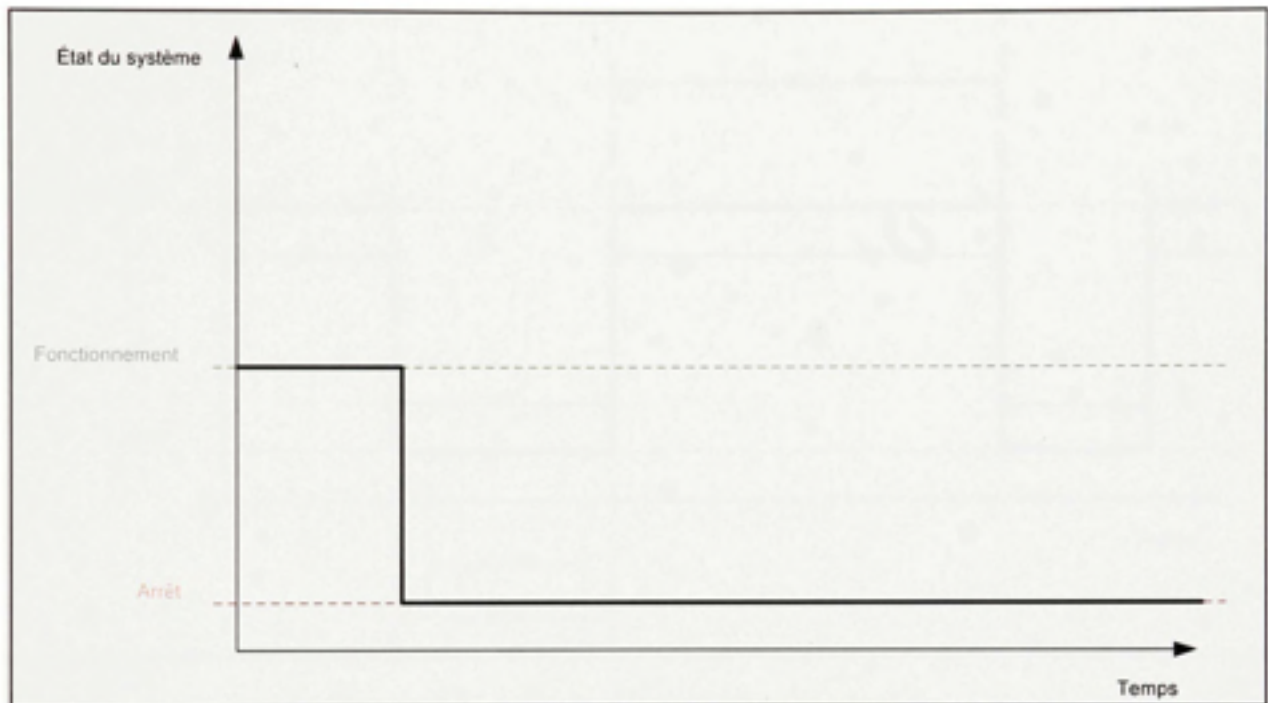


Figure 1.2 États d'un système irréparable

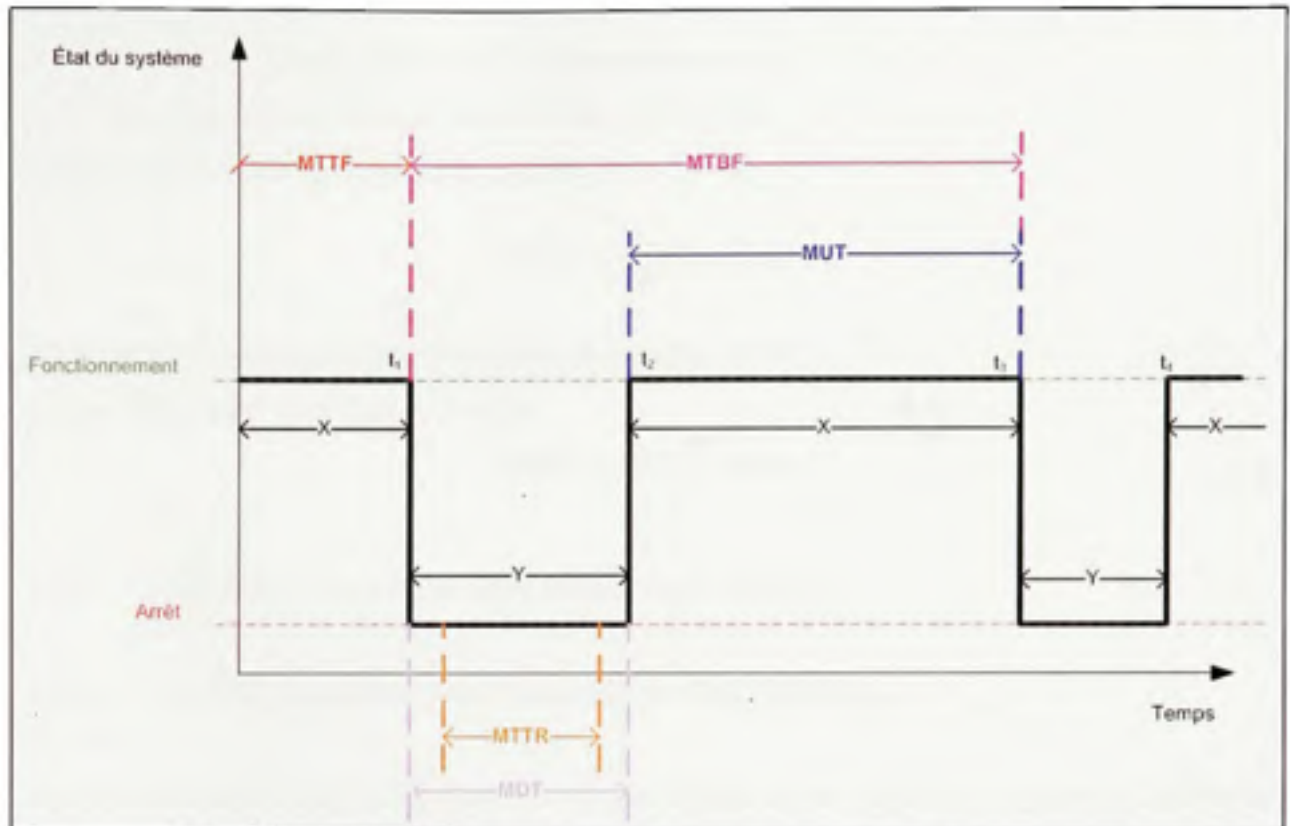


Figure 1.3 États d'un système réparable

Dans la Figure 1.3, les indicateurs $MTTF$, $MTBF$, MUT et MDT sont indiqués schématiquement. Il s'agit généralement d'estimateurs d'un comportement 'moyen', ou une 'espérance' dans le sens statistique. Nous traitons donc des espérances statistiques de quatre phénomènes.

Étant donné la fiabilité $R(t)$, le $MTTF$ (*Mean Time To Failure*) est défini comme le temps moyen où l'équipement est en opération avant qu'il ne tombe en panne. C'est une notion employée uniquement pour une composante remplaçable.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.1)$$

Le MUT (*Mean Up Time*) est défini comme le temps moyen où le système est en opération :

$$MUT = E(X_i) = \int_0^{t_i} X_i dt \quad (1.2)$$

Le *MDT* (*Mean Down Time*) est le temps moyen où le système est en panne ou à l'arrêt pour une raison de défaillance⁵ et le *MTTR* (*Mean Time To Repair*) est le temps moyen où le système est en réparation ($MTTR \leq MDT$) :

$$MTTR = E(Y_i) = \int_0^{t_i} Y_i dt \quad (1.3)$$

Dans le cas des composantes réparables, on emploie plutôt le (*Mean Time Between Failures*) qui est défini par l'équation ci-dessous.

$$MTBF = MUT + MTTR \quad (1.4)$$

1.2.2 Méthodes analytique pour l'étude de la fiabilité

1.2.2.1 Analyse statistique des durées de vie d'équipements

Une analyse statistique de la durée de vie des équipements permet d'établir une politique utile pour la détermination du nombre d'appareils de remplacement requis lorsqu'on considère un équipement en particulier. Par exemple, le cas étudié pour des transformateurs de puissance, la quantité de transformateurs à garder comme pièces de rechange dépend directement de la fiabilité établie par rapport à l'historique de l'appareil (Jongen et al., 2007). L'approche à préconiser pour l'analyse statistique est donnée dans la Figure 1.4.

⁵ Un temps d'arrêt planifié pour d'autres raisons (production, demande, etc.) doit être exclu du calcul.

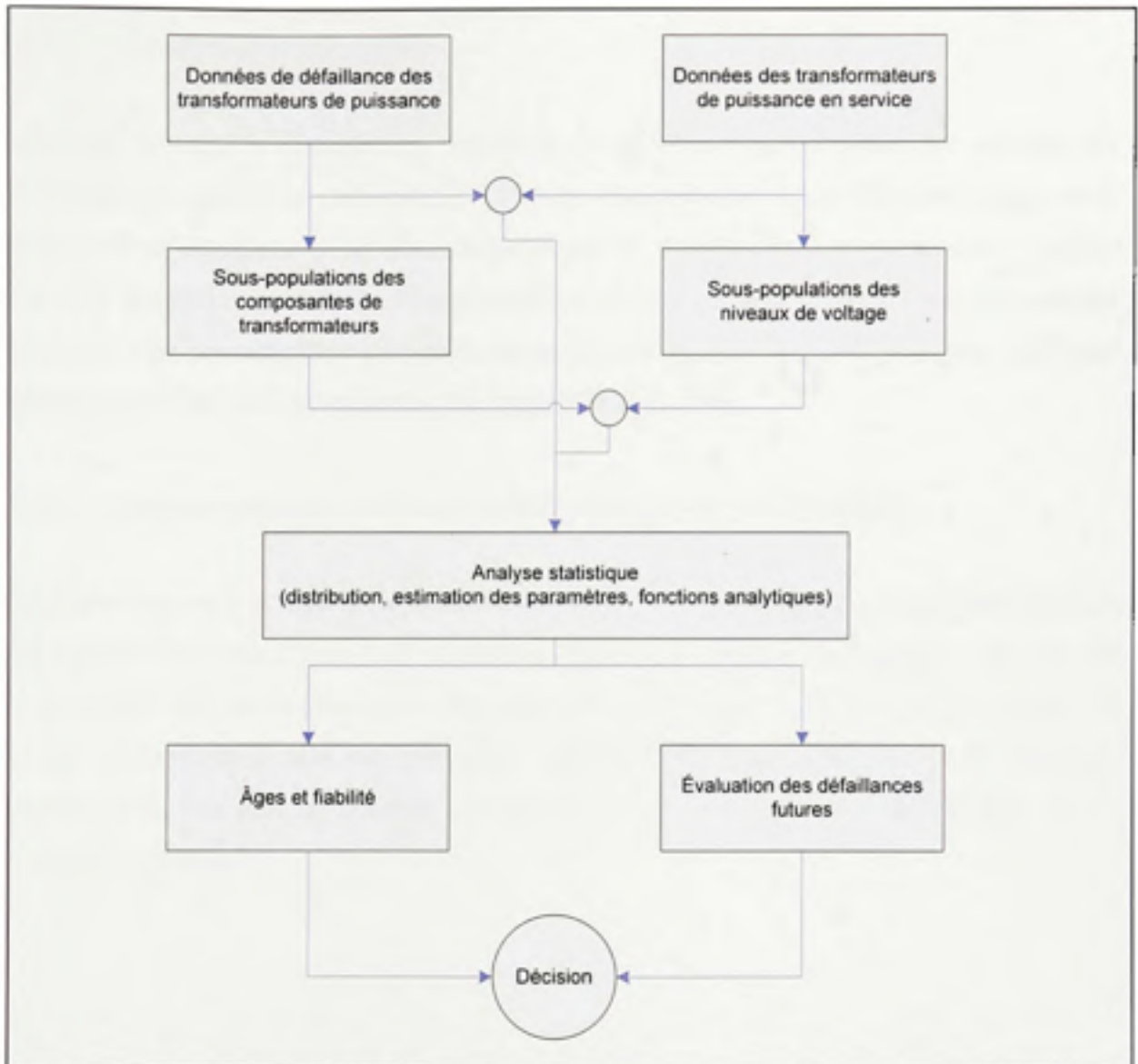


Figure 1.4 Approche statistique pour la création d'une politique de remplacement
(Jongen et al., 2007)

Cette approche est légèrement différente de celle qui est employée dans le présent projet de recherche. Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire est une approche microscopique par type d'équipements au lieu d'employer une approche macroscopique par type d'équipement critique uniquement tel que donné dans la Figure 1.4.

1.2.2.2 Fiabilité prévisionnelle

Lorsqu'un système à analyser est complexe et difficile à décomposer, une analyse par fiabilité prévisionnelle est parfois utile. Ce type d'analyse sert à identifier les composantes critiques d'un équipement et d'en déduire que la fiabilité de ces composantes permet d'estimer la fiabilité globale de l'équipement en entier. Ce type d'analyse est très pratique lorsqu'on a un sous-système particulièrement critique qui est simple à analyser seul mais difficile à analyser dans un contexte plus large (Puccini, 2006).

1.2.2.3 Décomposition par schéma en blocs ou par arbre de défaillance

Une hypothèse est à la base de cette méthode : toutes les composantes d'un système peuvent être représentées sous forme d'un schéma en blocs avec connexions logiques. Ce type de représentation est particulièrement utile dans des cas où une évaluation de la fiabilité de chaque composante a déjà été effectuée. Essentiellement, deux (2) types de scénarios peuvent avoir lieu soit de manière individuelle ou groupée : un système en série ou un système en parallèle⁶.

⁶ D'autres types de connexion et de schémas peuvent être envisagés : systèmes prioritaires, systèmes avec dispositif d'attente, etc. Nous avons, délibérément, omis de rentrer dans de tels détails. Le but étant de donner un aperçu général de l'état de l'art pour l'étude de fiabilité Lyonnet, Patrick. 2006. *Ingénierie de la fiabilité*. Lavoisier, 323 p.

, Puccini, Dominique. 2006. « Preliminary Supportability Trades-Off for A30X New Programme ». Blagnac, France, École Nationale d'Ingénieurs de Sainte-Étienne, 56 p.



Figure 1.5 Schéma en blocs (série)

Pour un système en série, des composantes indépendantes n'étant pas redondantes sont branchées ensemble. Dans ce type de configuration, si une seule composante tombe en panne, le système en entier tombe en panne. Pour ce système, la fiabilité du système en entier $R(t)$ est donnée par :

$$R(t) = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \quad (1.5)$$

Avec λ_s le taux de défaillance résultant :

$$\lambda_s = \prod_{i=1}^{i=n} \lambda_i \quad (1.6)$$

Si le taux de défaillance λ_i est constant, alors $\lambda_s = n\lambda$.

Pour un système en parallèle, des composantes indépendantes redondantes sont branchées ensemble. Donc, si le nombre de composantes augmente dans ce type de configuration, le système tombe en panne si, et seulement si, toutes les composantes tombent en panne et demeurent en panne sans réparation. Pour ce type de système, la fiabilité du système en entier $R(t)$ est donnée en fonction du nombre de composantes en cascade.

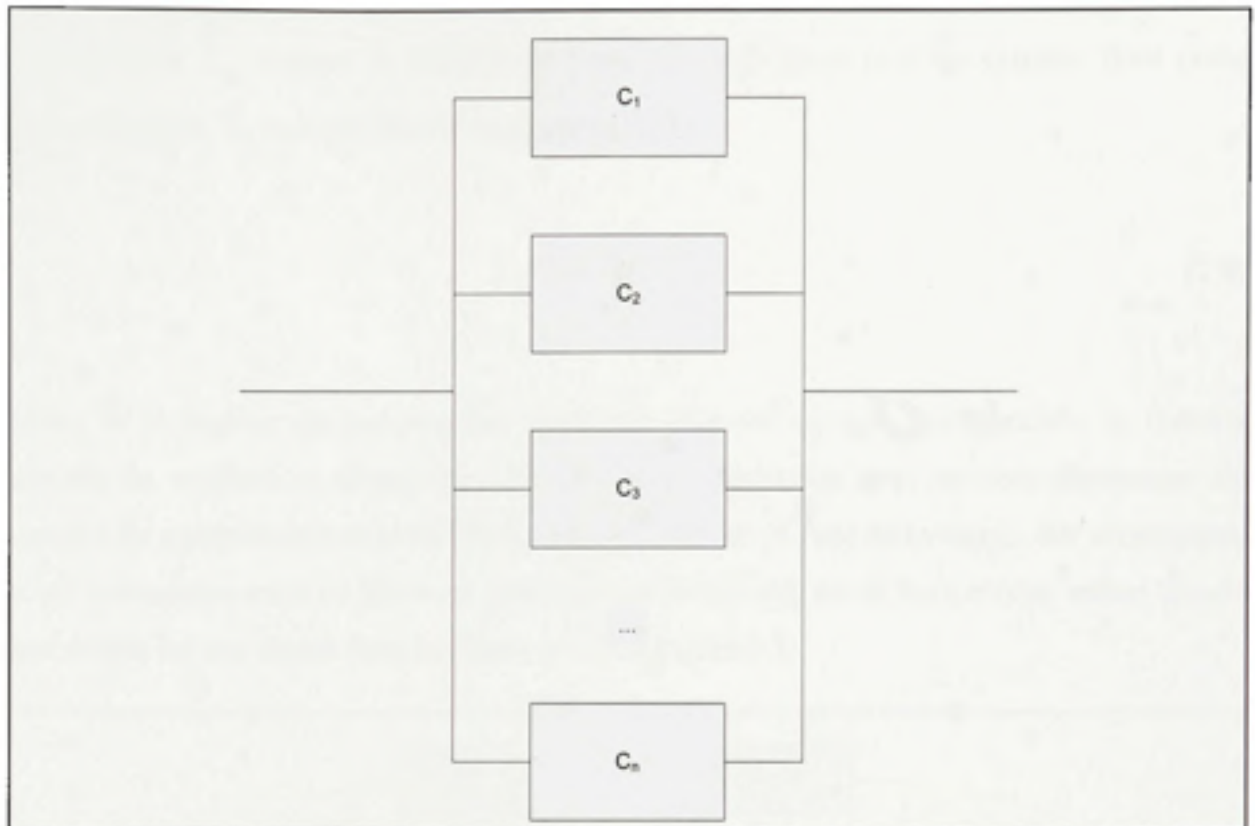
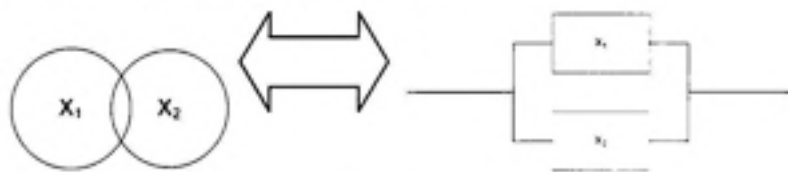


Figure 1.6 Schéma en blocs (parallèle)

Pour l'exemple de deux composantes en parallèle, l'équation qui définit la probabilité de fonctionnement avec deux systèmes exclusifs est :



$$R(t) = R_1 + R_2 - R_1 \times R_2 \quad (1.7)$$

Et,

$$\lambda_s = \frac{1}{R(t)} \times \frac{d}{dt}(R(t)) \quad (1.8)$$

Dans l'équation (1.8), λ_s s'applique uniquement si le taux de défaillance est constant. Dans le cas de N éléments en redondance, R_s indique la fiabilité du système final (avec

redondance), R_b indique la fiabilité de base, C_s indique le coût du système final (avec redondance) et C_b indique le coût du système de base.

$$N = \frac{R_s}{R_b} = \frac{C_s}{C_b} \quad (1.9)$$

Donc, si le nombre de composantes augmente dans ce type de configuration, la fiabilité globale du système va augmenter et l'inverse est également vrai où toute diminution du nombre de composantes en parallèle diminue la fiabilité globale du système. Par conséquent, toute redondance mise en place est plus efficace lorsqu'elle est de haut niveau versus une de bas niveau tel que donné dans la Figure 1.7 et la Figure 1.8.

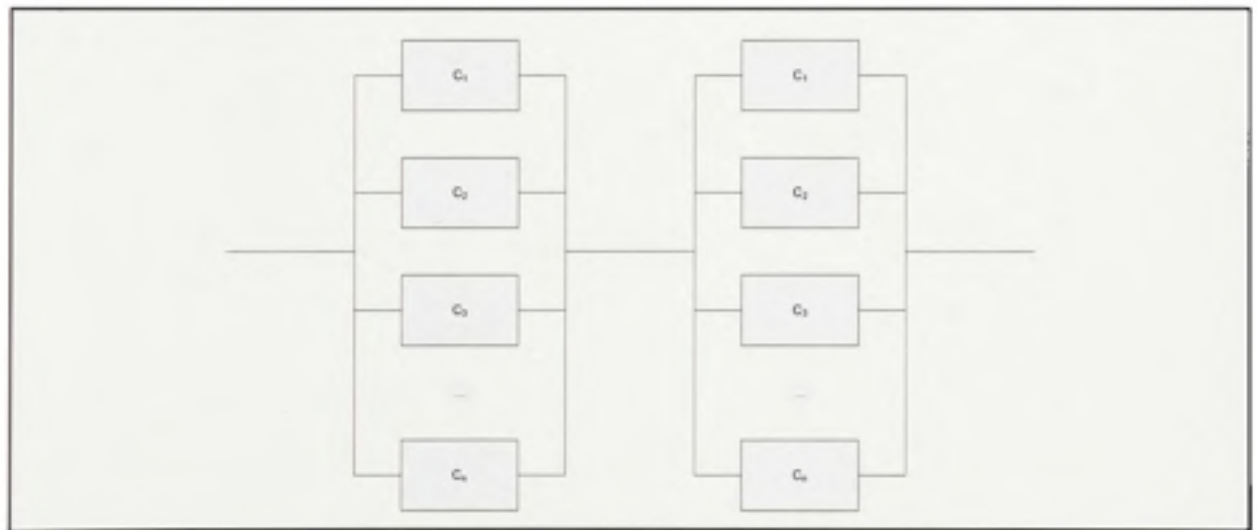


Figure 1.7 Redondance de haut niveau

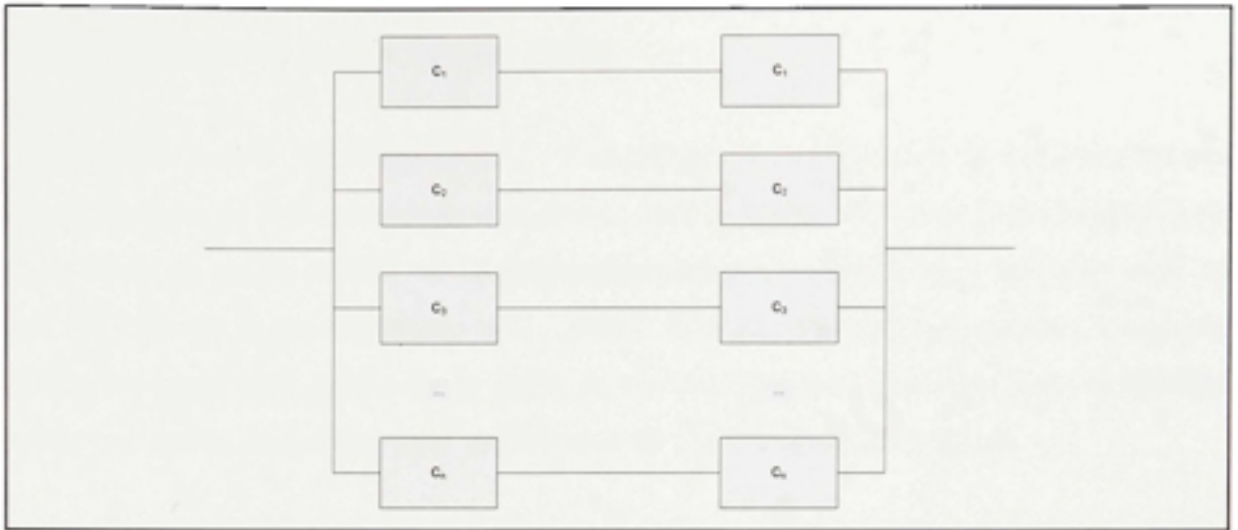


Figure 1.8 Redondance de bas niveau

1.2.2.4 Conception pour la fiabilité (DFR)

La conception pour la fiabilité (*Design for Reliability*) est un concept où la fiabilité n'est pas adressée à la fin du processus de la conception, mais bien au tout début. Dans beaucoup de cas, la durée de vie du produit est largement dépassée par la fiabilité de ce dernier, mais ce n'est pas toujours le cas (Minchane et al., 2000). Pour des applications critiques, lorsque la fiabilité est jugée trop proche de la durée de vie désirée, une conception pour la fiabilité s'avère une option particulièrement intéressante tel que donnée dans la Figure 1.9.

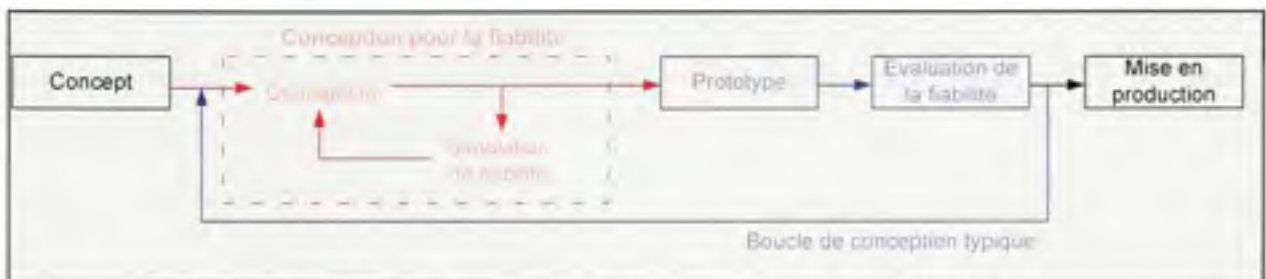


Figure 1.9 Processus de conception pour la fiabilité

1.2.2.5 Chaîne de Markov et arbres de défaillances

Dans cette approche, l'état d'un système est défini par l'état de chacune des composantes associé à ce dernier. Ce type d'analyse prend en compte que le système à l'étude est de nature réparable et que des stratégies de maintenance en place sont efficaces. Pour N composantes d'un système, nous avons 2^N états possibles. Dans la Figure 1.10, λ dénote le taux de défaillance et γ dénote le taux de réparation.

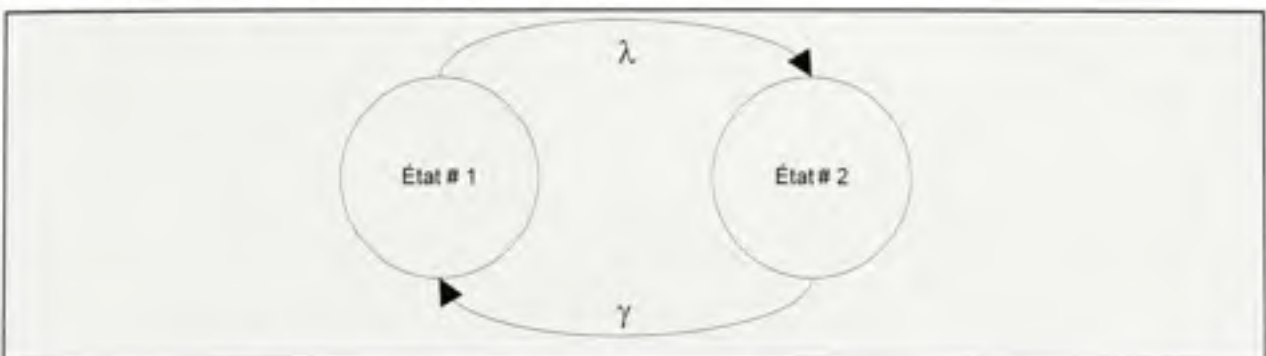


Figure 1.10 Graphique d'état d'une composante

Un raffinement de la méthode de graphiques d'états est une analyse selon les chaînes stochastiques de *Markov*. Dans ce type d'analyse, la probabilité de passer d'un état fonctionnel à un état qui est soit partiellement ou totalement en défaillance est calculée. Ce type de processus n'a pas de mémoire et ne peut prendre en compte ce qui c'est passé dans un temps t_{-1} . Dans la Figure 1.11, λ_A dénote le taux de transition pour passer de l'état 1 où les deux composantes sont fonctionnelles à l'état 2 où la composante A est en panne. En pratique, la transition λ_{AB} est peu probable et pour cette raison elle est rarement considérée, car cette transition implique que la composante A et la composante B tombent en panne à exactement le même moment. De plus, la théorie des processus aléatoires suppose que cette transition est même impossible.

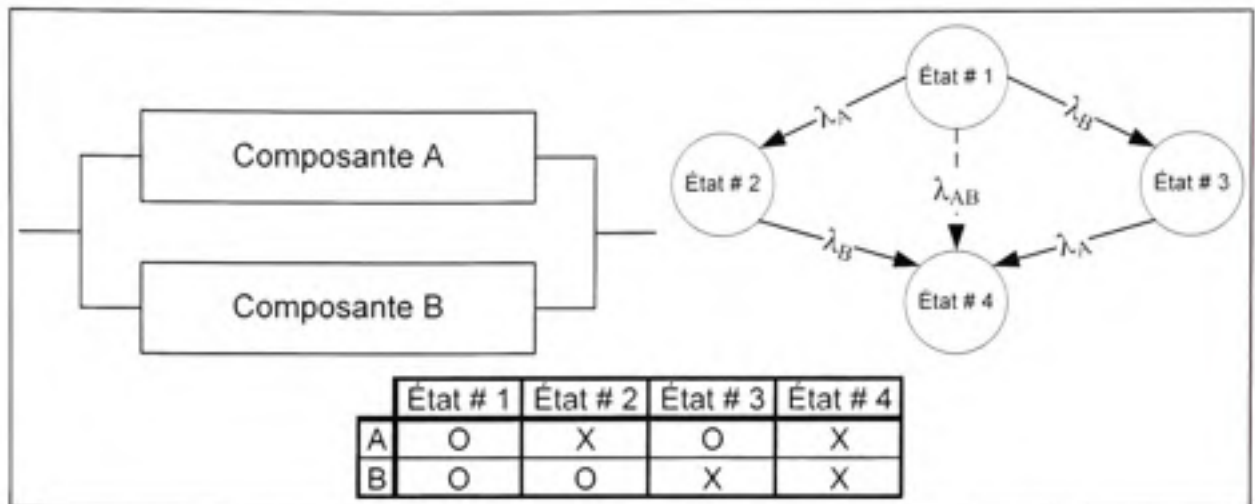


Figure 1.11 États Markoviens d'un système à deux composants

Pour chacun des états, nous devons présenter sous la forme d'une équation telle qu'illustrée par l'équation (1.10) où $\lambda \times \Delta t$ représente la probabilité que la composante A soit en panne à $(t + \Delta t)$ si on considère qu'il est opérationnel au temps t .

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = \lambda \times \Delta t \times P_i(t) \quad (1.10)$$

L'équation précédente doit être complétée pour chacun des états. Une transformée de Laplace peut être utilisée pour résoudre l'ensemble des équations. Ainsi, la probabilité d'être dans chaque état sera déterminée.

Donc, la fiabilité est déterminée, pour un système à deux composantes, par la relation suivante :

$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) \quad (1.11)$$

Il est à noter que dans les équations (1.10) et (1.11), on laisse de côté l'état 4 car le système est en panne à cet état.

1.2.2.6 Analyse AMDEC (FMEA)

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effets et de leur Criticité), ou FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) en anglais, est un outil d'analyse qualitatif et quantitatif des risques potentiels associés à un système. Il permet de les classer par ordre selon trois critères (gravité, occurrence et détection) et de développer par la suite des plans d'actions pour chaque risque recensé comme critique. Une fois le risque est documenté, un classement est effectué selon la criticité (une sorte de combinaison arithmétique de la fréquence, la capacité de détection et la gravité) (AIAG, 2008).

Les principales étapes associées à une étude AMDEC sont comme suit :

- Effectuer une évaluation sommaire de l'ensemble du système à l'étude;
- Émettre des hypothèses sur le fonctionnement de chaque aspect du système à l'étude;
- Effectuer une décomposition du système en sous-systèmes et détailler chaque élément principal contenu par sous-système;
- Analyser l'environnement qui affecte le système et définir les risques associés à cette dernière;
- Suite à la décomposition en sous-systèmes, effectuer une analyse fonctionnelle poussée pour clairement définir chaque aspect de fonctionnement du système;
- Monter un tableau AMDEC contenant les aspects suivants :

Tableau 1.1 Tableau AMDEC

ÉLÉMENT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE	EFFET									
				Local	Système	Environnement							
ELEMENT	MOYEN DE DETECTION	CRITICITE (AVANT)					ACTION(S) CORRECTIVE(S)	CRITICITE (APRES)					
		TYPE	F	D	D	C		Evaluation de criticite	F	D	D	C	Evaluation de criticite

- Effectuer l'analyse qualitative et quantitative selon les grilles d'évaluation de l'occurrence (fréquence), la gravité et la détection.

Tableau 1.2 Grille d'évaluation des critères 'Fréquence', 'Gravité' et 'Détection'
(Komljenovic et Rioux, 2007)

	Fréquence	Gravité	Détection
1 à 3	Occurrence rare	Aucune conséquence sur la sécurité	Détection en tout temps
4 à 6	Occurrence possible	Mécontentement opérationnel	Détection aléatoire
7 à 9	Occurrence fréquente	Incident - risque de blessure	Détection rare
10	Présent en tout temps	Incident - risque de mort	Impossible de détection

Malgré sa simplicité, l'AMDEC s'avère comme étant un outil fort puissant pour l'analyse de systèmes très complexes qui sont difficiles à analyser avec des méthodes de nature plus quantitative. L'analyse quantitative est bien représentée dans le Tableau 1.1 et le

Tableau 1.2. Cette méthode permet de se baser sur l'expérience humaine des personnes (concepteur, opérateur, client, etc.) qui ont déjà vécu plusieurs problèmes dans la pratique et peuvent évaluer l'effet des différents défaillances qui se présentent lors de l'exploitation. Pour cette raison, l'utilisation de l'AMDEC est fortement recommandée surtout dans le cas d'un démarrage d'un système ou pour assister des analyses de bris.

L'handicap principal de cette méthode est que chaque défaillance est traitée de manière indépendante alors que cela n'est pas nécessairement le cas en pratique. D'autres méthodes doivent être employées pour le traitement de défaillances non indépendantes. La méthode est également déficiente sur la base qu'elle ne peut pas être étendue à toutes les composantes associées au système, le résultant ne peut être qu'une évaluation globale de la fiabilité. Finalement, comme la méthode associe une valeur de 1 à 10 pour chaque critère évalué, une évaluation précise ne peut être effectuée. Donc, la subjectivité de l'équipe qui y participe à l'exercice influence sensiblement les conclusions. Cette méthode est plutôt utilisée de manière complémentaire aux autres méthodes présentées dans ce mémoire (Krasich, 2007).

1.2.3 La distribution de Weibull

Le principe de la distribution de *Weibull* est associé à l'étude de la probabilité de défaillance ou de succès. L'allure de la fonction de densité de cette distribution est représentée dans la Figure 1.12.

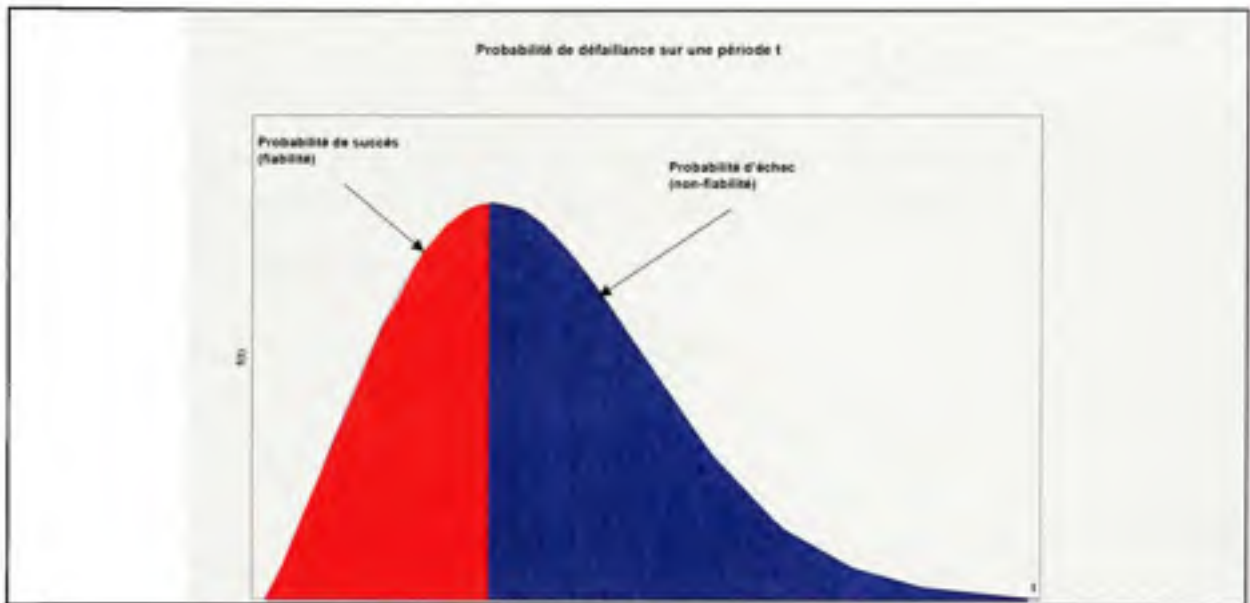


Figure 1.12 Probabilité de défaillance sur une période t
(Failure Distributions)

Dans un contexte pratique, et pour identifier un comportement probabiliste, l'équipement à l'étude doit être documenté avec soin afin de noter le temps où chaque élément est tombé en panne. Une fois que cette information est documentée, plusieurs méthodes sont disponibles afin d'effectuer de traitement mathématique (ou graphique) des données. Afin de s'assurer que les données collectées sont bel et bien distribuées selon un modèle Weibull, le coefficient de corrélation entre le modèle proposé et les données est calculé. Un coefficient de corrélation supérieur à 0.85 indiquera que le modèle Weibull est probablement significatif (l'hypothèse ne peut pas être rejetée). Dans le cas échéant, nous concluons par le rejet de l'hypothèse comme quoi le comportement ne peut probablement pas être modélisé par une distribution de Weibull.

La distribution présentée dans la Figure 1.12 représente la distribution de la défaillance d'une composante sur une période de temps t . La relation $f(t)$ est la *Probability Density Function (PDF)*. L'aire sous la courbe $f(t)$ est donnée par l'équation (1.12) donnée ci-contre:

$$\int_{t=0}^{+\infty} f(t) dt = 1 \quad (1.12)$$

Pour des raisons pratiques, le temps t a été considéré comme ayant origine à $t = 0$. Lorsqu'on intègre la PDF, la fonction obtenue est la *Cumulative Density Function (CDF)*. La CDF est donc définie par :

$$F(t) = \int_{\tau=0}^{t=t} f(\tau) d\tau \quad (1.13)$$

Où on calcule :

$$\begin{aligned} F(t) &= 0, & t &= 0 \\ F(t) &= 1, & t &\rightarrow \infty \end{aligned} \quad (1.14)$$

La fonction $F(t)$ est également connue sous la fonction de la non-fiabilité (ou probabilité de défaillance). Les relations données par la CDF peuvent être définies comme étant l'occurrence d'aucune défaillance au temps $t = 0$ et l'occurrence de la défaillance absolue (tous les éléments à l'étude sont en panne) au temps $t \rightarrow \infty$. Cet énoncé démontre que la Figure 1.12 représente la réalité d'un équipement distribué selon un modèle de *Weibull* et que la fiabilité est directement associée à la probabilité de défaillance.

Lorsqu'on considère le cas où la distribution *Weibull* est paramétrée par trois variables, on définit la distribution par le facteur de forme β , le facteur d'échelle η et le facteur de localisation γ . La distribution de Weibull à trois paramètres est donnée par l'équation ci-dessous :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (1.15)$$

Dans le cas de l'étude sur la fiabilité du réseau de transport régional de TransÉnergie, l'utilisation d'une distribution *Weibull* à trois paramètres sera préconisée. L'effet de la modification des facteurs de forme, d'échelle et de localisation est donné schématiquement par la Figure 1.13, la Figure 1.14 et la Figure 1.15.

La version simplifiée à deux paramètres peut être utilisée si le facteur de localisation γ tend vers zéro et que le taux d'erreur associé à cette estimation est acceptable. La distribution de *Weibull* dans ce cas est donnée par :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (1.16)$$

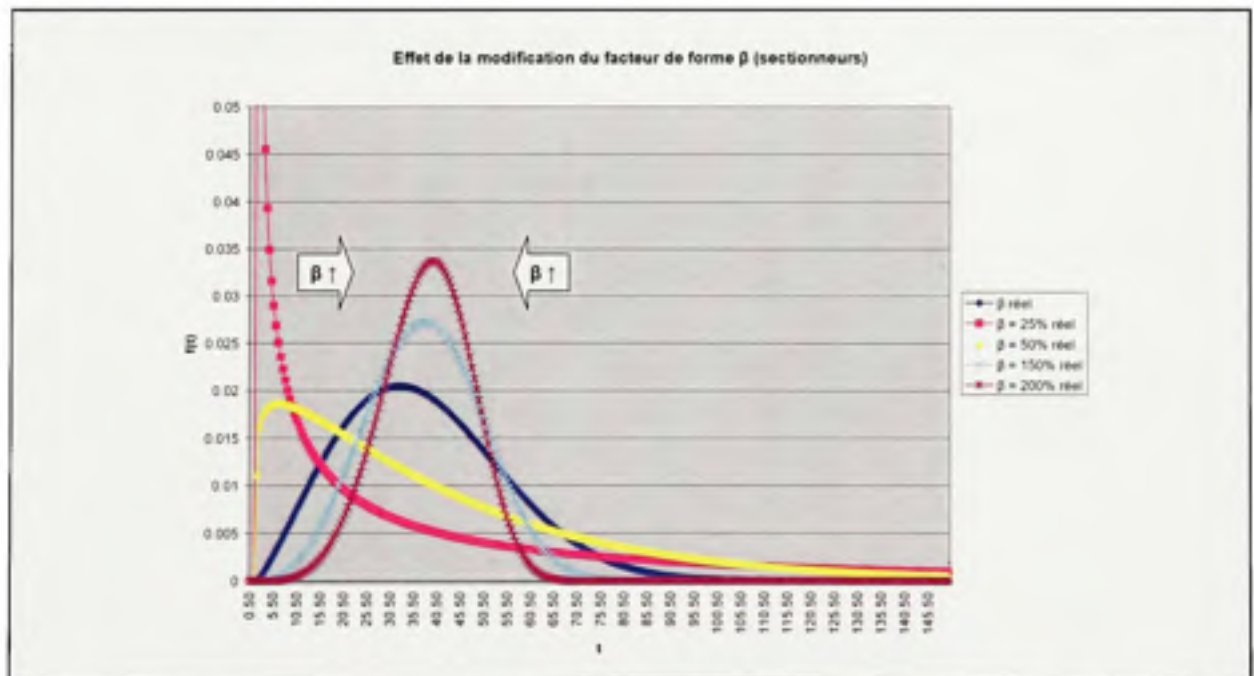


Figure 1.13 Effet de la modification du facteur de forme β

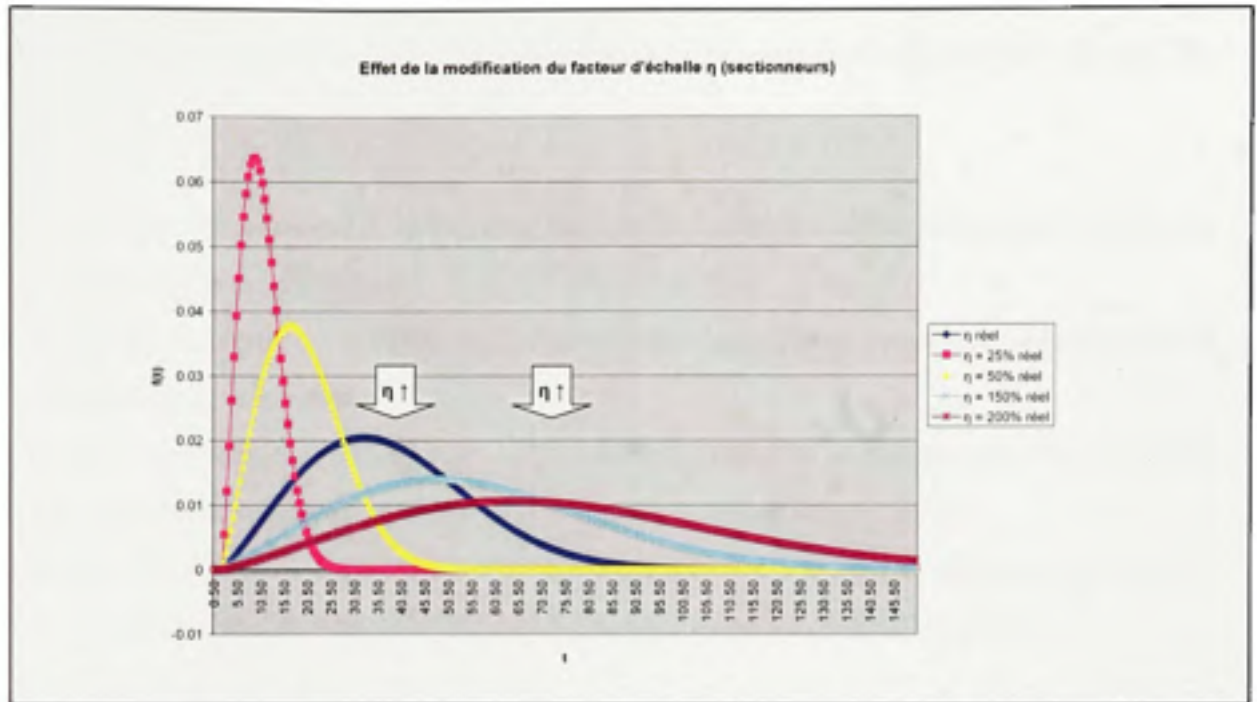


Figure 1.14 Effet de la modification du facteur d'échelle η

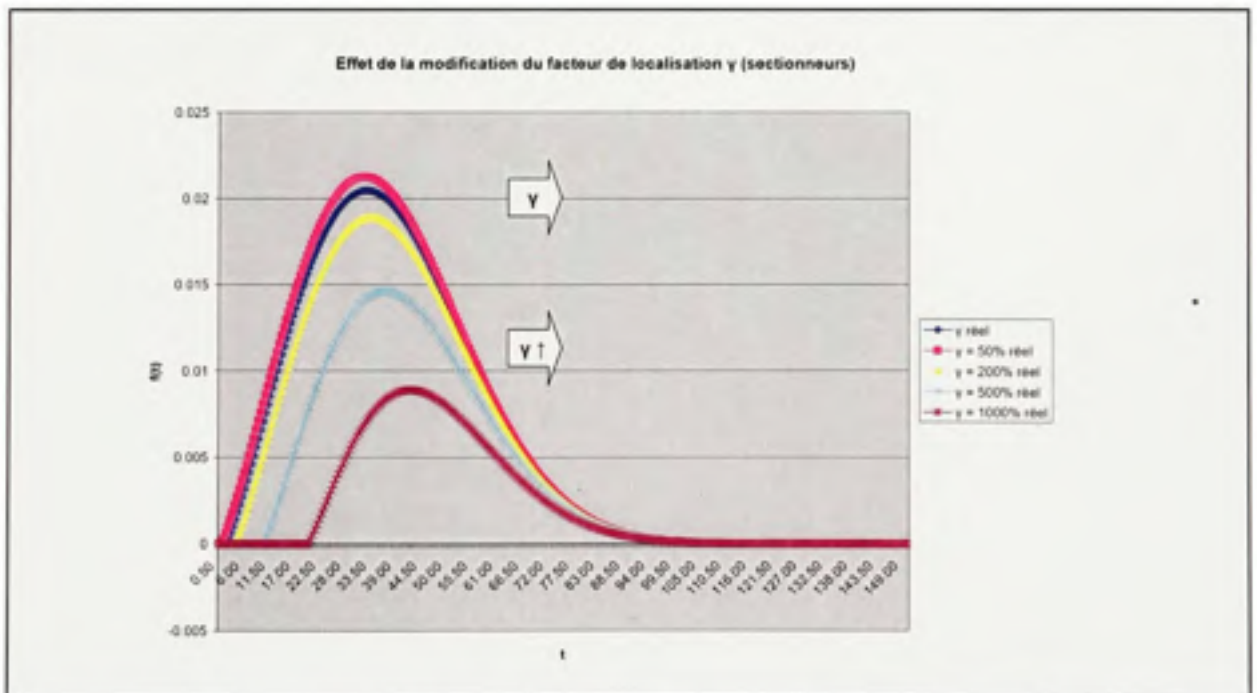


Figure 1.15 Effet de la modification du facteur de localisation γ

Le niveau de précision de tout analyse peut être validé avec les critères suivants (Wong, Wu et Ng, 2005):

1. Probabilité de couverture: le pourcentage qu'un paramètre soit réellement à l'intérieur d'un intervalle de confiance;
2. Erreur de couverture : la différence absolue entre les valeurs nominales attendues et les probabilités de couverture;
3. Niveau supérieur et inférieur de la probabilité d'erreur : le pourcentage qu'un paramètre soit réellement supérieur ou inférieur à l'intervalle de confiance calculé;
4. Biais moyen : la moyenne de la différence absolue entre le niveau supérieur et inférieur de la probabilité d'erreur et les valeurs nominales respectives de ces dernières.

