Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de

VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

Discipline, spécialité selon la liste des spécialités pour lesquelles l'Ecole Doctorale est accréditée :
Automatique, Génie informatique

Présentée et soutenue par Fabien, TURGIS.

Le 08/02/2013, à Valenciennes

Ecole doctorale :
Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :
Laboratoire de Thermique, Ecoulement, Mécanique, Mise en Production (TEMPO)

Amélioration de la fiabilité d'un système complexe

Application ferroviaire : Accès voyageurs

JURY

Président du jury
- Barros, Anne. Professeur. Université de technologie de Troyes.

Rapporteurs
- Charbonnier, Sylvie. Maître de conférences, HDR. GIPSA-Lab de Grenoble.
- Aubrun, Christophe. Professeur au CRAN, Centre de Recherche en Automatique de Nancy.

Examinateurs
- Dehombreux, Pierre. Professeur. Université de Mons.
- Copin, Reynald. Docteur. Société Bombardier Transportation France. Crespin.

Directeur de thèse
- Loslever, Pierre. Professeur, LAMIH/ASHM. Université de Valenciennes.

Co-directeur de thèse :Cauffriez, Laurent. Maître de conférences, HDR. Université de Valenciennes.
Co-encadrant : Caouder, Nathalie. Maître de conférences, LAMAV. Université de Valenciennes.

Résumé :

Les grandes entreprises ferroviaires intègrent au niveau du matériel roulant une grande variété de systèmes complexes qui se doivent d'être fiables et ce, dès le démarrage du service commercial. Ce travail de thèse propose une méthodologie expérimentale pour l'amélioration de la robustesse d'un système prédominant, à savoir l'accès voyageurs. L'objectif est d'améliorer sa fiabilité intrinsèque dans un laps de temps raisonnable dans le cadre de projet industriel contraint par le temps. La méthodologie expérimentale proposée s'appuie sur la méthode des essais aggravés et accélérés de fiabilité, et se veut être optimisée grâce à l'utilisation de plans d'expériences D-optimaux.

Après une analyse bibliographique, suivie d'une étude sur l'utilisation des plans d'expériences D-optimaux, ce travail expose les méthodes et moyens expérimentaux mis en place pour utiliser les plans d'expériences dans un contexte industriel. La dernière partie de cette thèse contient les résultats quantitatifs et qualitatifs issus des expérimentations réalisées sur le banc d'essais du système accès voyageurs développé par Bombardier.

Abstract :

The train manufacturer companies handle a large number of complex systems in their trains. These systems must be reliable to ensure reliability of the final product as soon the entry into commercial services. This thesis provides an experimental solution to improve robustness of a predominate system, namely passengers access system. The goal is to improve inherent reliability in a reasonable amount of time to be integrated in a project phase. This experimental method is based on testing aggravated and accelerated method temporally optimized with using of D-optimal design of experiment.

After a literature review, followed by a focus on the definition and use of experimental design D-optimal, this work will present experimental methods and means used to set up the experimental design in an industrial context. The last part of this thesis contains quantitative and qualitative results performed on the passenger's access test bench developed by Bombardier.

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent aux Professeurs, Maîtres de conférences, Chercheurs et Hommes de Sciences que j'ai pu rencontrer et qui m'ont transmis leur passion et leur envie de comprendre et d'améliorer ce qui nous entoure.

Plus personnellement, je souhaite remercier Reynald Copin de m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse au sein d'une entreprise ainsi que Pierre Loslever, Laurent Cauffriez et Nathalie Caouder de l'université de Valenciennes pour l'avoir encadrée. J'ai particulièrement apprécié la liberté et l'autonomie qu'ils m'ont laissées tout au long de ce parcours, de même que leurs nombreuses critiques constructives et éclairées afin de réussir ce travail de recherche.