Bien que les données analysées ne fassent pas part de ces types de vérifications, des échantillons de données qui demandent un haut niveau de précision peuvent bénéficier d'une analyse aussi poussée.

1.3 Équipements étudiés dans le cadre de cette maîtrise

1.3.1 Définition des équipements

Accumulateur	Dispositif à réactions réversibles, recevant, lors de la charge, de l'énergie électrique, qu'il emmagasine sous forme d'énergie chimique, pour la restituer, en partie, à la décharge, sous forme de courant électrique.
Alternateur	Un appareil mécanique, électrique ou électromécanique qui fournit du courant alternatif.
Barre	Un conducteur lourd, rigide et métallique, généralement non-isolé, utilisé pour transporter un courant important ou pour faire une connexion entre plusieurs circuits.
Barre blindée	<i>Voir Barre</i>
Barre conventionnelle	<i>Voir Barre</i>
Batterie de condensateur	Équipement composé de condensateurs raccordés en parallèle sur le réseau servant à absorber de la puissance réactive capacitive. Les condensateurs connectés en parallèle sur le réseau fournissent de la puissance réactive : ils permettent de compenser une absorption de puissance réactive par les charges du côté du client ou d'Hydro-Québec.
Changeur de prise	Équipement servant à choisir le nombre de tours effectifs à utiliser pour un transformateur. Du fait, un transformateur à tension variable est créé où le point de branchement s'effectue à un point autre qu'à la fin d'une résistance ou d'un enroulement.
Chargeur d'accumulateur	Voir la définition d'Accumulateur, donnée plus haut.

Circuit bouchon	Les courants porteurs étant émis côté ligne d'énergie, leur aiguillage vers la direction choisie (sens de la voie de transmission) est réalisé à l'aide de circuits bouchons qui ont pour fonction d'empêcher toute injection inutile des courants porteurs vers des tronçons de ligne qui ne sont pas concernés par la transmission.
Disjoncteur 600V	Dispositif réglant l'admission ou la coupure du courant dans un circuit ou dans un ensemble de circuits. La coupure peut se déclencher automatiquement (en cas de court-circuit, par exemple) ou par intervention manuelle. Appareil capable d'interrompre non seulement les courants de charge normale, mais aussi les courants de défauts.
Disjoncteur HT	<i>Voir Disjoncteur 600V</i>
Éclateur	Ensemble de deux pièces conductrices, séparées par un diélectrique liquide ou gazeux, entre lesquelles on fait passer des décharges disruptives.
Excitation	Production d'un flux d'induction magnétique dans un circuit magnétique au moyen d'un courant électrique.
Inductance à noyau d'air	Caractéristique d'un circuit électrique ou de deux circuits à proximité où une force électromotrice est générée par procédé d'induction électromagnétique dans un circuit avec le changement du courant à travers un circuit ou l'autre.
Inductance isolée à l'huile	<i>Voir Inductance à noyau d'air</i>

Moteur synchrone	Un synchrorécepteur est une synchromachine qui permet de reproduire à distance la position ou le mouvement du rotor du synchrotransmetteur qui l'alimente. Les constitutions de ces deux machines sont sensiblement identiques ; cependant le synchrorécepteur, qui fonctionne comme un moteur, possède divers dispositifs d'amortissement mécanique qui ne sont pas utiles dans un synchrotransmetteur.
Onduleur	Appareil ou installation permettant de convertir du courant continu en courant alternatif.
Parafoudre	Dispositif destiné à protéger les réseaux électriques et les matériels qui leur sont reliés contre les surtensions produites par la foudre ou par les manœuvres.
Plateforme (compensation série)	Réduction de l'impédance des lignes d'un réseau par l'installation de condensateurs en série sur les lignes, afin d'améliorer la fiabilité du réseau. Technique utilisée pour accroître la robustesse du réseau et sa capacité de transporter l'électricité. Des condensateurs sont installés en série sur les lignes.
Résistance	La résistance est définie comme étant l'opposition d'un appareil ou matériau au courant qui est égal à la chute de tension dans l'ensemble de l'élément divisé par le courant à travers l'élément. Dans un circuit de courant alternatif, la résistance est définie comme étant la partie réelle de l'impédance complexe.
Rupteur (de charge)	Un rupteur de charge est défini comme étant un interrupteur électrique dans un circuit avec plusieurs centaines de milliers de volts conçu pour transporter une grande quantité de courant sans surchauffer à la position ouverte. Ceci considère d'avoir suffisamment d'isolation pour isoler le circuit en position fermée et équipé d'arcs interrupteurs pour interrompre le courant de charge.

Sectionneur	Un sectionneur est capable d'ouvrir et de fermer un circuit lorsqu'un courant d'intensité négligeable est interrompu ou établi, ou bien lorsqu'il ne se produit aucun changement notable de la tension aux bornes de chacun des pôles du sectionneur. En position de fermeture, il est aussi capable de supporter des courants dans les conditions normales du circuit et de supporter des courants pendant une durée spécifiée dans des conditions anormales telles que celles du court-circuit.
Stator	Partie fixe de l'alternateur, faite d'un enroulement de conducteurs de cuivre, qui recueille le courant électrique produit par le rotor
Tête de disjoncteur	Voir <i>Disjoncteur 600V</i>
Transformateur de mesure	Transformateur destiné à transmettre un signal d'information à des appareils de mesure, à des compteurs, à des dispositifs de protection ou de commande.
Transformateur de puissance	Appareil statique à induction électromagnétique (c'est-à-dire sans contact direct), servant à transformer un système de courants alternatifs en un autre système de courants alternatifs ayant la même fréquence, mais une intensité et une tension différente.
Traversée	Dispositif permettant de faire passer un conducteur à travers la paroi d'un appareil, en isolant le conducteur de cette paroi.
Valve à thyristor	Élément à conduction unidirectionnelle comportant trois jonctions semi conductrices et une électrode de commande permettant de déclencher le passage du courant.

Les définitions données dans la présente section ont été tirées des références (Access Science: Encyclopedia of Science and Technology Online, 2009; answers.com, 2009; Grand dictionnaire terminologique de l'Office de la langue française (OLF), 2009; *Guide de saisie d'inventaire Maximo / Appareillage électrique*, 2004; Petit dictionnaire d'Hydro-Québec, 2009).

1.4 Méthodes alternatives à la fiabilité prévisionnelle

Lorsqu'on considère les principes de la fiabilité prévisionnelle, il devient évident que cette pratique peut s'avérer utile seulement si l'utilisateur effectue un contrôle soutenu de la collecte de données. Une alternative à cette pratique est d'effectuer une analyse de la protection présente sur un réseau d'électricité afin d'assurer la fiabilité d'un réseau par l'entremise de redondances et protections tel que des fusibles et disjoncteurs afin de minimiser (versus la prévention) les effets d'une défaillance critique.

Une application de ce type d'analyse est d'utiliser cette approche avec un système de batterie de condensateurs. Une approche via la fiabilité prévisionnelle serait d'analyser le taux de défaillance de cet appareil et d'adapter son plan de maintenance selon le modèle mathématique établi pour ce type d'équipement afin d'en prédire le vieillissement à venir du parc d'équipements. Une méthode alternative serait d'analyser les protections associées à la batterie de condensateurs afin de s'assurer de la survie par un système de redondance combiné avec des protections adéquates (Wei-Jen et al., 2002).

Des méthodes alternatives peuvent également s'appliquer lorsqu'on considère des équipements majeurs tel qu'un transformateur de puissance. Ce type d'équipement est un élément critique d'un réseau alors la protection utilisée pour ce type d'équipement doit être conçu en conséquence. Un volet qui ne peut être négligé est l'impact économique de cet équipement qui peut s'avérer un des éléments les plus dispendieux d'un réseau électrique. Plusieurs méthodes peuvent être employées afin d'effectuer un suivi sur les équipements et, le cas échéant, effectuer un diagnostic sur leur état actuel.

Des exemples qui sont couramment utilisées sont:

1. Mesure diélectrique par phase;
2. Analyse des gaz dissous dans l'huile;
3. Analyse de la quantité d'humidité dans l'appareil;
4. Suivi de la température des composantes à l'intérieur de l'appareil;
5. Analyse de la thermographie infrarouge et du niveau de décharges partielles;
6. Mesure de l'efficacité du ratio de transformation de l'appareil.

Tel que mentionné précédemment, cette étude ne traite pas du développement d'un plan de maintenance par rapport aux équipements analysés. Par contre, il devient tout de même intéressant de pouvoir prendre une décision par rapport à la période de maintenance pour un équipement majeur tel qu'un transformateur de puissance. Cet équipement est à la fois coûteux et bénéficie d'un haut niveau de fiabilité qui vient compliquer l'analyse à effectuer. Une approche à considérer est celle de développer un arbre de défaillances afin de pouvoir avoir un échantillonnage représentatif des temps de défaillances. Un modèle peut ensuite être développé par rapport aux données collectées (Liu et al., 2003). Un exemple de cette approche sera présenté dans le CHAPITRE 4.

Dans le cadre de l'étude en cours, une discussion sera présentée en annexe sur l'analyse des gaz dissous dans l'huile, l'analyse de la thermographie et du niveau de décharges partielles au niveau du réseau de distribution ainsi que de la mesure de l'efficacité du ratio de transformation de l'appareil de transformation lui-même. Bien que ce mémoire traite d'un réseau de transport régional d'électricité, une analogie peut facilement être effectuée entre les activités de maintenance d'un réseau de distribution souterrain complexe comme celui présent à Montréal et un réseau de transport régional. Dans le cas de tous type d'équipement de transformation à l'étude, l'analyse effectuée est particulièrement critique lorsque l'appareil vient atteindre de 20 ans à 25 ans de sa durée de vie espérée (Arshad et Islam, 2004).

1.5 Conclusion

Ce chapitre a servi à introduire les différentes notions de fiabilité qui sont couramment utilisées dans le domaine de la maintenance. Par l'entremise de cette revue de la littérature, nous avons atteint les objectifs suivants : réviser les différentes relations mathématiques qui sont utilisées dans le domaine et de renseigner le lecteur à propos de quelques méthodes analytiques qui sont utilisées pour l'étude de la fiabilité. Plus particulièrement, nous avons complété une revue du modèle de Weibull qui est non seulement le principe de base dans notre projet de recherche mais aussi un outil fort puissant utilisé dans une grande pluralité de disciplines. Finalement, nous avons défini les différents équipements que nous allons analyser dans le cadre de ce mémoire et donné un bref aperçu des pratiques de maintenance effectuées par Hydro-Québec Distribution pour des fins de balisage.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DE LA LOI DE LA FIABILITÉ

2.1 Introduction

Dans le cas étudié, il sera difficile, presque impossible, d'effectuer l'étude de la fiabilité sur une base théorique (à partir des relations analytiques des composants et systèmes constituant l'ensemble du réseau) pour déterminer l'espérance de vie et les limites de confiance du système globale de TransÉnergie (Brkic, 1990). La difficulté principale lorsqu'on travaille avec des distributions opérationnelles de probabilité est que les paramètres sont identifiés à partir de données expérimentales (incluant l'historique des défaillances et celui des équipements en fonction). C'est donc une estimation tributaire de la disponibilité et de la qualité des données. Lorsqu'on a des données où des composants sont retirées avant la fin de leur vie utile, il peut devenir utile de considérer les données tel que donné par une fonction de Weibull modifiée où on a des données censurées (Ng, 2005). Par contre, comme il devient impossible de considérer les données de TransÉnergie de cette façon, cette approche ne sera donc pas préconisée dans le cadre de ce mémoire.

2.2 Méthodologie de traitement des données

Pour pouvoir utiliser une estimation adéquate, la méthode des probabilités de vraisemblance maximale (*Maximum Likelihood*) est largement employée. Cependant, lorsque cette méthode est retenue pour identifier les paramètres de la distribution *Weibull*, sous certaines conditions, aucune solution n'est possible pour évaluer le facteur de forme β . Aussi, l'absence d'une solution convergente limite l'efficacité de telles méthodes. Ce problème est connu comme étant un problème de non-régularité et de divergence (Hirose, 1996). Une solution itérative devient donc la seule issue pour obtenir une estimation consistante.

Aussi, dans plusieurs cas, seul un nombre limité d'essais est disponible lorsqu'on traite les données de défaillance (Gong, 1999). Dans plusieurs situations, il n'est pas pratique

d'effectuer la collecte de données à grande échelle. Cela est particulièrement vrai dans une exploitation industrielle où on n'observe pas des pannes et des défaillances de manière récurrente. Donc, nous concluons que les paramètres d'une distribution de *Weibull* ne peuvent qu'être approximés. Leurs précisions dépendent en premier lieu de la qualité des données et, en second, de la méthode choisie pour effectuer l'analyse.

Toute estimation comporte une incertitude (un doute associé à un résultat spécifique). Une attention particulière doit donc être accordée à la présence de cette incertitude avant toute interprétation et conclusion. Deux types d'erreurs sont possibles, soit des erreurs de type I et des erreurs de type II. Dans l'erreur de type I, communément désigné « erreur α », on effectue une fausse décision négative. Autrement dit, ce type d'erreur occasionne une mauvaise interprétation des données où on risque de constater une différence entre les données alors que cela n'est pas le cas. Dans l'erreur de type II, communément désigné « erreur β »⁷ on effectue une fausse décision positive. Avec ce type d'erreur, aucune observation d'une différence significative entre les données n'est possible même si une réelle différence est présente (Montgomery, 2004).

La première méthode qui a été retenue pour l'estimation des intervalles de confiance d'une distribution de *Weibull* considère l'existence d'un lien direct et proportionnel entre l'intervalle de confiance du CDF $F(t)$ et les facteurs de forme et d'échelle (Brkic, 1990). Le défaut principal de cette méthode est qu'elle n'est applicable que pour une distribution *Weibull* à deux paramètres (facteur de forme β et facteur d'échelle η). On ne peut donc pas étendre cette méthode vers une distribution généralisée à trois paramètres qui est beaucoup plus polyvalente. Cela se traduit concrètement par notre incapacité de déterminer un intervalle de confiance pour le facteur de localisation (γ).

⁷ À ne pas confondre avec le facteur de forme β de la distribution statistique.

Afin de pouvoir travailler avec une distribution *Weibull* à trois paramètres, une analyse itérative est requise. De cette façon, une méthode est développée où chacune des paramètres de la distribution de *Weibull* sont évaluées à tour de rôle (facteur de forme β , facteur d'échelle η et facteur de localisation γ) (Hirose, 1996).

Cependant, une balise est requise afin de comparer les résultats de l'analyse itérative de Hirose à une méthode connue d'analyse connue (calibration de la méthode). La méthode retenue choisie est celle des moindres carrés qui est une méthode bien connue et décrite dans le présent chapitre sous une forme modifiée pouvant être utilisée avec une fonction *Weibull* à trois paramètres (Hai-Lin, Chong-Hong et Jong-Wuu, 2004; Haitao et al., 2009; Markovic, Jukic et Benic, 2009; Wang, 2001; Xie, Zhang et Tang, 2006). Une section sera dédiée à la détermination des paramètres par estimation des moindres carrés (*Least Squares Parameter Estimation – LSPE*).

Comme mentionné précédemment, la précision avec laquelle les paramètres de la distribution de *Weibull* sont estimés est cruciale. Une erreur dans la spécification de ces paramètres va mener à des problèmes tels que des erreurs de Type I et de Type II. À titre d'exemple, (Keats, Nahar et Korbel, 2000) ont démontré que des méthodes simplifiées, telle qu'une approximation par une distribution exponentielle, doivent être évitées à tout prix. Nous citerons d'autres références pertinentes à travers le texte du présent mémoire pour appuyer nos hypothèses et notre démarche (Birgoren, 2003; Lyonnet, 2006; Nikolaidis, Ghiocel et Singhal, 2005).

2.2.1 Lien entre l'intervalle de confiance du PDF aux paramètres β et η

Une première méthode est présentée dans le cas où le système pourra être modélisé avec une approximation d'une distribution *Weibull* à deux paramètres. Le facteur de localisation sera donc égal à zéro. Bien que cette méthode ne soit pas employée dans la modélisation finale de

l'équipement de TransÉnergie, elle est présentée ici à titre de base de comparaison avec la méthode qui sera utilisée pour une distribution de Weibull à trois paramètres.

La fiabilité du PDF d'une distribution de Weibull est donnée par (Kumljenovic et Rioux, 2007):

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2.1)$$

(Kumljenovic et Rioux, 2007)

et le CDF d'une distribution de Weibull est donné par:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2.2)$$

(Kumljenovic et Rioux, 2007)

Tel que noté préalablement, β est le facteur de forme et η est le facteur d'échelle. Pour pouvoir déterminer les intervalles de confiance ces paramètres, la méthode exige en premier lieu d'identifier les paramètres du CDF (Brkic, 1990). Par la suite, nous devons considérer deux points représentatifs dans l'intervalle du temps couvrant le domaine d'étude (t_1, t_2) . La représentation graphique de $F(t)$ pour différentes valeurs de t est illustrée dans la Figure 2.1.

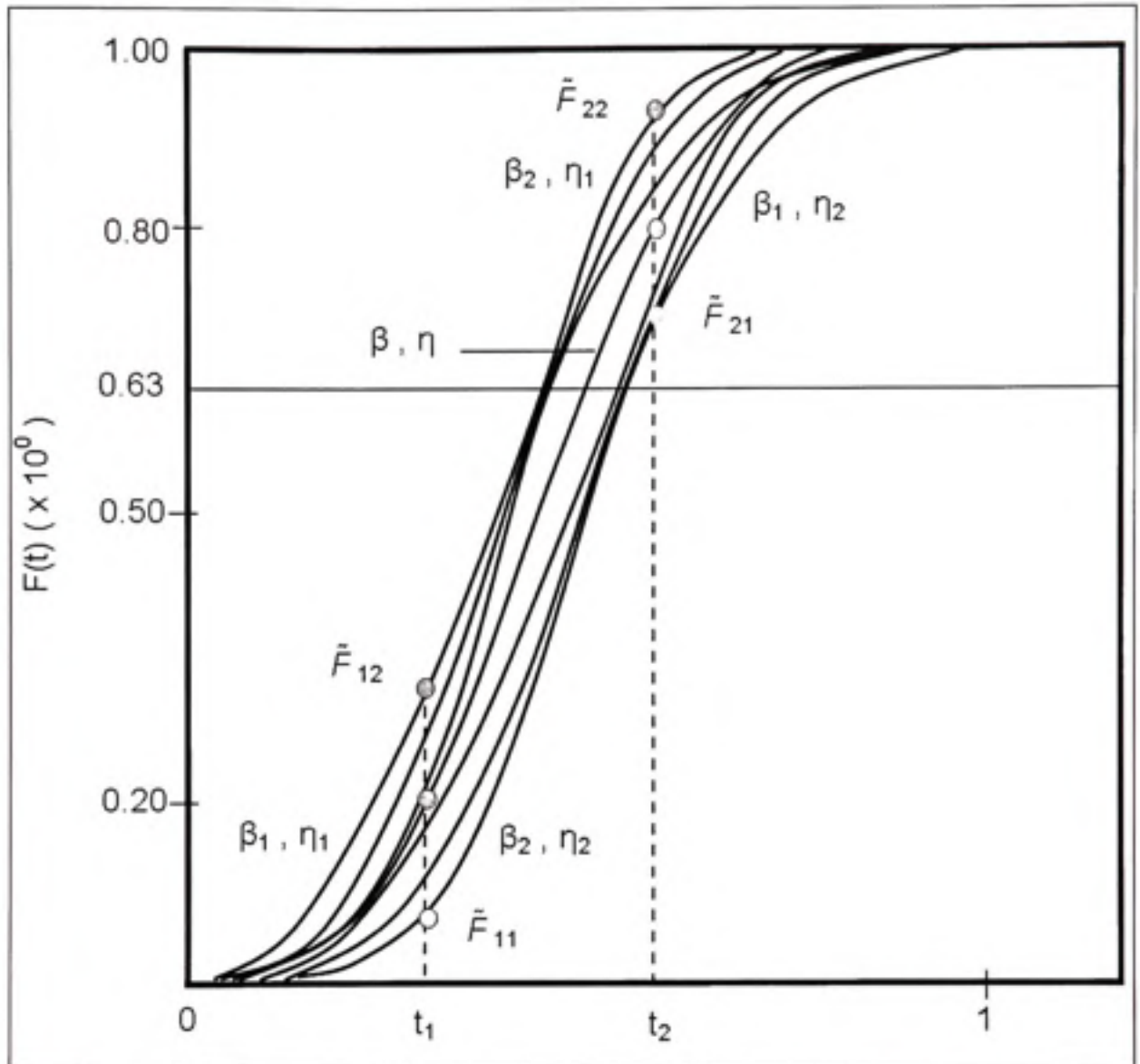


Figure 2.1 Représentation graphique de $F(t)$ à des valeurs différentes de β et η

Deux événements sont définis dans le temps: les événements A et B . L'événement A a lieu au moment où $t \leq t_1$ et l'événement B a lieu au moment où $t \leq t_2$. La probabilité de ces événements est donnée par les deux relations suivantes:

$$\begin{aligned} P(A) &= P(t \leq t_1) = F(t_1) \\ P(B) &= P(t \leq t_2) = F(t_2) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Nous considérons que ces probabilités sont estimées par des données expérimentales. Donc, nous pouvons avancer que les intervalles de confiance inférieures et supérieures pour $P(A)$ et $P(B)$ sont données par:

- Événement A : la borne de confiance inférieure est égale à $LCL_A = \hat{F}_{11}$ et la borne de confiance supérieure est égale à $UCL_A = \hat{F}_{12}$.
- Événement B : $LCL_A = \hat{F}_{11}$: la borne de confiance inférieure est égale à $LCL_B = \hat{F}_{21}$ et la borne de confiance supérieure est égale à $UCL_B = \hat{F}_{22}$.

Afin de pouvoir estimer les paramètres pour les facteurs de forme et d'échelle, nous considérons que la population est significative et que le nombre d'éléments contenu dans la population en considération est égal à n . *Brkic* propose que le nombre total de défaillances (exprimé par la variable r) soit égal à:

$$\begin{aligned} r|_{t=t_1} &\approx 1 + 0.2n \\ r|_{t=t_2} &\approx 0.8n \end{aligned} \tag{2.4}$$

C'est-à-dire qu'au temps t_1 , il y a un taux de défaillance approximativement égal à 20% et qu'au temps t_2 , il y a un taux de défaillance approximativement égal à 80% parmi la population à l'étude. Les valeurs de 20% et de 80% ont été utilisées uniquement qu'à titre d'étalon pour illustrer la méthode. Ces valeurs peuvent être ajustées afin de refléter le comportement de la population à l'étude.

Étape ❶ : Nous devons nous assurer que toutes les variables relatives au temps (données collectées) sont organisées en ordre chronologique et que les entrées de données correspondant à t_1 et t_2 sont déterminées en utilisant les relations suivantes :

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{(t_{r_1}^* + t_{r_1+1}^*)}{2} \\ t_2 &= \frac{(t_{r_2}^* + t_{r_2+1}^*)}{2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Les valeurs de $t_{r_1}^*$ représentent le $(r_1)^{e}$ valeur de t dans la population à l'étude. Dans le même ordre d'idées, $t_{r_1+1}^*$ représente le $(r_1+1)^{e}$ valeur de t dans la population n . La même logique est étendue au variable $t_{r_2}^*$.

Étape ❷ : Une fois que les valeurs actuelles de t sont déterminées (bornes inférieures et supérieures), nous introduisons les variables r_1 et r_2 dans les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{p}_1 &= 1 - \chi_{n-r_1, r_1+1; \alpha_1} \\ \hat{p}_2 &= 1 - \chi_{r_2+1, n-r_2; \alpha_2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$\chi_{\mu, \nu; x}$ est une variable correspondant à une distribution du type Bêta⁸ avec μ et ν comme degrés de libertés et qui doit être utilisée afin de déterminer les valeurs de $\hat{p}_1$ et $\hat{p}_2$. Il est important de noter qu'à ce stade, l'utilisateur de la méthode doit décider quel intervalle de confiance est recherché pour l'application particulière (90%, 95%, etc.).

⁸ Fonction de distribution Bêta : $p(\alpha, \beta; x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (1-x)^{\beta-1} x^{\alpha-1}$

Étape ③ : Une fois que les relations illustrées dans la Figure 2.1 sont prises en considération, une variable k peut être introduite afin de pouvoir associer les intervalles de confiance des PDF à ceux des facteurs de la distribution de *Weibull*. Donc, nous pouvons introduire les quatre (4) relations suivantes, où $\hat{F}_{11} = \hat{p}_{11}$, $\hat{F}_{12} = \hat{p}_{12}$, $\hat{F}_{21} = \hat{p}_{21}$ et $\hat{F}_{22} = \hat{p}_{22}$:

$$\begin{aligned} k_{11} &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \hat{F}_{11}} \right) \right] \\ k_{12} &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \hat{F}_{12}} \right) \right] \\ k_{21} &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \hat{F}_{21}} \right) \right] \\ k_{22} &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \hat{F}_{22}} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Étape ④ : Lorsque les variables préalablement utilisées pour déterminer le LCL et le UCL et que ces relations sont associées aux valeurs spécifiques de k_{ij} , nous pouvons utiliser les relations suivantes pour déterminer le facteur de forme (β) et le facteur d'échelle (η) pour une distribution de *Weibull*. Donc, nous pouvons introduire les quatre relations suivantes :

$$\begin{aligned} k_{11} &= \beta_2 (\ln t_1 - \ln \eta_2) \\ k_{12} &= \beta_1 (\ln t_1 - \ln \eta_1) \\ k_{21} &= \beta_1 (\ln t_2 - \ln \eta_2) \\ k_{22} &= \beta_2 (\ln t_2 - \ln \eta_1) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Nous pouvons utiliser ce système d'équations pour déterminer les bornes de confiance inférieure (LCL) et supérieure (UCL) de β et η .

2.2.2 Estimation des probabilités avec un estimateur à vraisemblance maximale (MLE) avec une distribution Weibull à trois paramètres

La méthode d'estimation des probabilités maximales (MLE) est d'une utilité particulière car elle peut être utilisée pour une distribution Weibull à trois paramètres. Cette méthode est polyvalente, elle s'adapte à la majorité des cas où on cherche à modéliser la fiabilité des équipements. En plus, cette méthode est privilégiée dans le cas où les paramètres d'une distribution de *Weibull* ne peuvent être estimés à cause d'une divergence de la solution (Hirose, 1996).

La première composante de cette estimation est un changement dans les paramètres de la distribution de Weibull. Cela est effectué avec les trois relations suivantes :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\eta}{\beta} \\ \mu &= \eta + \gamma \\ k &= \frac{1}{\beta}\end{aligned}\tag{2.9}$$

La substitution de (2.9) dans la CDF nous procure la relation ci-dessous.

$$F(x; \sigma, \mu, k) = 1 - e^{-\left[1 + k\left(x - \frac{\mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{k}}}\tag{2.10}$$

Étape ❶ : La première étape dans le processus est de déterminer l'espérance statistique (moyenne) de l'échantillon avec la relation suivante:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\tag{2.11}$$

Et de poursuivre en déterminant la variance de l'échantillon avec la relation suivante:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (2.12)$$

où n représente le nombre d'éléments dans l'échantillon de la population étudiée.

Des essais initiaux doivent être effectués pour les paramètres σ et μ . Des essais initiaux sont notés comme $\sigma_0^{(0)}$ et $\mu_0^{(0)}$. Ils sont évalués avec les relations suivantes:

$$\begin{aligned} \sigma_0^{(0)} &= 0.779697s \\ \mu_0^{(0)} &= m + 0.577216\sigma \\ k_0 &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

En utilisant ces essais initiaux tel que notés dans l'équation (2.13), nous obtenons le MLE pour le CDF tel que donné dans l'équation (2.10). Ce résultat sera dénoté comme MLE_0 .

Étape ② : À cette étape dans le processus, on définit un petit intervalle pour k donné par Δk . Un bon point de départ est de définir $\Delta k = 0.01$. En utilisant $k_1 = k_0 + \Delta k$, la condition initiale pour les paramètres $\sigma_0^{(0)}$ et $\mu_0^{(0)}$ demeurent inchangées de l'étape précédente. Donc, la prochaine série de relations à utiliser sont données par :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_0^{(0)} = 0.779697s \\ \mu_1 &= \mu_0^{(0)} = m + 0.577216\sigma \\ k_1 &= k_0 + \Delta k = 0.01 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Étape ③ : La prochaine étape est d'évaluer σ_{-1} et μ_{-1} dans une manière similaire aux cas précédents. La procédure d'estimation est représentée dans la Figure 2.2 donnée plus bas.

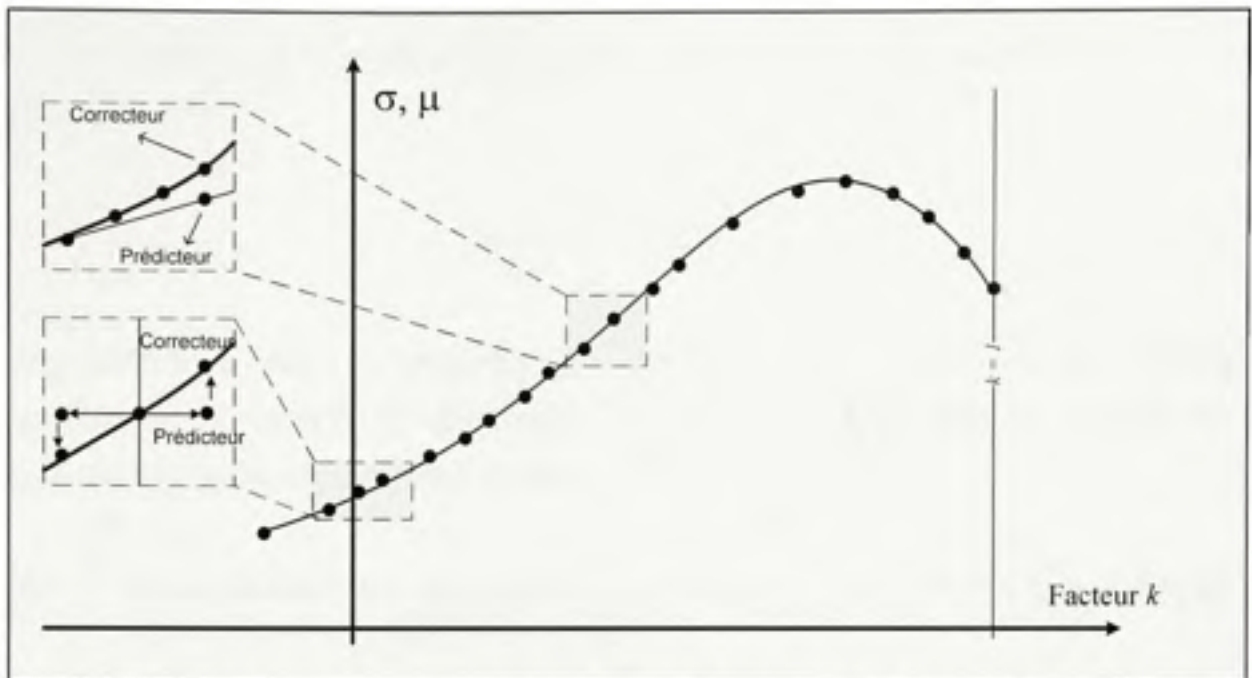


Figure 2.2 Estimation du résultat du MLE d'une distribution GEV
(Hirose, 1996)

À la fin de cette étape, les valeurs suivantes ont été obtenues par la méthode donnée auparavant:

$$\begin{aligned} &\sigma_{-1}, \mu_{-1}, k_{-1} \\ &\sigma_0, \mu_0, k_0 \\ &\sigma_1, \mu_1, k_1 \end{aligned} \quad (2.15)$$

En utilisant les trois points donnés précédemment dans la Figure 2.2, un quatrième point peut être extrapolé en trouvant la solution d'une extrapolation basée sur une relation quadratique. Le quatrième point sera donc donné par la relation $(\sigma_2^{(0)}, k_2)$ où $k_2 = k_1 + \Delta k$. Le point $(\mu_2^{(0)}, k_2)$ est obtenu de la même manière. Une grande attention doit être accordée dans le choix du Δk et des estimateurs initiaux afin de s'assurer que la convergence. La même procédure est utilisée mais pour le sens inverse de la solution (de $k = k_{-2}$ à $k = k_{-1}$).

Étape ④ : Finalement, la solution retenue pour k est obtenue en maximisant la fonction de vraisemblance⁹:

$$\log L(\sigma(k_r), \mu(k_r), k_r) \quad (2.16)$$

Cette méthode a donc été préconisée et employée dans nos analyses des données d'exploitation du réseau de transport régional d'Hydro-Québec TransÉnergie à chaque fois que le nombre de données a été jugé suffisant.

2.2.3 Détermination des paramètres par estimation des moindres carrés (*Least Square Parameter Estimation – LSPE*)

La méthode d'estimation des paramètres d'une fonction de Weibull par moindres carrés est une méthode efficace pour l'approximation de la fonction de Weibull utilisée pour modéliser la fiabilité d'un réseau de transport électrique.

La méthode des moindres carrés nécessite qu'une ligne droite soit modélisée à travers une série de données. Le but principal est de s'assurer que la somme des carrés de la distance des points à la ligne minimise la somme des erreurs quadratiques. La valeur minimisée peut être calculée soit dans une direction préétablie selon la direction normale où la Figure 2.3 et la Figure 2.4 donnent une représentation graphique de l'analyse qui doit être effectuée dans le

⁹ Hirose suggère d'examiner attentivement la solution afin de s'assurer qu'on soit en présence d'une solution minimax dite « selle de cheval » en utilisant les déterminants des sous-matrices formées par la matrice d'information Hirose, Hideo. 1996. « Maximum likelihood estimation in the 3-parameter Weibull distribution a look through the generalized extreme-value distribution ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 3, n° 1, p. 43-55..

cas d'un modèle linéaire simple (*Least Squares Parameter Estimation (Regression Analysis)*, 2006).

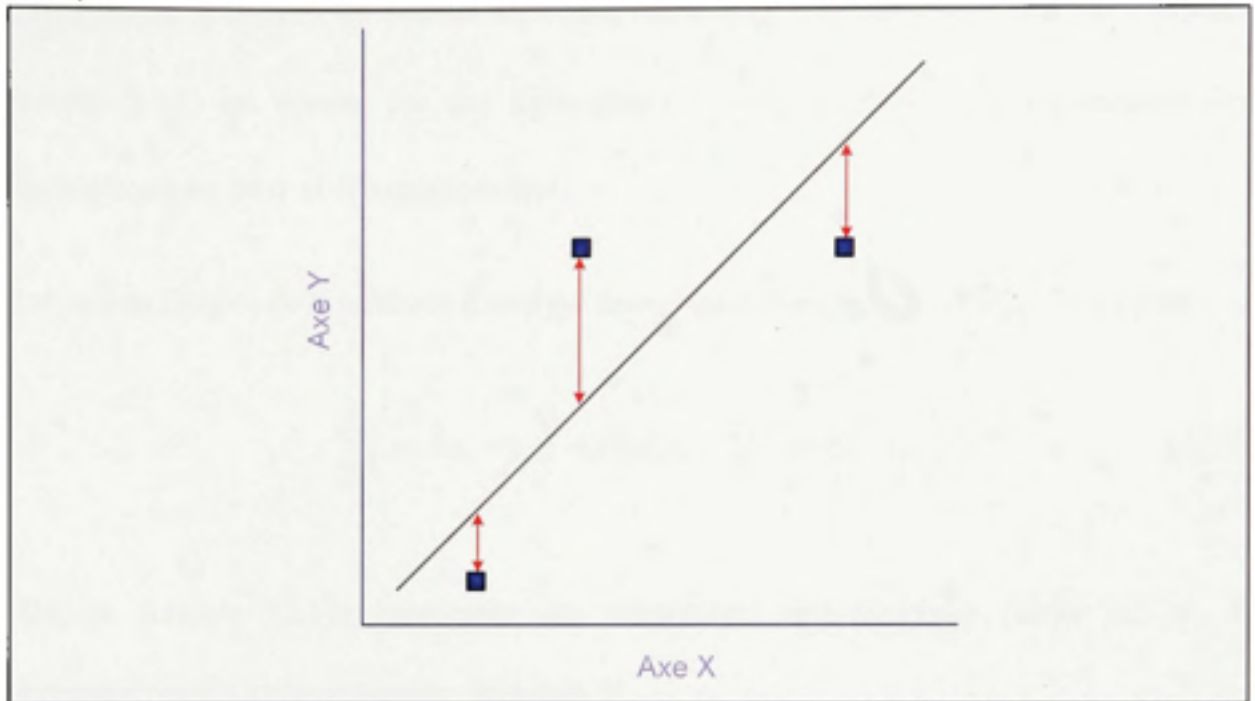


Figure 2.3 Min. de la somme des carrés (verticale) de la méthode LSPE

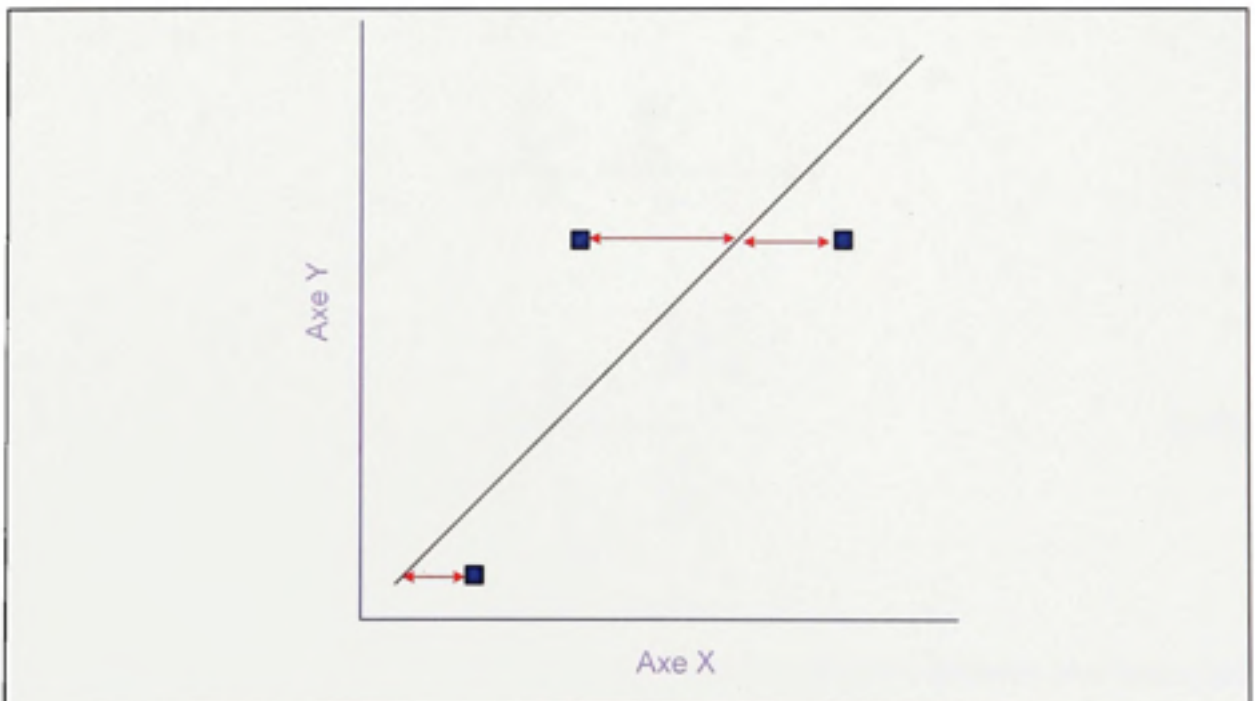


Figure 2.4 Min. de la somme des carrés (horizontale) de la méthode LSPE

Lorsqu'on considère que nous avons une série de données qui sont représentées par (x_1, y_1) , $(x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ où les valeurs de x sont connues et que l'approximation par moindres carrés (LSE) est donnée par une ligne droite $y = \hat{a} + \hat{b}x$ où $\hat{a}$ et $\hat{b}$ représentent des approximations de a et b respectivement.

La version linéaire de la méthode d'analyse numérique est donnée par la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^N \left(\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i \right)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^N \left(a + bx_i - y_i \right)^2 \quad (2.17)$$

Où la formule (2.17) représente les estimations des moindres carrés de a et b respectivement avec un nombre de points N .

La relation (2.17) est minimisée par les deux relations suivantes :

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b} \bar{x} \quad (2.18)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N}} \quad (2.19)$$

Cependant, une utilisation linéaire de la théorie selon les équations données plus haut n'est pas adéquate pour une distribution de Weibull. Pour pouvoir analyser le cas tel que présenté dans cet ouvrage, une transformation doit être effectuée où la méthode présentée est un

mélange de méthodes paramétriques et non paramétriques. L'idée est de procéder avec une bonne approximation non paramétrique où la PDF $\hat{f}$ a besoin d'être aussi précise que possible et ensuite de procéder à l'application d'une méthode des moindres carrés afin d'estimer les paramètres β , η et γ soit les facteurs de forme, d'échelle et de localisation, respectivement. Les données pour l'estimation des moindres carrés est donnée par (w_i, t_i, y_i) où $i=1, \dots, n$, $y_i = \hat{f}(t_i)$ et $w_i > 0$ où w_i représente les poids des données qui assurent une précision dans notre évaluation (Markovic, Jukic et Benic, 2009). Les paramètres inconnus de β , η et γ doivent être estimés pour minimiser la relation suivante :

$$S(\beta, \eta, \gamma) = \sum_{i=1}^n w_i \left[f(t_i; \beta, \eta, \gamma) - y_i \right]^2 = \sum_{i=1}^n w_i \left[\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{\left(\frac{t_i - \gamma}{\eta} \right)^\beta} - y_i \right]^2 \quad (2.20)$$

Par la suite, une approximation par méthode des moindres carrées est effectuée afin de trouver les paramètres de forme, d'échelle et de localisation.

La méthode proposée par (Markovic, Jukic et Benic, 2009) est en principe plus précise et présente une plus petite variance dans les estimés fournis (Hai-Lin, Chong-Hong et Jong-Wuu, 2004).

Ces estimations par moindres carrées présente une alternative à l'utilisation d'une méthode d'estimation avec un estimateur à vraisemblance maximale. Il est à noter que les deux types de méthodes sont adéquates pour l'analyse en cours et plus particulièrement pour l'analyse d'une série de données étant jugées partiellement incomplètes ou partiellement bruitées tel qu'est le cas avec notre présent étude (Haitao et al., 2009). De plus, il existe un certain avantage à considérer une méthode par moindres carrés et plus spécifiquement dans des cas où une petite quantité de données de qualité sont disponibles. Dans des cas où les données sont inférieures à un certain seuil déterminé d'avance, il n'est pas recommandé d'utiliser une estimation par probabilités maximales (Wang, 2001). Il est d'ailleurs démontré dans en annexe qu'une utilisation d'estimation par un estimateur à vraisemblance maximale pour une petite quantité de données n'est pas adéquate et c'est pour cette raison que certains types

d'équipements ne présentent pas des modèles adéquats et sont considérés comme étant non plausibles.

2.3 Exemple d'application

Pour comparer les trois méthodes, nous utilisons les données de l'équipement 'accumulateur' comme exemple (voir Annexe I). Un résumé des résultats est au Tableau 2.1. Nous mentionnons que l'ensemble des équipements a été analysé simultanément par les trois méthodes.

Tableau 2.1 Grille de comparaison entre les méthodes

	Intervalle η et β (Brkie)			MLE (Hirose)			Moindres carrés générale		
	-95% (LCL)	Nom.	+95% (UCL)	-95% (LCL)	Nom .	+95% (UCL)	-95% (LCL)	Nom .	+95% (UCL)
Facteur β	1.623	1.687	1.757	1.602	1.694	1.792	2.605	2.670	2.703
Facteur η	17.287	18.211	19.065	17.103	18.031	19.137	17.345	18.368	19.023
Facteur γ	-	0	-	2.131	2.316	2.370	1.602	1.637	1.665
Corrélation	95.2%			95.8%			96.3%		

Nous constatons.

- Dans le cas d'une abondance relative des données, les trois méthodes nous donnent sensiblement les mêmes résultats;
- Dans le cas où les données sont restreintes (ou douteuses), l'intervention et le jugement de l'utilisateur semble encore le meilleur moyen pour établir un modèle 'cohérent'. En effet, dans ces cas, le changement d'une ou deux données seulement peuvent avoir des percussions importantes sur le modèle (voir Annexe I, équipement : 'Alternateur', 'Centre de distribution', 'CPC', etc.).

- c. Le niveau de corrélation est pratiquement toujours tributaire de la qualité et de la disponibilité des données (voir Annexe 1);
- d. Pour les analyses futures (Chapitre 4), nous retenons les résultats de la méthode MLE. Plus spécifiquement, la borne pessimiste. C'est-à-dire, la borne LCL (95%)

$$\beta_{min}, \eta_{min}, \gamma_{min}.$$

2.4 Conclusion

À l'intérieur du chapitre 2, nous avons effectué une revue complète de la modélisation de la loi de fiabilité. Avant tout, la méthodologie de traitement de données a été présentée où nous avons indiqué les différentes techniques d'analyse permettant d'effectuer un traitement adéquat du grand nombre de données à notre disposition. À la fin de ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie de traitement où on estime les probabilités maximales avec une distribution Weibull à trois paramètres. Cette méthodologie est celle qui a été sélectionnée comme étant la plus adéquate pour le traitement à effectuer. Finalement, une méthode d'estimation par moindres carrés a été présentée afin de pouvoir comparer les résultats par estimation des probabilités maximales avec une méthode alternative. Il est d'une importance primordiale de choisir une méthode adéquate pour analyser les données considérées dans cette étude. Le choix d'utiliser une estimation par probabilités maximales est clair et un balisage est effectué avec une analyse par minimisation des moindres carrés. Par contre, à cause d'une faible quantité de données, il sera démontré que certains types d'équipements ne peuvent fournir assez d'information pour formuler un modèle adéquat.

CHAPITRE 3

ANALYSE DES DONNÉES

3.1 Introduction

Les données de mise au rebut des équipements étudiés dans le cadre de ce mémoire sont contenues dans une base de données Microsoft Access®. Les données fournies par TransÉnergie n'ont pas fait part d'un traitement préliminaire pour filtrer les éléments bruités provenant de la conception originale de la base de données utilisée pour suivre les activités de maintenance de TransÉnergie où l'analyse détaillée des données sera présenté à travers ce chapitre.

3.2 Analyse des données de TransÉnergie

Les données brutes fournies par Hydro-Québec TransÉnergie sont issues d'une base de données. Comme une grande partie de l'information disponible n'est pas requise dans l'analyse en cours, un premier tri est impératif pour isoler les données pertinentes dans la base de données selon l'hierarchie illustrée à la Figure 3.1.

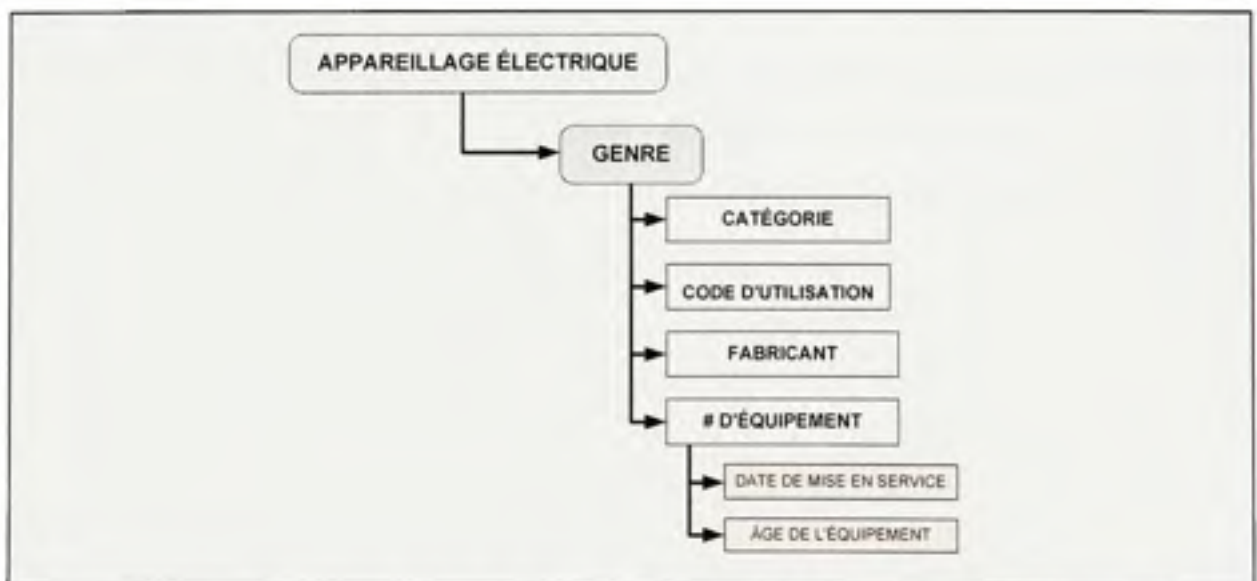


Figure 3.1 Hiérarchie de la base de données d'Hydro-Québec TransÉnergie

Les données dans la base de données ne sont malheureusement pas introduites selon une manière uniforme. Cette présence de données non-structurées est directement associée au système utilisé pour la gestion de la maintenance (Maximo®). Ce système laisse un nombre significatif de champs libres à l'utilisateur. Bien que ce type de base de données soit très flexible et qu'on peut y insérer tous les types d'équipements imaginables, il représente un inconvénient de taille pour notre analyse. En effet, le risque de se trouver submergé par un grand nombre de catégories et de données est présent. En plus la contamination des données par des attributs parasites est omni présente. Nous avons pu dans certains cas épurer les tableaux des données en utilisant les analyses visuelles ou l'analyse des résidus. Toutefois, et nous référons le lecteur à l'ensemble des résultats numériques qui se trouve à l'Annexe I, certaines catégories d'équipements ne représentaient que très peu de données. Donc, l'estimation de leurs paramètres de fiabilité demeure problématique.

Une analyse aurait pu être complétée par le principe de *fuzzy clustering* pour analyser les données mais ce type d'analyse requiert une bonne qualité de données. De plus, ce type d'analyse est particulièrement utile lorsqu'on effectue une collecte de données selon plusieurs paramètres alors que notre analyse actuelle est largement basée sur l'âge de mise au rebut des équipements (Scionti et Lanslots, 2005).

La donnée qui présente pour nous le principal intérêt est l'âge des équipements lorsqu'ils ont été transférés au rebut ou déclarés comme défectueux. Afin d'assurer une précision acceptable dans nos analyses, l'âge de la mise au rebut a été calculée selon les différents changements d'états dans la base de données¹⁰.

¹⁰ Cette information est sauvegardée dans la table T3_Changement_État_Rebut de la base de données de TransÉnergie.

L'âge en années a été calculé selon deux scénarios possibles dans la table, soit :

- 1) Si l'âge de l'état est inférieur à la date de la requête d'information, ou;

$$\hat{Age\ actual} = \frac{(Date\ changement\ état) - (Date\ mise\ en\ service)}{365} \quad (3.1)$$

- 2) Si l'âge de l'état est égal à la date de la requête d'information (ou une absence de date).

$$\hat{Age\ actual} = \frac{(Date\ actuelle) - (Date\ mise\ en\ service)}{365} \quad (3.2)$$

Le détail du calcul effectué à travers les requêtes de Microsoft Access® sont données dans la section 3.3. Afin de s'assurer de l'analyse de chaque type d'équipement, une validation croisée est effectuée en considérant les colonnes « GENRE » et « CATÉGORIE » dans la base de données. La colonne « GENRE » regroupe chaque type d'équipement alors que la colonne « CATÉGORIE » regroupe chaque variante présente de l'équipement en considération. Par exemple, si on considère le cas des sectionneurs, le genre serait un 'sectionneur' alors que la catégorie serait un 'interrupteur de charge'.

Finalement, le champ « *Code_Util* » est présent afin de fournir le détail sur l'état actuel d'un équipement en particulier. Ce champ est caractérisé par les états suivants tel que fournis dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 États disponibles à travers le champ « *Code_Util* »

Champ	États disponibles
Code_Util	N'existe plus
	En service
	En réparation
	Désaffecté
	En réserve
	Engagé
	Disponible

Les données dans la base de données ont été dans un premier temps regroupées par genre et sont résumées par le Tableau 3.2. Il est à noter que la valeur « Total » représente ici un nombre d'équipements contenus dans le regroupement « GENRE ».

Tableau 3.2 Inventaire d'appareillage électrique par « GENRE »

GENRE	Total
ACCUMULATEUR	1447
ALTERNATEUR	114
BARRE	11848
BARRE BLINDÉE	697
BARRE CONVENTIONNEL	10
BATTERIE DE CONDENSATEUR	1489
CENTRE DE DISTRIBUTION	7
CENTRE DISTRI	167
CHANGEUR DE PRISE	6
CHARGEUR D'ACCUMULATEUR	1769
CIRCUIT BOUCHON	117
CPC	1856
DISJONCTEUR 600 VOLTS	370
DISJONCTEUR 600 VOLTS	2517
DISJONCTEUR HT	11881
ÉCLATEUR	30
EXCITATION	27
EXCITATION AMPLYDINE	14
GRILLE DE MALT	48
INDUCTANCE À NOYAU D'AIR	15
INDUCTANCE À NOYAU D'AIR	4095
INDUCTANCE ISOLÉ À L'HUILE	988
MOTEUR SYNCHRONE	22
ONDULEUR	1
PARAFODRE	13938
PLATE FORME (C SER)	27
RÉSISTANCE	46
RUPTEUR	6
SECTIONNEUR	40790
STATOR	2
TÊTE DE DISJONCTEUR	11854
TRANSFO DE MESURE	25508
TRANSFO DE PUISSANCE	6880
TRAVERSEE	52375
VALVE À THYRISTOR	198
Grand Total	191159

Chaque type d'équipement est analysé et regroupé selon deux critères :

- La quantité d'une catégorie d'équipement (par état)
- La quantité d'équipements au rebut (par fabricant)

De plus, une analyse statistique plus poussée a été effectuée selon la méthode décrite dans la 2.2.3 avec la détermination des paramètres par la méthode des moindres carrés par l'entremise du le logiciel *Minitab*® où nous avons retenu :

- Une modélisation du type *Weibull* à trois paramètres selon l'âge de mise au rebut (avec et sans mortalité infantile);
- Une validation de la cohérence du modèle basée sur la corrélation observée entre le modèle identifié et les données disponibles.

Les analyses détaillées pour chaque équipement sont données dans l'ANNEXE I (ANALYSE DÉTAILLÉE DES DONNÉES HISTORIQUES DE TRANSÉNERGIE).

3.3 Structure des requêtes Microsoft Access®

Les données brutes contenues dans la base de données de TransÉnergie ont été regroupées dans Microsoft Access® et ont été traitées pour les uniformiser. Ainsi, une harmonisation des titres des équipements a été effectuée dans le but d'avoir une liste uniforme des équipements. La liste finale des équipements est donnée par le Tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.3 Répertoire des noms d'équipements

#	Nom utilisé dans l'analyse	Noms dans la base de données
1	Accumulateur	ACCUMULATEUR
2	Alternateur	ALTERNATEUR
3	Barre	BARRE
4	Barre blindée	BARRE BLINDÉE
5	Barre conventionnel	BARRE CONVENTIONNEL
6	Batterie de condensateur	BATTERIE DE CONDENSATEUR
7	Centre de distribution	CENTRE DE DISTRIBUTION CENTRE DISTRI.
8	Changeur de prise	CHANGEUR DE PRISE
9	Chargeur d'accumulateur	CHARGEUR D'ACCUMULATEUR
10	Circuit bouchon	CIRCUIT BOUCHON
11	CPC	CPC
12	Disjoncteur 600V	DISJONCTEUR 600 VOLTS DISJONCTEUR 600 VOLTS
13	Disjoncteur HT	DISJONCTEUR HT
14	Éclateur	ÉCLATEUR
15	Excitation	EXCITATION EXCITATION AMPLYDINE
16	Inductance à noyau d'air	INDUCTANCE À NOYAU D'AIR INDUCTANCE À NOYAU D'AIR
17	Inductance isolé à l'huile	INDUCTANCE ISOLÉ À L'HUILE
18	Moteur synchrone	MOTEUR SYNCHRONE
19	Onduleur	ONDULEUR
20	Parafoudre	PARAFoudre
21	Plateforme (compensation série)	PLATE FORME (C.SÉR.)
22	Résistance	RÉSISTANCE
23	Rupteur	RUPTeur
24	Sectionneur	SECTIONNEUR
25	Stator	STATOR
26	Tête de disjoncteur	TÊTE DE DISJONCTEUR
27	Transformateur de mesure	TRANSFO DE MESURE
28	Transformateur de puissance	TRANSFO DE PUISSANCE
29	Traversée	TRAVERSEE
30	Valve à thyristor	VALVE À THYRISTOR

Comme on peut constater en consultant le Tableau 3.3, la base de données n'est pas normalisée. Donc, suite à des travaux de concertations avec les principaux intervenants, une harmonisation des données a graduellement été introduite. Les requêtes bâties ont été conçues pour prendre en compte cet aspect et pour pouvoir tenir compte de chaque entrée dans la base de données.

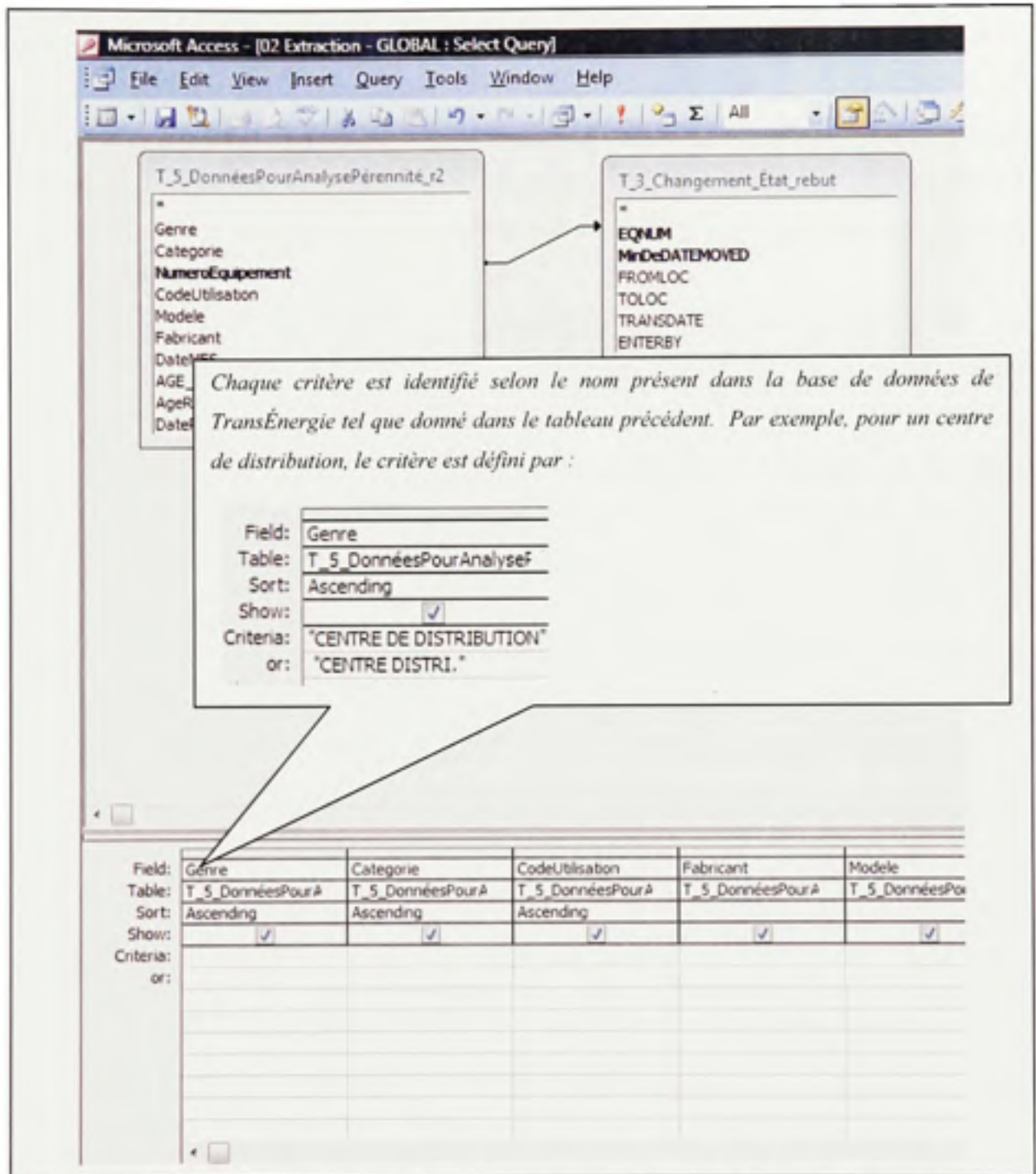


Figure 3.3 Conception de la requête d'un centre de distribution (exemple)

3.4 Résultat de l'analyse des données de TransÉnergie

Les données analysées doivent être triées afin de pouvoir décider ce qui sera retenu pour une analyse plus approfondie. Afin de pouvoir retenir une série de données et d'accepter le modèle comme étant adéquat, deux critères ont été définis afin d'inclure ou exclure un équipement:

- un nombre d'équipements au rebut doit nécessairement être supérieur à zéro ($N > 0$);
- un facteur de corrélation entre le modèle et les données réelles doit être supérieur à 0.925.

Un tri effectué dans la liste d'équipements permet d'identifier les équipements qui feront partie de l'analyse plus poussée dans le présent chapitre. Au total, 17 équipements sur 30 ont pu être retenus. Le rejet d'un équipement est souvent dû à un faible nombre de données (avec un facteur de corrélation faible) ou une absence d'équipements au rebut. Les équipements qui seront analysés ont été identifiés sous la bannière *INCLUS*. Tous les équipements où des données sont disponibles mais que le facteur de corrélation est trop bas sont identifiés sous la bannière *EXCLUS*. Tous les équipements ne présentant aucune défaillance sont identifiés sous la bannière *AUCUNE DÉFAILLANCE*. L'analyse globale vient cependant inclure les données d'équipements au rebut et celles toujours en vie. Le Tableau 3.4 démontre les résultats du premier tri où les données ont été validées afin de confirmer si le facteur de corrélation était supérieur au seuil établi et si des équipements au rebut sont présents afin de faire un traitement des données de défaillance.

Il est important de noter que cet analyse vient inclure les données opérationnelles du réseau de transport où tous les divers facteurs pouvant affecter le fonctionnement (charge, intempéries, foudre, etc.) sont considérées dans les données de mise au rebut. Par contre, tout changement technologique n'est pas suivi dans les types d'équipements donc il devient difficile d'évaluer spécifiquement l'effet d'un changement. Par exemple, un changement de technologie de parafoudre a un effet bénéfique sur le taux de défaillance mais ce type d'analyse n'est pas possible dans le cas de ce travail de recherche. Il est également hors contexte dans ce projet de considérer les effets de la maintenance préventive tel que la

lubrification des composantes mécanique qui peut, bien entendu, avoir effet significatif sur la durée de vie de certains types d'équipements (McDermid, 2002; Salinas et Prunte, 2001).

Tableau 3.4 Analyse préliminaire des équipements de TransÉnergie

#	Nom utilisé dans l'analyse	N	Facteur de corrélation	Rétention dans l'analyse?
1	Accumulateur	563	0.969	INCLUS
2	Alternateur	19	0.888	EXCLUS
3	Barre	156	0.995	INCLUS
4	Barre blindée	35	0.923	EXCLUS
5	Barre conventionnel	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
6	Batterie de condensateur	170	0.990	INCLUS
7	Centre de distribution	8	0.939	INCLUS
8	Changeur de prise	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
9	Chargeur d'accumulateur	743	0.991	INCLUS
10	Circuit bouchon	41	0.943	INCLUS
11	CPC	66	0.913	EXCLUS
12	Disjoncteur 600V	259	0.978	INCLUS
13	Disjoncteur HT	241	0.985	INCLUS
14	Éclateur	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
15	Excitation	25	0.943	INCLUS
16	Inductance à noyau d'air	669	0.979	INCLUS
17	Inductance isolé à l'huile	97	0.980	INCLUS
18	Moteur synchrone	12	0.914	EXCLUS
19	Onduleur	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
20	Parafoudre	2804	0.995	INCLUS
21	Plateforme (compensation série)	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
22	Résistance	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
23	Rupteur	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
24	Sectionneur	6800	0.997	INCLUS
25	Stator	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE
26	Tête de disjoncteur	140	0.979	INCLUS
27	Transformateur de mesure	4325	0.997	INCLUS
28	Transformateur de puissance	1897	0.997	INCLUS
29	Traversée	1580	0.974	INCLUS
30	Valve à thyristor	---	0.000	AUCUNE DÉFAILLANCE

Le constat suite à l'analyse préliminaire était que les données n'ont pas toutes été calculées avec des dates réelles de mise au rebut. Certains équipements sont identifiés comme étant au rebut mais n'ont pas de dates de mise au rebut. Pour cette raison, ces équipements seront exclus de l'analyse à cause de leur faible taux de fiabilité. Le

Tableau 3.5 présente le résultat des données épurées où le niveau d'incertitude de chaque équipement est présenté.

Tableau 3.5 Niveau d'erreur associé aux équipements analysés

Équipement	Access		Maximo		Total	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Accumulateur	77	13.77%	482	86.23%	559	100.00%
Barre	5	5.62%	84	94.38%	89	100.00%
Batterie de condensateur	47	29.19%	114	70.81%	161	100.00%
Centre de distribution	8	100.00%	0	0.00%	8	100.00%
Chargeur d'accumulateur	117	16.62%	587	83.38%	704	100.00%
Circuit bouchon	9	30.00%	21	70.00%	30	100.00%
Disjoncteur 600V	18	7.35%	227	92.65%	245	100.00%
Disjoncteur HT	655	25.44%	1920	74.56%	2575	100.00%
Excitation	9	37.50%	15	62.50%	24	100.00%
Inductance à noyau d'air	48	7.57%	586	92.43%	634	100.00%
Inductance isolé à l'huile	5	5.32%	89	94.68%	94	100.00%
Parafoudre	378	14.39%	2249	85.61%	2627	100.00%
Sectionneur	567	9.11%	5659	90.89%	6226	100.00%
Tête de disjoncteur	0	0.00%	134	100.00%	134	100.00%
Transformateur de mesure	473	11.66%	3582	88.34%	4055	100.00%
Transformateur de puissance	410	23.70%	1320	76.30%	1730	100.00%
Traversée	12	0.90%	1328	99.10%	1340	100.00%
Total	2838	13.36%	18397	86.64%	21235	100.00%

Afin d'assurer que l'analyse effectuée est précise, les données ont été validées avec une requête plus poussée afin d'assurer que les données au rebut ont réellement vu un tel changement d'état dans la base de données Maximo. Le problème principal se situe au niveau du calcul de l'âge des équipements. Comme une date de mise au rebut est absente pour un certain nombre d'équipements contenu dans chaque GENRE, la date de mise au rebut est calculée comme étant la même date que la mise à jour dans Microsoft Access est effectuée. Pour cette raison, les équipements sont analysés afin d'exclure toute date qui est calculée. Suite à l'analyse effectuée, le niveau d'erreur associé à chaque modèle est calculé et les facteurs propres à une distribution de Weibull sont identifiés. Afin d'éliminer cet incertitude, les données associées à un calcul à l'extérieur de Maximo ont été exclues de l'analyse.

Tous les équipements ont été analysés à l'ANNEXE I où les principales étapes de l'analyse sont comme suit :

1. Analyser les données de défaillance afin de s'assurer que les données associées à une mortalité infantile sont exclues (données de mortalité inférieures à 2 ans).
2. Les données sont ensuite traitées numériquement afin d'identifier les bornes pessimistes des estimations du facteur de forme, d'échelle et de localisation des données. Toutes ces données sont les valeurs réelles directement associés aux équipements.

Donc, en consultant le

Tableau 3.5, il devient évident que les modèles qui auraient pu normalement être établis directement par les données fournies ne peuvent être utilisés sans une analyse supplémentaire. Le Tableau 3.6 résume les modèles qui sont établies pour les équipements analysés.

Tableau 3.6 Identification des paramètres Weibull

#	Nom utilisé dans l'analyse	N	FC	Rétention	N'	ΔN	FC'	ΔFC	β	η	γ
1	Accumulateur	563	0.999	OUI	482	-81	0.958	-1.14%	2.955	21.565	-1.419
2	Alternateur	19	0.888	NON							
3	Barre	156	0.995	OUI	84	-72	0.984	-1.11%	1.537	28.753	3.854
4	Barre blindée	35	0.923	NON							
5	Barre conventionnel	---	0.000	NON							
6	Batterie de condensateur	170	0.990	OUI	113	-57	0.979	-1.11%	2.991	34.372	-1.114
7	Centre de distribution	---	0.000	NON							
8	Changeur de prise	---	0.000	NON							
9	Chargeur d'accumulateur	743	0.991	OUI	586	-157	0.994	0.30%	2.518	25.244	1.897
10	Circuit bouchon	41	0.943	OUI	21	-20	0.928	-1.59%	0.664	3.575	9.741
11	CPC	66	0.913	NON							
12	Disjoncteur 600V	259	0.978	OUI	220	-39	0.975	-0.31%	12.032	142.603	-99.843
13	Disjoncteur HT	2576	0.985	OUI	1907	-669	0.993	0.81%	2.544	42.566	-0.918
14	Eclateur	---	0.000	NON							
15	Excitation	25	0.943	OUI	15	-10	0.929	-1.48%	0.408	6.355	44.361
16	Inductance à noyau d'air	669	0.979	OUI	586	-83	0.975	-0.41%	65.294	540.064	-495.313
17	Inductance isolé à l'huile	97	0.980	OUI	88	-9	0.968	-1.22%	2.879	30.284	2.608
18	Moteur synchrone	12	0.914	NON							
19	Onduleur	---	0.000	NON							
20	Parafoudre	2804	0.985	OUI	2241	-563	0.994	-0.10%	2.994	36.418	2.132
21	Plateforme (compensation sène)	---	0.000	NON							
22	Résistance	---	0.000	NON							
23	Rupteur	---	0.000	NON							
24	Sectionneur	6800	0.997	OUI	5647	-1153	0.994	-0.30%	2.325	40.037	1.832
25	Stator	---	0.000	NON							
26	Tête de disjoncteur	140	0.979	OUI	134	-6	0.97	-0.92%	8.309	75.843	-33.163
27	Transformateur de mesure	4325	0.997	OUI	3555	-770	0.997	0.00%	2.309	35.996	-0.026
28	Transformateur de puissance	1897	0.997	OUI	1302	-595	0.995	-0.20%	2.396	41.568	2.279
29	Traversée	1580	0.974	OUI	1313	-267	0.978	0.41%	1.852	25.694	4.698
30	Valve à thyristor	---	0.000	NON							

Conclusion

Le troisième chapitre de cette étude a servi à présenter le traitement des données ayant été effectué pour les données de défaillance de TransÉnergie. Avant tout, la structure des données a été présentée afin de familiariser le lecteur avec la méthodologie préconisée pour organiser la grande quantité d'information à notre disposition. Par la suite, la structure des requêtes bâties à l'intérieur du logiciel Microsoft Access® a été présentée pour familiariser le lecteur avec l'approche utilisée non seulement pour calculer l'âge au rebut mais aussi pour expliquer le raisonnement derrière l'approche choisie. Le résultat de cette analyse a ensuite été présenté et la qualité des données constructivement critiquée. Le résultat final de ce chapitre est une grande quantité de données qui sont jugées adéquates pour le traitement statistique qui a été présenté à la fin du présent chapitre.

CHAPITRE 4

PRÉDICTION DE LA FIABILITÉ DES SYSTÈMES COMPLEXES ET RÉPARABLES D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT

4.1 Introduction

L'objectif de la conception d'un réseau de transport est d'obtenir le maximum de flexibilité, fiabilité et disponibilité tout en conservant un taux d'investissement raisonnable et acceptable pour accomplir la tâche requise. Le but ultime est de conserver un haut niveau de continuité d'alimentation aux clients. De plus, l'aménagement des équipements doit permettre un entretien adéquat et accessible sans engendrer une interruption de service tout en assurant la sécurité du personnel. Afin d'arriver à concevoir et analyser un réseau électrique, un schéma unifilaire (*Line Diagram*) est employé. Ces schémas représentent l'arrangement électrique et physique des composantes d'un réseau de transport d'un poste jusqu'à destination.

4.2 Types de schémas unilaires

Pour le réseau de transport régional d'Hydro-Québec, il existe six configurations principales dont la complexité varie en fonction du nombre de leurs composantes et leurs architectures respectives :

- Barre unique;
- Barres et disjoncteurs en double;
- Barre principale et barre de relève;
- Barre en double et disjoncteur unique;
- Bouclés;
- Disjoncteur et demi.

Ces configurations sont illustrées dans la figure suivante.

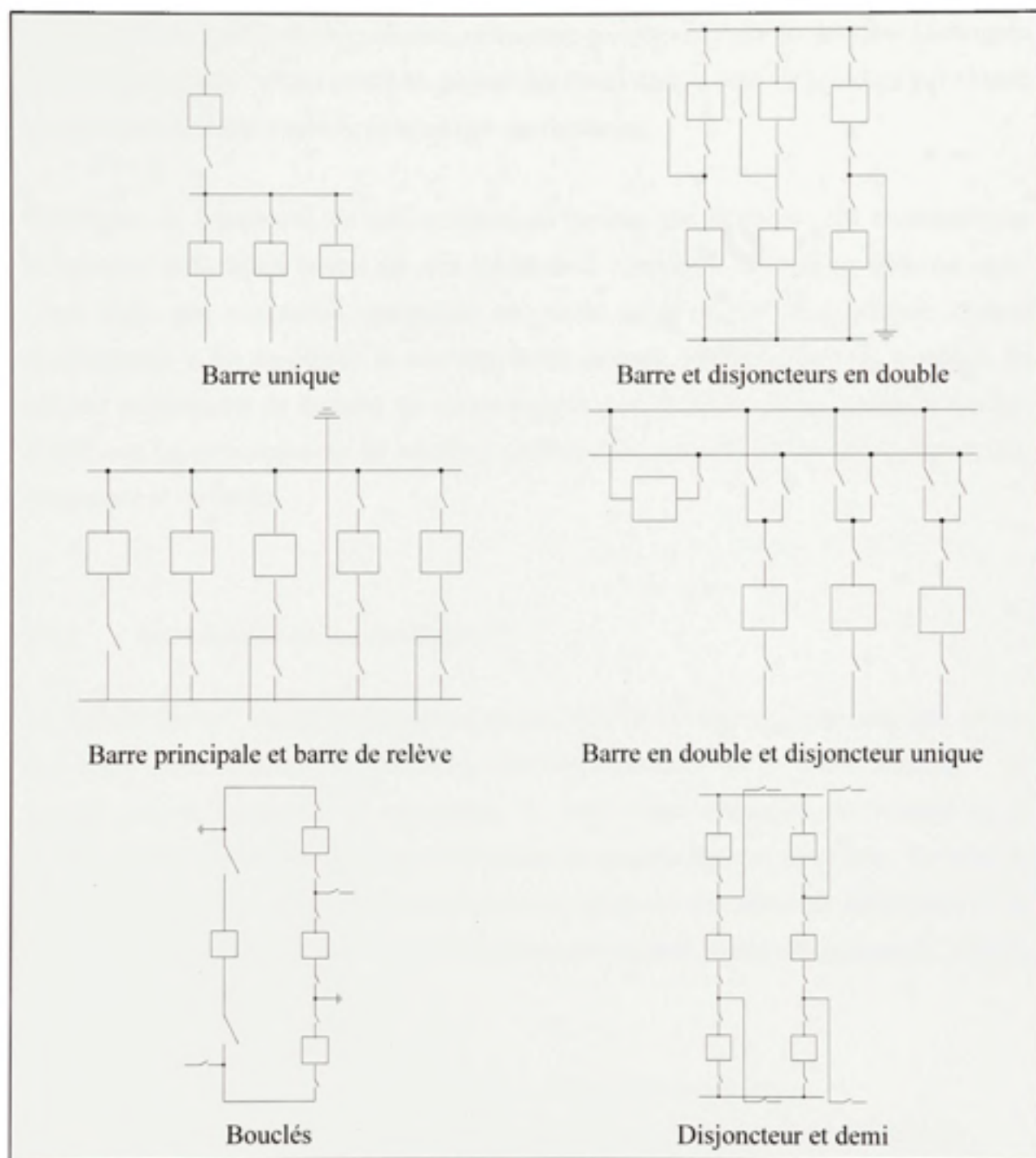


Figure 4.1 Configurations courantes du réseau de TransÉnergie

4.3 Simulation de la disponibilité des configurations de TransÉnergie

Comme chaque configuration présente un système complexe et que les données historiques que nous possédons traitent plutôt des pannes des composantes, nous ne pouvions pas obtenir un modèle de fiabilité explicite pour chaque configuration.

Également, la complexité de tels systèmes ne permet pas d'obtenir des modèles issus d'équations analytiques basées sur des schémas de connexion du type parallèle ou série. C'est donc, par simulation numérique que nous avons abordé le problème; chaque configuration a été modélisée et une simulation de type Monte-Carlo nous a permis de générer un ensemble de données du comportement général (disponibilité, temps de pannes, MTBF, etc.). Ces données ont été traitées à leur tour pour extraire les statistiques appropriées (espérance et variance).

4.3.1 Introduction au logiciel Raptor®

Le logiciel Raptor® simule les opérations de tout type de système ou processus, que ce soit une usine manufacturière, un réseau de télécommunications ou un avion militaire. Le logiciel permet également de caractériser le coût d'une réparation, la fiabilité et la maintenabilité. Il possède la capacité d'identifier les goulots dans un processus. De plus, le logiciel a la capacité d'identifier les composants ayant un taux élevé de défaillance et de déterminer les ressources qui viennent absorber une grande partie des ressources (Raptor Reliability Simulation Software).

L'entrée de données dans le logiciel Raptor® se fait en trois étapes soit :

1. Modéliser le système sous forme de diagramme à blocs et des connections logiques;
2. Entrer l'information associée à chaque élément du système;
3. Lancer les simulations (Monte-Carlo) et analyser les statistiques des résultats.

La version utilisée dans le cadre de la présente analyse est la version 5.0. Pour ne pas encombrer les ressources informatiques, la simulation sera effectuée en différents sous-systèmes afin de pouvoir travailler avec les limitations du logiciel et de l'équipement informatique.

4.3.2 Entrée de données pour la simulation

L'entrée de données est effectuée avec l'analyse des données telle que donnée en ANNEXE I. Nous avons introduit les statistiques du facteur de forme (β), du facteur d'échelle (η) et du facteur de localisation (γ). Uniquement les modèles qui ont affiché un facteur de corrélation élevé ont été retenus tel que défini dans la section 0. Un exemple d'entrée de données pour le cas d'un sectionneur est donné dans la Figure 4.2.

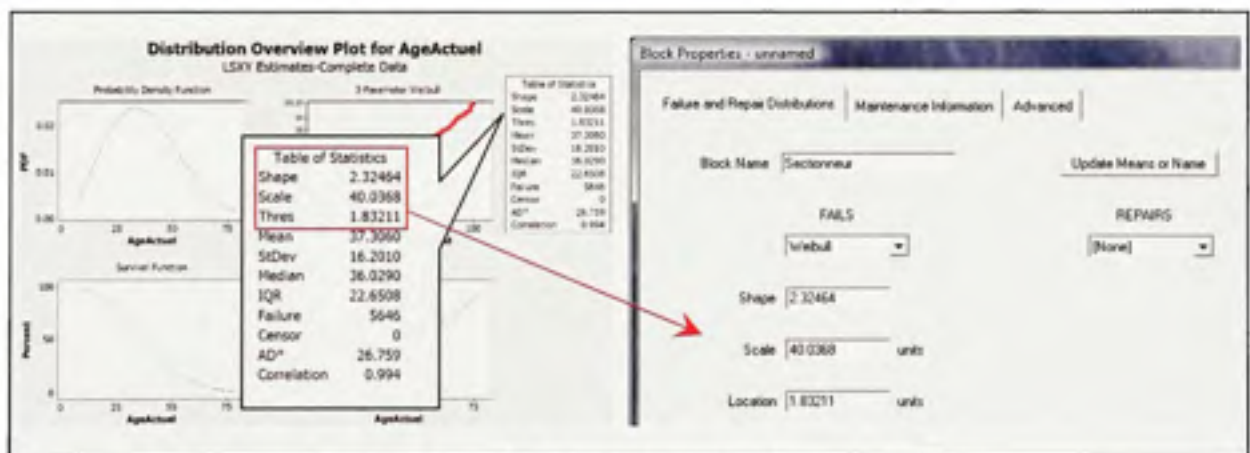


Figure 4.2 Entrée de données dans Raptor®

4.3.3 Simulations des configurations courantes de TransÉnergie

Afin de simuler chaque type de configuration tel que donné dans la Figure 4.1, les étapes suivantes sont requises :

1. Dessiner la configuration dans Raptor® afin de pouvoir simuler chaque cas;
2. Décider quelle branche est essentielle pour le fonctionnement du système (cheminement critique) et lesquelles sont présentes de manière redondante dans le schéma;
3. Effectuer la simulation et traiter les données pour extraire les statistiques pertinentes.

À titre d'exemple, l'arrangement d'un « disjoncteur et demi » est donné dans les figures suivantes pour la simulation à effectuer.

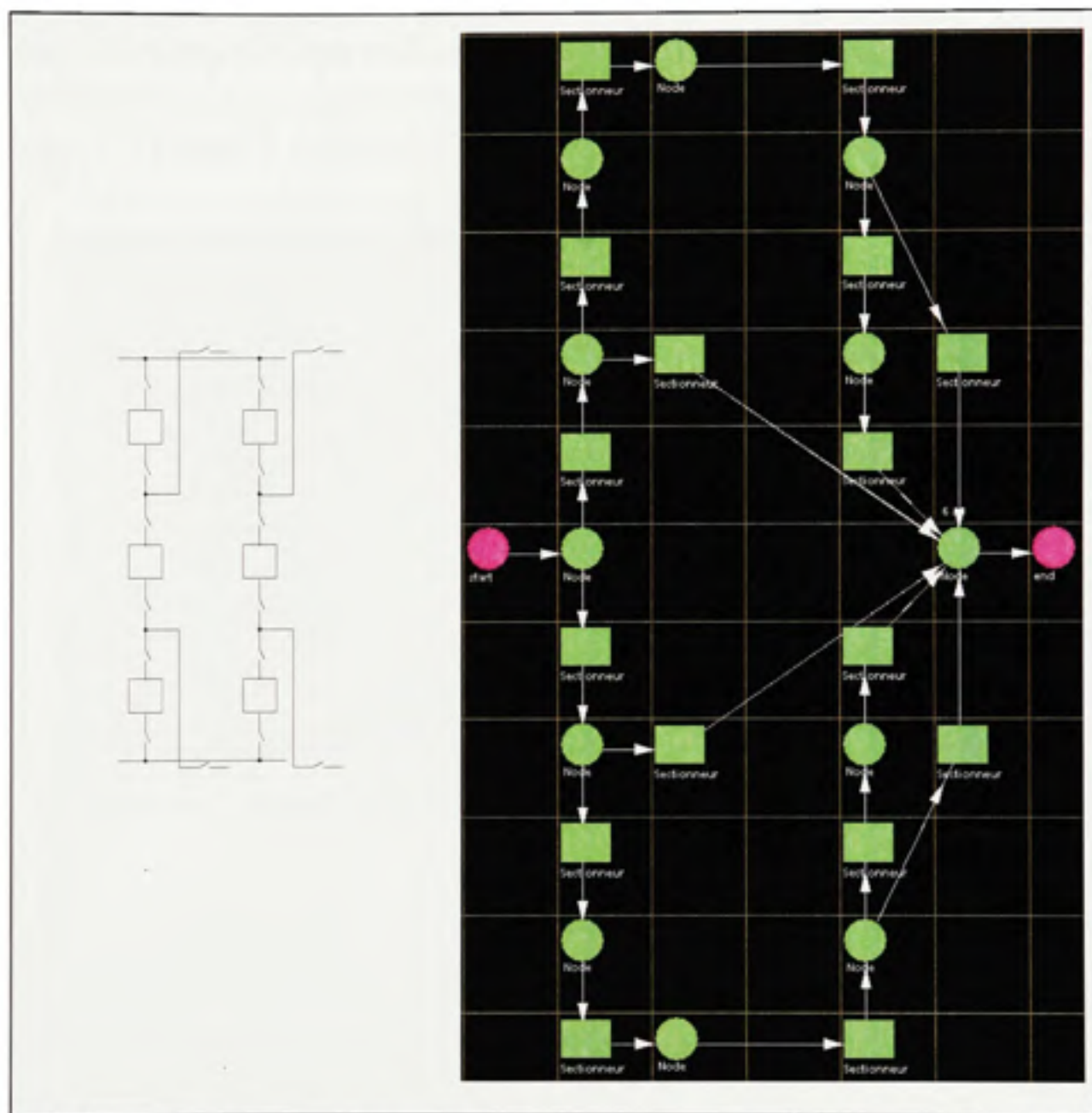


Figure 4.3 Configuration Raptor® d'un disjoncteur et demi

Une fois le schéma complété, la prochaine étape consiste à lancer les simulations avec 500 essais chacun représentant une durée de 10^6 heures¹¹. Suite à cet essai, un fichier est généré qui indique, sous différentes conditions, l'âge de l'installation à la défaillance. L'entrée de données pour chaque simulation est effectuée tel que noté dans la section 0 du présent rapport. La fenêtre de simulation est donnée dans la prochaine figure.

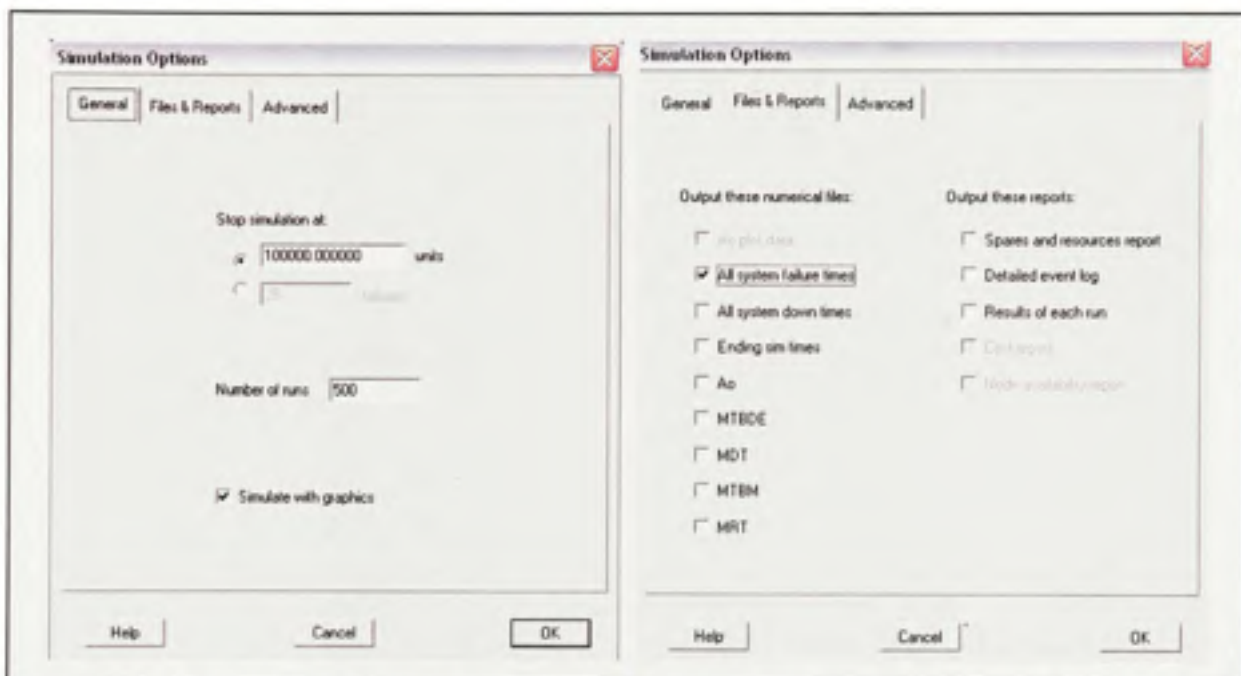


Figure 4.4 Configuration Raptor® de la simulation d'un disjoncteur et demi

¹¹ Le nombre d'essais et la durée des simulations ont été établis suite à une analyse de convergence. Nous avons constaté que les statistiques extraites se stabilisent après un certain temps (de l'ordre de 10^4 heures).

Tel que mentionné plus tôt, la simulation est ensuite lancée où on peut visualiser et analyser les différents états¹² du système par rapport aux conditions définies. La simulation pour le « disjoncteur et demi » est donnée dans la Figure 4.5.

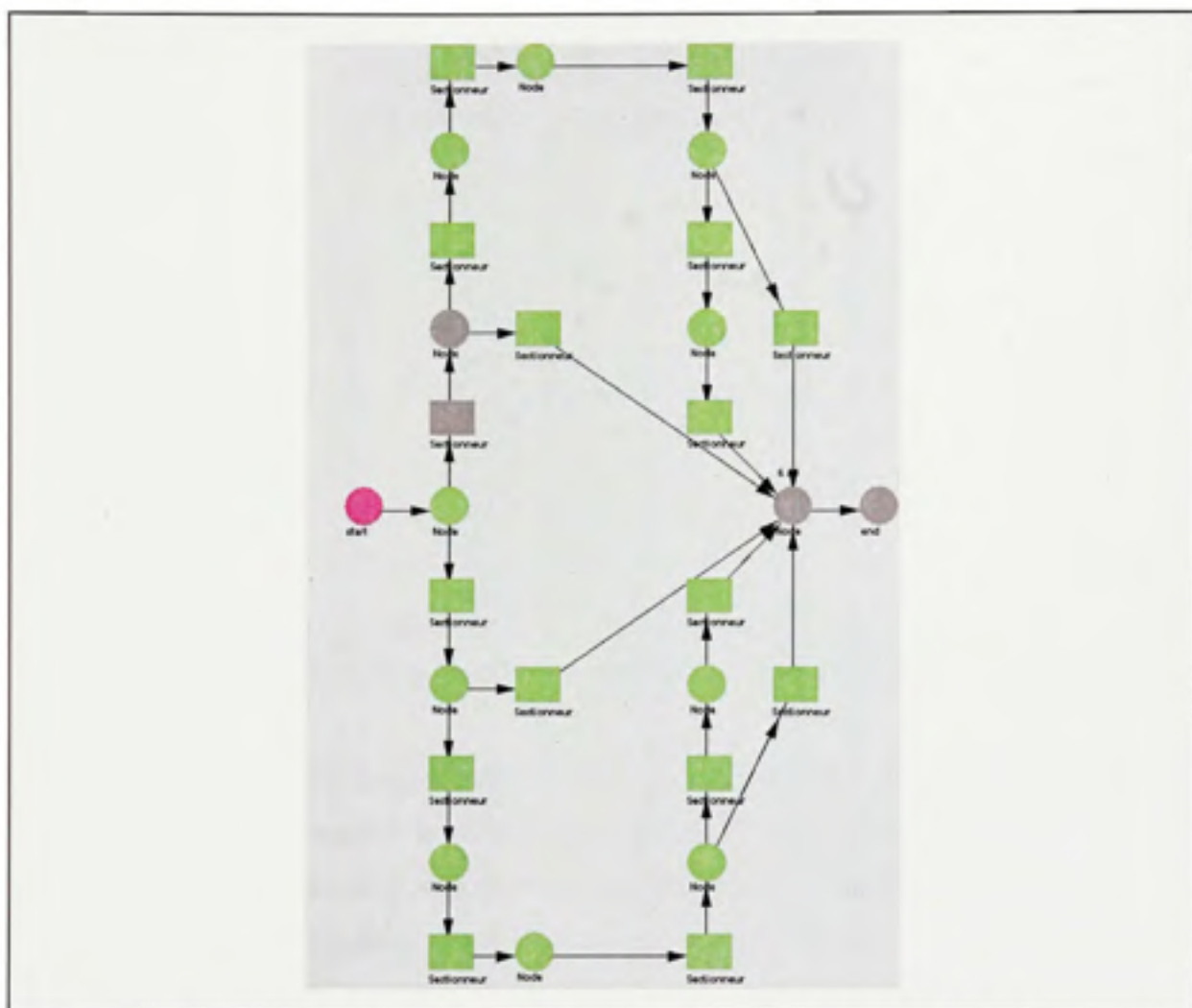


Figure 4.5 Simulation Monte-Carlo d'un disjoncteur et demi

¹² L'état 'vert' est activé lorsque toutes les composantes de la configuration étudiée sont fonctionnelles, l'état 'rouge' présente l'état où il y a une défaillance et, finalement, l'état 'jaune' représente le cas où une ou plusieurs composantes non critiques sont en panne sans toutefois causer l'arrêt de la configuration.

Les résultats de la simulation sont sauvegardés dans un fichier qui contient l'ensemble des données soit le temps correspondant aux défaillances sous les conditions prédéterminées. Un exemple est donné dans la Figure 4.6.

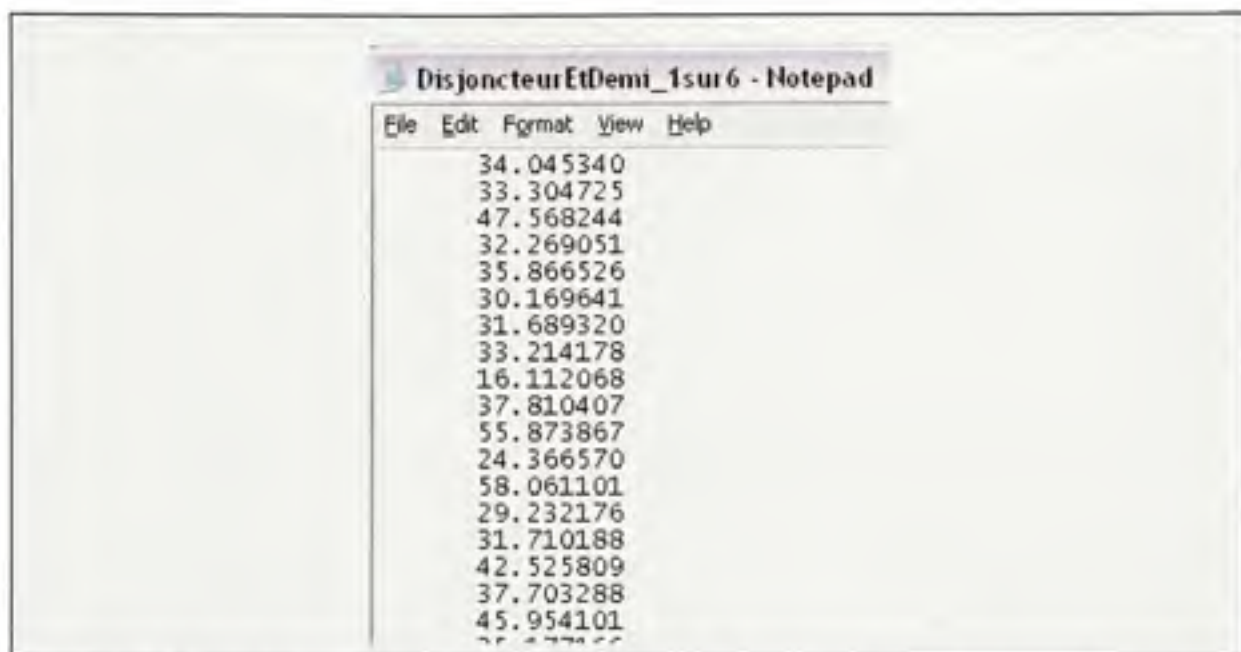


Figure 4.6 Résultat de la simulation Monte-Carlo pour un disjoncteur et demi

La dernière étape consiste à consolider et traiter les données pour identifier les statistiques. L'analyse a été effectuée selon la méthodologie décrite dans la section 2.2.2 soit d'effectuer une estimation des probabilités maximales d'une distribution Weibull à trois paramètres par l'entremise du logiciel Statistica® pour les traitements. Pour chaque configuration un modèle Weibull a été identifié en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance. Ce modèle qui évalue la borne inférieure de prédiction selon un niveau de confiance de 95% (borne pessimiste) servira à prédire le comportement de chaque installation et ainsi permettre aux gestionnaires d'entretien d'optimiser leurs opérations de maintenance et de remplacement.

Un résumé des résultats de toutes les simulations est donné dans le Tableau 4.1 où on peut constater l'effet des critères de disponibilité choisis. À titre d'exemple, dans les cas où on exige qu'une branche sur trois est requise, les paramètres sont bien différents pour la même

configuration par rapport au cas où on exige que deux branches sur trois soient requises pour assurer la survie de la configuration en question.

Tableau 4.1 Résultat des simulations Monte-Carlo pour les différentes configurations

Bloc. Disponibilité	β'	β	β^*	η'	η	η^*	γ	γ	γ^*
Barre unique, 1 / 3		2.896			22.619			13.636	
Barre unique, 1 / 3	2.363	2.526	2.699	20.457	21.210	22.010	14.252	14.992	15.733
Barre unique, 2 / 3		2.579			17.807			9.432	
Barre unique, 2 / 3	2.371	2.539	2.720	16.659	17.482	18.129	9.037	9.724	10.411
Barre unique, 3 / 3		2.731			18.067			0.519	
Barre unique, 3 / 3	2.516	2.694	2.885	17.125	17.722	18.339	0.098	0.823	1.549
Barre et disjoncteur en double, 1 / 3		3.122			24.602			10.988	
Barre et disjoncteur en double, 1 / 3	2.812	2.794	2.988	22.367	23.119	23.896	11.510	12.420	13.329
Barre et disjoncteur en double, 2 / 3		3.882			24.260			2.040	
Barre et disjoncteur en double, 2 / 3	2.981	3.188	3.409	21.565	22.200	22.854	3.340	4.161	4.983
Barre et disjoncteur en double, 3 / 3		2.330			16.007			1.389	
Barre et disjoncteur en double, 3 / 3	2.197	2.353	2.521	15.264	15.874	16.508	0.890	1.488	2.085
Barre principale et barre de relève, 1 / 5		3.344			39.569			18.393	
Barre principale et barre de relève, 1 / 5	2.688	2.851	3.047	35.488	36.657	37.865	19.917	21.279	22.642
Barre principale et barre de relève, 2 / 5		3.123			29.257			15.275	
Barre principale et barre de relève, 2 / 5	2.588	2.770	2.964	26.865	27.777	28.719	15.788	16.794	17.800
Barre principale et barre de relève, 3 / 5		3.419			27.793			8.310	
Barre principale et barre de relève, 3 / 5	2.704	2.889	3.197	24.950	25.733	26.541	9.268	10.322	11.376
Barre principale et barre de relève, 4 / 5		3.600			25.807			2.425	
Barre principale et barre de relève, 4 / 5	2.848	3.154	3.374	23.306	23.998	24.712	3.238	4.218	5.198
Barre principale et barre de relève, 5 / 5		2.178			17.491			1.901	
Barre principale et barre de relève, 5 / 5	2.070	2.217	2.375	16.661	17.369	18.106	1.344	1.973	2.602
Barre en double et disjoncteur unique, 1 / 3		3.220			30.999			-1.545	
Barre en double et disjoncteur unique, 1 / 3	2.848	3.050	3.265	28.922	29.811	30.727	-1.698	-0.403	0.891
Barre en double et disjoncteur unique, 2 / 3		3.385			26.148			-0.923	
Barre en double et disjoncteur unique, 2 / 3	2.704	2.890	3.090	23.288	24.045	24.826	0.196	1.152	2.088
Barre en double et disjoncteur unique, 3 / 3		2.196			16.346			1.711	
Barre en double et disjoncteur unique, 3 / 3	2.052	2.197	2.353	15.472	16.136	16.827	1.307	1.871	2.435
Boucles, 1 / 2		3.124			23.181			0.578	
Boucles, 1 / 2	2.775	2.970	3.160	21.577	22.258	22.960	0.482	1.443	2.403
Boucles, 2 / 2		2.137			14.511			1.904	
Boucles, 2 / 2	2.119	2.272	2.436	14.120	14.704	15.313	1.148	1.697	2.247
Disjoncteur et demi, 1 / 6		2.829			30.255			9.486	
Disjoncteur et demi, 1 / 6	2.316	2.476	2.647	27.385	28.427	29.507	10.257	11.255	12.293
Disjoncteur et demi, 2 / 6		2.466			19.756			9.730	
Disjoncteur et demi, 2 / 6	2.354	2.522	2.702	19.037	19.747	20.482	8.933	9.718	10.502
Disjoncteur et demi, 3 / 6		2.756			17.238			7.039	
Disjoncteur et demi, 3 / 6	2.296	2.455	2.625	15.951	16.583	17.198	7.253	7.742	8.143
Disjoncteur et demi, 4 / 6		3.540			20.429			-0.100	
Disjoncteur et demi, 4 / 6	2.789	2.980	3.193	18.024	18.591	19.177	0.966	1.684	2.403
Disjoncteur et demi, 5 / 6		2.373			14.429			1.646	
Disjoncteur et demi, 5 / 6	2.248	2.408	2.580	13.802	14.341	14.901	1.155	1.705	2.254
Disjoncteur et demi, 6 / 6		2.206			11.758			1.702	
Disjoncteur et demi, 6 / 6	1.991	2.131	2.281	11.026	11.514	12.024	1.565	1.920	2.254

Légende

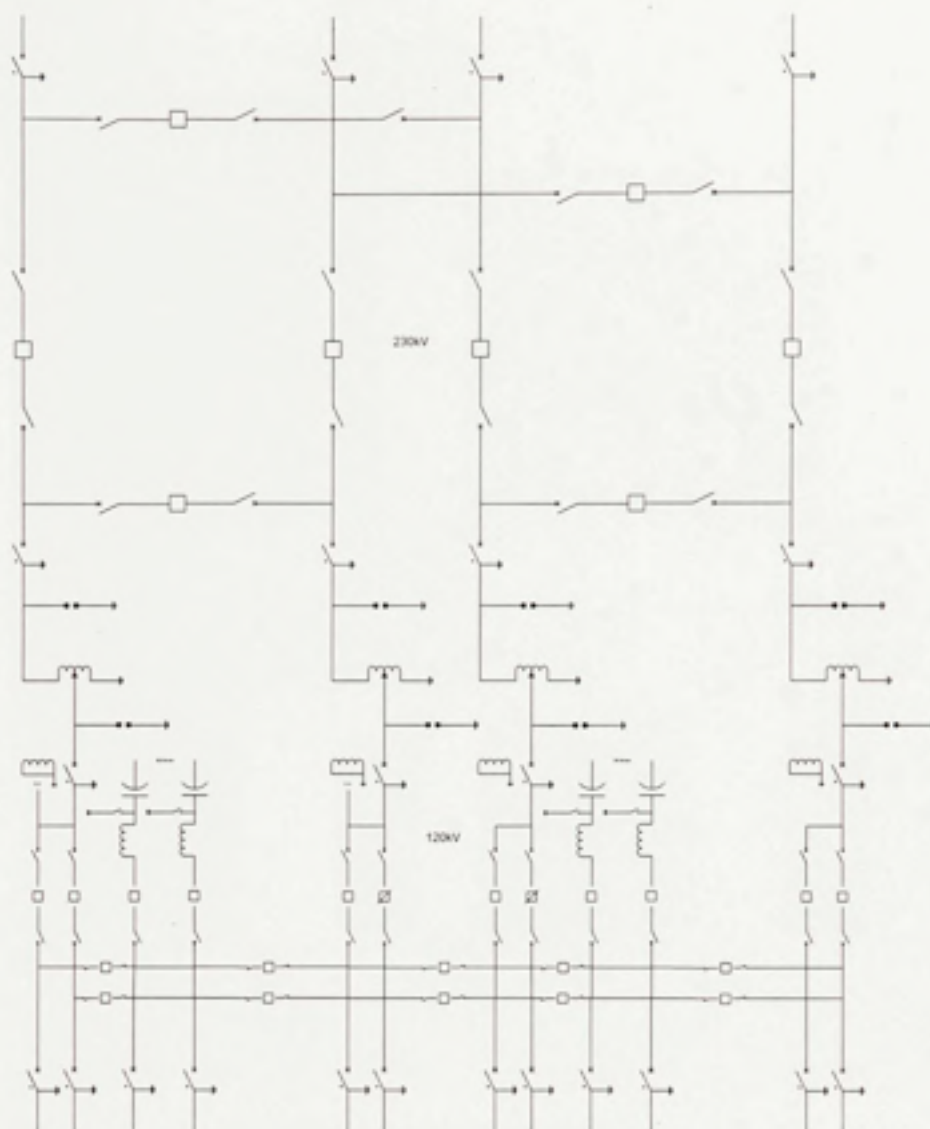
Paramètre Weibull (Estimation des probabilités maximales, MLE)

Paramètre Weibull (Estimation des moindres carrés, LSE)

4.3.4 Simulation d'un poste de transport

Un cas a été retenu pour illustrer notre approche soit celui d'un poste de transport typique 230-120kV (Déry et Garant, 2006). Tel que mentionné dans la section 4.1, la simulation devra être effectuée en sous-systèmes afin de pouvoir faciliter la tâche et éviter de débiter une analyse manuscrite du système qui risque d'être à la fois complexe, laborieuse et voir même impossible. Afin de simplifier l'analyse, plusieurs ensembles d'éléments ont été traités comme un sous-système. Par exemple, l'utilisation d'un sectionneur-interrupteur dans un poste a été généralisée comme un sectionneur.

La première étape de simulation d'un poste de transport est de planifier de quelle façon les différents sous-systèmes seront interconnectés pour subdiviser la simulation en plusieurs parties dont chacun peut être facilement géré et ne nécessitant pas d'amples ressources logistiques et informatiques. La Figure 4.7 illustre le schéma du poste de transport. La Figure 4.8 illustre le découpage en sous-systèmes qui a été retenu pour la simulation.



LÉGENDE

	Sectionneur
	Sectionneur motorisé
	Mise à la terre
	Parasoudre
	Inductance shunt
	Service auxiliaire
	Disjoncteur
	Condensateur (ou batterie de condensateurs)

Figure 4.7 Schéma électrique du poste 230kV-120kV

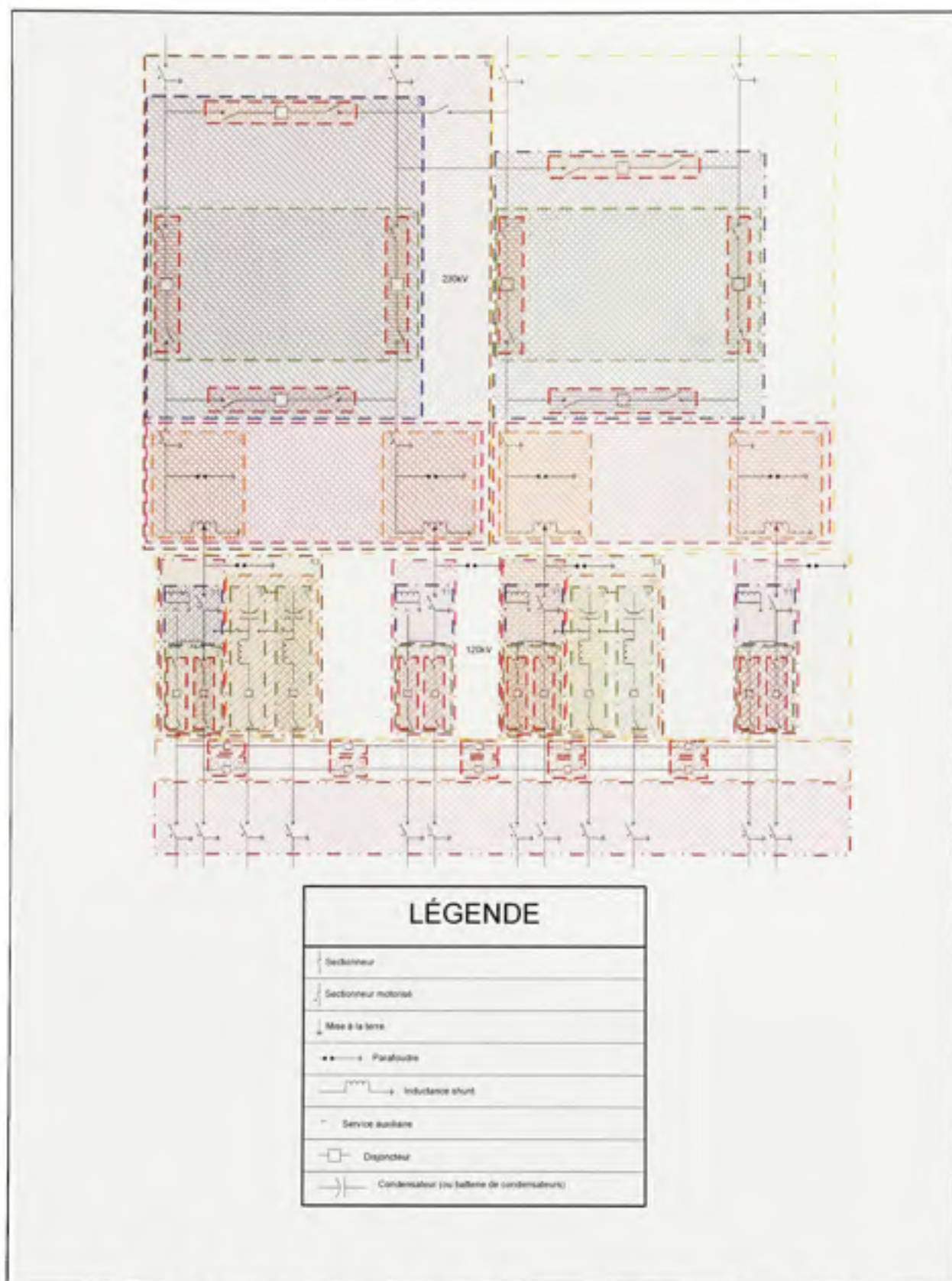


Figure 4.8 Schéma électrique des sous-systèmes (poste 230kV-120kV)

La simulation est effectuée d'une manière identique à celle qui a été employée à la section 4.3.3. La Figure 4.9 illustre schématiquement la procédure qui a été suivie pour chaque sous-système.

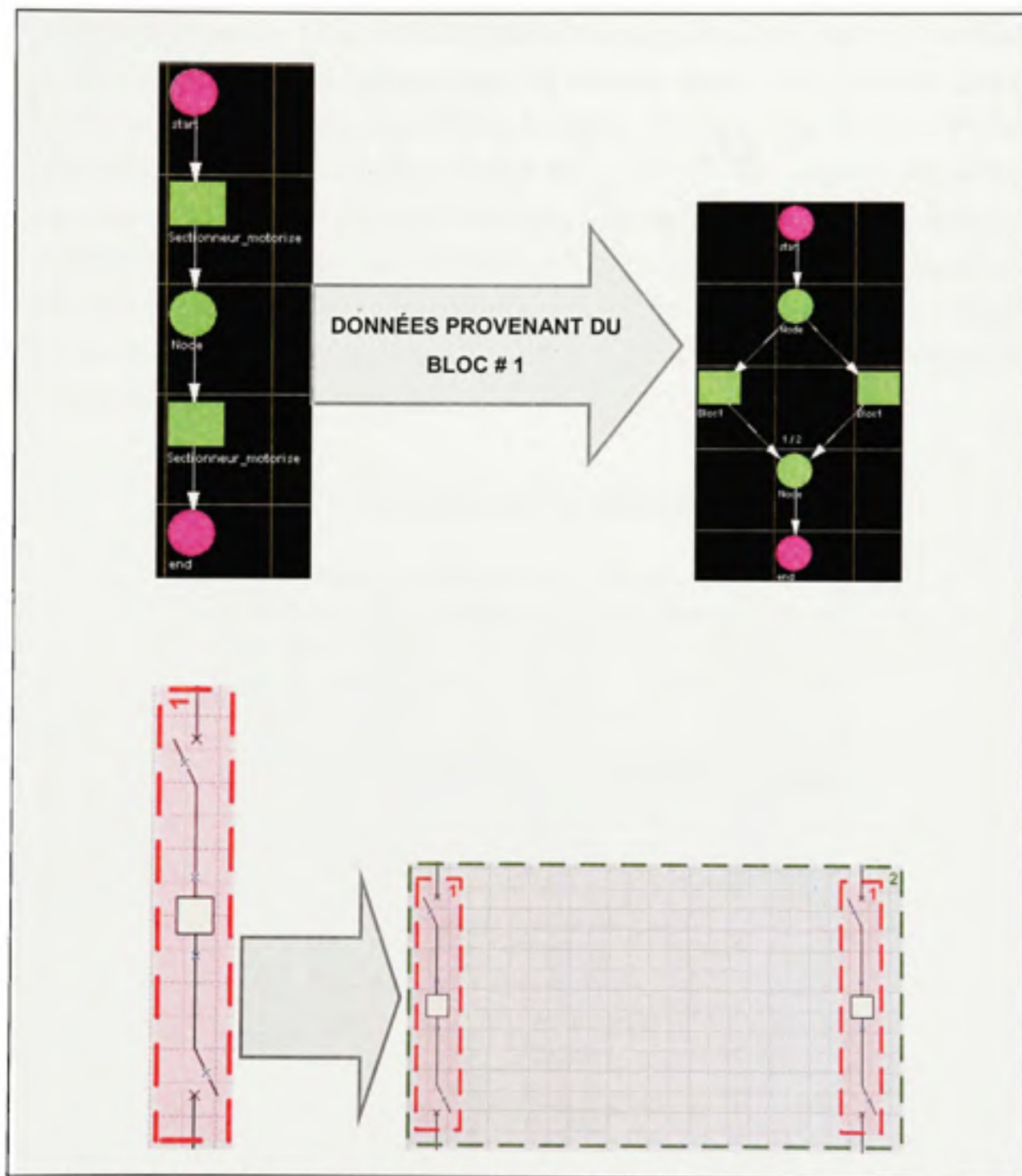


Figure 4.9 Exemple d'une simulation transférée d'un sous-système à un autre

Pour chaque sous-système, des paramètres de forme, d'échelle et de localisation équivalents sont extraits pour être transférés vers le prochain bloc de simulation. Les données utilisées pour alimenter les différents appareils compris à l'intérieur du poste sont données en annexe et décrits dans la section ANALYSE DES DONNÉES du présent rapport. Lors du traitement, il a été constaté que certains blocs pouvaient être traités de manière simultanée avec d'autres blocs d'où l'indication dans le Tableau 4.2 qu'un paramètre particulier est « NON-REQUIS ». De plus, certaines valeurs du facteur de localisation sont indiquées comme étant zéro bien que ce ne soit pas nécessairement le cas. Cela est directement associé au fait que le logiciel Raptor® ne permet aucune valeur négative du facteur de localisation comme donnée d'entrée à la simulation. Pour cette raison, les résultats produits doivent être traités avec soin car ces derniers comportent un certain niveau d'erreur. Les résultats de la simulation sont donnés dans le Tableau 4.2:

Tableau 4.2 Résultat des simulations pour le poste 230kV-120kV

Bloc	β	η	γ
1	2.408	31.758	0.291
2	3.071	35.750	3.520
3	3.391	28.967	4.494
4	3.260	26.333	0.000
5	NON-REQUIS	NON-REQUIS	NON-REQUIS
6	3.159	19.519	5.690
6,8	4.606	20.644	0.785
7	NON-REQUIS	NON-REQUIS	NON-REQUIS
8	NON-REQUIS	NON-REQUIS	NON-REQUIS
9	NON-REQUIS	NON-REQUIS	NON-REQUIS
10	NON-REQUIS	NON-REQUIS	NON-REQUIS
11	NON-REQUIS	NON-REQUIS	NON-REQUIS
12	3.661	30.855	0.000
13	4.346	24.623	0.000
14	4.952	23.115	0.000
15	3.775	23.266	1.772
16	3.294	19.781	20.293

Lorsqu'on combine tous les sous-systèmes (voir Figure 4.10), nous obtenons un modèle global pour le poste étudié. Les résultats sont donnés dans la situation décrite comme TOTAL dans ce mémoire.

Les résultats de la simulation sont donnés par les paramètres suivants soit :

- $\beta = 5.085$, $\eta = 19.265$ et $\gamma = -1.1455$.

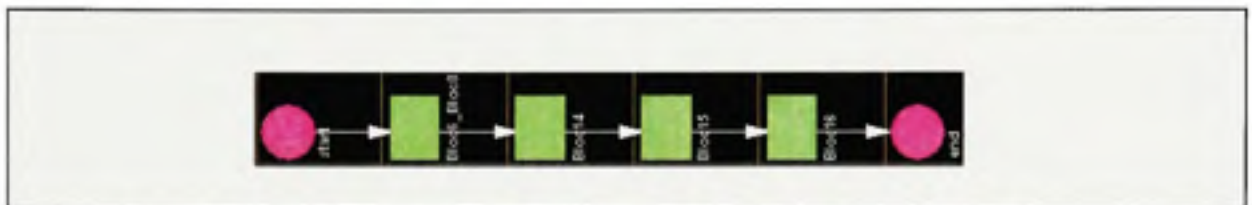


Figure 4.10 Simulation Monte-Carlo finale pour le poste 230kV-120kV

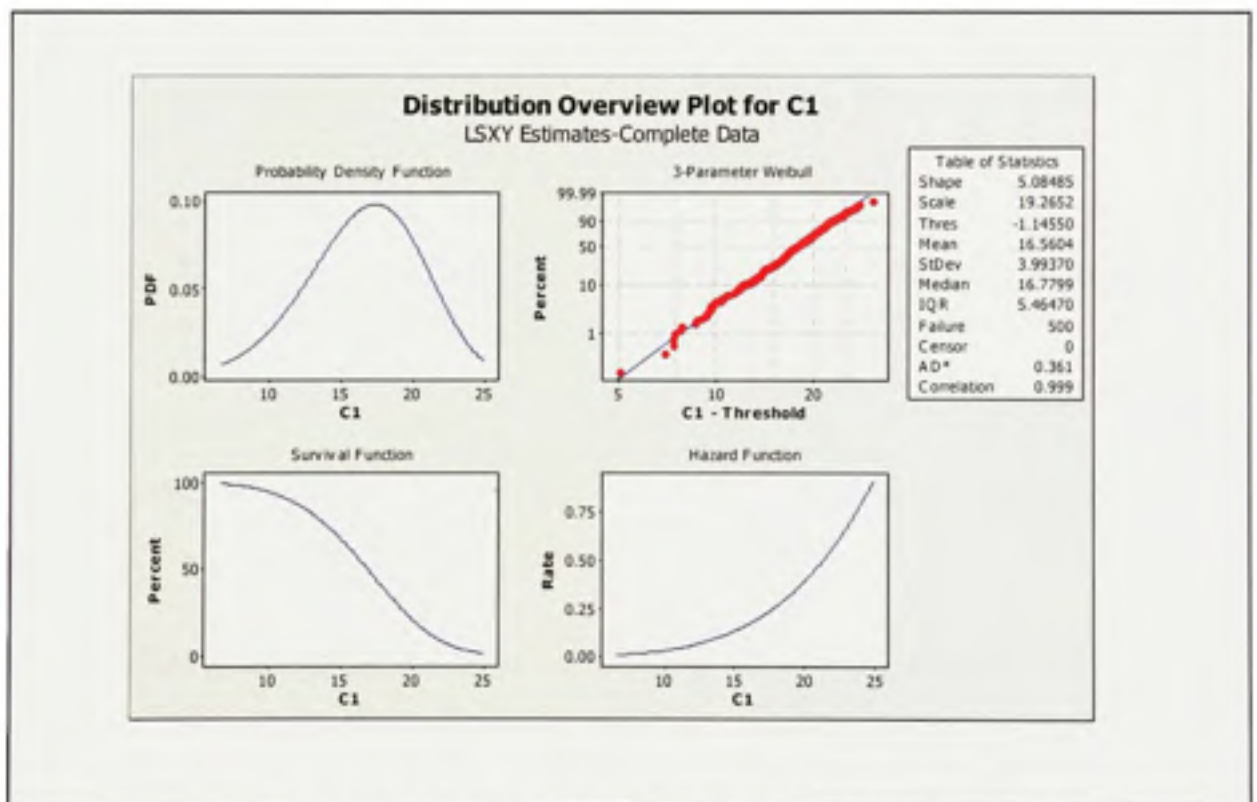


Figure 4.11 Modèle de fiabilité du poste 230kV-120kV

4.3.5 Validation du modèle

Pour illustrer le potentiel et la commodité du modèle analytique identifié précédemment, nous proposons deux scénarios.

Scénario 1:

- Un planificateur de maintenance désire établir une politique de maintenance préventive et systématique;
- Le seuil de risque acceptable est établi à 0.01% (donc fiabilité résiduelle égale à 99.99%);
- La substitution des paramètres du modèle dans l'équation (2.10) nous donne :

$$0.0001 = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-1.1455}{19.265}\right)^{5.085}} \quad (4.1)$$

- Ce qui nous permet d'isoler une période égale à 28.67 années. Pour des raisons de commodité, ce dernier chiffre peut être arrondi à **29 ans**.

Scénario 2 :

- En considérant une fiabilité de 99.99966% (niveau Six Sigma®), la période de maintenance prédictive systématique pour tout le poste sera de :

$$0.0000034 = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-1.1455}{19.265}\right)^{5.085}} \quad (4.2)$$

- Ceci nous permet d'isoler une période égale à 30.59 années. Pour des raisons de commodité, ce dernier chiffre peut être arrondi à **30 ans**.

Nous signalons également au lecteur que notre modèle peut être utilisé pour établir le nombre minimal des redondances nécessaires (connexion en parallèle) du poste.

4.4 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons introduit les différentes configurations qui sont couramment utilisées sur le réseau de TransÉnergie. Afin de démontrer les principes qui ont été détaillés dans ce mémoire, nous avons effectué une simulation de la disponibilité des différentes configurations présentées. L'utilisation du logiciel Raptor[®] permet une efficience dans les calculs effectués qui peuvent être très laborieux lorsque effectués manuellement. Les paramètres (facteurs de forme, d'échelle et de localisation) préalablement calculés en annexe ont été utilisés comme les données d'entrée dans chaque simulation et, pour fins de simplicité, le temps de réparation a été considéré comme étant zéro. Les résultats de chaque simulation sont les données de défaillance de la configuration. Ces données doivent être considérées avec soin car elles comportent un certain niveau d'erreur directement causé par les limitations du logiciel Raptor[®] qui ne permettent pas l'entrée d'une donnée négative pour le facteur de localisation lorsqu'on passe d'un sous-système à l'autre à travers notre analyse. Pour fins de balisage, les paramètres de Weibull (facteurs de forme, d'échelle et de localisation) ont été calculés avec les deux méthodes décrites précédemment soit une estimation des moindres carrés et une estimation des probabilités maximales. Ensuite, un deuxième exemple a été présenté soit celui d'un poste de transport où une sous-division en blocs a été effectuée afin de démontrer la flexibilité de la méthode décrite. Finalement, une validation du modèle a été présentée afin de démontrer de quelle façon le modèle de Weibull pouvait être utilisé comme base de calcul pour estimer la durée de vie opérationnelle d'un poste de transport selon un niveau de fiabilité prédéterminé avec une probabilité de défaillance acceptable.

CONCLUSION

À travers ce mémoire, différentes méthodes ont été utilisées afin de déterminer les paramètres de forme, d'échelle et de localisation d'une distribution de Weibull à trois paramètres. Il a été démontré que ce type de distribution est la plus appropriée pour la modélisation de la fiabilité d'un équipement lorsqu'un nombre suffisant de données sont disponibles afin d'établir une corrélation adéquate. Deux méthodes ont été utilisées pour la modélisation des paramètres soit une estimation des probabilités maximales (MLE) et une détermination des paramètres par estimation des moindres carrés. Lors de la démonstration des deux méthodes d'estimation, la MLE a été jugée comme étant la plus efficace en étant capable de fournir des données qui sont à la fois conservatrices et précises.

Les paramètres de forme, d'échelle et de localisation ont été estimés avec un intervalle de confiance de 95%. Certains types d'équipements ont dû être exclues de l'analyse à cause du facteur de corrélation (inférieur à 0.925) et ayant une date de mise au rebut qui est calculée à partir d'une date de mise en service combinée avec une date de mise au rebut qui est soit explicitement indiquée ou qui peut être inférée à partir des dates de changement d'état vers le rebut dans la base de données Maximo.

Suite aux travaux effectués dans le cadre de ce mémoire, les données extraites de la base de données de TransÉnergie ont été codées et uniformisées, un sommaire sur les données statistiques a été présenté et l'intervalle de confiance a été déterminé pour les paramètres de la distribution de Weibull.

Finalement, une validation des données a été effectuée par l'entremise d'un exemple concret démontrant les résultats obtenus en utilisant le lien entre le facteur de forme et d'échelle, une estimation des probabilités maximales et une détermination des paramètres par estimation des moindres carrés.

RECOMMANDATIONS

Les objectifs originellement définis pour ce mémoire en introduction ont tous été atteints. Considérant l'atteinte de ces objectifs, il a été constaté que certains points restent encore à approfondir. Lors d'une prochaine série de travaux, les points suivants devront être approfondies afin d'obtenir une meilleure compréhension de l'analyse de la pérennité du réseau de transport régional de TransÉnergie :

- **Harmonisation de l'entrée de données dans la base de données Maximo :** L'analyse effectuée des données a été compliquée par le fait que très peu de restrictions sont présentes dans Maximo. Le simple fait de préciser les entrées de données par des listes établies d'avance (par exemple : type d'équipement) viendrait assurer que les données présentes dans la base de données sont exactes.
- **Effectuer une mise à jour des données sur une base régulière :** Les modèles qui ont été déterminées à travers cet ouvrage devront être mis à jour au fil du temps afin d'assurer que la réalité est toujours reflétée à travers le temps. Cela est d'une importance particulière avec les données qui n'ont pas pu faire partie d'une analyse statistique jugée plausible car à travers le temps une plus grande quantité de données rendront probablement plusieurs modèles plausibles.
- **Analyser le niveau de protection présent sur chaque équipement :** Bien que cela n'ait pas fait partie de l'analyse quantitative de cet ouvrage, une analyse du niveau de protection présent pour les équipements n'ayant pas de modèle statistique plausible est recommandé car un aspect prédictif n'a pas pu être appliqué aux équipements affectés.

- **Analyser le niveau de redondance requis afin d'établir une corrélation sur la pérennité du réseau :** Une simulation Monte-Carlo a été effectuée pour des configurations courantes d'équipements de TransÉnergie. Il n'a pas été possible de déterminer une corrélation directe entre le niveau de redondance présent par configuration et la variation des paramètres de forme, d'échelle et de localisation. Il est recommandé d'examiner cet aspect en profondeur lors d'un ouvrage académique subséquent.
- **Intégrer le temps de réparation par type d'équipement à la modélisation effectuée :** Pour fins de simplicité, le temps de réparation a été déterminé comme étant égal à zéro alors qu'on sait très bien que cela ne représente pas la réalité. Afin d'avoir des modèles qui sont simulés avec précision dans le logiciel Raptor®, il est fortement recommandé d'intégrer cet aspect à l'intérieur des travaux à venir.
- **Utiliser d'autres méthodes qui sont appropriées pour des équipements où une absence de données est présente :** Un des problèmes principaux avec certains types d'équipements est le fait qu'une faible quantité de données rendent impossible de justifier l'utilisation de modèles établis (résultats non-plausibles). À travers la revue de la littérature, certaines méthodes d'analyse ont été citées comme étant des ressources adéquates pour l'analyse de ce type de données. Cette analyse n'a pas fait partie du présent mémoire, mais dans le cas où une absence de données persiste à travers le temps, ce type d'approche s'avère intéressant.

ANNEXE I

ANALYSE DÉTAILLÉE DES DONNÉES HISTORIQUES DE TRANSÉNERGIE

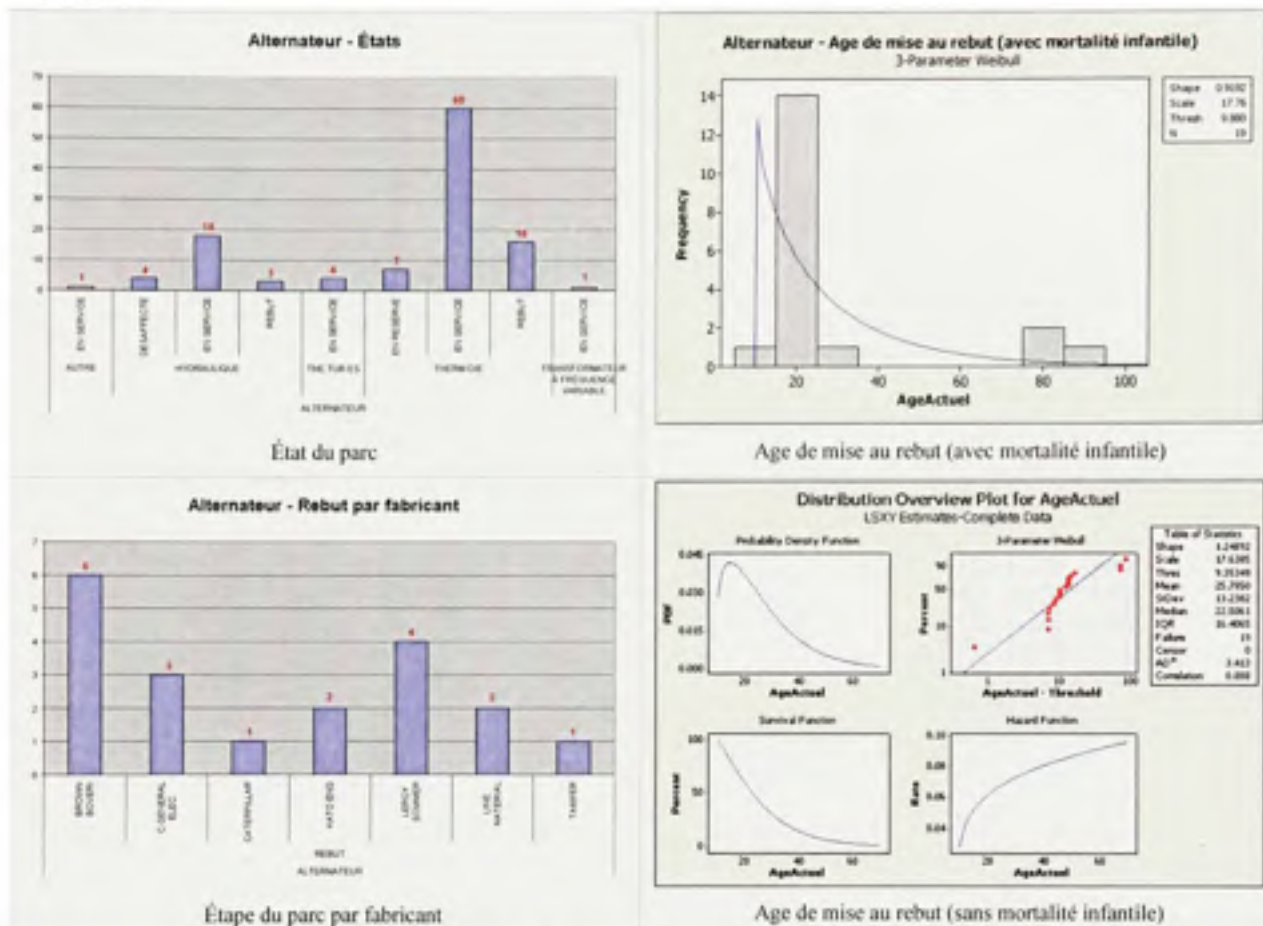
Les données présentées couvrent une période suffisante afin d'avoir une quantité de données représentatives. Ces données ont été tirées de la base de données fournie par TransÉnergie au début du projet et les résultats présentés dans cette section tiennent en compte les données modifiées dans le CHAPITRE 3.

L'état du parc, que se soit sur le plan global (par état) ou par fabricant est par rapport aux données non filtrées. Une nuance est requise par rapport aux données présentées dans la présente section.

Le choix a été de présenter les données brutes (incluant toutes les données enregistrées) et les données filtrées (en excluant ce qui a été jugé comme mortalité infantile). Ce point est très important car les défaillances enregistrées durant les premières périodes de fonctionnement (< 2 années dans la présente étude) ont pour la grande majorité une origine, non pas liée à la fiabilité intrinsèque de l'équipement, mais plutôt une mauvaise installation ou un usage non adéquat. Ces données, si retenues, auront pour conséquence de sous-estimer significativement la fiabilité opérationnelle.

Deux analyses ont été effectuées pour les données étant jugées plausibles. La première analyse a été effectuée avec une estimation des moindres carrés (LSE) afin d'avoir un aperçu global des trois paramètres de Weibull avec une corrélation présentée pour valider l'intégrité des données. Par la suite, une analyse a été effectuée avec une estimation des probabilités maximales (MLE) afin de pouvoir présenter les trois paramètres à l'intérieur d'un intervalle de confiance de $\pm 95\%$. La différence entre les paramètres calculés est due aux différentes méthodes de calcul utilisées pour obtenir nos données finales des différents paramètres.

Alternateur

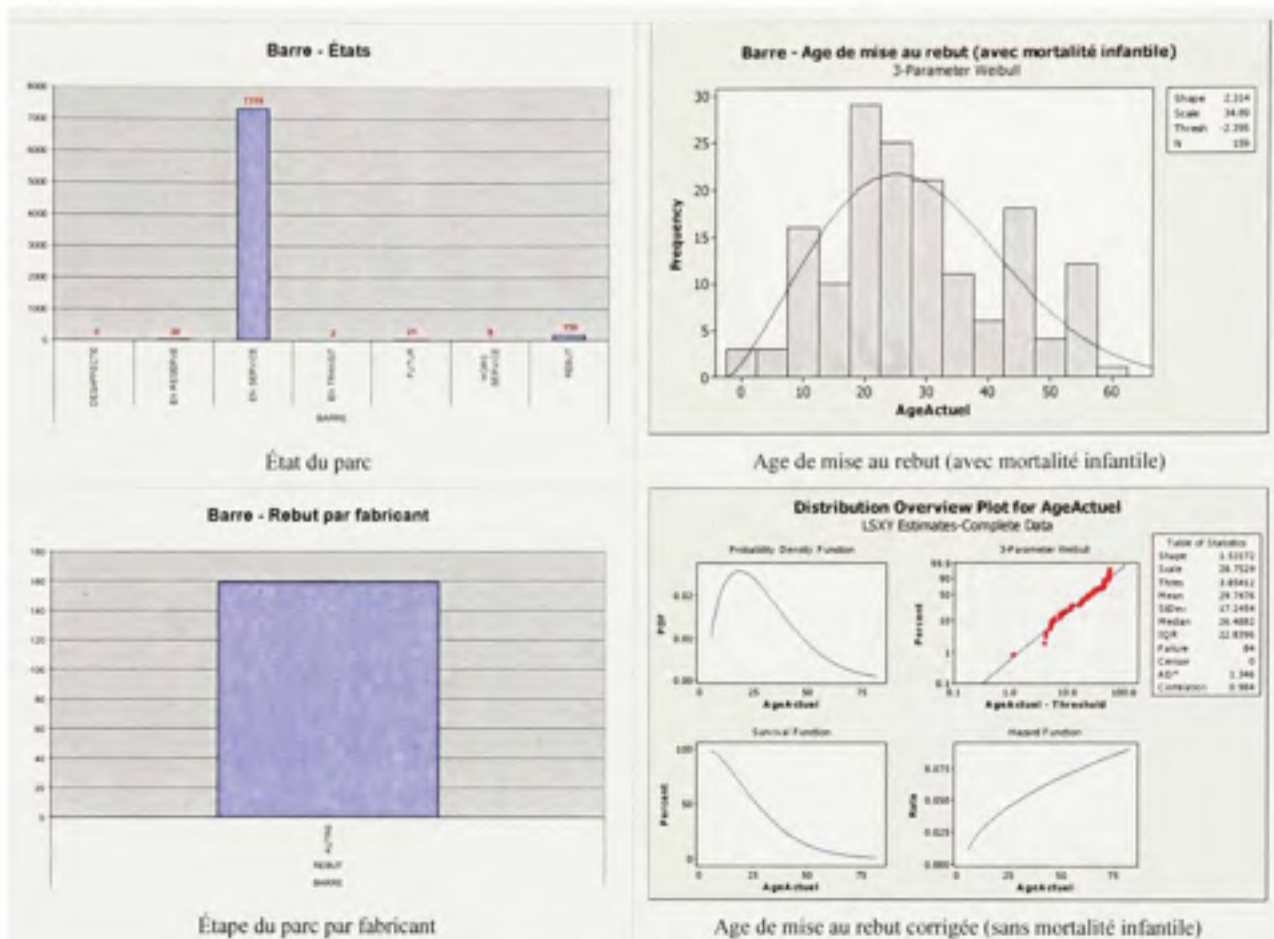


Statistiques descriptives de l'équipement 'Alternateur'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

				Modèle plausible?
Facteur de forme:	$\beta =$	1.249		NON
Facteur d'échelle:	$\eta =$	17.639		
Facteur de localisation:	$\gamma =$	9.353		
Facteur de corrélation:	$r =$	0.888		

Barre



Statistiques descriptives de l'équipement 'Barre'

Les trois paramètres corrigés de la distribution Weibull sont données par :

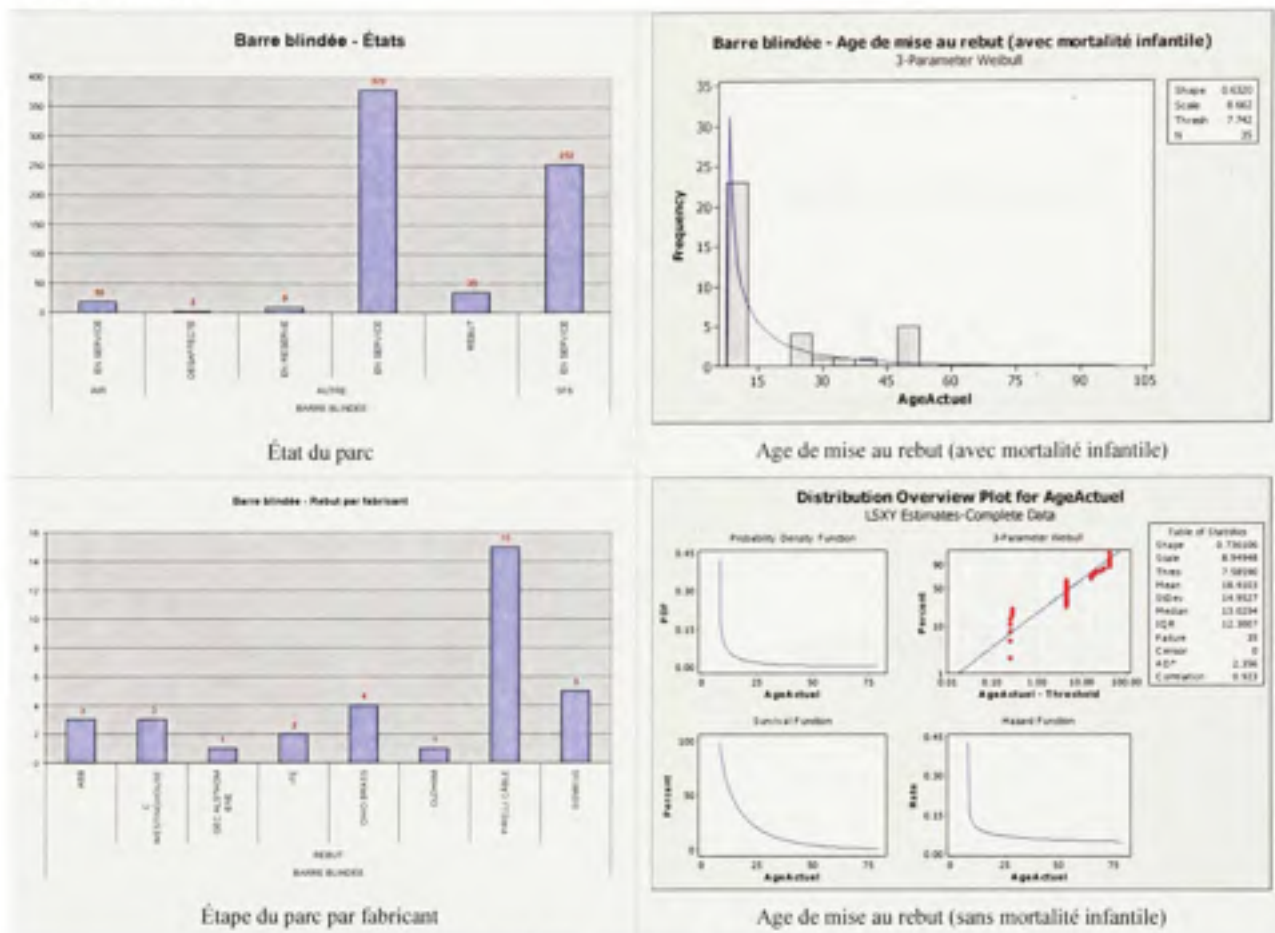
Modèle plausible?	MLE			
OUI	LSE	- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme: $\beta' =$	1.532	1.530	1.824	2.175
Facteur d'échelle: $\eta' =$	28.753	27.074	30.625	34.642
Facteur de localisation: $\gamma' =$	3.854	---	2.361	---
Facteur de corrélation: $r =$	0.984			

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Barre blindée

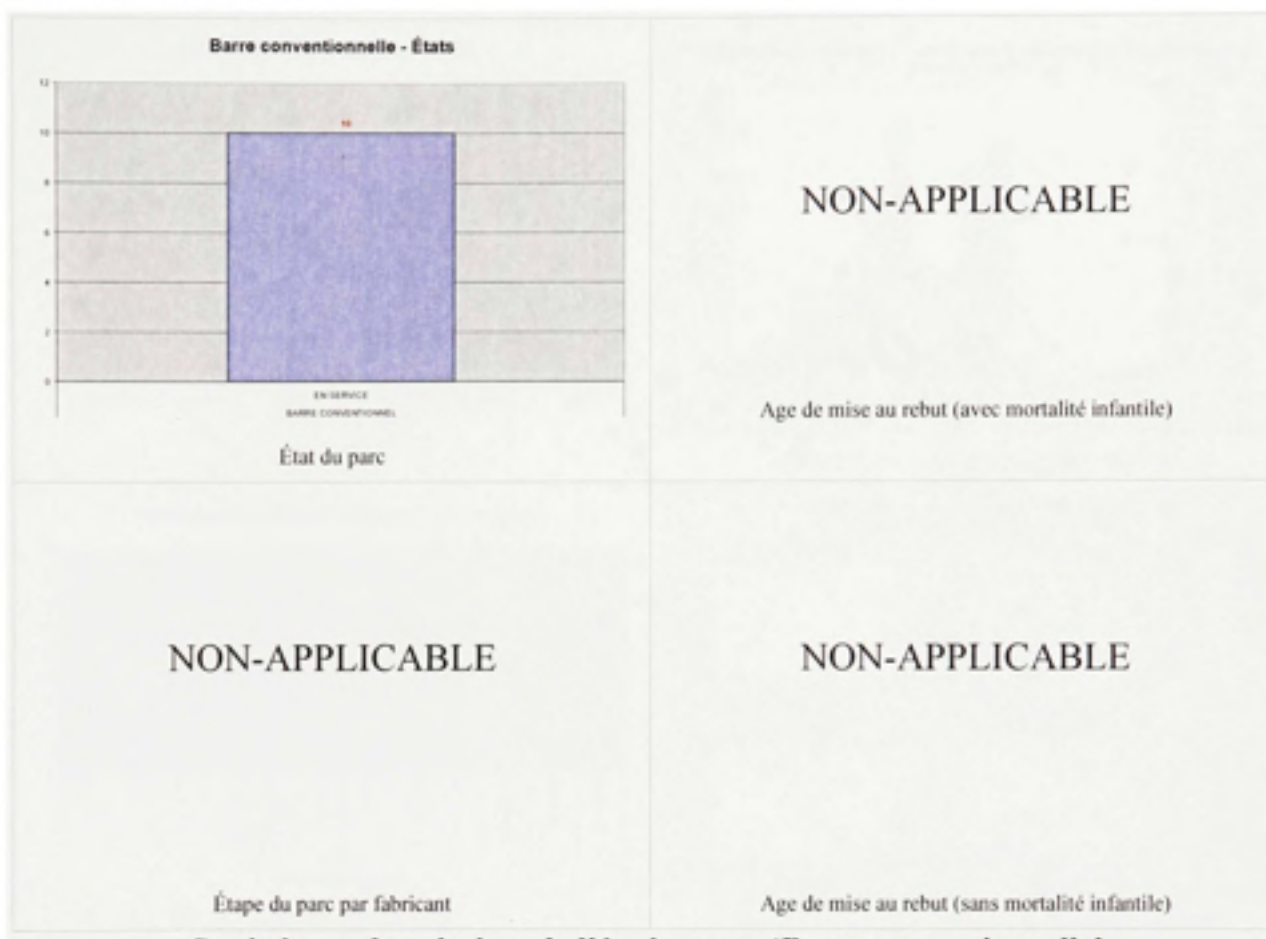


Statistiques descriptives de l'équipement 'Barre blindée'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

			Modèle plausible?
Facteur de forme:	$\beta =$	0.736	NON
Facteur d'échelle:	$\eta =$	8.949	
Facteur de localisation:	$\gamma =$	7.586	
Facteur de corrélation:	$r =$	0.923	

Barre conventionnelle



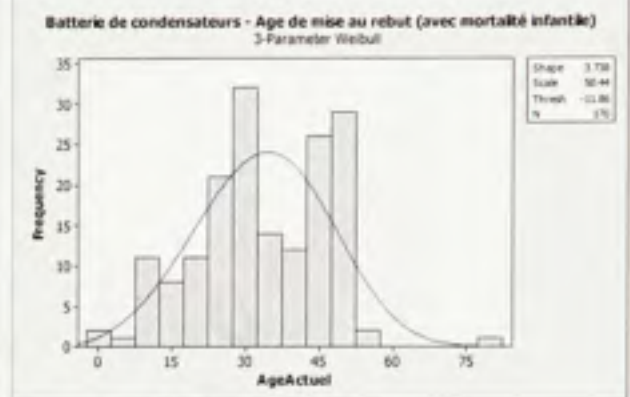
Statistiques descriptives de l'équipement 'Barre conventionnelle'

Comme tous les équipements sont en service, aucune analyse ne peut être effectuée pour quantifier le taux de défaillance.

Batterie de condensateurs



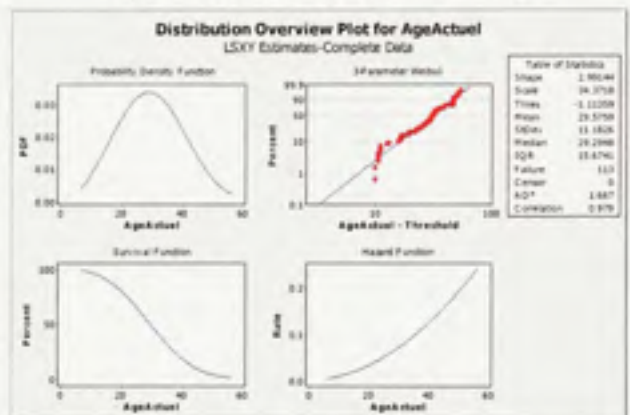
État du parc



Age de mise au rebut (avec mortalité infantile)



État du parc par fabricant



Age de mise au rebut corrigée (sans mortalité infantile)

Statistiques descriptives de l'équipement 'Batterie de condensateurs'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

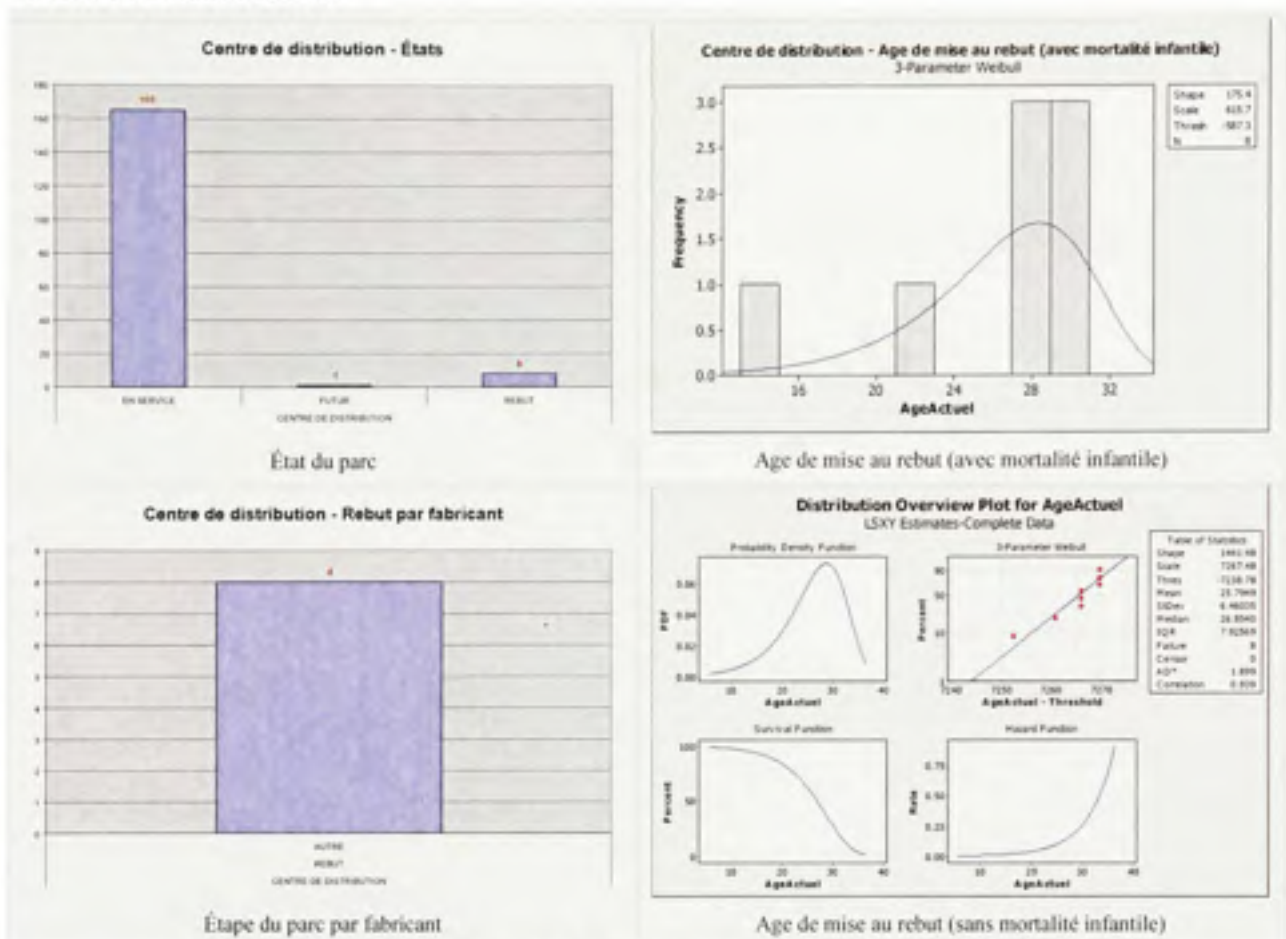
Modèle plausible?		MLE		
OUI		LSE	- 95% (LCL)	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta^* =$	2.991	2.465	3.309
Facteur d'échelle:	$\eta^* =$	34.372	30.614	35.065
Facteur de localisation:	$\gamma^* =$	-1.114	-2.614	0.498
Facteur de corrélation:	$r =$	0.979		

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Centre de distribution



Statistiques descriptives de l'équipement 'Centre de distribution'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

			Modèle plausible?
Facteur de forme:	$\beta =$	1441.480	NON
Facteur d'échelle:	$\eta =$	7267.480	
Facteur de localisation:	$\gamma =$	-7238.780	
Facteur de corrélation:	$r =$	0.939	

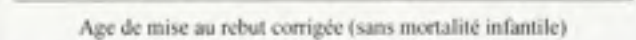
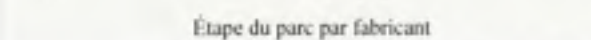
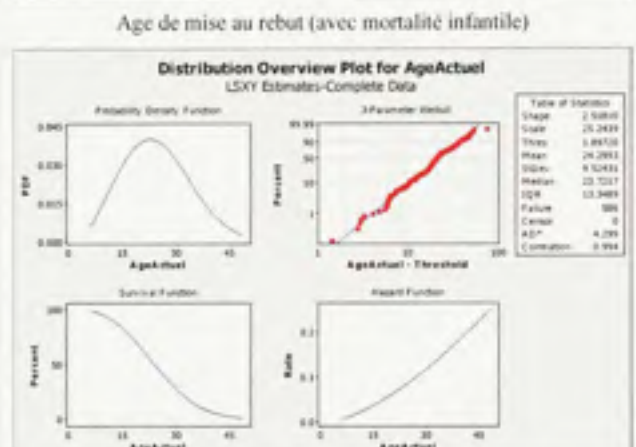
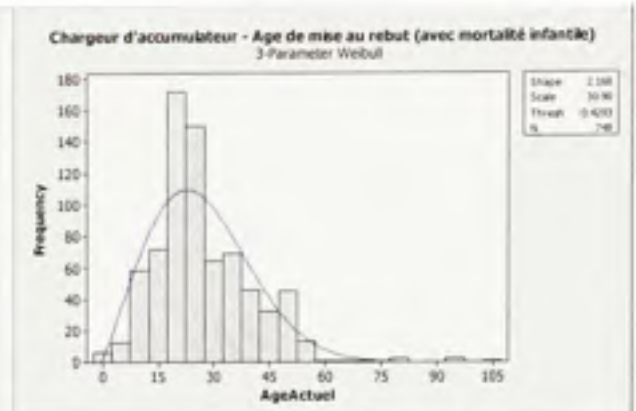
Changeur de prise



Statistiques descriptives de l'équipement 'Changeur de prise'

Comme tous les équipements sont en service, aucune analyse ne peut être effectuée pour quantifier le taux de défaillance.

Chargeur accumulateur



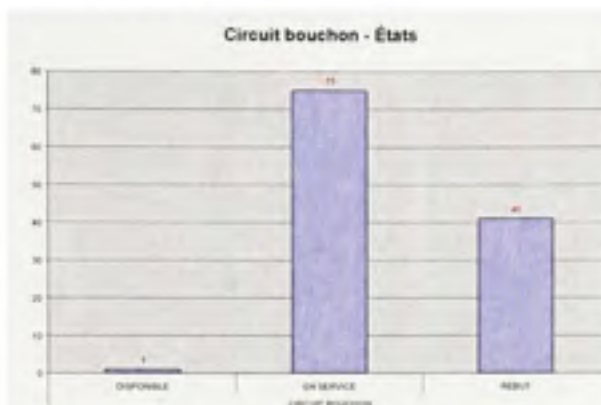
Statistiques descriptives de l'équipement 'Chargeur accumulateur'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

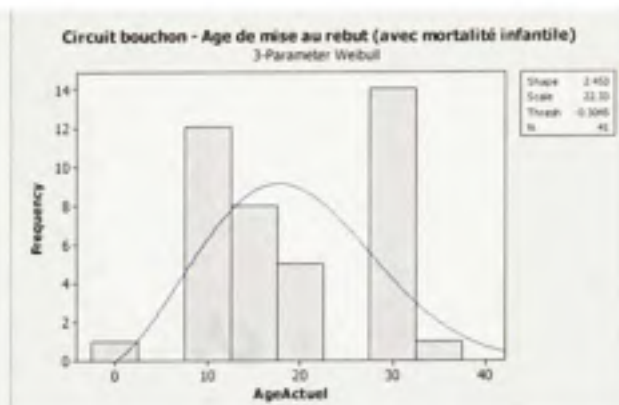
Modèle plausible?		LSE	MLE		
OUI			- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta' =$	2.518	2.113	2.246	2.388
Facteur d'échelle:	$\eta' =$	25.244	23.412	24.319	25.261
Facteur de localisation:	$\gamma' =$	1.897	2.208	2.829	3.310
Facteur de corrélation:	$r =$	0.994			

LÉGENDE
LSE = Least square estimate
MLE = Maximum likelihood estimate

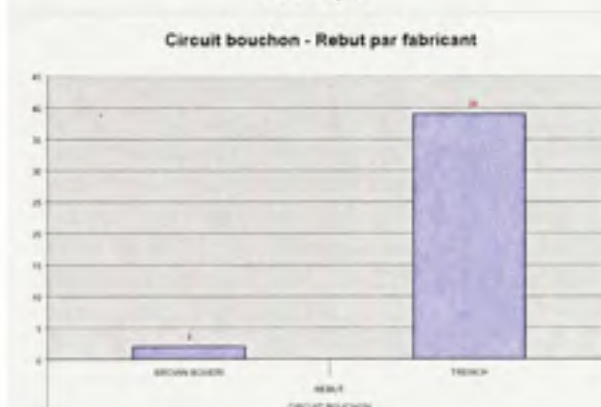
Circuit bouchon



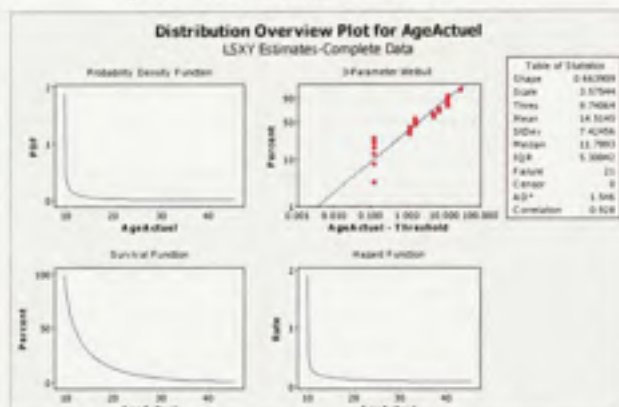
État du parc



Age de mise au rebut (avec mortalité infantile)



Étape du parc par fabricant



Age de mise au rebut corrigée (sans mortalité infantile)

Statistiques descriptives de l'équipement 'Circuit bouchon'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

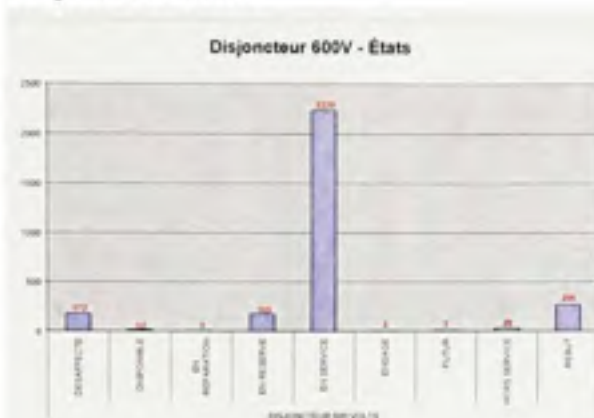
Modèle plausible?		LSE	MLE		
OUI			- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta^* =$	0.664	0.762	1.050	1.446
Facteur d'échelle:	$\eta^* =$	3.575	4.289	6.611	10.189
Facteur de localisation:	$\gamma^* =$	9.741	---	8.509	---
Facteur de corrélation:	$r =$	0.928			

LÉGENDE

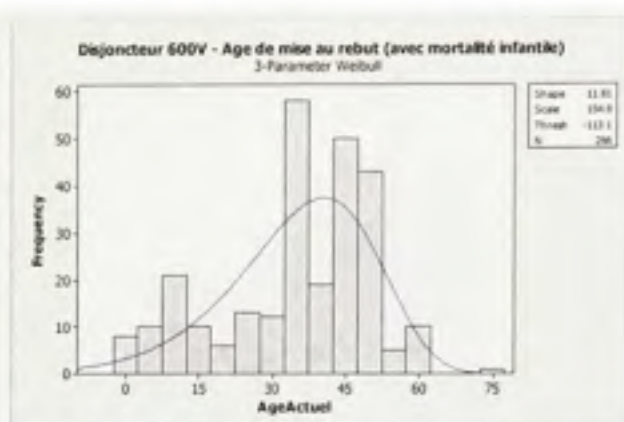
LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

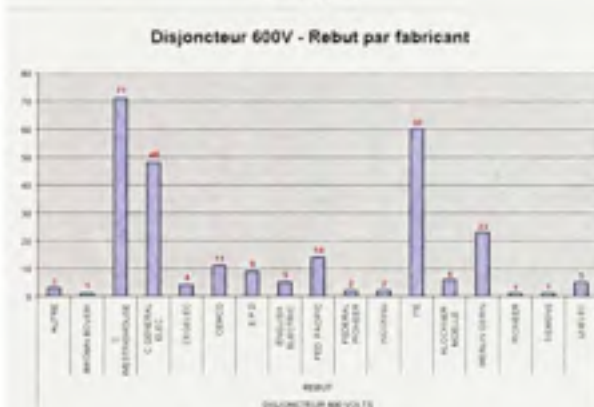
Disjoncteur 600V



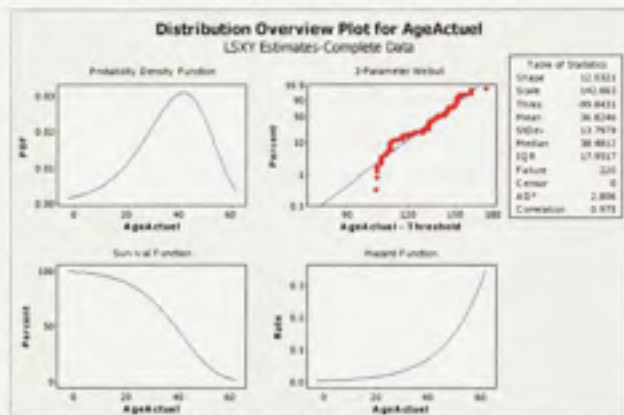
État du parc



Age de mise au rebut (avec mortalité infantile)



Étape du parc par fabricant



Age de mise au rebut corrigée (sans mortalité infantile)

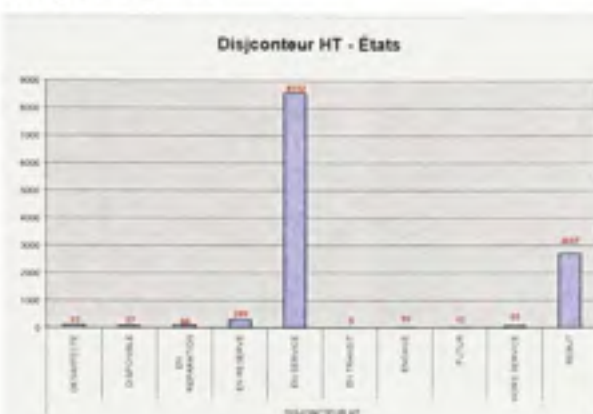
Statistiques descriptives de l'équipement 'Disjoncteur 600V'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

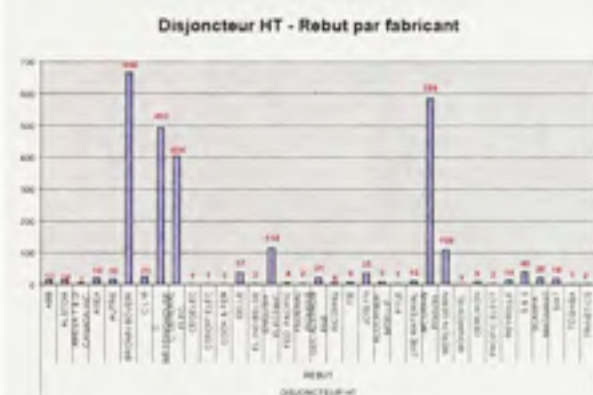
Modèle plausible?		LSE	MLE		
OUI			- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta' =$	12.032	2.617	2.929	3.278
Facteur d'échelle:	$\eta' =$	142.603	39.247	41.129	43.101
Facteur de localisation:	$\gamma' =$	-99.843	---	0.013	---
Facteur de corrélation:	$r =$	0.975			

LÉGENDE
LSE = Least square estimate
MLE = Maximum likelihood estimate

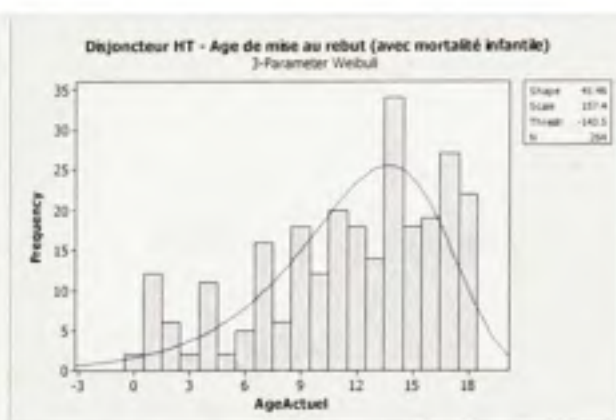
Disjoncteur HT



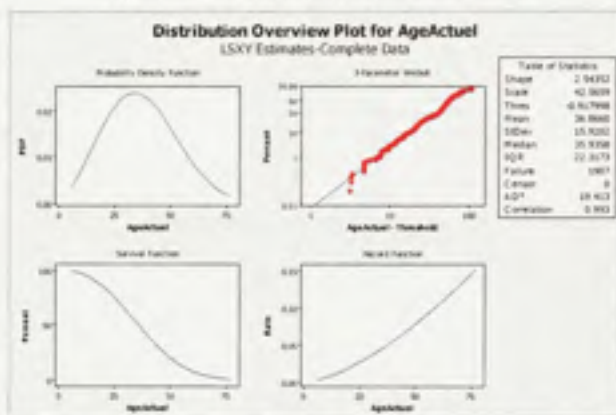
État du parc



Étape du parc par fabricant



Age de mise au rebut (avec mortalité infantile)



Age de mise au rebut corrigée (sans mortalité infantile)

Statistiques descriptives de l'équipement 'Disjoncteur HT'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

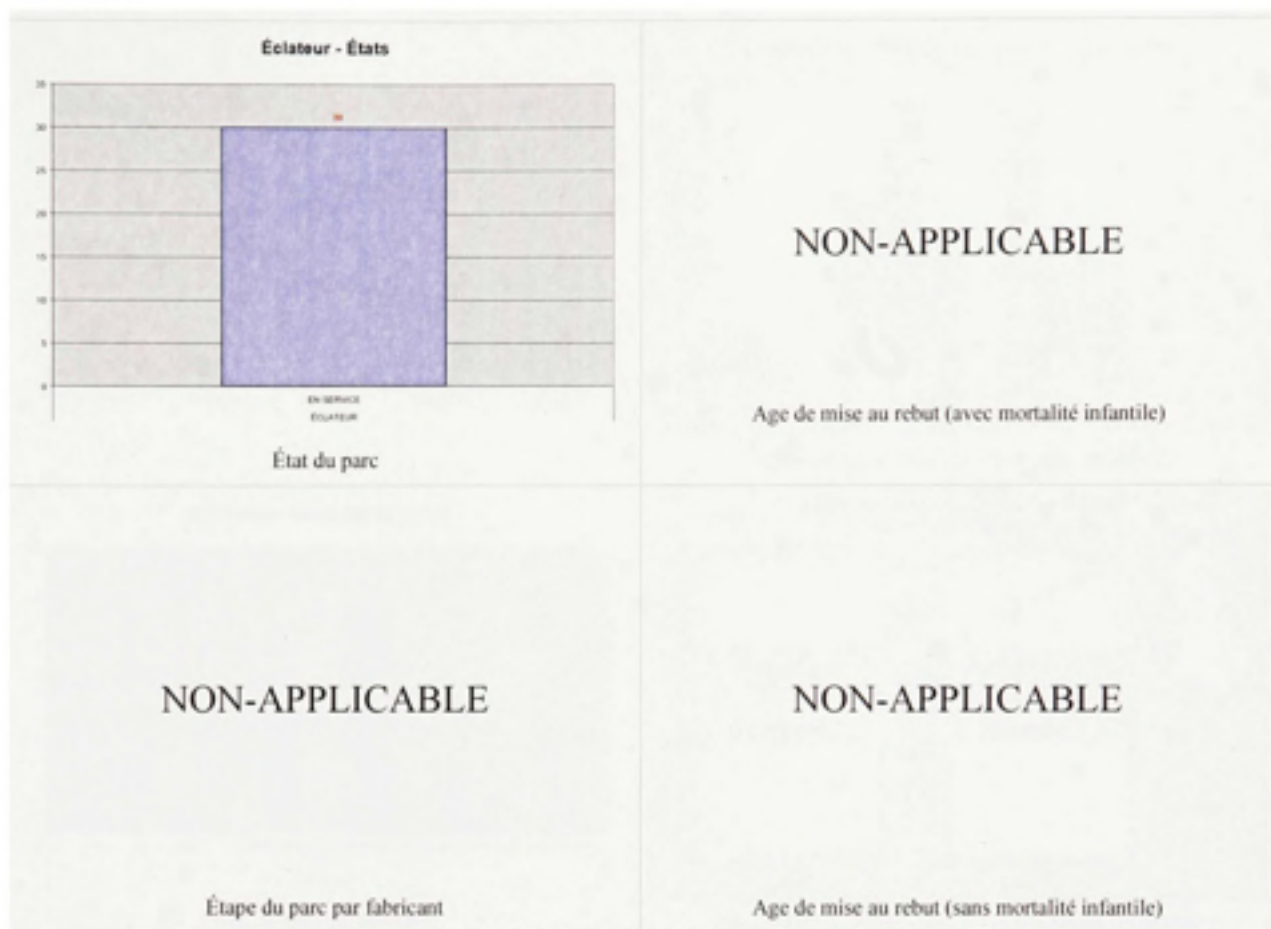
Modèle plausible?		LSE	MLE		
OUI			- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta^* =$	2.544	2.824	2.925	3.030
Facteur d'échelle:	$\eta^* =$	42.566	44.986	45.717	46.461
Facteur de localisation:	$\gamma^* =$	-0.918	-5.001	-3.946	-2.890
Facteur de corrélation:	$r =$	0.993			

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

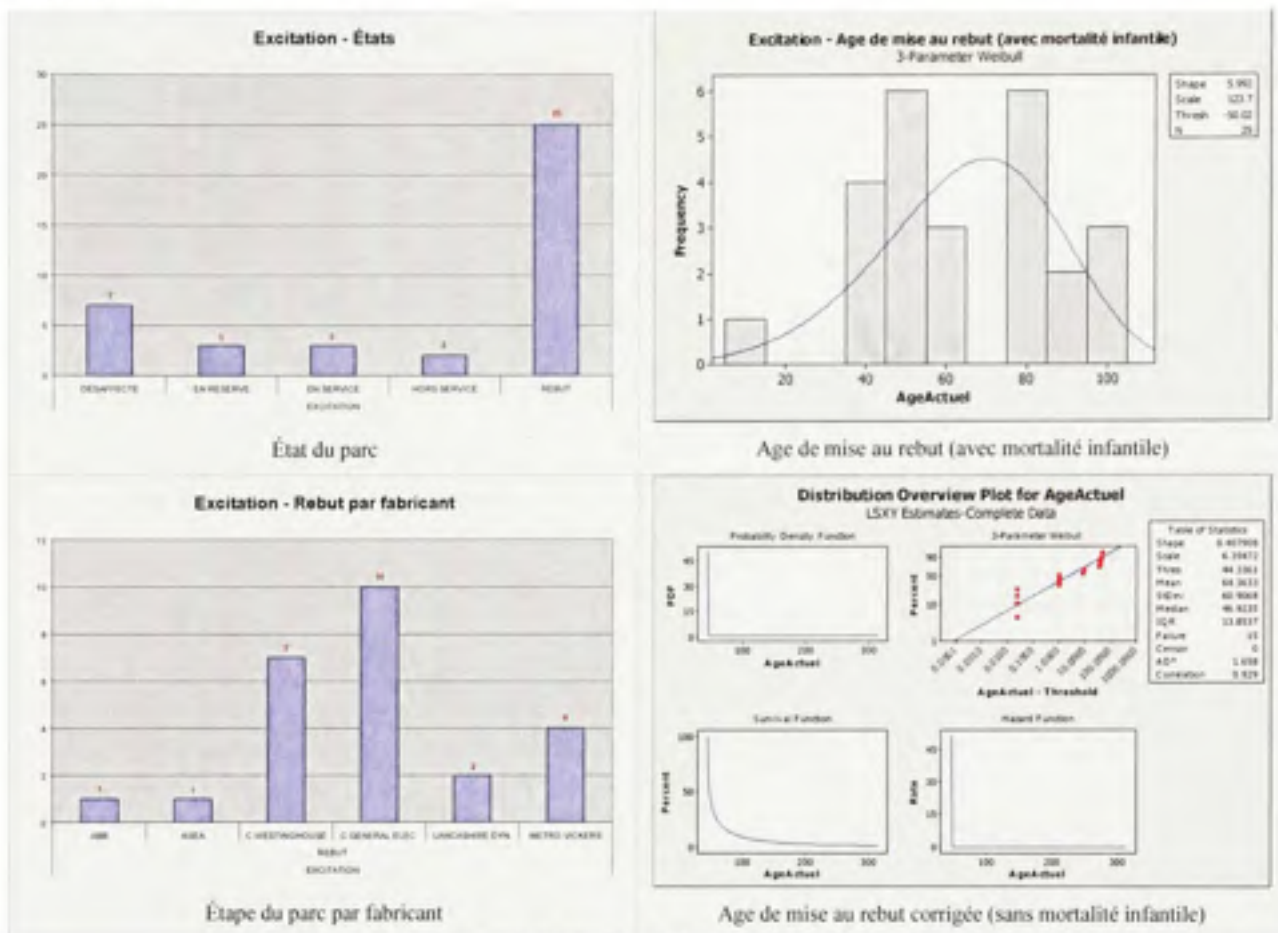
Éclateur



Statistiques descriptives de l'équipement 'Éclateur'

Comme tous les équipements sont en service, aucune analyse ne peut être effectuée pour quantifier le taux de défaillance.

Excitation



Statistiques descriptives de l'équipement 'Excitation'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

Modèle plausible?		LSE	MLE		
	OUI		- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta' =$	0.408	0.572	0.850	1.263
Facteur d'échelle:	$\eta' =$	6.355	8.315	15.639	29.416
Facteur de localisation:	$\gamma' =$	44.336	---	42.089	---
Facteur de corrélation:	$r =$	0.929			

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

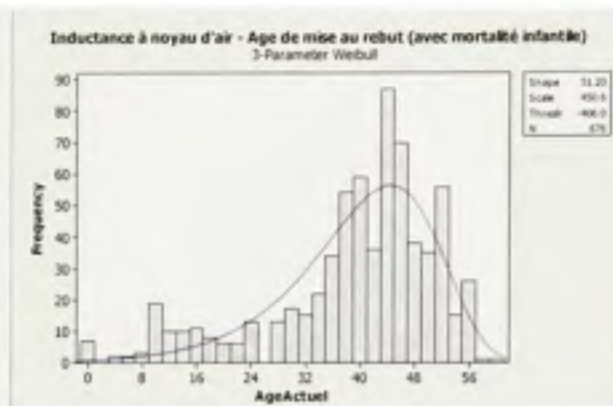
Inductance à noyau d'air



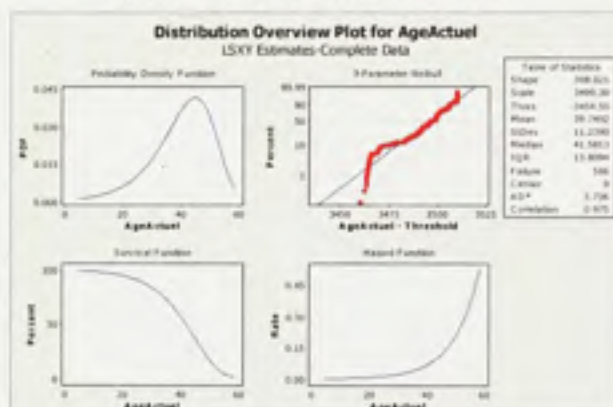
État du parc



Étape du parc par fabricant



Age de mise au rebut (avec mortalité infantile)



Age de mise au rebut corrigée (sans mortalité infantile)

Statistiques descriptives de l'équipement 'Inductance à noyau d'air'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

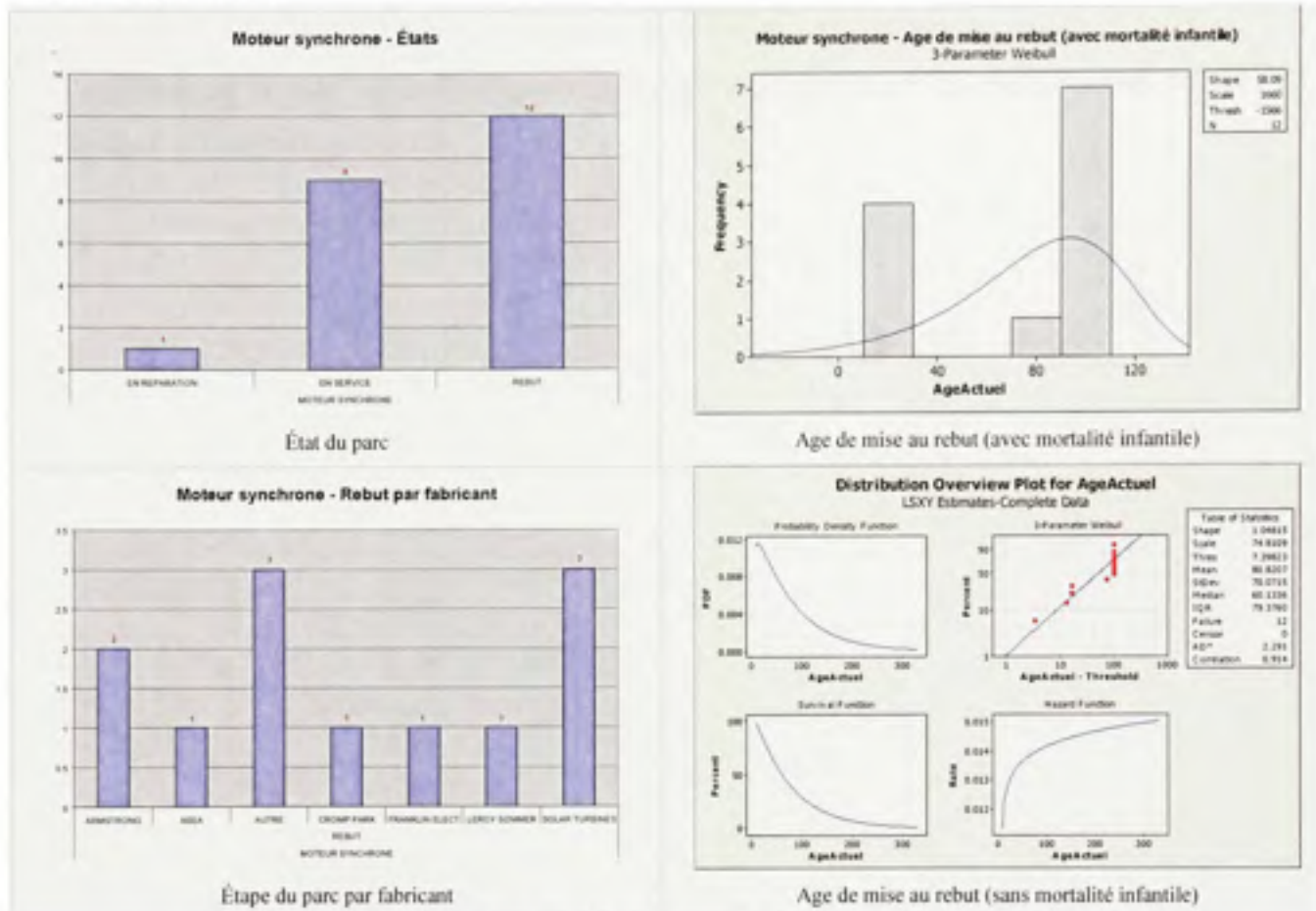
Modèle plausible?	LSE	MLE		
		- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
OUI				
Facteur de forme: β'	398.021	3.593	3.855	4.137
Facteur d'échelle: η'	3499.300	39.194	40.053	40.931
Facteur de localisation: γ'	-3454.500	----	3.370	----
Facteur de corrélation: r	0.975			

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Moteur synchrone



Statistiques descriptives de l'équipement 'Moteur synchrones'

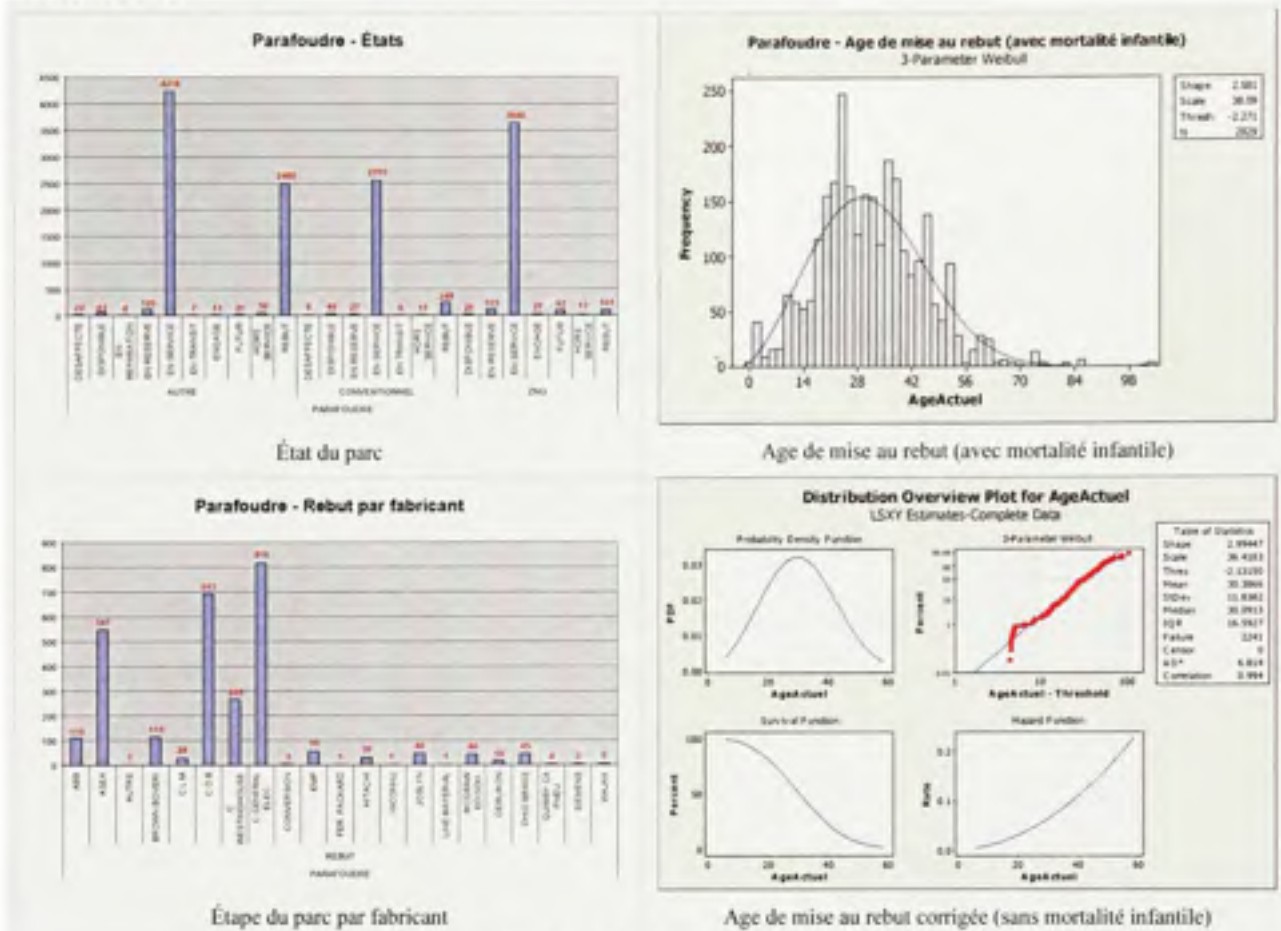
Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

				Modèle plausible?
Facteur de forme:	$\beta =$	1.048		NON
Facteur d'échelle:	$\eta =$	74.811		
Facteur de localisation:	$\gamma =$	7.398		
Facteur de corrélation:	$r =$	0.914		

Onduleur

Pour ce type d'équipement, une seule unité a été identifiée sur le réseau de transport régional de TransÉnergie et pour cette raison aucune analyse supplémentaire n'a été effectuée car la seule unité est toujours en service.

Parafoudre



Statistiques descriptives de l'équipement 'Parafoudre'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

Modèle plausible?		MLE		
OUI		LSE	- 95% (LCL)	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta^* =$	2.994	2.473	2.552
Facteur d'échelle:	$\eta^* =$	36.418	33.371	33.946
Facteur de localisation:	$\gamma^* =$	-2.132	-0.288	0.289
Facteur de corrélation:	$r =$	0.994		0.865

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

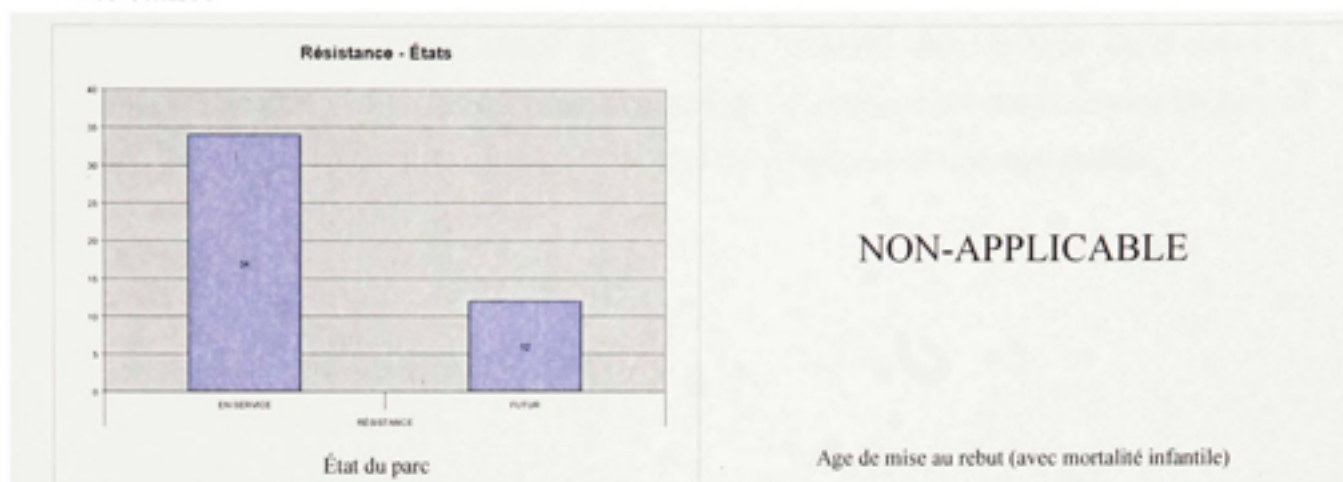
Plateforme compensation série



Statistiques descriptives de l'équipement 'Plateforme compensation série'

Comme toutes les dates de mise au rebut sont identiques aux dates de mise en service, les données dans la base de données ne sont pas précises. Pour cette raison, aucune analyse ne peut être effectuée pour quantifier le taux de défaillance.

Résistance



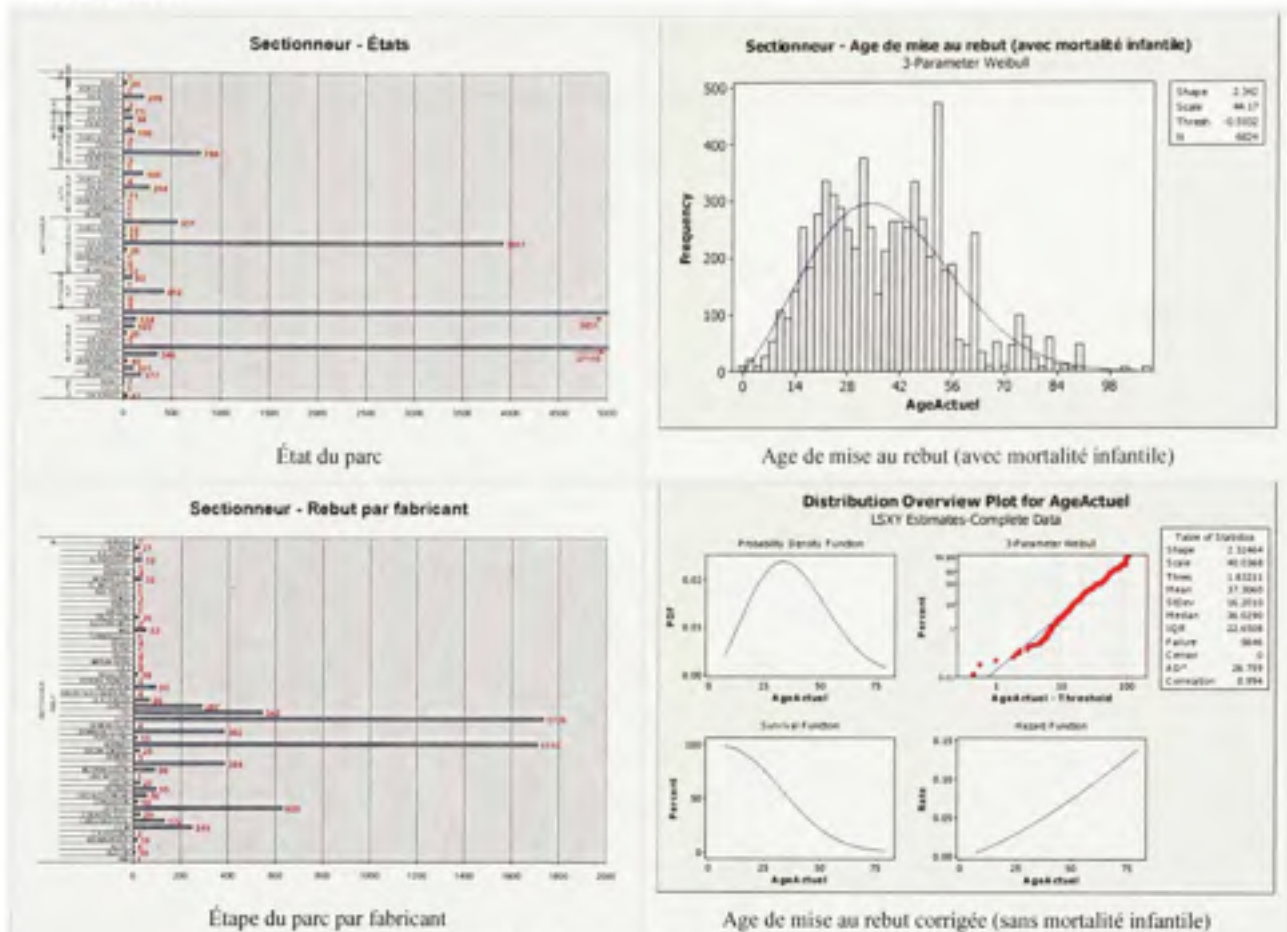
Statistiques descriptives de l'équipement 'Inductance à noyau d'air'

Comme tous les équipements sont en service, aucune analyse ne peut être effectuée pour quantifier le taux de défaillance.

Rupteur

Pour ce type d'équipement, aucun statut n'a été identifié dans la base de données de TransÉnergie alors il est impossible de déterminer si un équipement est en service ou bien au rebut. Pour cette raison, aucune analyse du taux de défaillance n'a pu être établie.

Sectionneur



Statistiques descriptives de l'équipement 'Sectionneur'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

Modèle plausible?		MLE		
OUI		LSE	- 95% (LCL)	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta^* =$	2.325	2.156	2.200
Facteur d'échelle:	$\eta^* =$	40.037	39.551	40.049
Facteur de localisation:	$\gamma^* =$	1.832	1.903	2.116
Facteur de corrélation:	$r =$	0.994		2.270

LÉGENDE

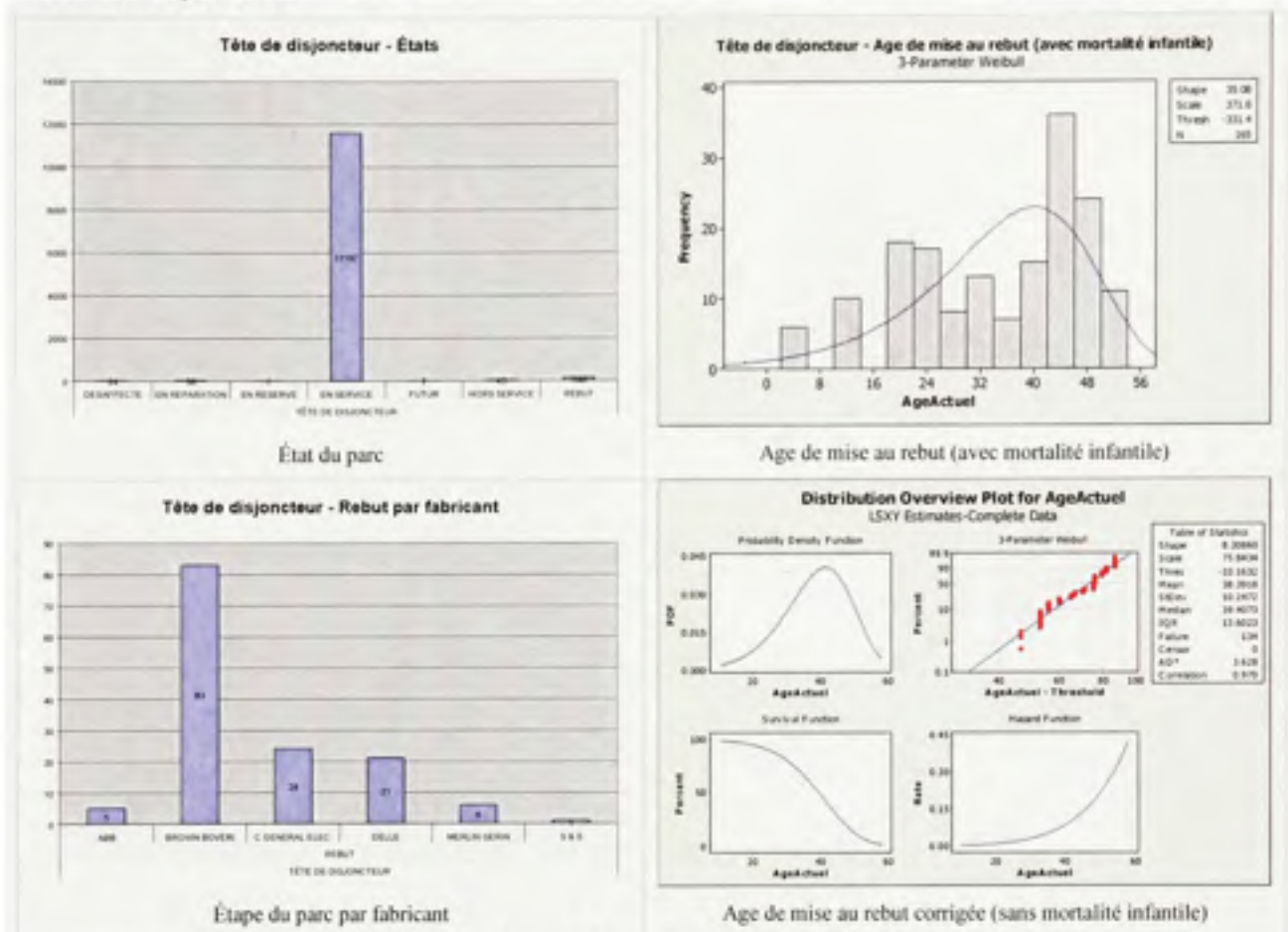
LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Stator

Pour ce type d'équipement, deux unités ont été identifiées sur le réseau de transport régional de TransÉnergie et pour cette raison aucune analyse supplémentaire n'a été effectuée car aucun des deux équipements n'a été placé au rebut.

Tête de disjoncteur



Statistiques descriptives de l'équipement 'Tête de disjoncteur'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

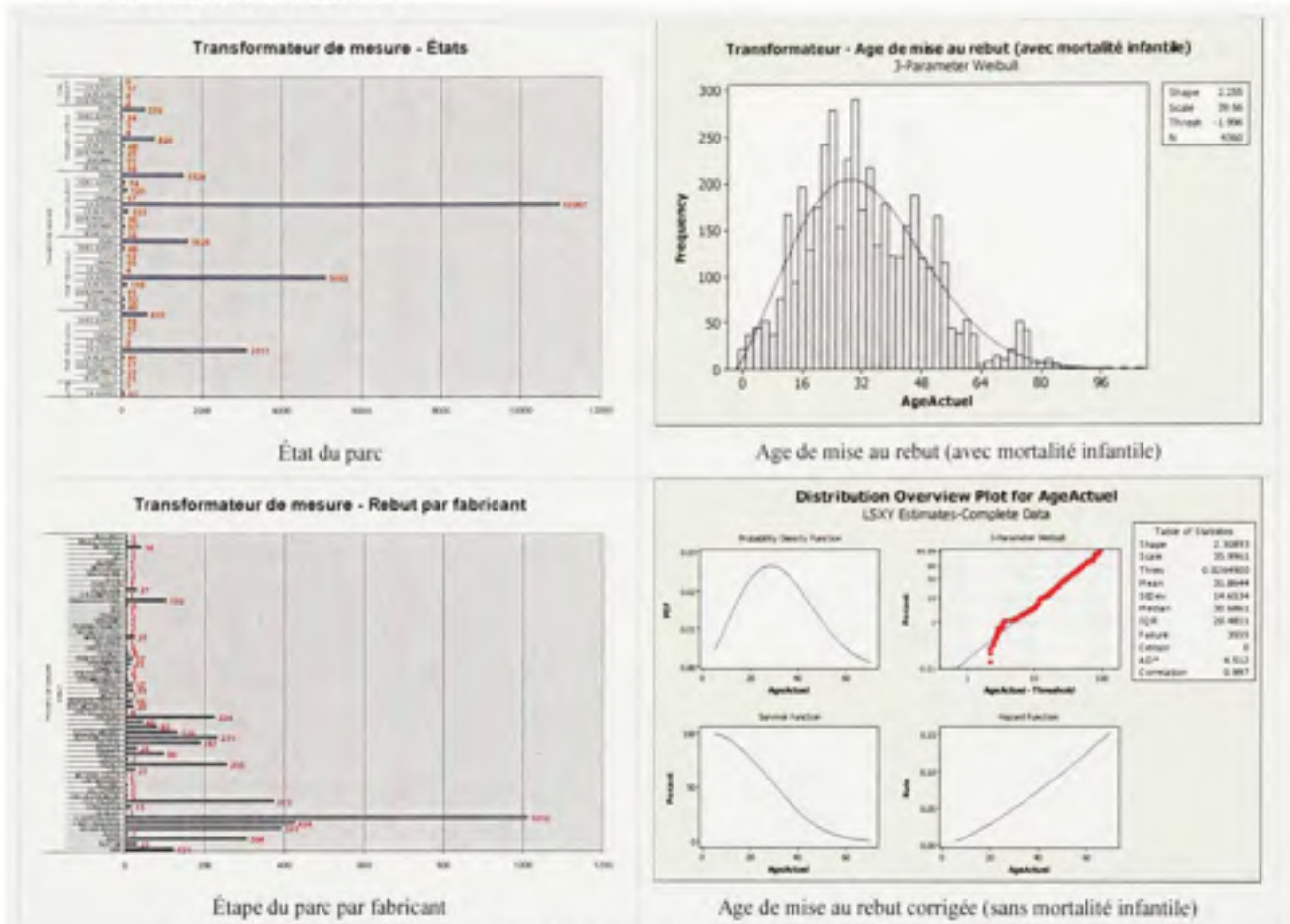
Modèle plausible?		LSE	MLE		
OUI			- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta' =$	8.309	2.556	2.959	3.425
Facteur d'échelle:	$\eta' =$	75.843	28.682	30.436	32.299
Facteur de localisation:	$\gamma' =$	-33.163	0.000	11.154	0.000
Facteur de corrélation:	$r =$	0.970			

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Transformateur de mesure



Statistiques descriptives de l'équipement 'Transformateur de mesure'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

Modèle plausible?		LSE	MLE		
OUI			- 95% (LCL)	Paramètre	+ 95 % (UCL)
Facteur de forme:	$\beta' =$	2.309	2.106	2.160	2.216
Facteur d'échelle:	$\eta' =$	35.996	34.536	35.094	35.661
Facteur de localisation:	$\gamma' =$	-0.026	0.436	0.861	1.286
Facteur de corrélation:	$r =$	0.997			

LÉGENDE

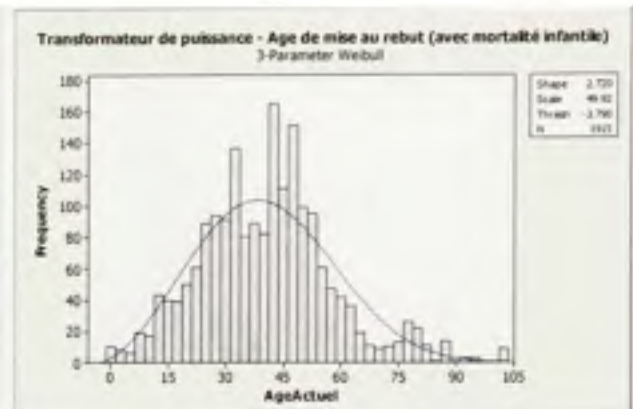
LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Transformateur de puissance



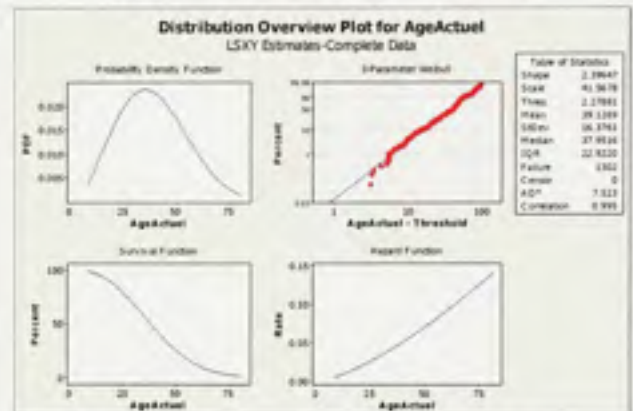
État du parc



Age de mise au rebut (avec mortalité infantile)



État du parc par fabricant



Age de mise au rebut corrigée (sans mortalité infantile)

Statistiques descriptives de l'équipement 'Transformateur de puissance'

Les trois paramètres de la distribution Weibull sont données par :

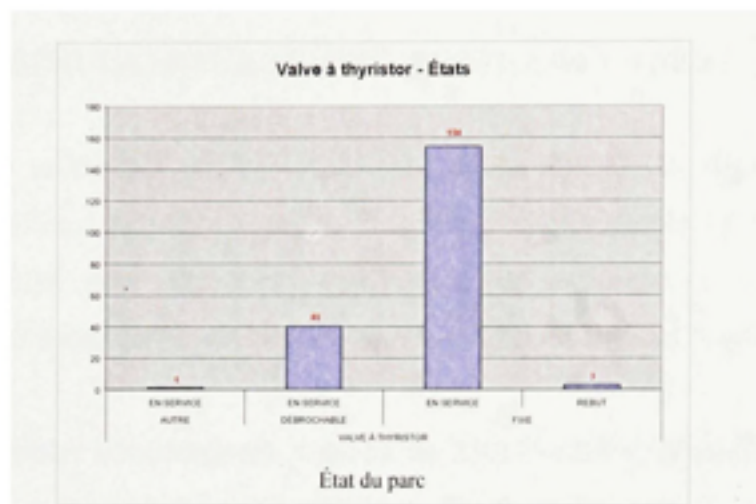
Modèle plausible?		MLE		
OUI		LSE	- 95% (LCL)	+ 95% (UCL)
Facteur de forme:	$\beta' =$	2.396	2.420	2.525
Facteur d'échelle:	$\eta' =$	41.568	41.297	42.242
Facteur de localisation:	$\gamma' =$	2.279	0.484	1.560
Facteur de corrélation:	$r =$	0.995		2.635

LÉGENDE

LSE = Least square estimate

MLE = Maximum likelihood estimate

Inductance à noyau d'air



Statistiques descriptives de l'équipement 'Inductance à noyau d'air'

Comme il y a seulement trois équipements au rebut, aucune analyse n'a pu être faite par rapport au taux de défaillance.

ANNEXE II

SIMULATION RAPTOR® (POSTE 230kV-120kV)

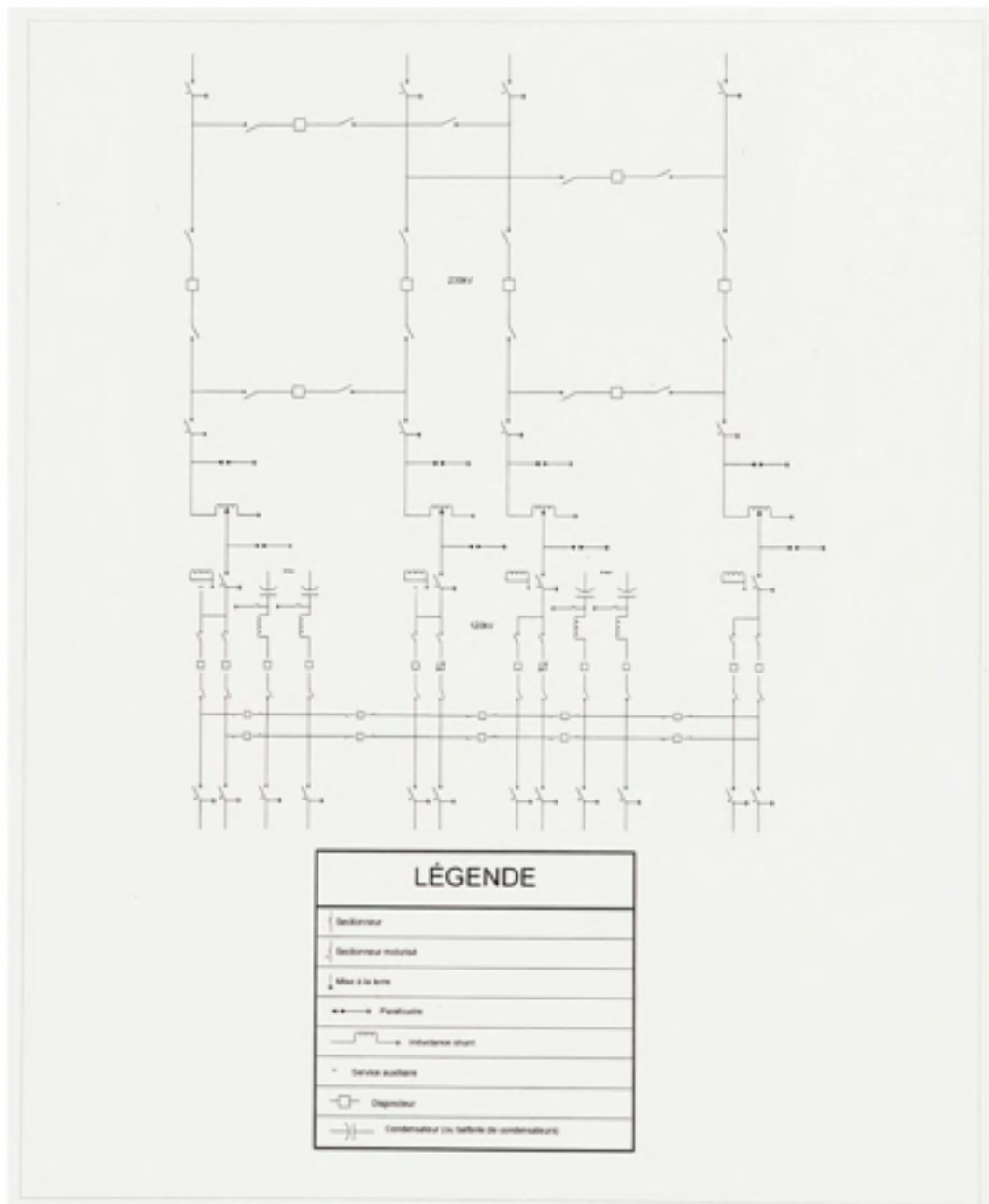
Pour illustrer notre méthodologie, une étude de cas est illustrée en détail. Le but est de démontrer les bénéfices de notre approche : le modèle qui simule le comportement en fiabilité sera employé pour améliorer la politique de maintenance. Des simulations numériques de type Monte-Carlo ont été effectuées à l'aide du logiciel Raptor®.

Afin de pouvoir simuler adéquatement le poste de 230kV-120kV, plusieurs sous-systèmes ont été déterminés et progressivement simulés. Par la suite, ces sous-systèmes ont été employés afin de pouvoir simuler le poste dans sa totalité.

Pour des fins de simplicité, aucune modélisation de l'aspect financier ou des paramètres de réparation n'a été effectuée.

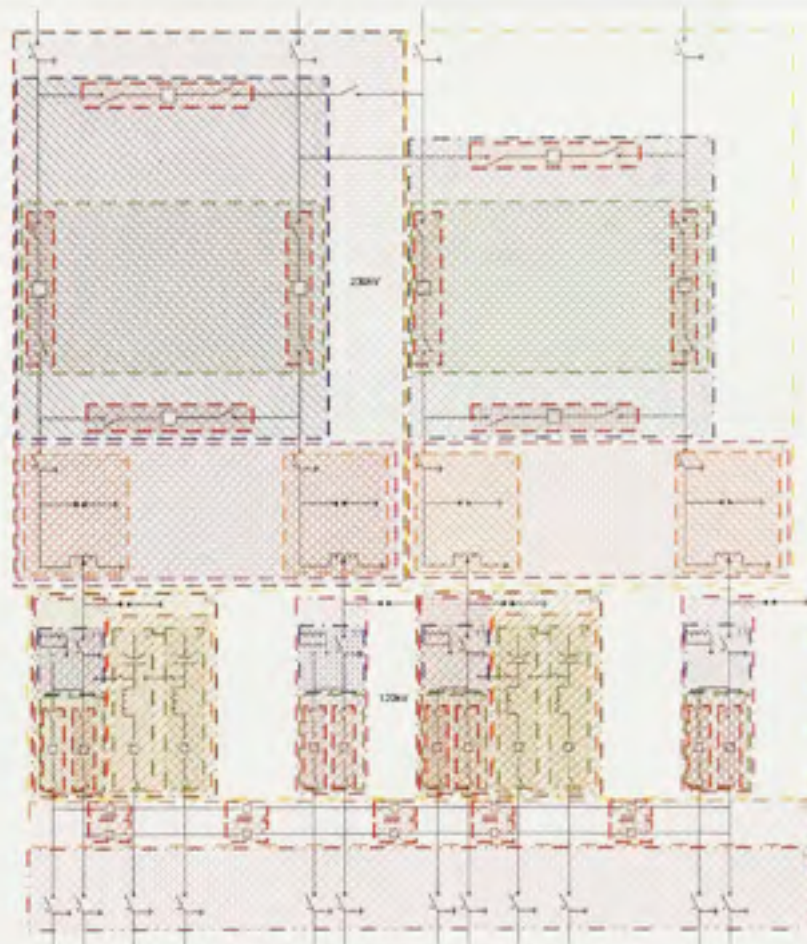
Schéma global du poste 230kV-120kV

Le poste utilisé pour fins de simulation est composé de sectionneurs motorisés, batteries de condensateurs, parafoudres et inductances. Pour la simulation, une inductance isolée à l'huile a été utilisée. La figure suivante représente le schéma électrique global.



Représentation unifilaire d'un poste 230kV-120kV

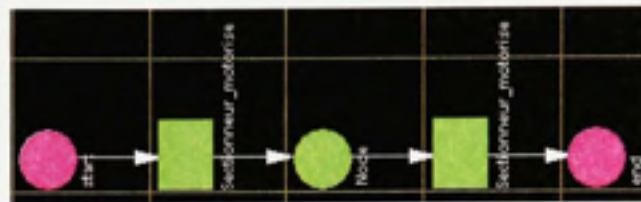
La figure donnée plus bas est identique à celle donnée précédemment au Chapitre 4 avec une décomposition en sous-systèmes (blocs) afin d'être capable de compléter la simulation sans recours à des calculs exigeants en temps et en ressources informatiques.



LÉGENDE	
	Sectionneur
	Sectionneur manuel
	Mise à la terre
	Parafoudre
	Inductance d'arrêt
	Service auxiliaire
	Dépendeur
	Condensateur (ou batterie de condensateurs)

Poste 230kV-120kV décomposé en sous-systèmes

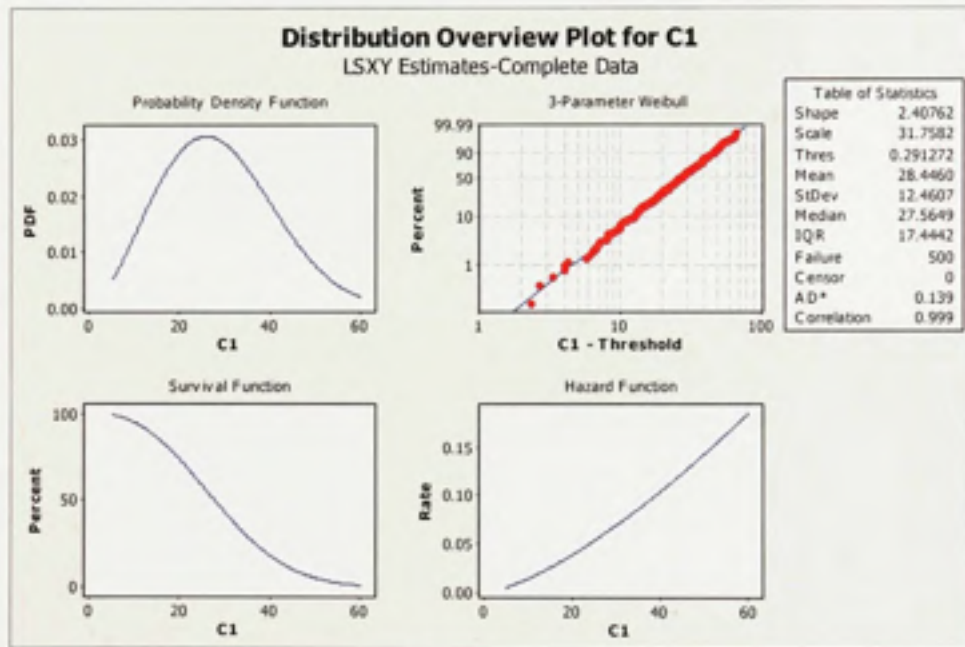
Simulation du sous-système # 1



Bloc de simulation Raptor®



Schéma électrique du sous-système 1



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 1

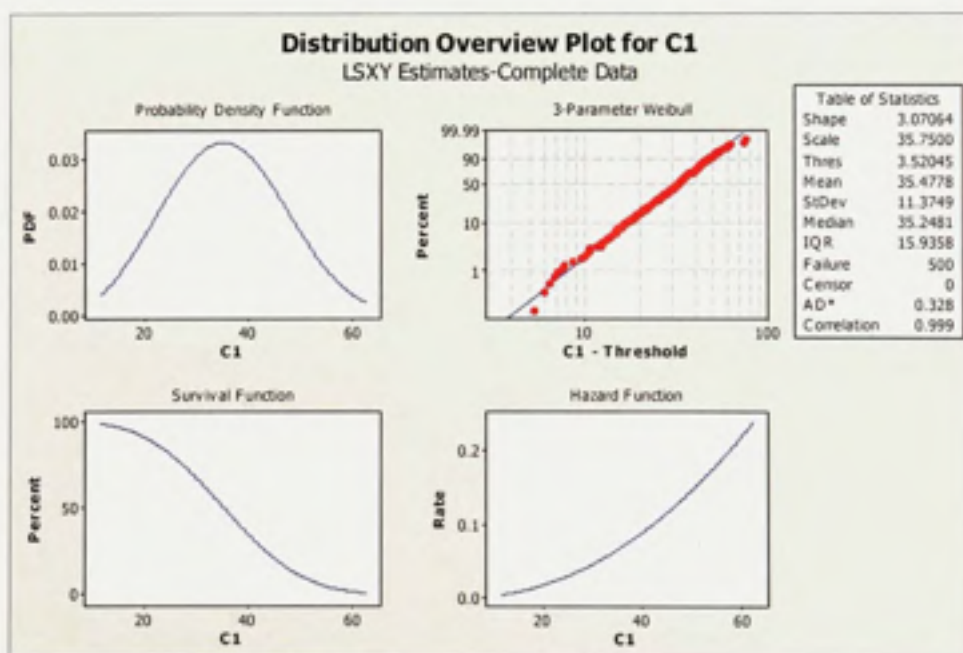
Simulation du sous-système # 2



Bloc de simulation Raptor®



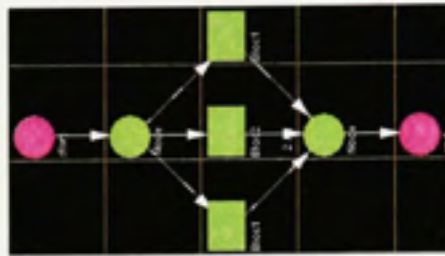
Schéma électrique du sous-système 2



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 2

Simulation du sous-système # 3



Bloc de simulation Raptor®

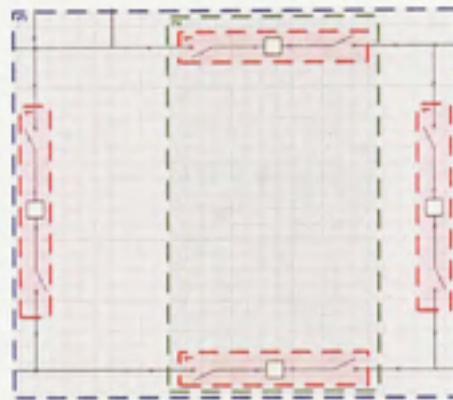
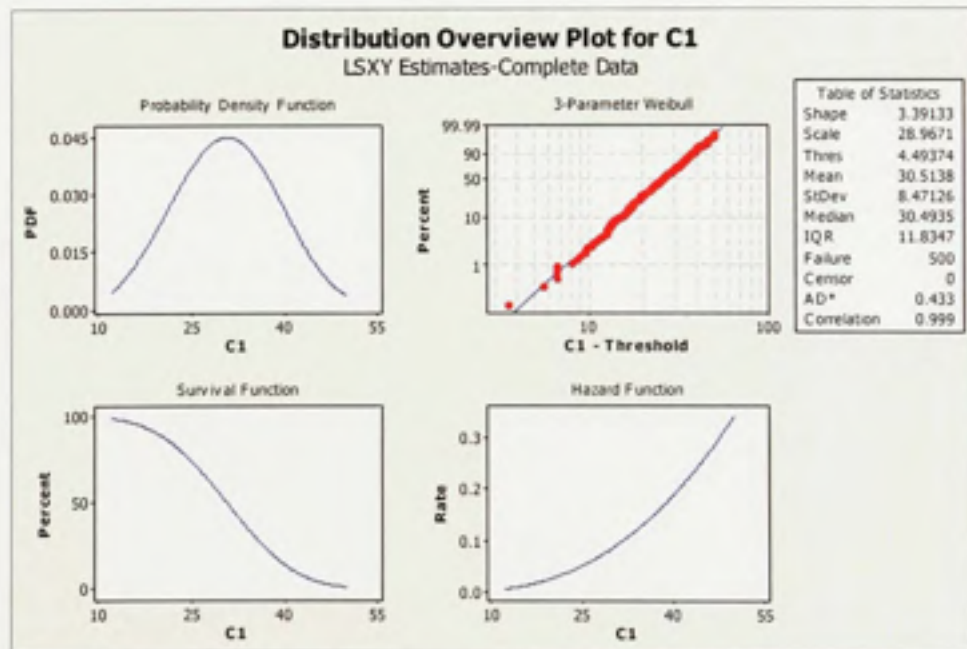


Schéma électrique du sous-système 3



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 3

Simulation du sous-système # 4



Bloc de simulation Raptor®

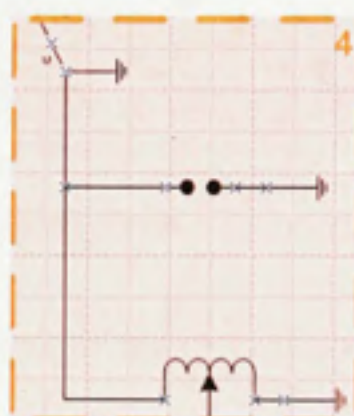
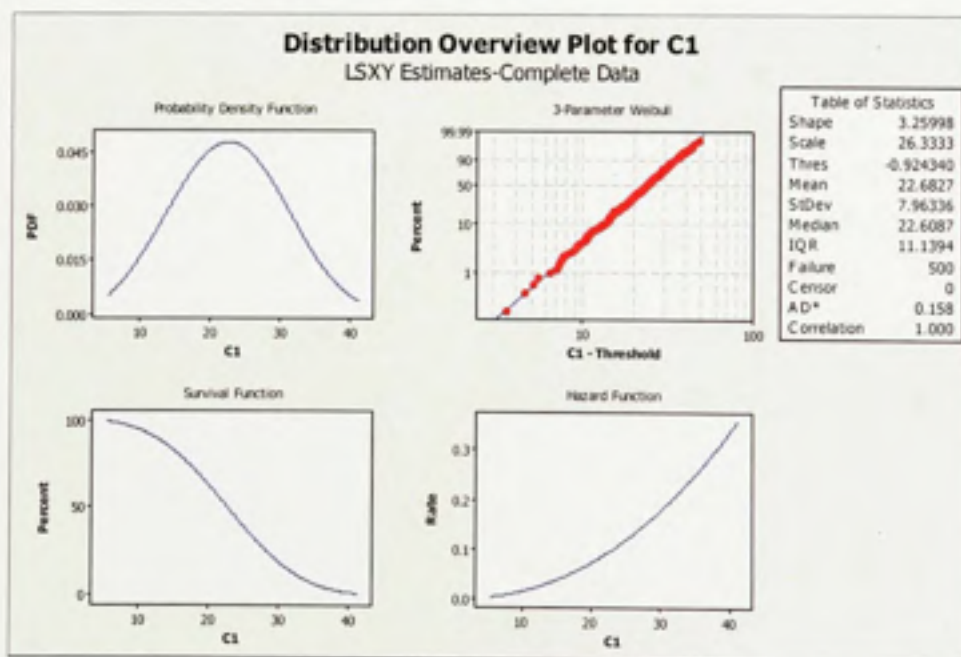


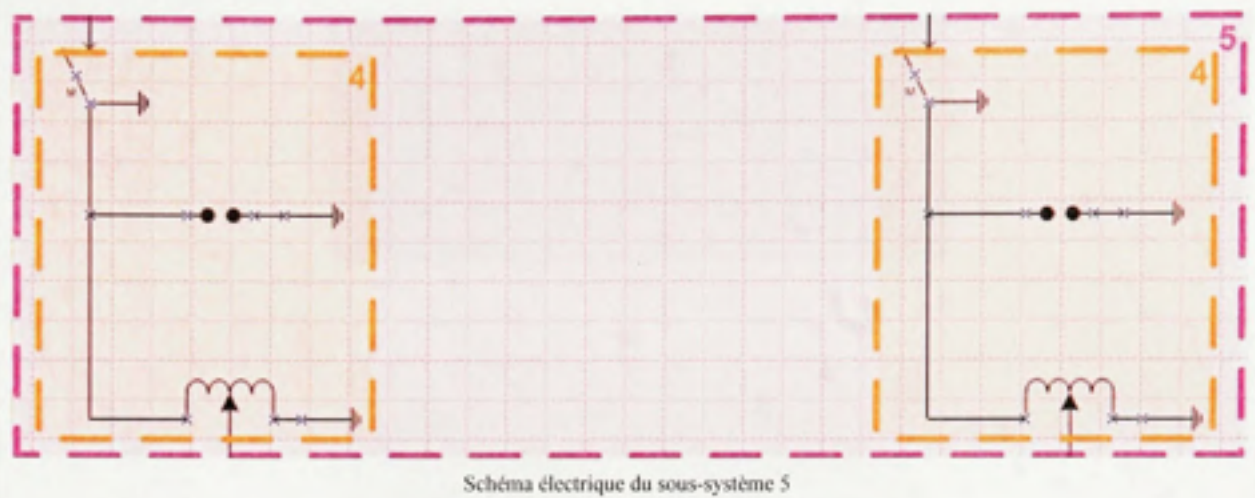
Schéma électrique du sous-système 4



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 4

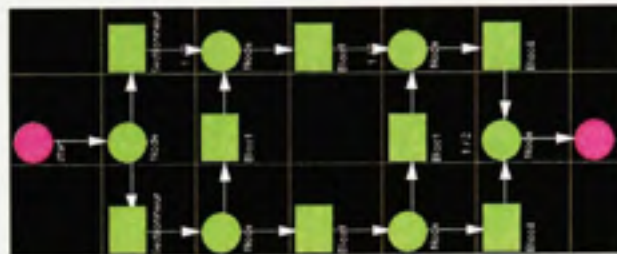
Simulation du sous-système # 5



Poste 230kV-120kV, Sous-système # 5

Il n'a pas été requis de simuler le sous-système # 5 car cela a été tenu en compte à l'intérieur du sous-système # 6.

Simulation du sous-système # 6



Bloc de simulation Raptor®

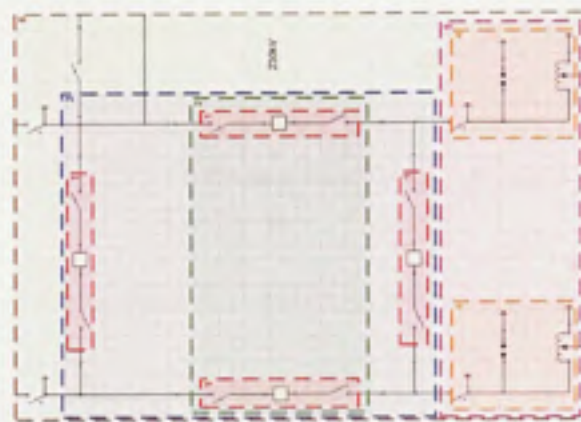
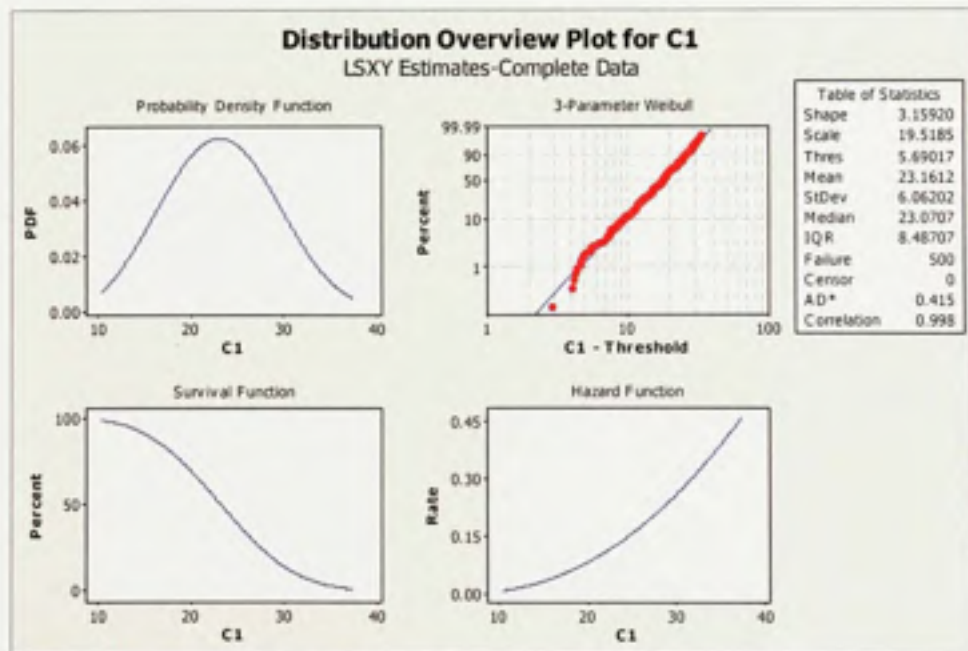


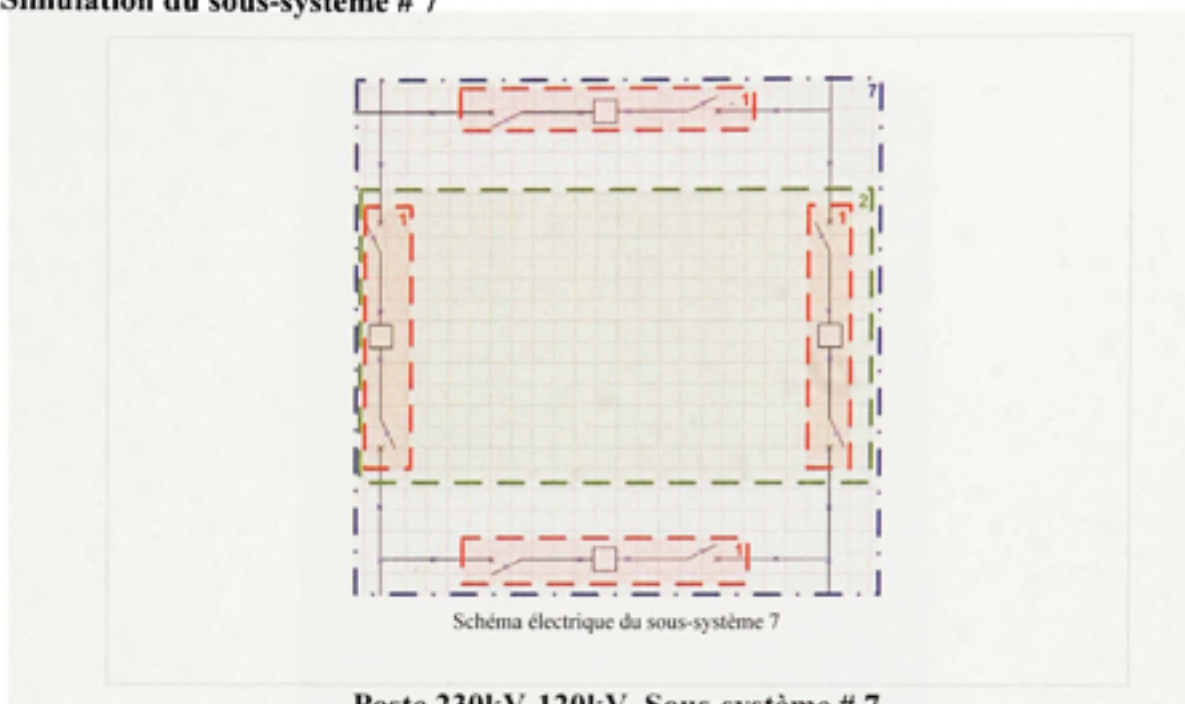
Schéma électrique du sous-système 6



Résultat de l'analyse statistique Minitab

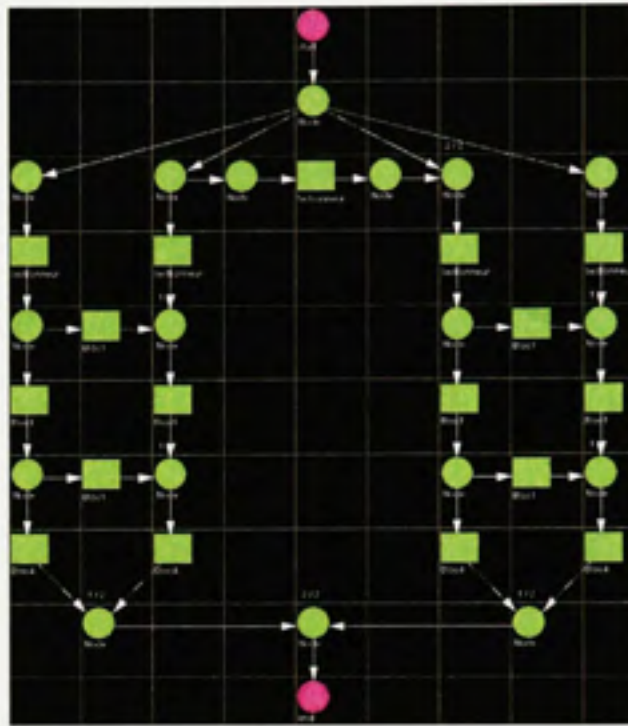
Poste 230kV-120kV, Sous-système # 6

Simulation du sous-système # 7



Il n'a pas été requis de simuler le sous-système # 7 car ce dernier a une configuration identique au sous-système # 6.

Simulation du sous-système # 8



Bloc de simulation Raptor®

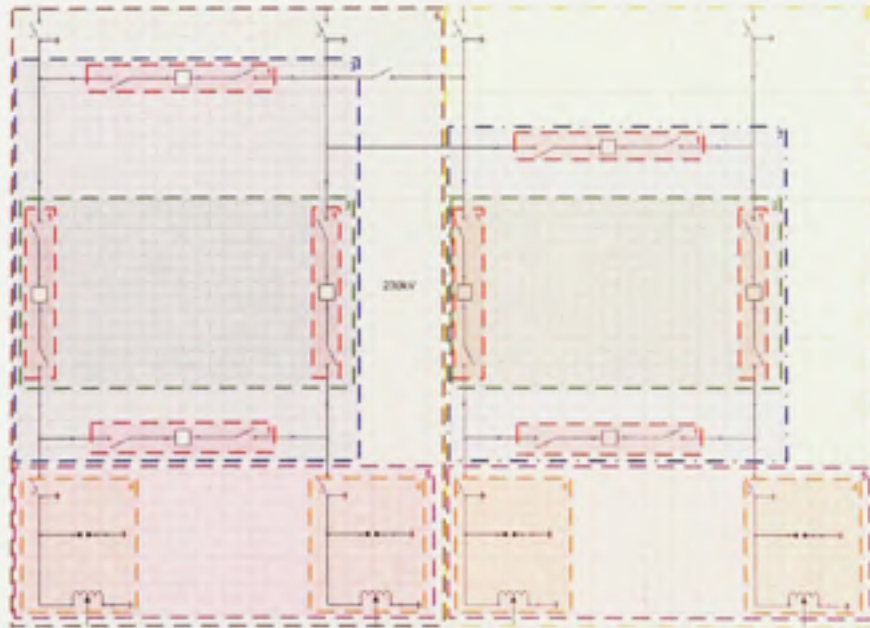
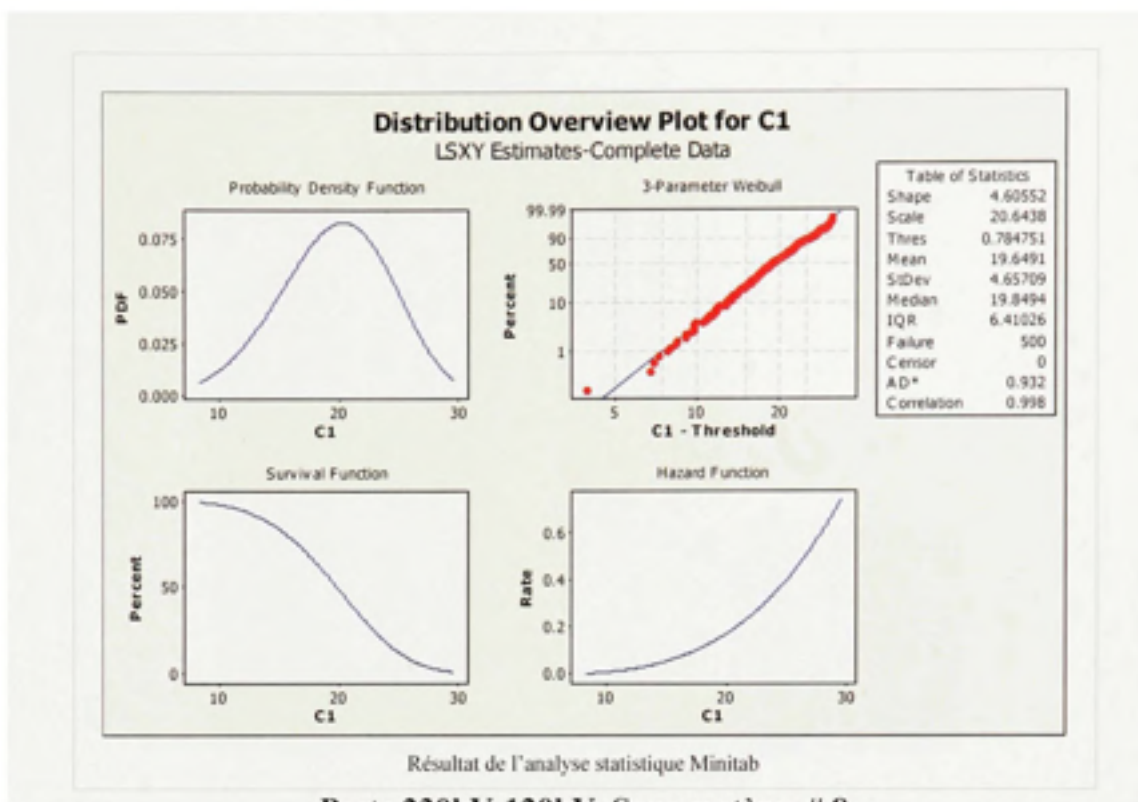


Schéma électrique du sous-système 8



Poste 230kV-120kV, Sous-système # 8

Le sous-système # 8 a été simulé ensemble avec le sous-système # 6 pour simplifier le regroupement à une étape ultérieure.

Simulation des sous-systèmes # 9, 10 et 11



Poste 230kV-120kV, Sous-système # 9, 10 et 11

Il n'a pas été requis de simuler les sous-systèmes # 9, 10 et 11 car ces derniers sont inclus dans les simulations des sous-systèmes # 12 et 13.

Simulation du sous-système # 12



Bloc de simulation Raptor®

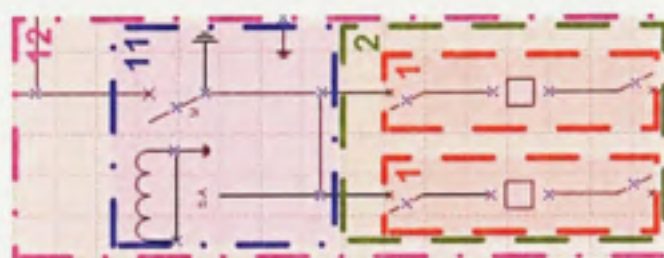
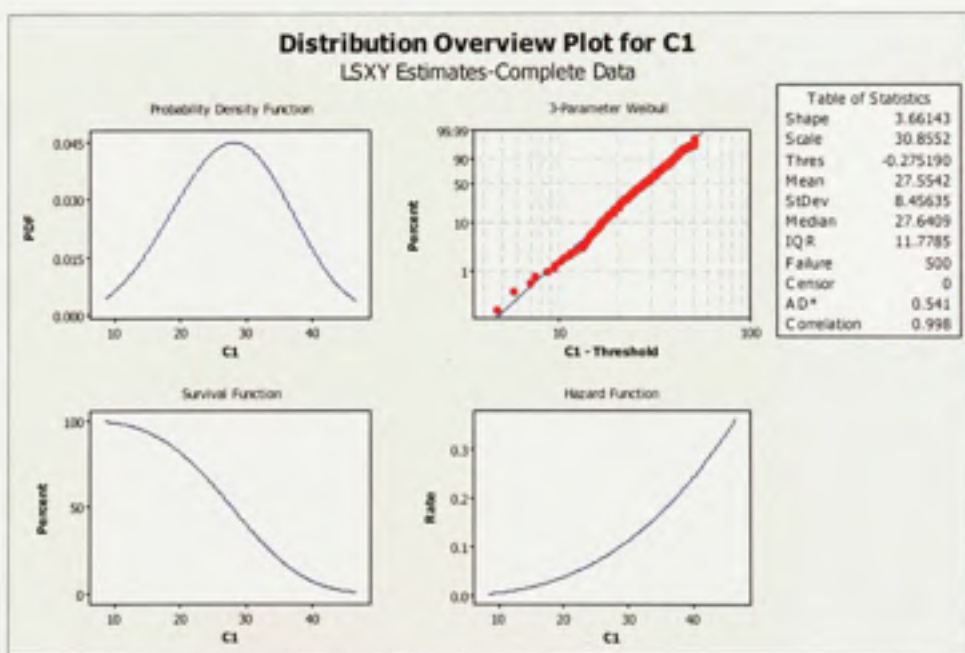
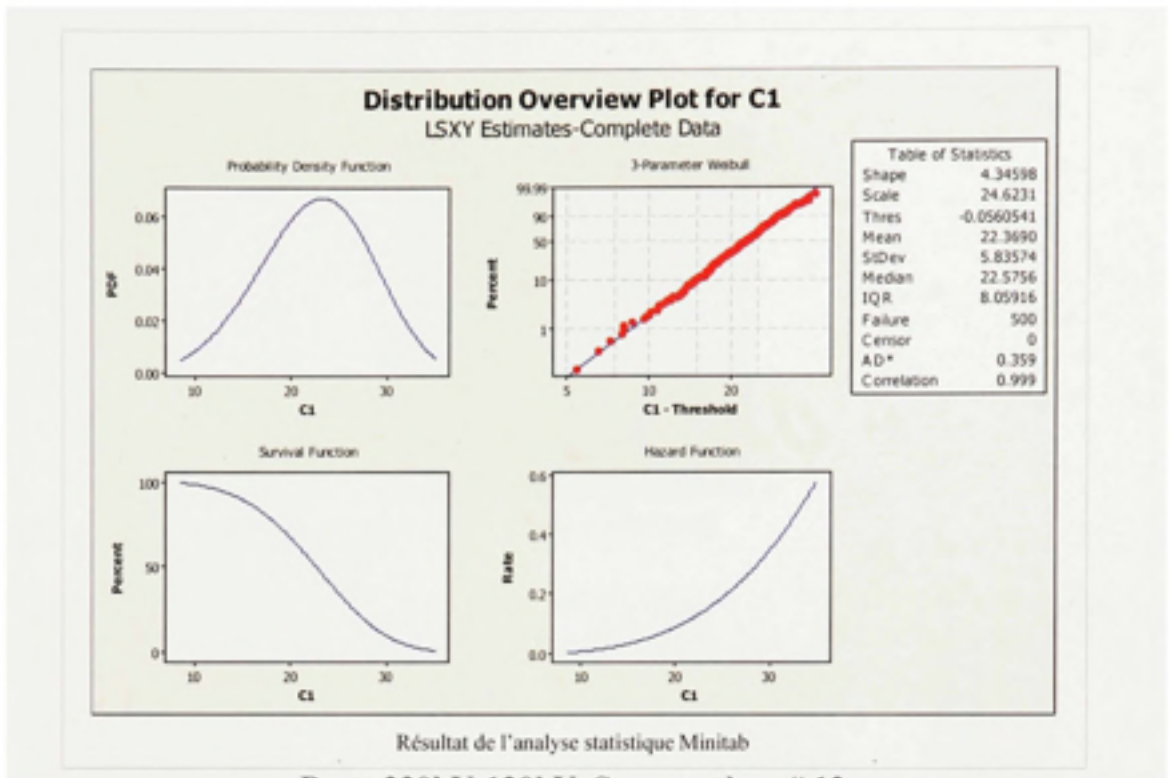


Schéma électrique du sous-système 12

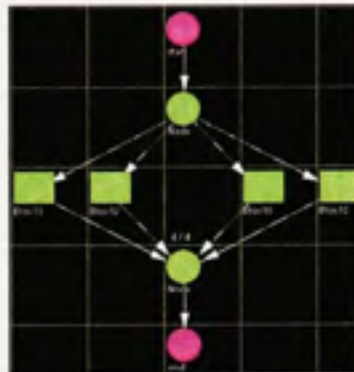


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 12



Simulation du sous-système # 14



Bloc de simulation Raptor®

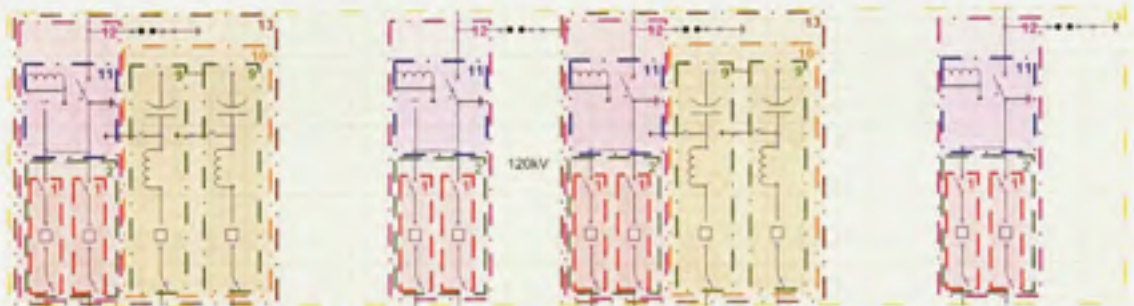
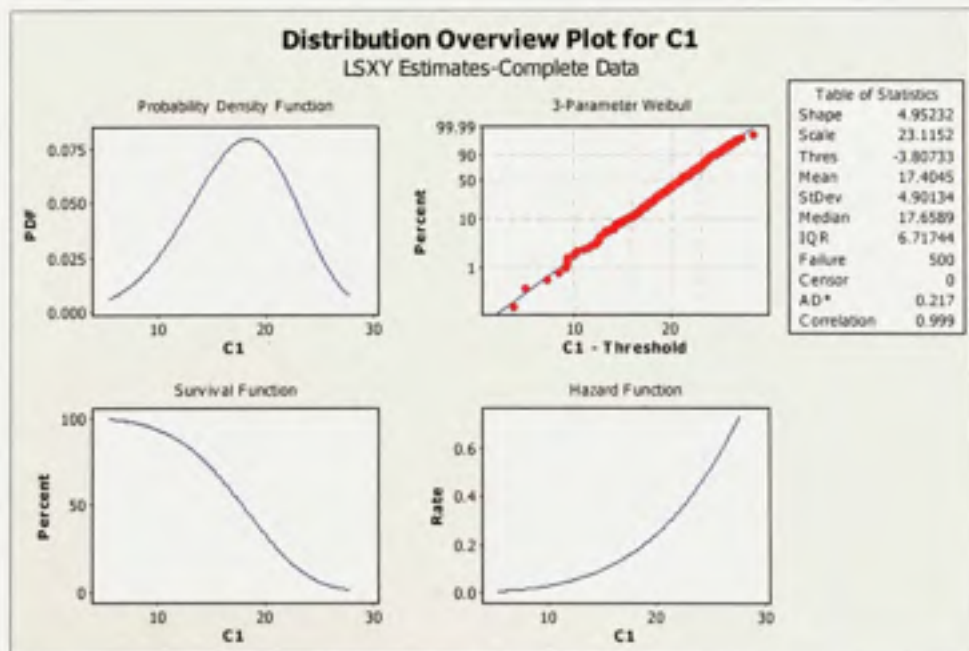


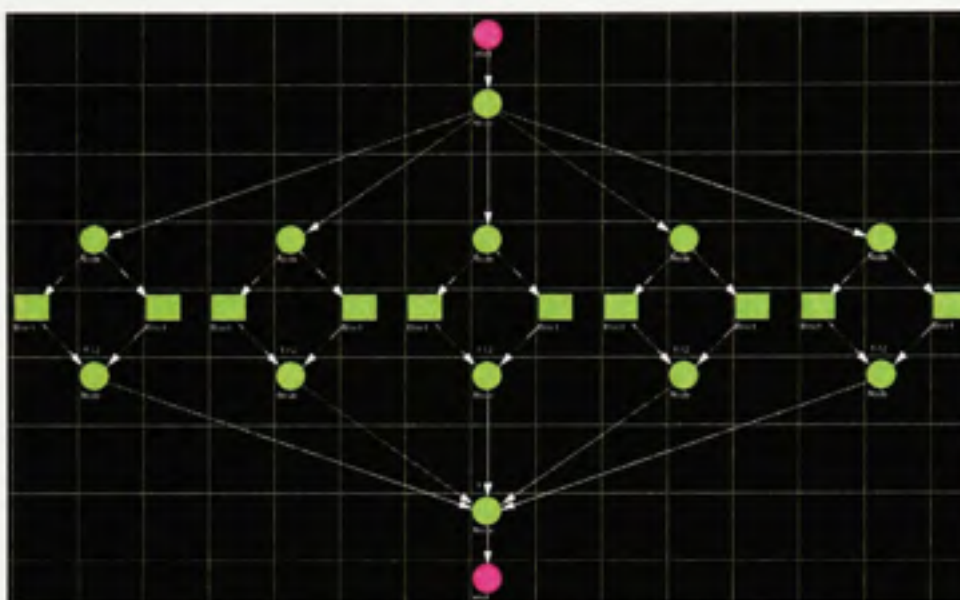
Schéma électrique du sous-système 14



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 14

Simulation du sous-système # 15



Bloc de simulation Raptor®

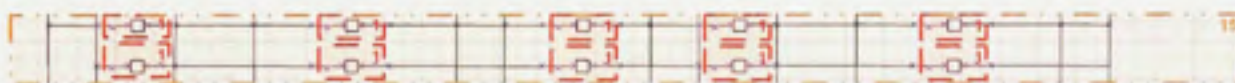
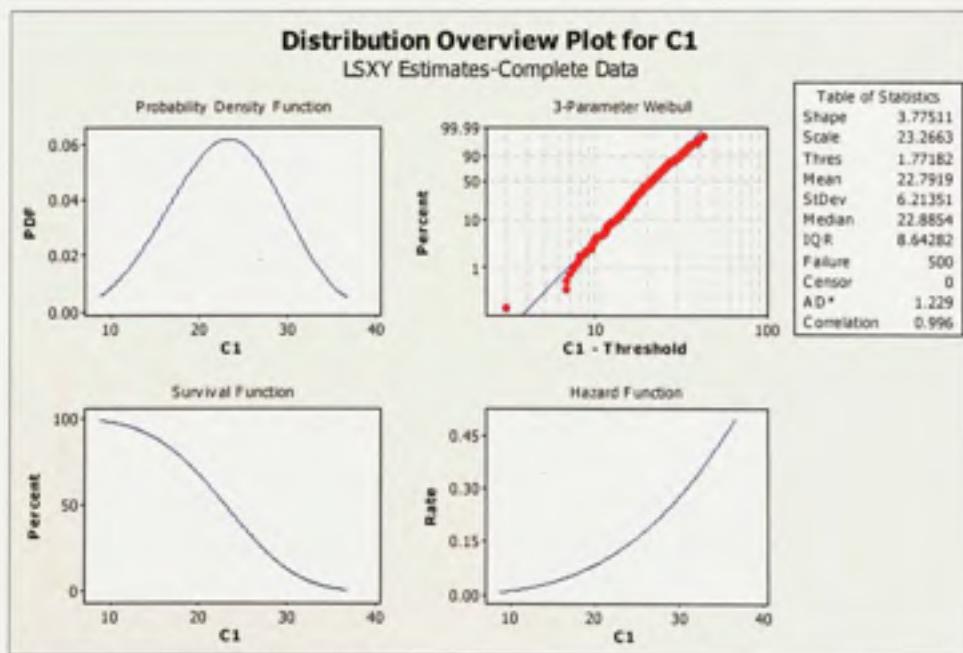


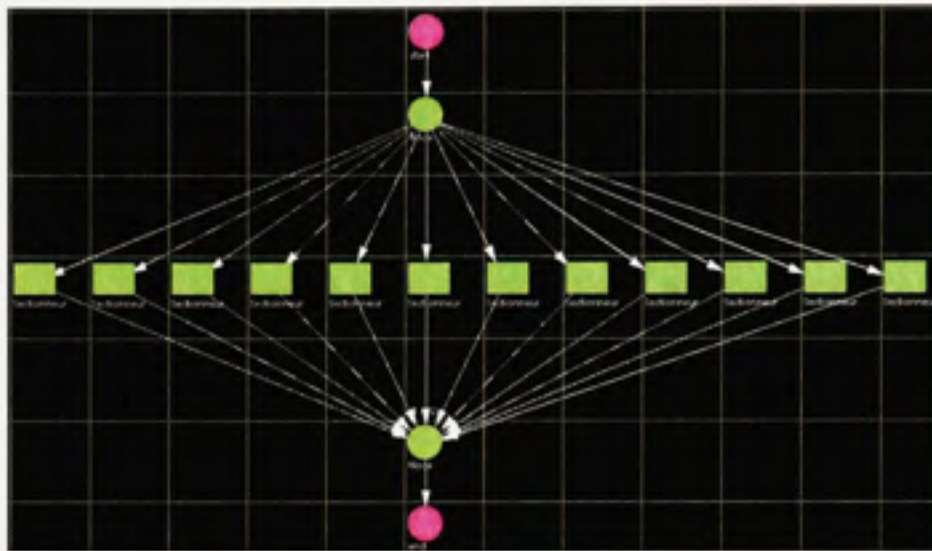
Schéma électrique du sous-système 15



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 15

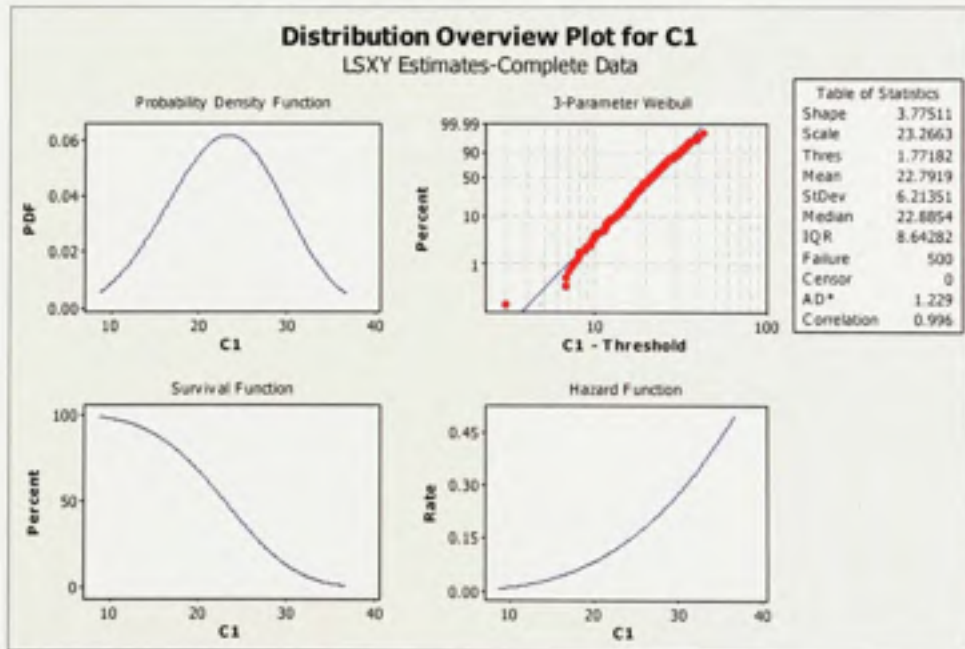
Simulation du sous-système # 16



Bloc de simulation Raptor®



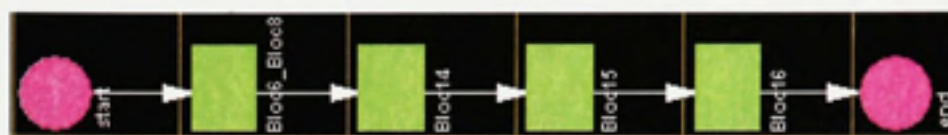
Schéma électrique du sous-système 1



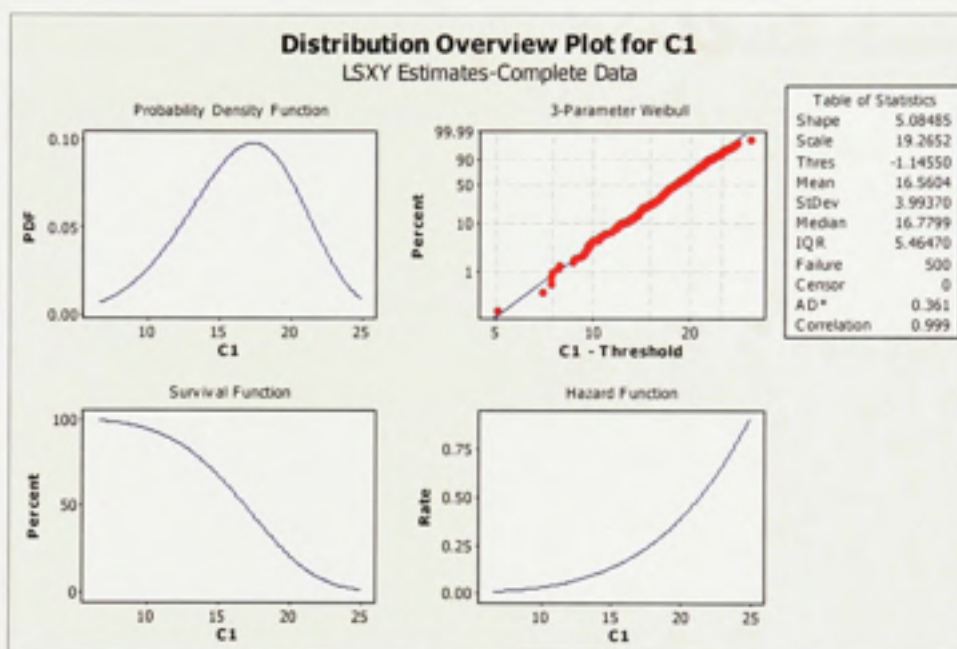
Résultat de l'analyse statistique Minitab

Poste 230kV-120kV, Sous-système # 16

Regroupement des sous-systèmes (simulation finale)



Bloc de simulation Raptor®



Résultat de l'analyse statistique Minitab

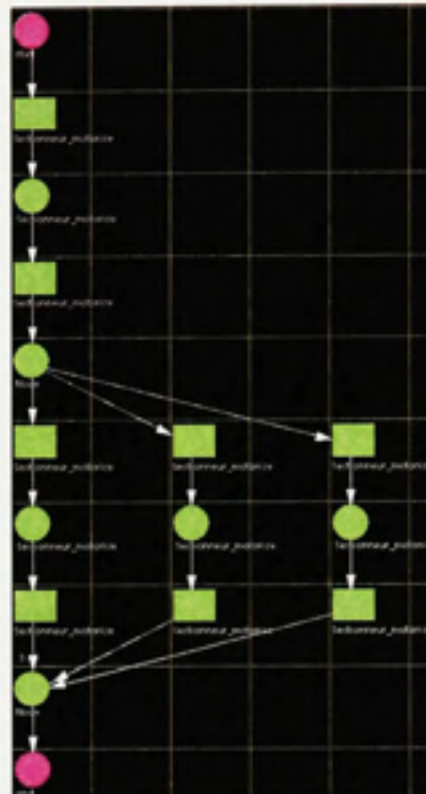
Poste 230kV-120kV, Modèle global

ANNEXE III

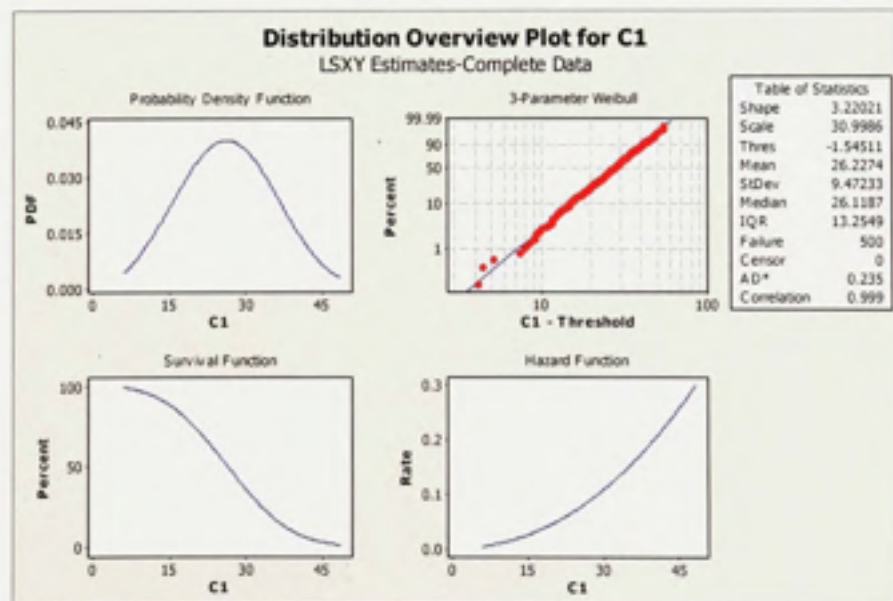
SIMULATION RAPTOR® (CONFIGURATION DU RÉSEAU DE TRANSÉNERGIE)

Dans l'intérêt de pouvoir évaluer l'effet des différents niveaux de redondance sur des configurations courantes d'équipements couramment utilisées par Hydro-Québec TransÉnergie, une procédure d'analyse très similaire à celle employée dans l'ANNEXE II a été utilisée. Le nombre de simulations à effectuer est égal au niveau de redondance qui a été conçu à l'intérieur de la configuration analysée.

Configuration : Barre unique

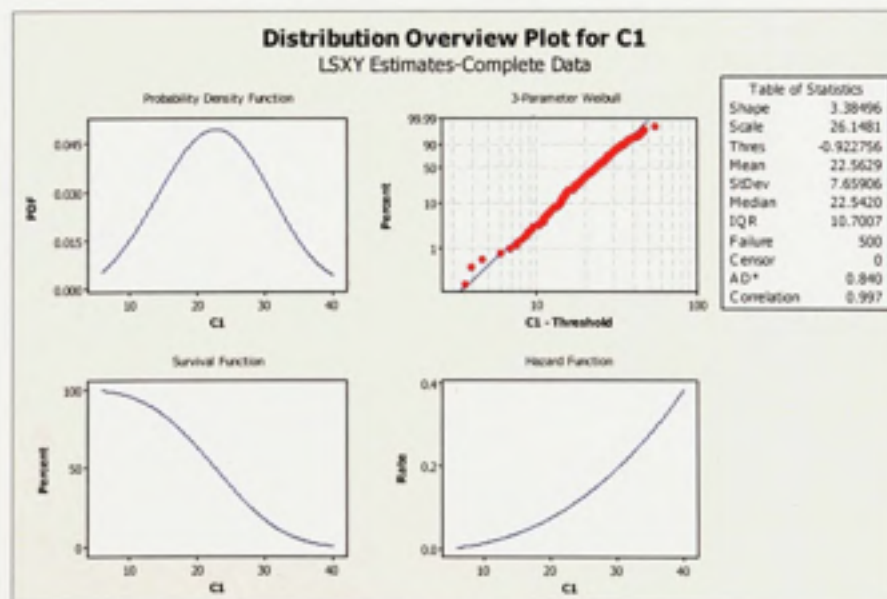


Bloc de simulation Raptor®

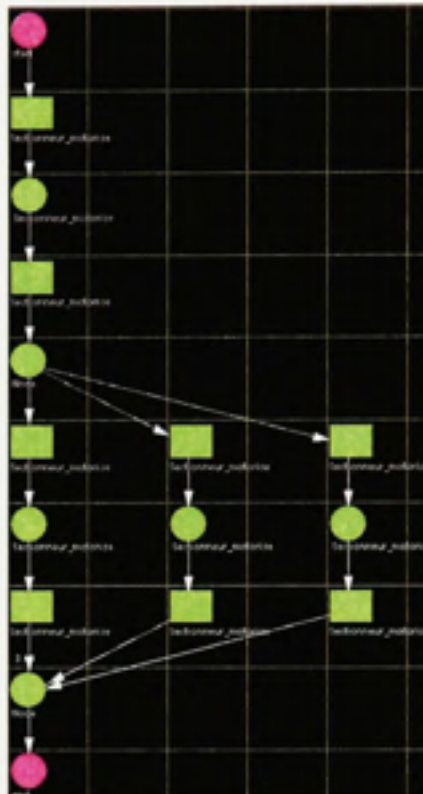


Résultat de l'analyse statistique Minitab

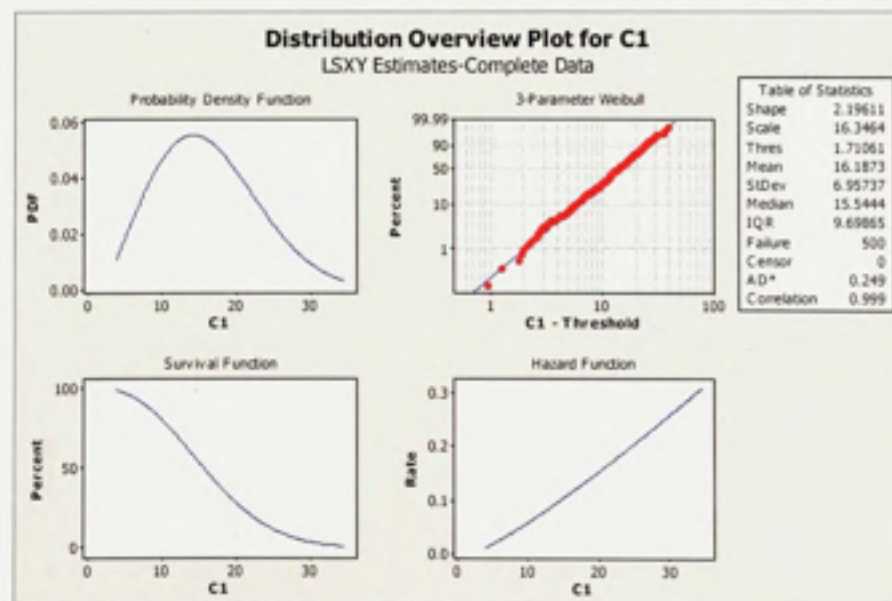
Barre unique, 1/3 requis pour survivre



Barre unique, 2/3 requis pour survivre



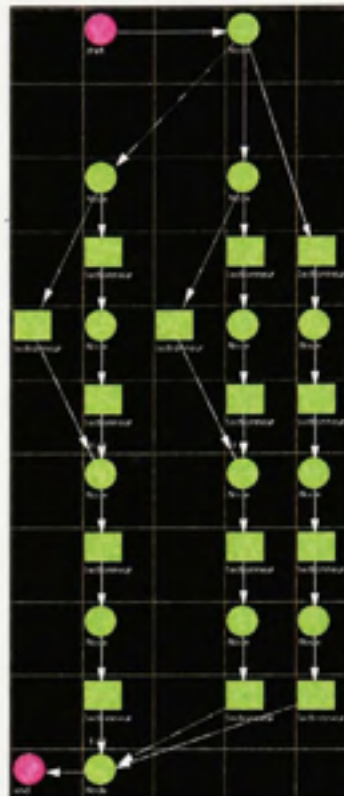
Bloc de simulation Raptor®



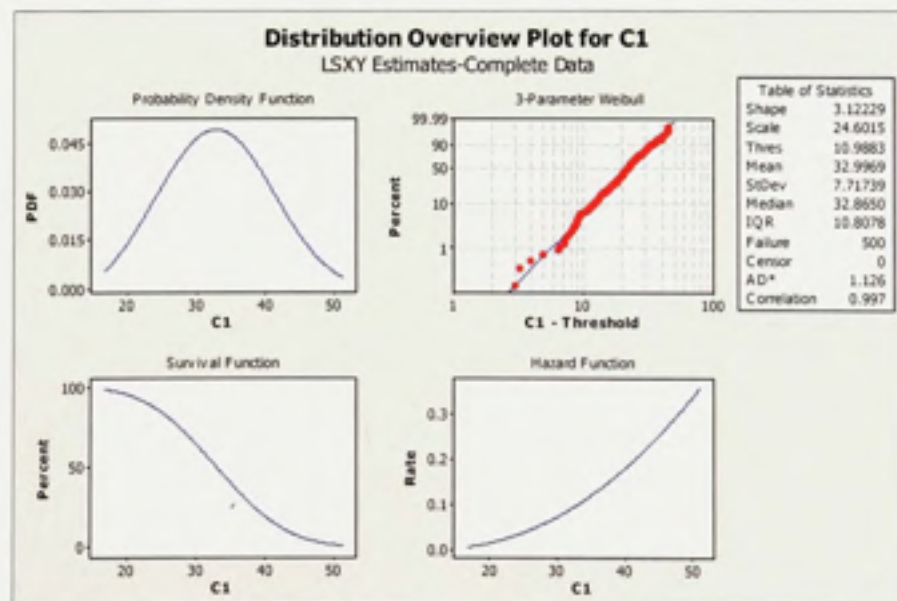
Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre unique, 3/3 requis pour survivre

Configuration : Barre et disjoncteur double

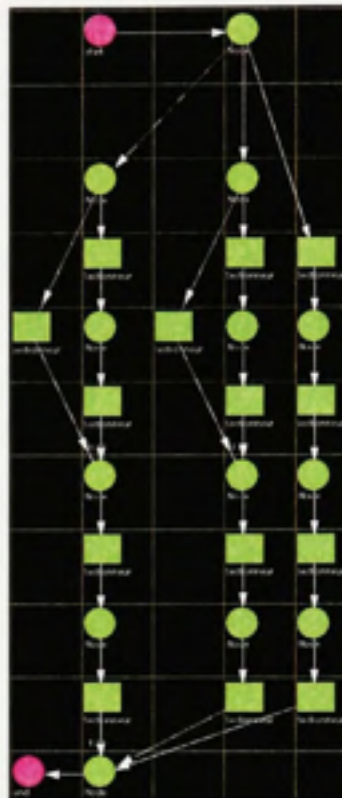


Bloc de simulation Raptor®

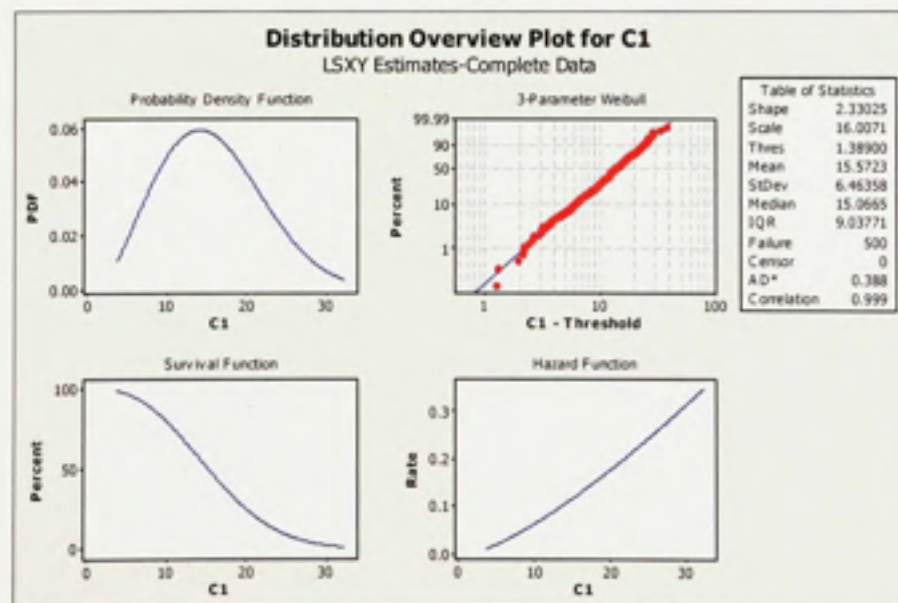


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre et disjoncteur en double, 1/3 requis pour survivre

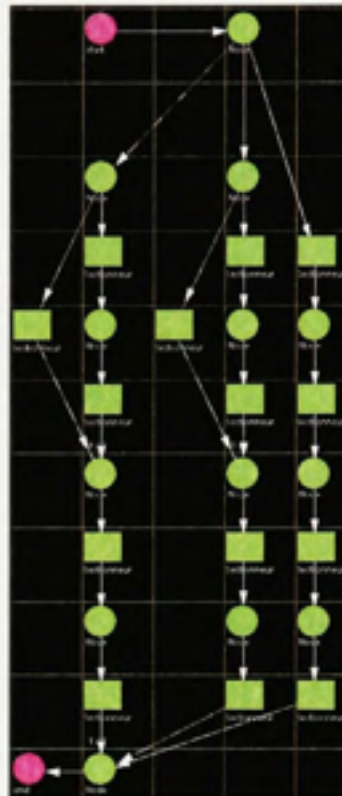


Bloc de simulation Raptor®

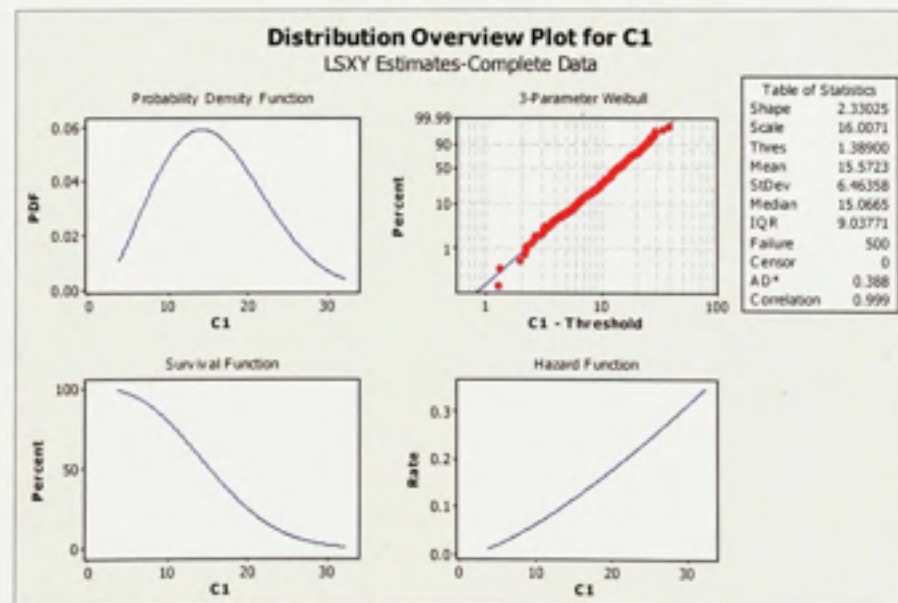


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre et disjoncteur en double, 2/3 requis pour survivre



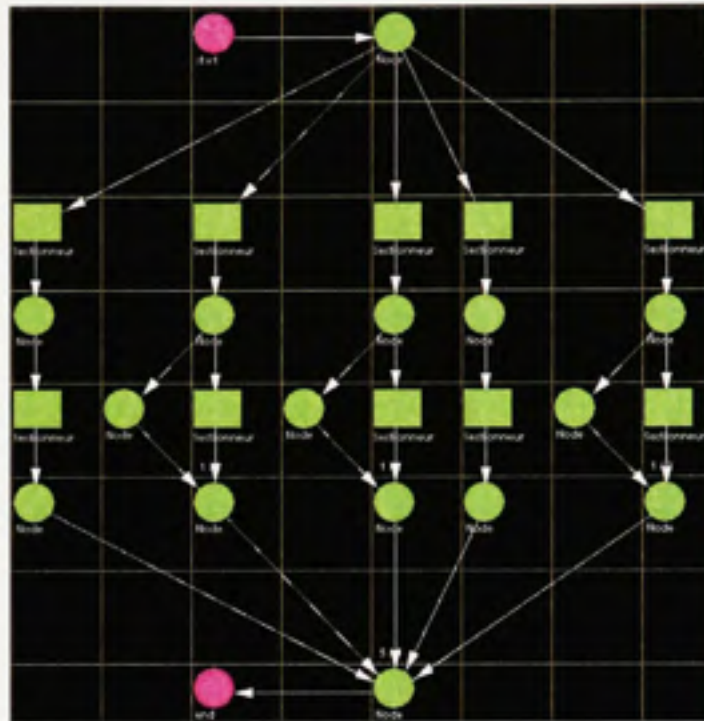
Bloc de simulation Raptor®



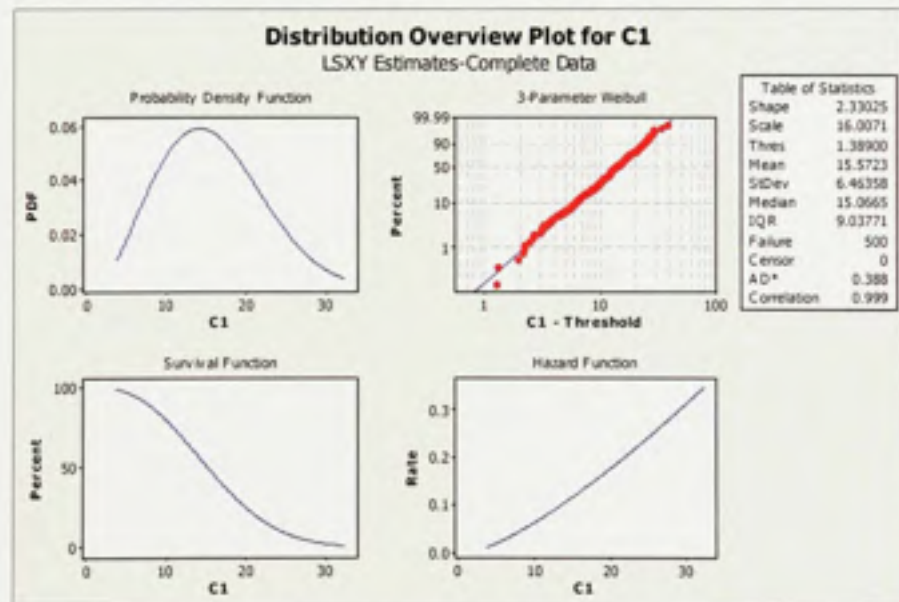
Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre et disjoncteur en double, 3/3 requis pour survivre

Configuration : Barre principale et barre de relève

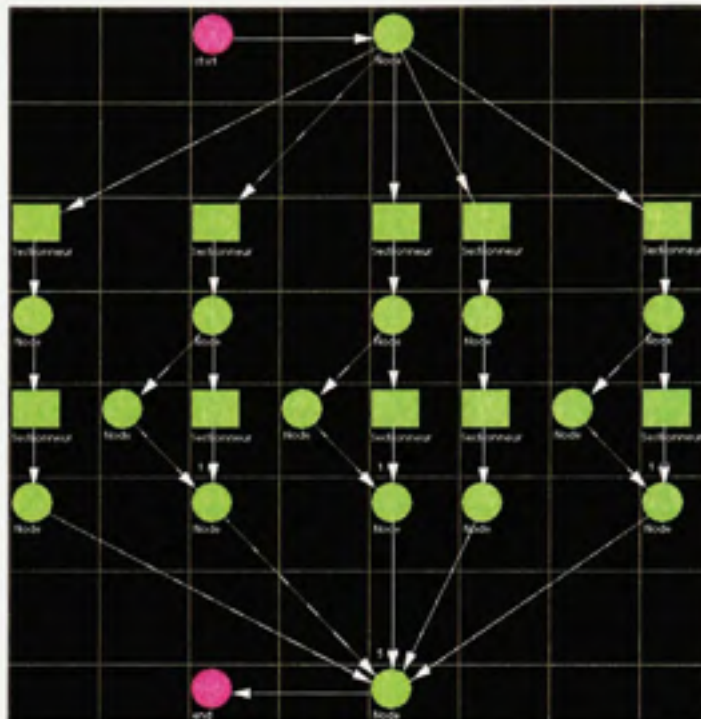


Bloc de simulation Raptor®

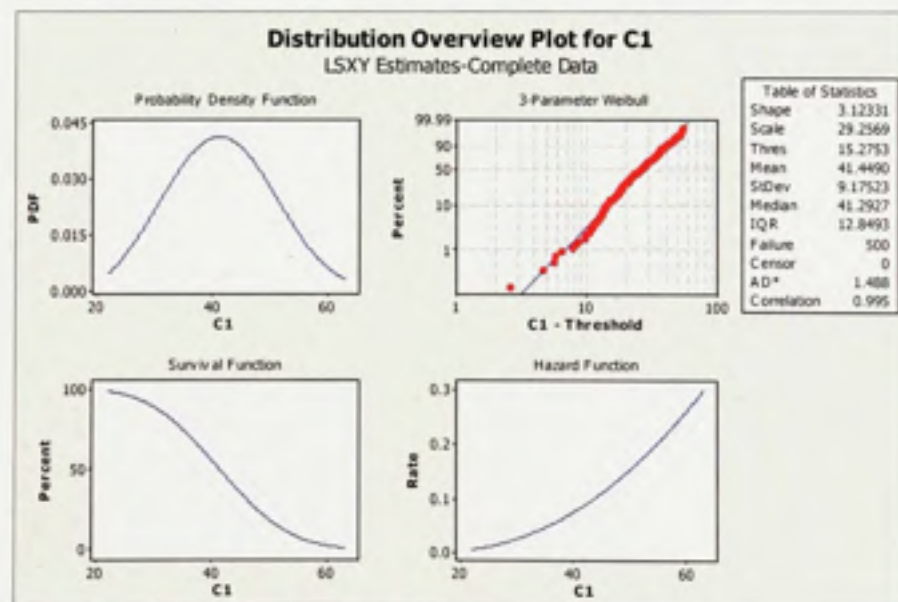


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre principale et barre de relève, 1/5 requis pour survivre

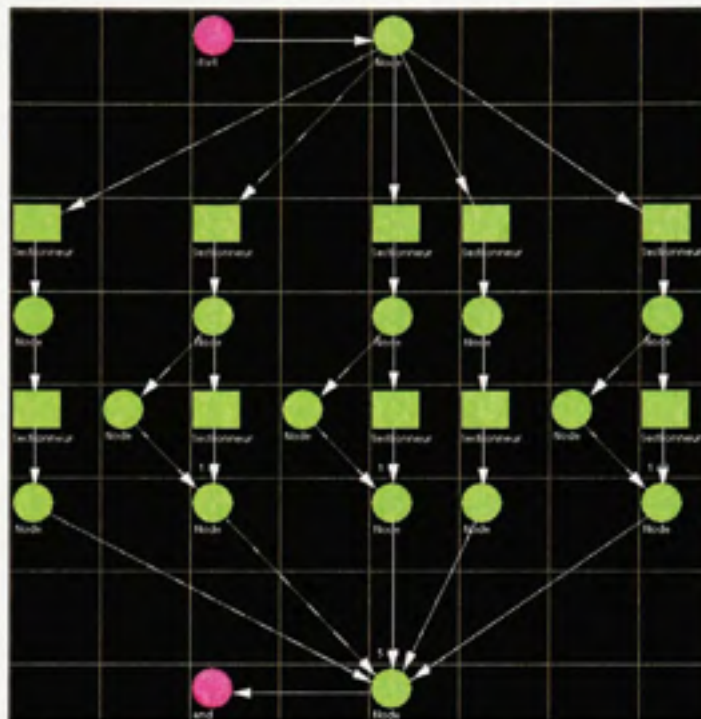


Bloc de simulation Raptor®

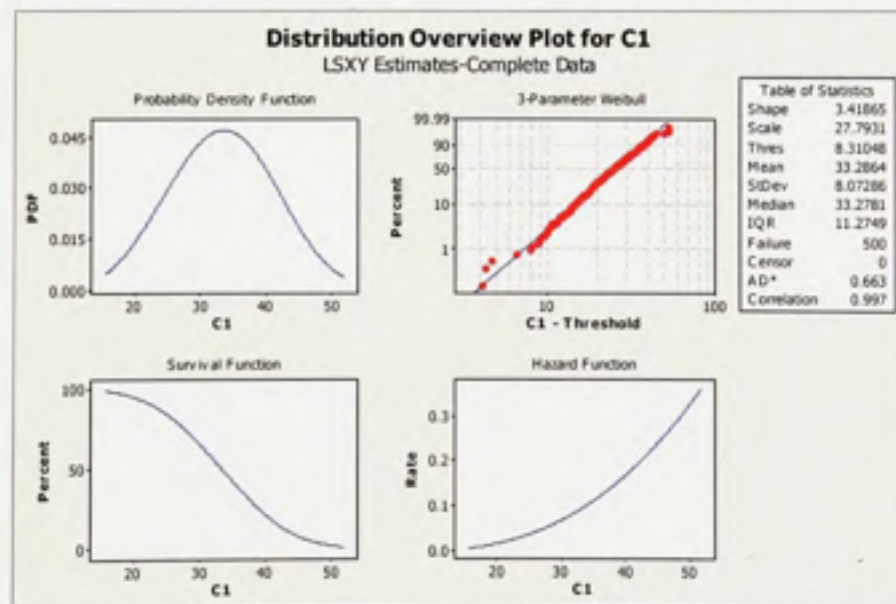


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre principale et barre de relève, 2/5 requis pour survivre

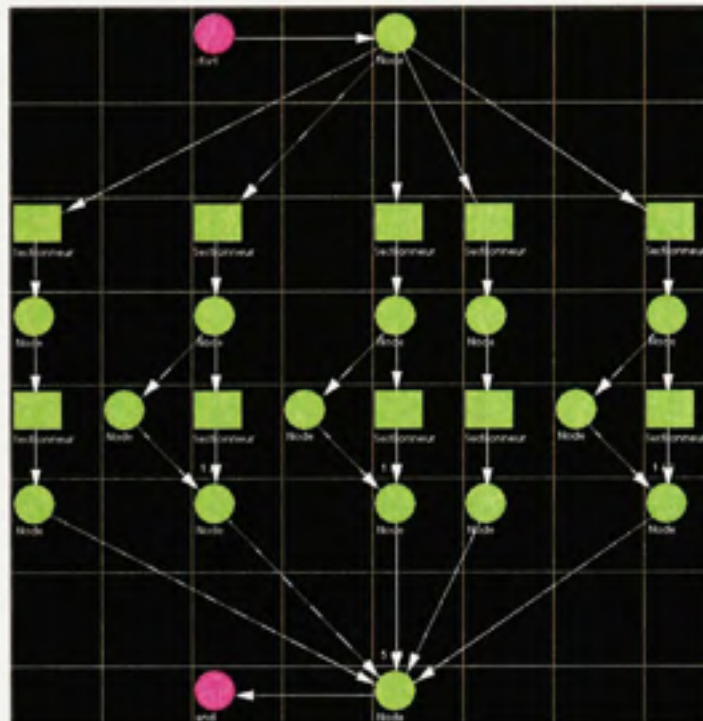


Bloc de simulation Raptor®

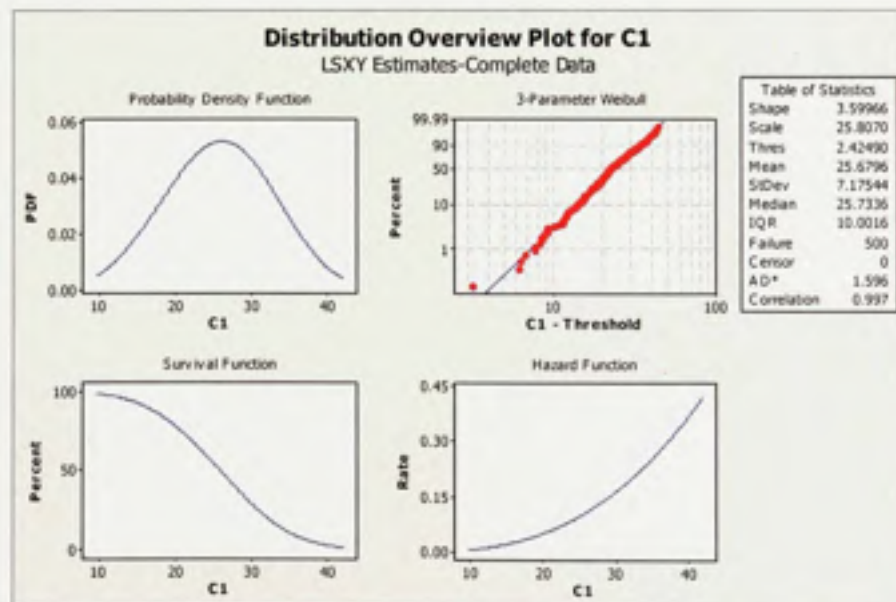


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre principale et barre de relève, 3/5 requis pour survivre

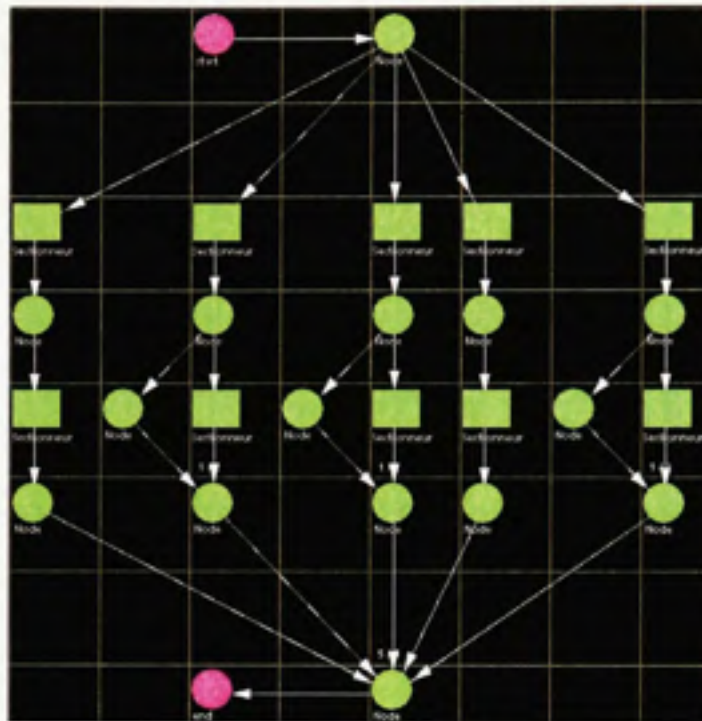


Bloc de simulation Raptor®

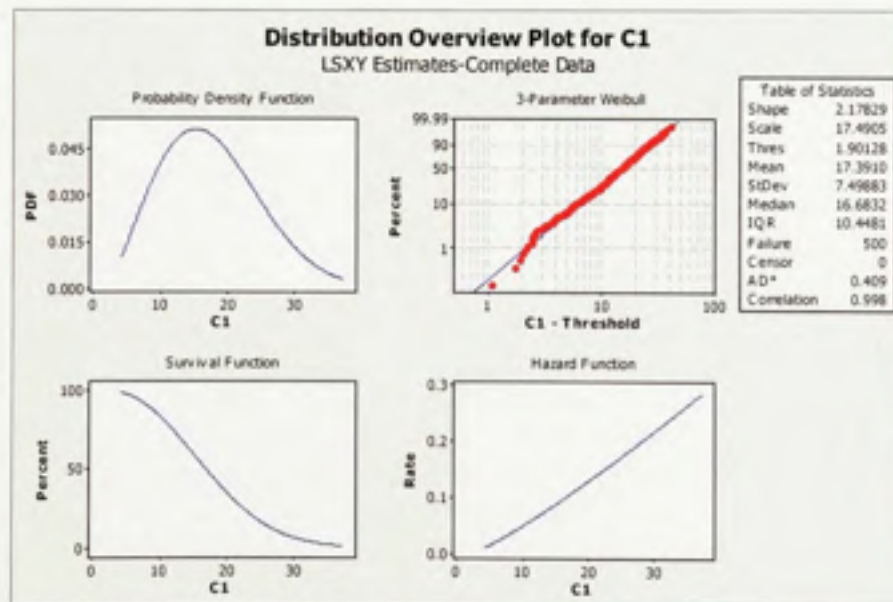


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre principale et barre de relève, 4/5 requis pour survivre



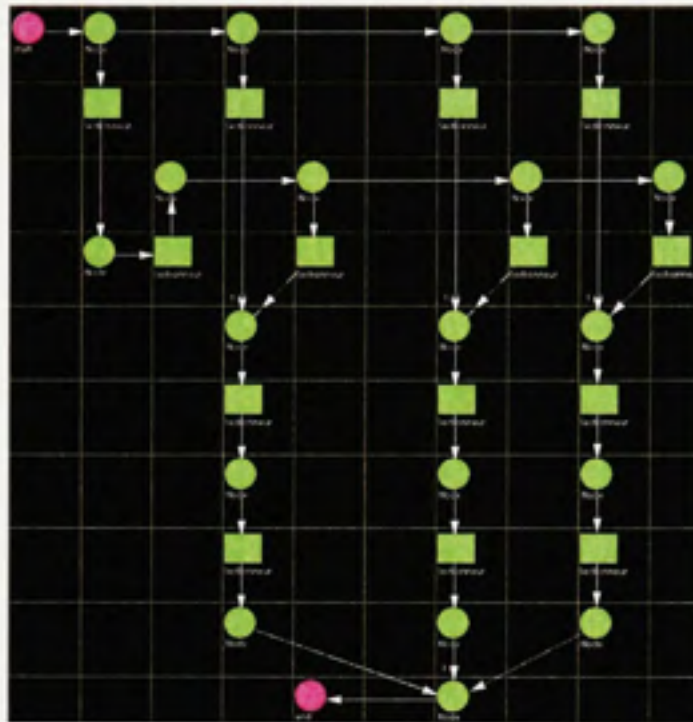
Bloc de simulation Raptor®



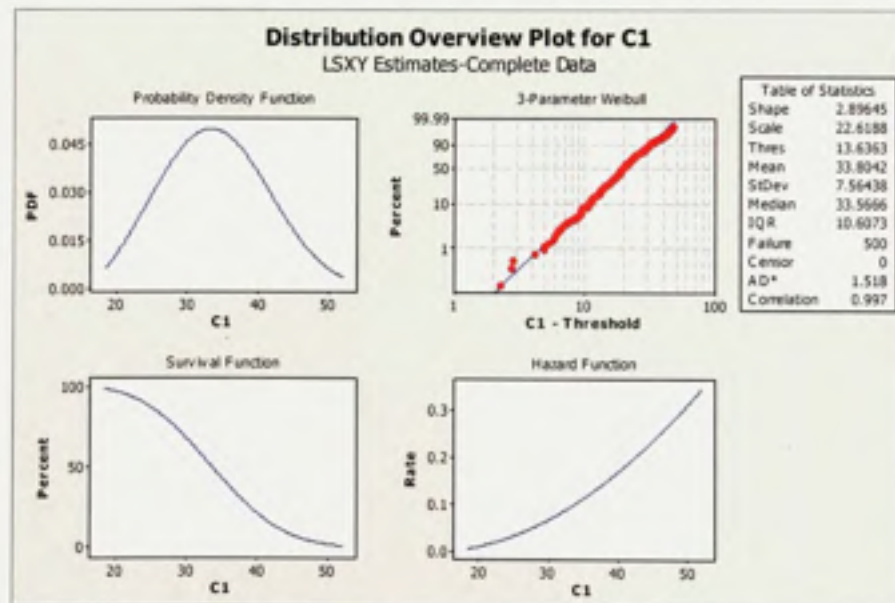
Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre principale et barre de relève, 5/5 requis pour survivre

Configuration : Barre double et disjoncteur unique

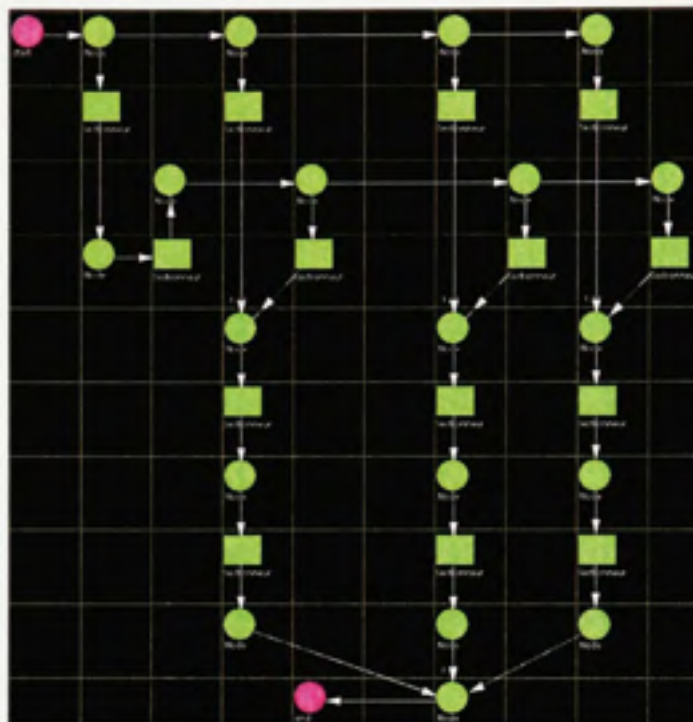


Bloc de simulation Raptor®

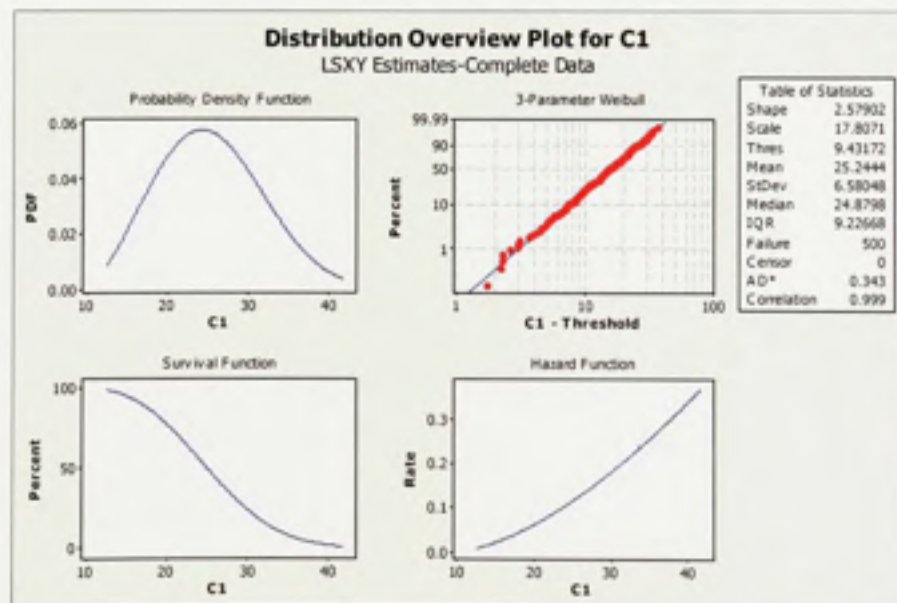


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre double et disjoncteur unique, 1/3 requis pour survivre

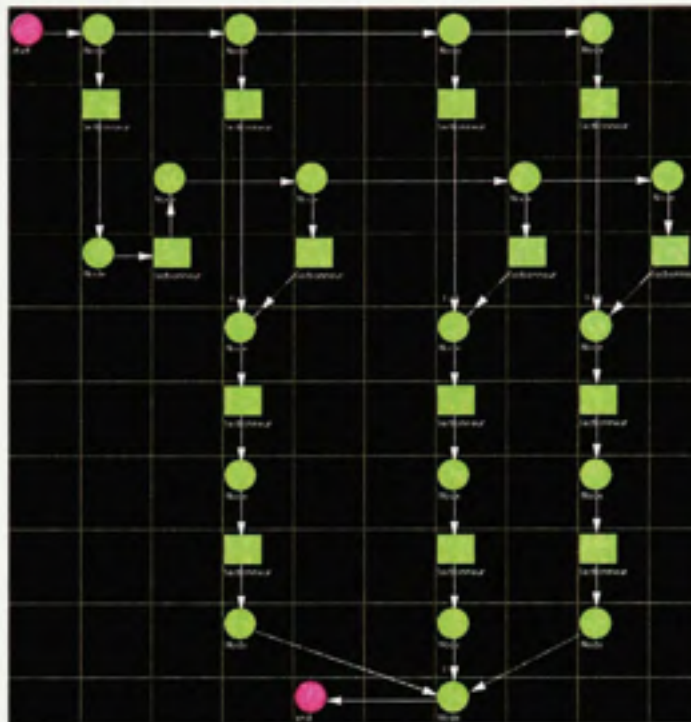


Bloc de simulation Raptor®

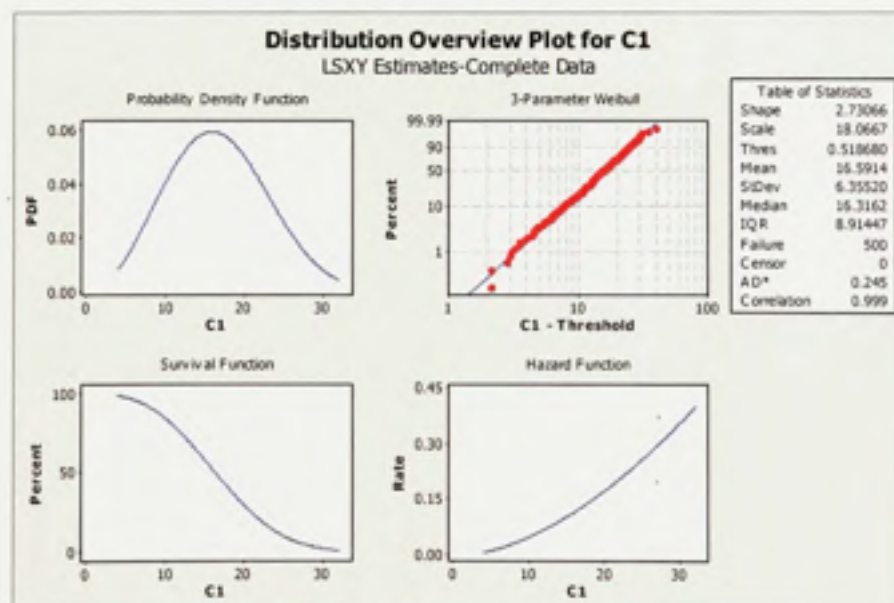


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre double et disjoncteur unique, 2/3 requis pour survivre



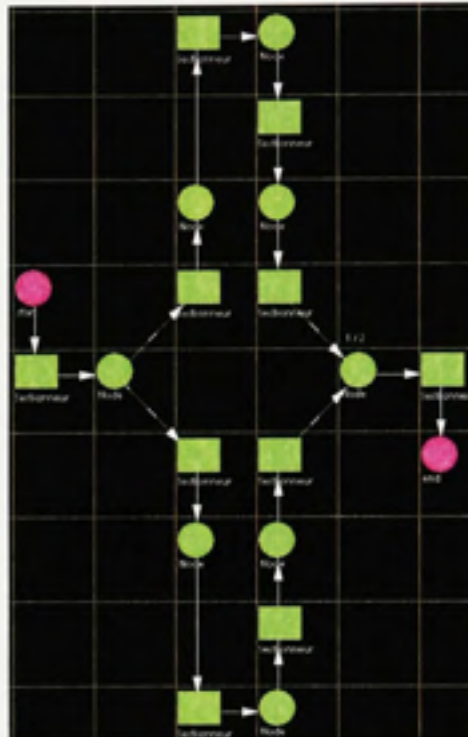
Bloc de simulation Raptor®



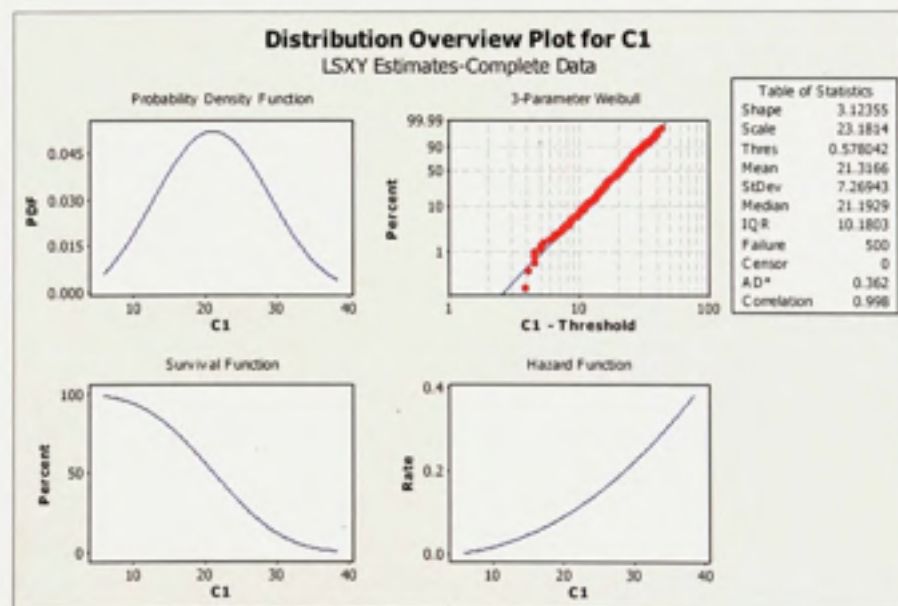
Résultat de l'analyse statistique Minitab

Barre double et disjoncteur unique, 3/3 requis pour survivre

Configuration : Bouclés

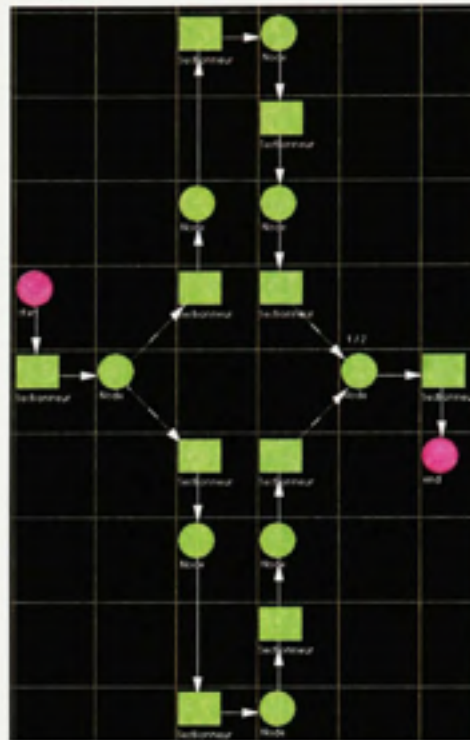


Bloc de simulation Raptor®

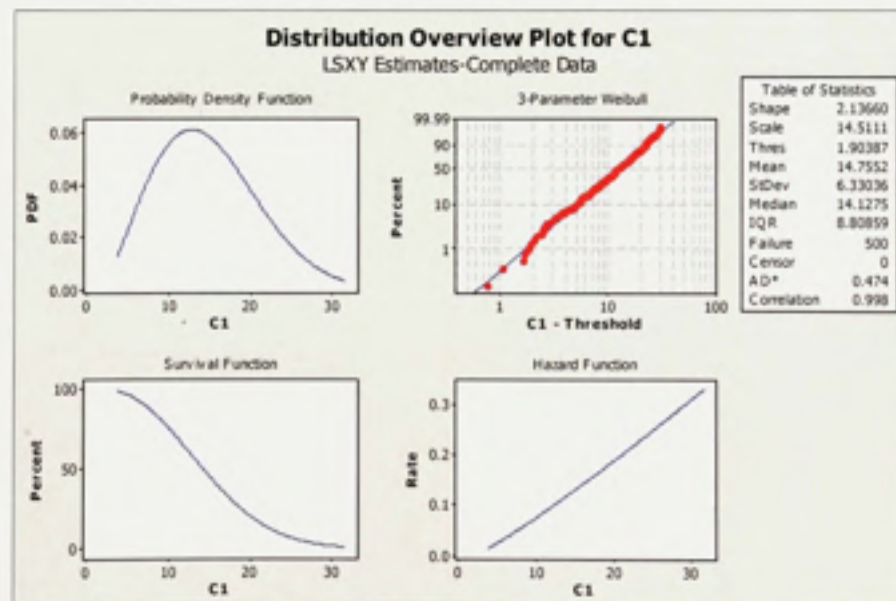


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Bouclés, 1/2 requis pour survivre



Bloc de simulation Raptor®



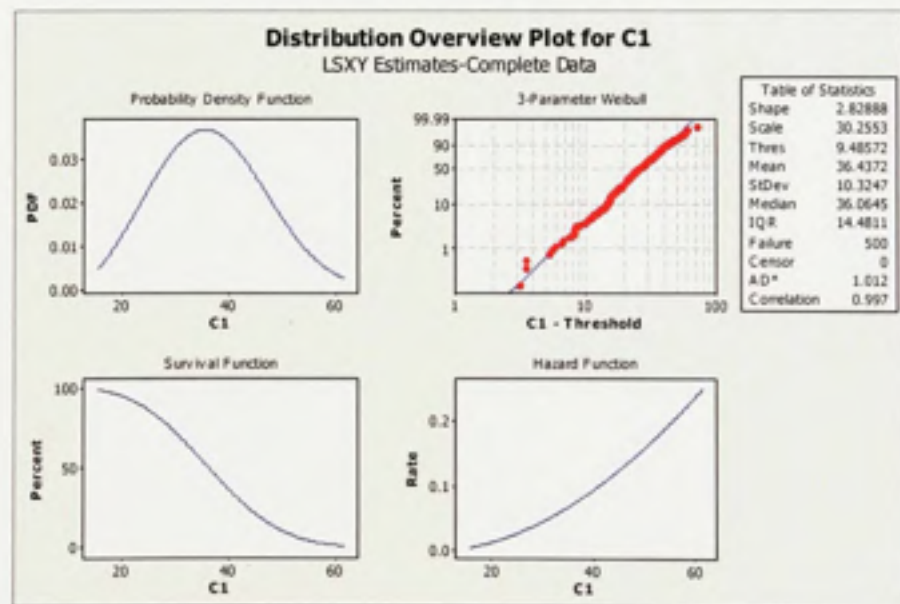
Résultat de l'analyse statistique Minitab

Bouclés, 2/2 requis pour survivre

Configuration : Disjoncteur et demi



Bloc de simulation Raptor®

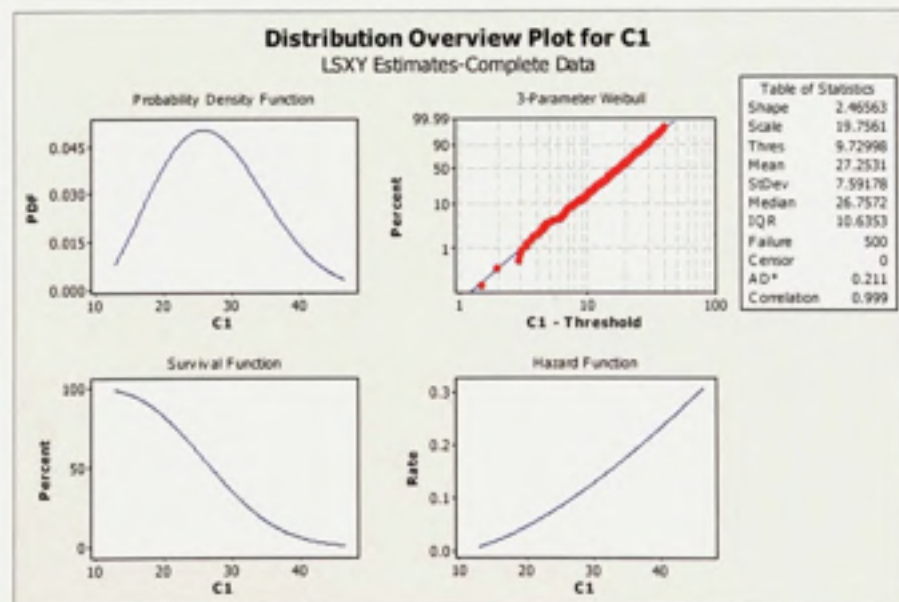


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Disjoncteur et demi, 1/6 requis pour survivre



Bloc de simulation Raptor®

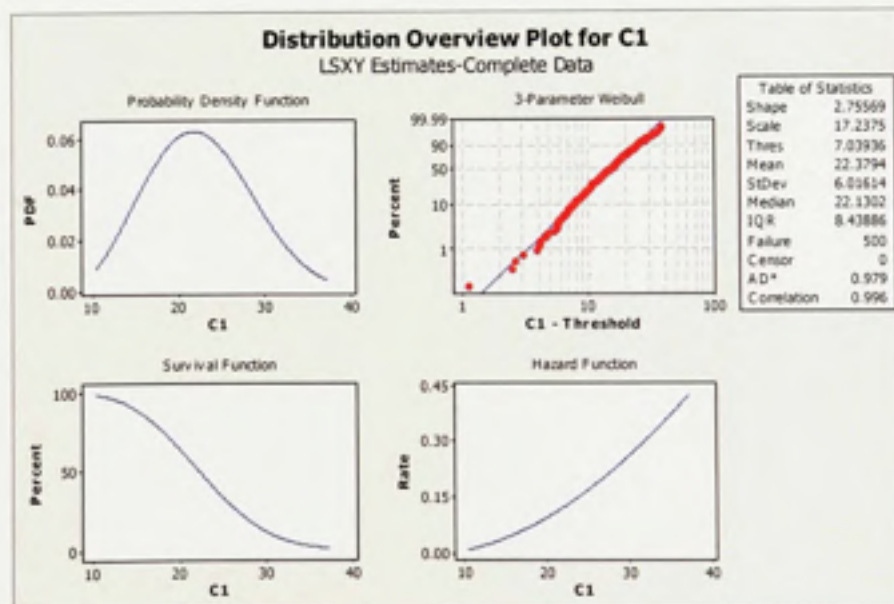


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Disjoncteur et demi, 2/6 requis pour survivre



Bloc de simulation Raptor®

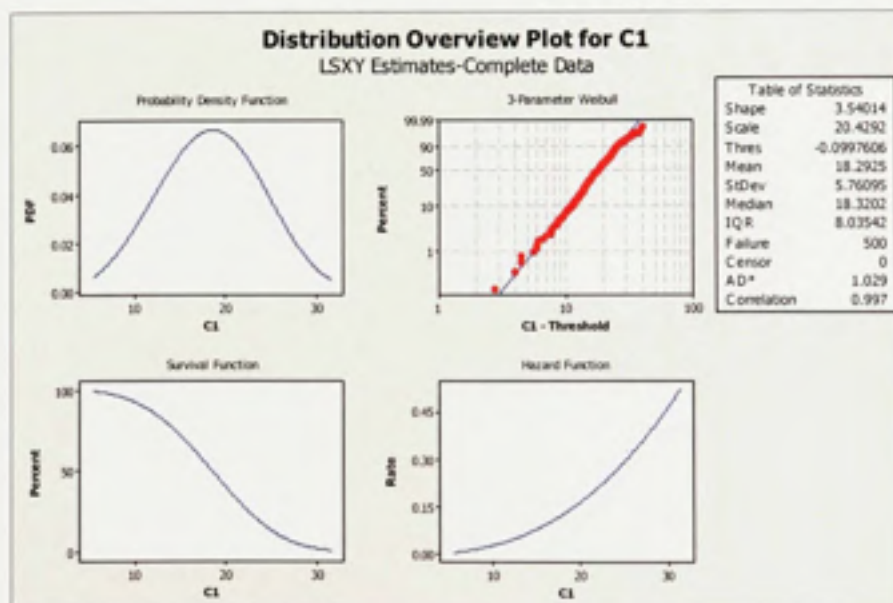


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Disjoncteur et demi, 3/6 requis pour survivre



Bloc de simulation Raptor®

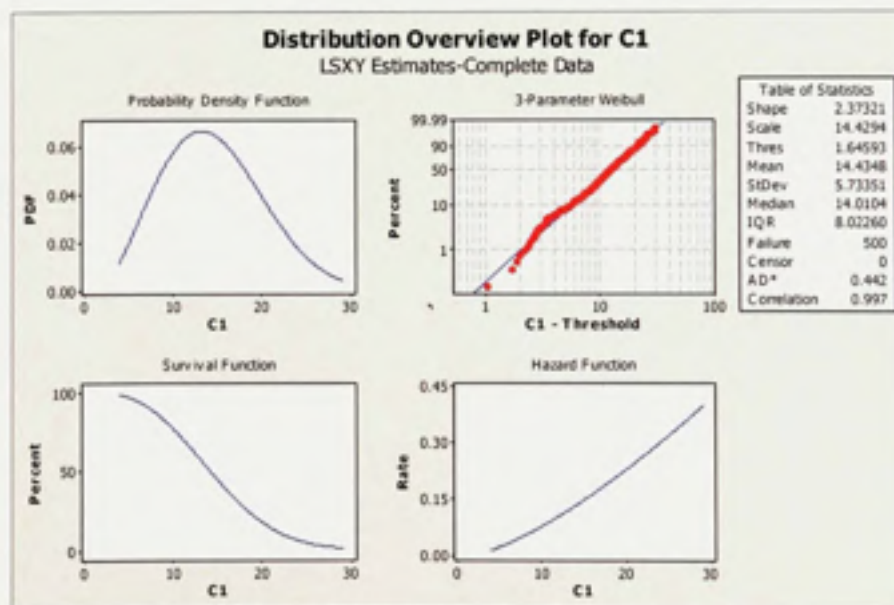


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Disjoncteur et demi, 4/6 requis pour survivre



Bloc de simulation Raptor®

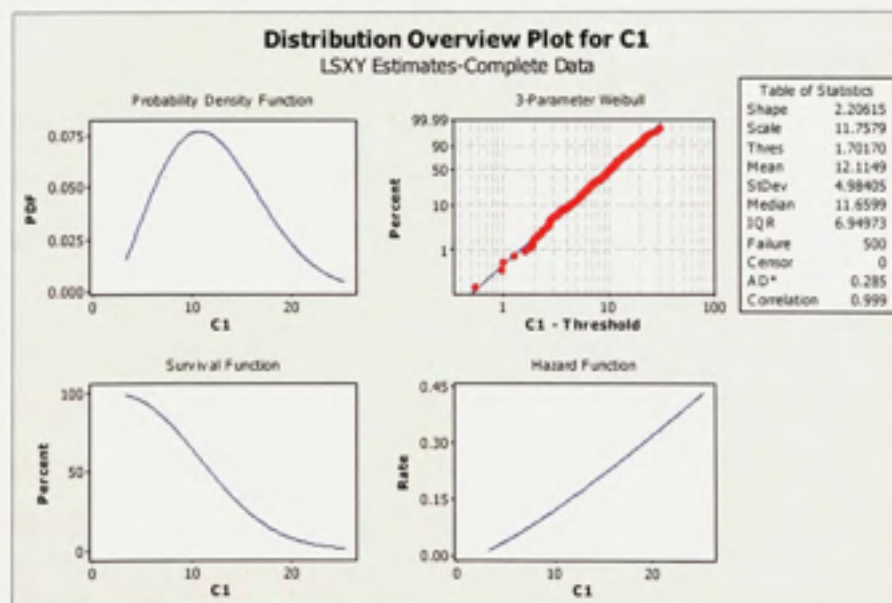


Résultat de l'analyse statistique Minitab

Disjoncteur et demi, 5/6 requis pour survivre



Bloc de simulation Raptor®



Résultat de l'analyse statistique Minitab

Disjoncteur et demi, 5/6 requis pour survivre

ANNEXE IV

PRATIQUES DE MAINTENANCE À HYDRO-QUÉBEC DISTRIBUTION

Les pratiques actuelles de maintenance à Hydro-Québec Distribution sont différentes des pratiques actuellement utilisées à Hydro-Québec TransÉnergie. Il existe plusieurs similarités entre un réseau de distribution dans une grande ville comme Montréal et un réseau de transport régional tel qu'est le sujet de l'étude en cours. La discussion présentée dans cette section a pour but d'amener au lecteur une vision complémentaire à la maintenance prédictive qui a été traitée comme sujet dans ce mémoire de recherche.

Analyse des gaz dissous

"L'analyse des gaz libres et des gaz dissous dans l'huile (AGD) est l'un des outils de diagnostic les plus utilisés pour la détection et l'évaluation de défauts dans les matériels électriques. Cependant, l'interprétation des résultats d'AGD est souvent complexe et il convient qu'elle soit toujours faite avec prudence, en s'entourant de personnel expérimenté en maintenance d'isolation." Un équipement électrique tel un transformateur de puissance est composé d'enroulements électriques qui baignent dans un bain d'hydrocarbures. Sous l'effet d'un défaut électrique, les groupes chimiques contenus dans l'huile faisant partie de part et d'autre d'hydrogène et de carbone, se décomposent pour former différents gaz qui se trouvent dissous dans le bain d'huile. Les gaz formés sont majoritairement l'hydrogène (H_2), le méthane (CH_4), l'éthane (CH_3-CH_3), l'éthylène ($CH_2=CH_2$) ou l'acétylène ($CH\equiv CH$). Le type de défaut présent dans l'appareil est diagnostiqué selon le type de gaz dissous dans l'huile et la concentration de cette dernière (*Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres*, 1999).

Cas	Défaut caractéristique	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
DP	Décharges partielles (voir notes 3 et 4)	NS ¹⁾	< 0,1	< 0,2
D1	Décharges de faible énergie	< 1	0,1 – 0,5	< 1
D2	Décharges de forte énergie	0,6 – 2,5	0,1 – 1	< 2
T1	Défaut thermique $t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	NS ¹⁾	> 1, mais NS ¹⁾	< 1
T2	Défaut thermique $300\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	< 0,1	> 1	1 – 4
T3	Défaut thermique $t > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,2 ²⁾	< 1	< 4

NOTE 1 – Dans certains pays, le rapport C_2H_2/C_2H_6 est utilisé plutôt que le rapport CH_4/H_2 . Également, dans certains pays, des limites légèrement différentes des rapports de gaz sont utilisées.

NOTE 2 – Les rapports ci-dessus ne sont significatifs et ne seront calculés que si au moins un des gaz est à une concentration et à une vitesse d'accroissement de gaz supérieures aux valeurs typiques (voir article 9).

NOTE 3 – $CH_4/H_2 < 0,2$ pour les décharges partielles dans les transformateurs de mesure.

$CH_4/H_2 < 0,07$ pour les décharges partielles dans les traversées.

NOTE 4 – Des compositions en gaz similaires aux décharges partielles ont été observées à la suite de la décomposition du mince film d'huile entre les lamelles du noyau, à des températures supérieures ou égales à $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ (voir 4.3 et [1] de l'annexe C).

¹⁾ NS = Non significatif, quelle que soit la valeur.

²⁾ Une valeur croissante de C_2H_2 peut indiquer que le point chaud est à une température supérieure à $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

DP	Décharges partielles
D1	Décharges de faible énergie
D2	Décharges de forte énergie
T1	Défaut thermique, $t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
T2	Défaut thermique, $300\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$
T3	Défaut thermique, $t > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Interprétation des gaz dissous dans l'huile selon la norme CEI 60599

(Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres, 1999)

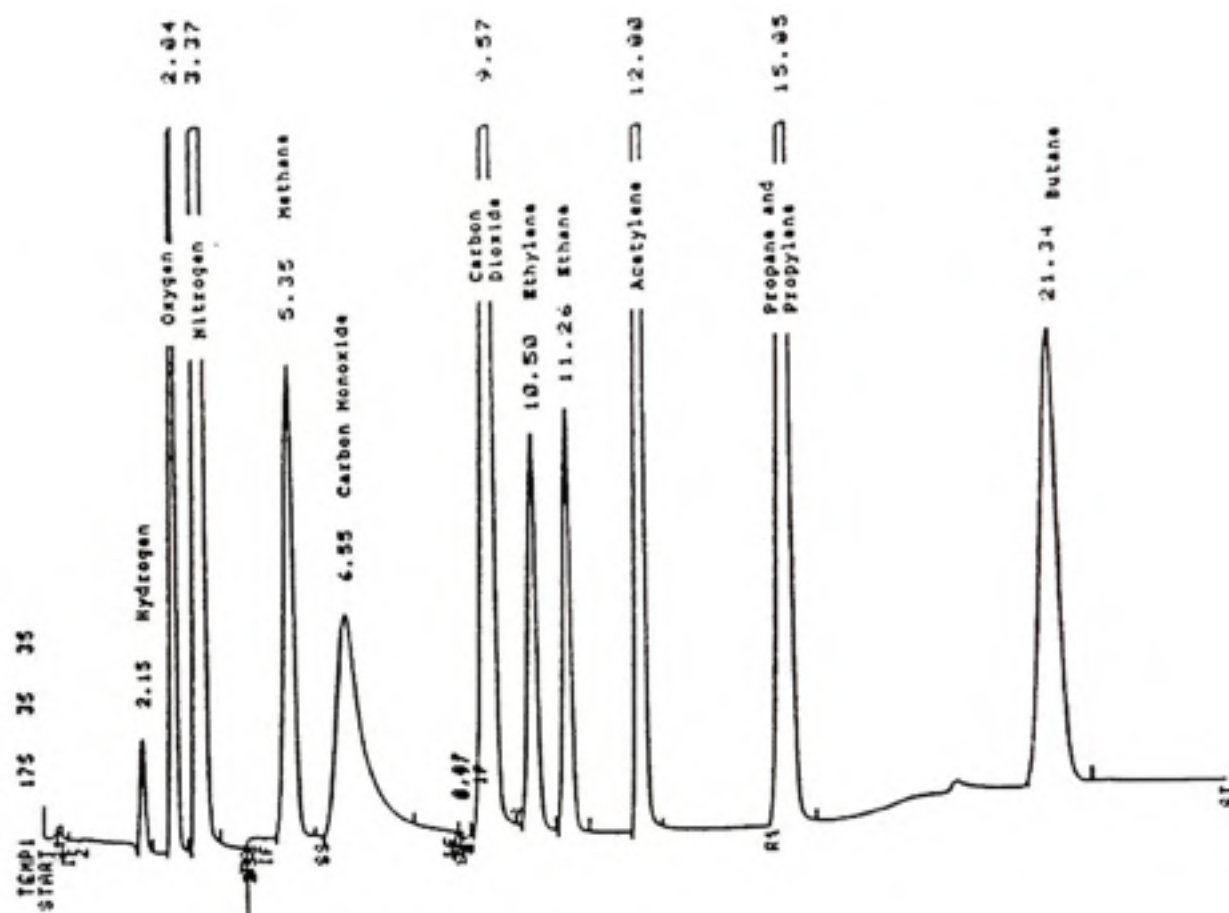
Hydro-Québec Distribution, ayant un grand nombre d'équipements présents sur le réseau établi, en collaboration avec l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ), ses propres balises par rapport à l'interprétation des gaz dissous. Un résumé est donné dans le tableau suivant.

Niveaux	H ₂ (PPM)	CO ₂ (PPM)	Acétylène (PPM)	Éthylène (PPM)	Éthane (PPM)	Méthane (PPM)	CO (PPM)	Actions
Normal	0-200	7000	0-5	0-30	0-40	0-100	500	Laisser le Nf en opération
Surveillance	>200 (1000)	>7000	>5	>30	>40	>100	>500	Investigation pour détection de surchauffe, point chaud, ou pour détermination de la cause de la présence de gaz dissous. (voir l'annexe 1 pour l'interprétation)
À retirer de service	>1000	N/A	>35	>100	>100	>800	N/A	Retirer pour inspection

Prise de décision d'Hydro-Québec des gaz dissous dans l'huile

(Noirhomme, 2008)

Afin d'effectuer une analyse des gaz dissous, deux méthodes sont actuellement utilisées à Hydro-Québec soit la chromatographie des gaz et l'analyse par photo-acoustique dans l'infrarouge. En ce qui concerne l'analyse par chromatographie, l'analyse des gaz dissous est effectuée à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) à Varennes. Pour ce type d'analyse, les gaz dissous sont extraits d'un échantillon d'huile par l'introduction dans un vide d'air à volume prédéterminé. Les gaz dissous sont alors comprimés à la pression atmosphérique et le volume mesuré. D'autres méthodes alternatives sont également utilisées selon la norme reconnue de l'ASTM (*Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography*, 2002). L'analyse effectuée donne un résultat de concentration en parties par million (PPM). Le chromatogramme résultant donne à l'opérateur la concentration de chaque type de gaz présent dans l'échantillon analysé. Un exemple est donné dans la figure suivante.



Exemple d'un chromatogramme

(Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography, 2002)

Afin de pouvoir utiliser ce type de technologie sur le terrain en temps réel, une analyse ayant un niveau de précision acceptable a récemment été homologuée par l'Institut de recherche d'Hydro-Québec à Varennes. L'appareil actuellement à l'essai sur le réseau de distribution (parmi d'autres) est le Kelman Transport X. L'appareil est donné dans la figure suivante.



Appareil d'analyse de gaz dissous portatif – Kelman Transport X
(Noirhomme, 2008)

Les résultats donnés par cet appareil produisent la concentration en PPM afin de pouvoir guider l'ingénieur ou le technicien responsable de la maintenance en terrain de pouvoir adéquatement diagnostiquer une défaillance sur un équipement isolé à l'huile. Les résultats sont donnés en exemple dans la figure suivante.

The screenshot shows the 'Résultats' (Results) screen of the Kelman Transport X device. It features a table of gas concentrations and several input fields for additional information.

Gas	Abbr.	Conc. (ppm)	Type
Hydrogène	H ₂	<5	Autre
Eau	H ₂ O	24	Identification du matériel
Dioxyde de carbone	CO ₂	517	mélange CO ₂
Oxyde de carbone	CO	71	Emplacement
Ethylène	C ₂ H ₄	4	lab test
Ethane	C ₂ H ₆	4	Point d'échantillonnage de l'huile
Méthane	CH ₄	3	test 50ml
Acétylène	C ₂ H ₂	0.5	Date
TGCEI		63	J's no. Dg

At the bottom of the screen, there are three buttons: 'Retour' (Return) with a left arrow, 'Suivant' (Next) with a right arrow, and 'Annuler' (Cancel) with a red X icon.

Exemple de résultats donnés par l'appareil Kelman Transport X
(Noirhomme, 2008)

Analyse de la thermographie et de la décharge partielle

Dans le cadre des activités d'Hydro-Québec Distribution, une analyse par thermographie est obligatoire dans tous les cas où une intervention au niveau du réseau souterrain est requise. Lorsqu'une thermographie valide est donnée pour une structure souterraine, cette dernière demeure valide pour une période de 12 mois où les intervenants sur le réseau peuvent avoir une évaluation valide de l'état d'un équipement dans une période de temps donnée. Les équipes de thermographie à Hydro-Québec sont des gens spécifiquement formés pour reconnaître une anomalie lorsque cette dernière est apparente visuellement. Lorsqu'un problème n'est pas nécessairement visible, une entrée de données obligatoire dans le système de maintenance PMRS (Planification de la maintenance du réseau souterrain), une application programmée dans SAP®, vient donner le diagnostic final. Dans le cas où une anomalie est décelée, l'accès à la structure est interdit via une restriction qui est à la fois

présente au centre opérationnel CED (Centre d'exploitation de Distribution) et dans le système PMRS. Deux types d'anomalies sont possibles soit: le point chaud diélectrique et le point chaud résistif.

Le premier type, le point chaud diélectrique, lorsque présent, mène toujours à une restriction d'accès à une structure. Ce type d'anomalie est souvent caractérisé par un anneau de chaleur ou par un point visible à concentration élevée. Un exemple d'anneau de chaleur est donné dans la figure plus bas. Des trois images présentées dans ce cas bien particulier, une vue du haut initialement signalée par les équipes de thermographie d'Hydro-Québec a décelé une anomalie sur les trois phases. Lors de l'analyse effectuée par un ingénieur de maintenance, il a été constaté que le point chaud diélectrique avec anneau de chaleur a été localisé sur la phase du centre mais la décision a tout de même été prise de retirer les trois phases du réseau afin d'investiguer le problème de manière plus poussée.



Point chaud diélectrique sur le réseau de distribution à Montréal

La thermographie à Hydro-Québec Distribution est gérée par une norme établie au niveau provinciale et doit être respectée par tous qui sont à pied d'œuvre sur le réseau souterrain. Dans le cas d'une composante moyenne tension étant déjà qualifiée dans le logiciel PMRS, les conditions à appliquer au réseau sont établies d'avance selon le tableau suivant. La qualification d'une composante est effectuée à l'IREQ où l'équipement analysé est poussé à sa limite opérationnelle afin de pouvoir déceler les points faibles qui doivent être inspectés régulièrement à la thermographie.

Critères de thermographie				
Type de raccords	Critères	Maintenance	Délais de validité	Délais de validité pour Raychem
Raccords moyenne tension	Condition verte <i>voir note</i>	Aucune action	1 an	2 mois
	Condition jaune* <i>voir note</i>	Aucune action	6 mois**	S/O
	Condition rouge	Réparation	Accès interdit	Accès interdit
	Point chaud diélectrique ¹	Réparation	Accès interdit	Accès interdit

* Si l'on obtient une condition jaune lors de la 1^{re} inspection selon cette méthode, on devra pour une période temporaire de 1 an, faire l'inspection de la structure préalablement à tout travaux ainsi qu'aux 2 mois pour connaître sa condition.

** Un suivi devra être réalisé par le support technique.

1- Inclut le brin de neutre concentrique reliant le raccord moyenne tension et le neutre du câble.

Note : Lorsqu'une anomalie de maintenance révèle un comportement limite (ex.: ΔT élevé et faible charge) la référer au support technique pour évaluation.

Critères à appliquer selon le résultat donné par PMRS

(Bellemare, 2003)

Dans le cas où un type d'équipement moyenne tension n'est pas qualifié d'avance dans le logiciel PMRS, l'interprétation doit être appliquée selon les critères définis par les conditions du réseau (Bellemare, 2003). Tout cas douteux doit être référé aux ingénieurs et techniciens attitrés au support technique.

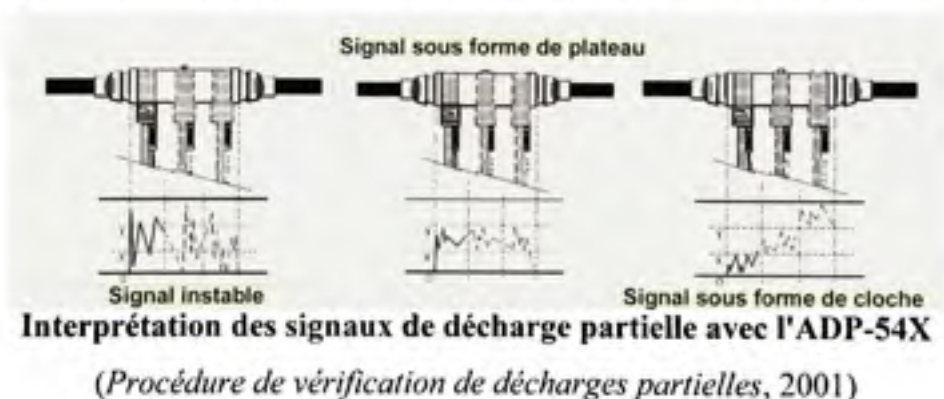
L'analyse de décharge partielle est une analyse où l'on doit évaluer le niveau de perte d'isolation électromagnétique d'un semi-conducteur sur les câbles et les jonctions faisant partie d'un réseau électrique. La décharge partielle est un phénomène où les matériaux composites utilisés comme isolation dans les câbles souterrains contiennent des irrégularités qui sont causées par le procédé manufacturier utilisé pour le fabriquer et/ou par stress mécanique. Ces défauts causent un causent de la décharge partielle qui à son tour vient détériorer l'isolant sur le câble (Achillides, Georghiou et Kyriakides, 2008). Deux méthodes sont mises à la disposition des ouvriers à pied d'œuvre sur le réseau afin d'effectuer une évaluation du niveau de décharge partielle.

La première méthode est de l'évaluation de l'intensité du niveau sonore de décharges partielles (DP) à l'aide du DDP-540. Lorsqu'une inspection est jugée valide par une équipe de thermographie, l'étape suivante est celle d'évaluer le niveau de décharges partielles dans la structure. L'appareil utilisé est le DDP-540 fabriqué par la compagnie NdB est donné par la figure suivante.



Appareil DDP-540 pour la mesure de décharges partielles

Il est important de pouvoir déceler trois différentes signatures en prenant la lecture sur une jonction moyenne tension. L'observation à faire est donnée par la figure suivante.

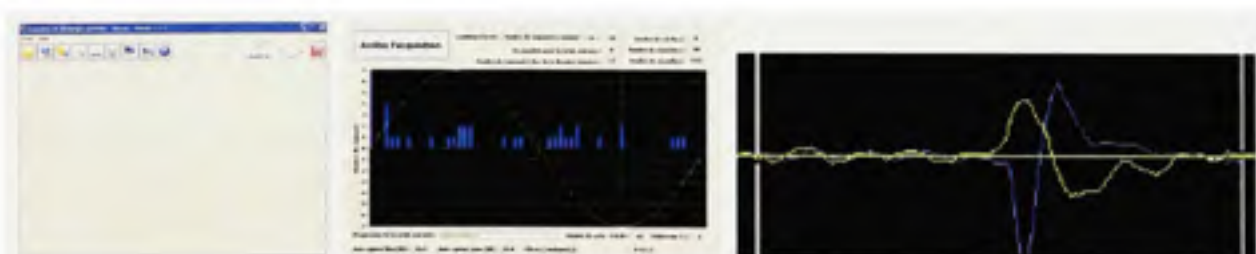


Lorsqu'un signal sous forme de plateau ou sous forme de cloche mène à une restriction d'accès tel que donné par les balises du tableau suivant.

Jonction Moyenne Tension	Sans bruit ambiant dans la structure	< ou = 10 dB	Aucune action
		> 10 dB	Accès interdit
	Avec bruit ambiant dans la structure	< ou = 10 dB de plus que le bruit ambiant dans la structure	Aucune action
		> 10 dB de plus que le bruit ambiant dans la structure	Accès interdit
Jonction Thermorétractable	Sans bruit ambiant dans la structure	< ou = 5 dB	Aucune action
		> 5 dB	Accès interdit
	Avec bruit ambiant dans la structure	< ou = 5 dB de plus que le bruit ambiant dans la structure	Aucune action
		> 5 dB de plus que le bruit ambiant dans la structure	Accès interdit

Interprétation de la décharge partielle par niveau de bruit

Afin d'aider au diagnostic de décharge partielle, un analyseur de décharges partielles (ADP) a également été conçu. Cet appareil est disponible sous deux versions soit un modèle "go / no go" et un modèle disponible comme oscilloscope mobile à être utilisé par les ingénieurs de l'équipe de support technique. L'interface visuelle de l'ADP est donnée dans la figure plus bas.



Analyseur de décharges partielles (ADP)

(Caron et Fournier, 2006)

BIBLIOGRAPHIE

- « Access Science: Encyclopedia of Science and Technology Online ». 2009. McGraw-Hill. <<http://www.accessscience.com/>>. Consulté le 2009-04-26.
- Achillides, Zenon, George Georghiou et Elias Kyriakides. 2008. « Partial discharges and associated transients: The induced charge concept versus capacitive modeling ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, n° 6, p. 1507-1516.
- AIAG. 2008. *Potential failure mode and effects analysis (FMEA) : reference manual*. 141 p.
- answers.com. 2009. « Load break switch ». <<http://www.answers.com/topic/load-break-switch>>.
- Arshad, Muhammad, et Syed M. Islam. 2004. « Power transformer critical diagnostics for reliability and life extension ». In. Vol. 2, p. 0625-0628. Coll. « Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering ». Niagara Falls, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Bellemare, André. 2003. *Critères d'application de la thermographie pour le réseau souterrain de distribution*. B.45.2-03. Montréal, Québec: Hydro-Québec Distribution, 11 p.
- Birgoren, B. 2003. « Estimating confidence lower bounds for Weibull percentiles ». *Journal of Materials Science Letters*, vol. 22, n° 16, p. 1121-1124.
- Brkic, D. M. 1990. « Interval estimation of the parameters β and η of the two-parameter weibull distribution ». *Microelectronics and Reliability*, vol. 30, n° 1, p. 39-42.
- Caron, Josée, et Daniel Fournier. 2006. *Analyseur de décharges partielles ADP v 2.0.1 - Manuel de l'utilisateur v 1.0*. Varennes, Québec: Institut de recherche d'Hydro-Québec. Aide en ligne électronique.
- Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes canadiennes et américaines*. 2008. Montréal (Québec), 58 p.
- Déry, Alain, et Luc Garant. 2006. *Schémas unifilaires de postes de transport (2006-05-4)*. Coll. « Programme de développement des ingénieurs en planification de réseaux ». Hydro-Québec TransÉnergie, 200 p.

- « Durée moyenne de coupure par client basse tension arrondie à la minute (2008-2009) ». 2009.
- « Failure Distributions ». Web page.
http://www.roytech.co.uk/Useful_Tables/ARM/Failure_Distributions.html.
- Gong, Jianghong. 1999. « Determining the confidence intervals for Weibull estimators ». *Journal of Materials Science Letters*, vol. 18, n° 17, p. 1405-1407.
- « Grand dictionnaire terminologique de l'Office de la langue française (OLF) ». 2009. Office de la langue française. <http://www.granddictionnaire.com/>. Consulté le 2009-04-27.
- Griggs, J. A., et Zhang Yunlong. 2003. « Determining the confidence intervals of Weibull parameters estimated using a more precise probability estimator ». *Journal of Materials Science Letters*, vol. 22, n° 24, p. 1771-3.
- Guide de saisie d'inventaire Maximo / Appareillage électrique*. 2004. TransÉnergie - Direction Appareillage de transport est.
- Hai-Lin, Lu, Chen Chong-Hong et Wu Jong-Wuu. 2004. « A note on weighted least-squares estimation of the shape parameter of the Weibull distribution ». *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 20, n° 6, p. 579-86.
- Haitao, Guo, S. Watson, P. Tavner et Xiang Jiangping. 2009. « Reliability analysis for wind turbines with incomplete failure data collected from after the date of initial installation ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, n° 6, p. 1057-63.
- Hirose, Hideo. 1996. « Maximum likelihood estimation in the 3-parameter Weibull distribution a look through the generalized extreme-value distribution ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 3, n° 1, p. 43-55.
- Jongen, Rogier, Edward Galski, Peter Morshuis, Johan Smit et Anton Janssen. 2007. « Statistical analysis of power transformer component life time data ». In., p. 1273-1277. Coll. « 8th International Power Engineering Conference, IPEC 2007 ». Singapore, Singapore: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
- Keats, J. Bert, Peeyush C. Nahar et Kristen M. Korbel. 2000. « Study of the effects of misspecification of the Weibull shape parameter on confidence bounds based on the Weibull-to-exponential transformation ». *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 16, n° 1, p. 27-31.
- Komljenovic, Dragan, et Michel Rioux. 2007. *Optimisation et fiabilité*. Notes de cours. ING800. Montréal, Québec: École de technologie supérieure.

- Krasich, Milena. 2007. « Can failure modes and effects analysis assure a reliable product? ». In., p. 277-281. Coll. « Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium ». Orlando, FL, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States. <<http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2007.328126>>.
- Landry, Marc. 2009. « Lancement du projet IMAGINE ». Hydro-Québec TransÉnergie.
- Least Squares Parameter Estimation (Regression Analysis). 2006. <http://www.weibull.com/LifeDataWeb/least_squares.htm>.
- Liu, Na, Wensheng Gao, Kexiong Tan, Liufang Wang, Guodong Liang et Wei Li. 2003. « Decision on maintenance period for power transformer based on Monte Carlo simulation of reliability ». In. Vol. 1, p. 479-482. Coll. « Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials ». Nagoya, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <<http://dx.doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218455>>.
- Lu, Jian-Guo, Tai-Hang Du et Yan-yan Luo. 2007. « Study on the instantaneous protection reliability of low voltage circuit breakers ». *Journal of Zhejiang University (Science)*, vol. 8, n° 3, p. 370-7.
- Lyonnet, Patrick. 2006. *Ingénierie de la fiabilité*. Lavoisier, 323 p.
- Markovic, Darija, Dragan Jukic et Mirta Benic. 2009. « Nonlinear weighted least squares estimation of a three-parameter Weibull density with a nonparametric start ». *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 228, n° 1, p. 304-312.
- Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres*. 1999. Deuxième édition. CEI 60599. Suisse: Commission Electrotechnique Internationale, 78 p.
- McDermid, W. 2002. « Reliability of station class surge arresters ». In., p. 320-322. Coll. « Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation ». Boston, MA, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <<http://dx.doi.org/10.1109/ELINSI.2002.995941>>.
- Messenger, P., et P. Turpin. 1993. *Approche méthodologique d'aide à la décision pour l'entretien et le renouvellement des réseaux EDF*. 93NR00002. Clamart, France: Electricité de France, 14 p.
- Minehane, S., R. Duane, P. O. O'Sullivan, K. G. McCarthy et A. Mathewson. 2000. « Design for reliability ». In, 8-10. Vol. 40, p. 1285-94. Coll. « Microelectron. Reliab. (UK) ». Dresden, Germany: Elsevier. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714\(00\)00138-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714(00)00138-4)>.

- Montgomery, Douglas C. 2004. *Introduction to Statistical Quality Control*, 5th edition. Wiley, 776 p.
- Ng, H. K. T. 2005. « Parameter estimation for a modified Weibull distribution, for progressively Type-II censored samples ». *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 54, n° 3, p. 374-380.
- Nikolaidis, Efstratios, Dan M. Ghiocel et Suren Singhal. 2005. *Engineering Design Reliability Handbook*. CRC Press, 1194 p.
- Noirhomme, Bernard. 2008. *Formation Transport X*. Institut de recherche d'Hydro-Québec. Présentation PowerPoint.
- « Nouvelle réglementation ». 2009. Montréal, Québec: Hydro-Québec TransÉnergie.
- « Petit dictionnaire d'Hydro-Québec ». 2009. Hydro-Québec.
- Procédure de vérification de décharges partielles*. 2001. SL011204, Montréal, Québec: Hydro-Québec Distribution, 2 p.
- Puccini, Dominique. 2006. « Preliminary Supportability Trades-Off for A30X New Programme ». Blagnac, France, École Nationale d'Ingénieurs de Sainte-Étienne, 56 p.
- « Raptor Reliability Simulation Software ».
<http://www.arinc.com/products/raptor/index.html>.
- Salinas, A. R., et J. Pruenste. 2001. « Enhancing circuit breaker reliability through effective mechanism maintenance and lubrication ». In. Vol. vol.1, p. 578-87. Coll. « 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE.
<http://dx.doi.org/10.1109/TDC.2001.971298>.
- Scionti, M., et J. P. Lanslots. 2005. « Stabilisation diagrams: Pole identification using fuzzy clustering techniques ». *Advances in Engineering Software*, vol. 36, n° 11-12, p. 768-79.
- Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography*. 2002. D 3612 – 02. ASTM, 22 p.
- Wang, F. K. 2001. « A comparison of three estimators of the Weibull parameters ». *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 17, n° 4, p. 249-256.
- Wei-Jen, Lee, K. Narayanan, T. Maffetone et P. Didsayabutra. 2002. « The design of a capacitor bank early warning system ». In., p. 17-23. Coll. « 2002 IEEE Industrial and

Commercial Power Systems Technical Conference Record. Papers Presented at the 2002 Annual Meeting (Cat. No.02CH37366) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE.

- Wong, A. C. M., J. Wu et K. W. Ng. 2005. « Likelihood-based confidence interval for the ratio of scale parameters of two independent Weibull distributions ». *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 135, n° 2, p. 487-97.
- Xie, M., L. F. Zhang et L. C. Tang. 2006. « Bias correction for the least squares estimator of Weibull shape parameter with complete and censored data ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, n° 8, p. 930-9.