Je tiens à remercier l'entreprise Bombardier France qui a investi dans cette thèse et a ainsi pu rendre cette recherche possible, de même que l'organisme d'Etat l'ANRT d'avoir cofinancé ces travaux dans le cadre d'une convention CIFRE. Mes remerciements s'adressent également à Francis Tison, Directeur du département ingénierie de Bombardier, pour avoir cru en moi, à tous les ingénieurs et techniciens spécialisés du service ingénierie FMDS/SLI de Bombardier, et plus précisément au personnel du service FIELD-FRACAS-REX (Christophe Dupas, Guillaume Branger, Sylvain Portais, Quentin Coutadeur, Aurélien Ducatillon, etc.), pour leur soutien de tous les jours et la transmission de leurs expériences et savoir-faire. Je souhaite aussi remercier Aldo Placenti de l'ingénierie systèmes pour le temps qu'il a pu me consacrer à l'apprentissage des connaissances liées au système d'accès voyageurs.

Un grand merci également au service d'investigation et d'homologation de Bombardier avec lequel j'ai fortement collaboré (Thibault Isola, Sébastien Texier et toute l'équipe des techniciens et ingénieurs).

Je remercie les rapporteurs, Messieurs les professeurs Sylvie Charbonnier et Christophe Aubrun, d'avoir accepté de lire et de juger ce travail de recherche ainsi que l'ensemble des membres du jury.

Je remercie également les quatre stagiaires Loic Muller, Lattanavong Thamabavong, Junior Holmes et Weiji Chen pour tous leurs travaux contributeurs.

Et pour toutes les personnes qui m'ont aidées dans mon travail de recherche, ils sont également nombreux à m'avoir accompagné quotidiennement et encouragé moralement tout

au long de ces quatre années. Ils ont su, pendant ce long travail, apporter la joie, le rire et la détente aussi nécessaires à la réussite de cette épreuve. Je pense notamment à tous mes amis « *ch'ti* » à savoir Thibaut, Manu, David, Tania, Audrey, Geoffroi, etc., à mes collègues de l'esport (sport électronique), à mes amis de promotion de MSGF et Polytech'Orléans et bien d'autres encore. Ce sont également tous ces moments de plaisir et de relaxation qui m'ont aussi aidé à affronter ces années difficiles.

Je souhaite conclure ces remerciements en les adressant à ma famille, ma mère, mon père, mon beau-père, ma sœur, ainsi que mes cousins pour m'avoir toujours soutenus et aidés.

SOMMAIRE :

Introduction ***11***

1. Etude bibliographique : Approche statistique pour accroître la fiabilité d'un système complexe ***15***

1.1. Introduction **16**

1.2. La sûreté de fonctionnement **16**

1.2.1. Définitions des grandeurs de la sureté de fonctionnement ____ 17
1.2.2. Notion de défaillance ____ 19
1.2.3. Notion de réparation ____ 20

1.3. Complexité des systèmes **21**

1.4. Croissance de fiabilité **22**

1.4.1. La croissance de fiabilité dans le déroulement d'un projet ____ 23
1.4.2. Premier objectif d'un programme de fiabilité : Spécifier les exigences ____ 26
1.4.3. Second objectif d'un programme de fiabilité : Assurer la fiabilité de conception ____ 26
1.4.4. Troisième objectif d'un programme de fiabilité : Valider la fiabilité ____ 32
1.4.5. Dernier objectif d'un programme de fiabilité : Maintenir la fiabilité sur le cycle de vie 34

1.5. Démarche statistique **36**

1.5.1. Objectifs sur le plan statistique ____ 36
1.5.2. Les différentes étapes ____ 38

1.6. La méthodologie des plans d'expériences **41**

1.6.1. Définitions ____ 42
1.6.2. Les différents types de plans d'expériences ____ 44

1.7. Conclusion **45**

2. Les plans D-Optimaux ***49***

2.1. Introduction **50**

2.2. Les plans d'expériences D-optimaux **50**

2.2.1. Définition ____ 50
2.2.2. Définition du modèle ____ 51
2.2.3. Définition du plan d'expériences ____ 52

2.2.4. Calcul des *p* paramètres du vecteur β ____ 53

2.2.5. Algorithme d'échange des coordonnées D-optimal ____ 56

2.3. Exemple d'utilisation de JMP à partir d'un exemple simulé **60**

2.3.1. Définition du modèle simulé ____ 61

2.3.2. Etape 1 : Construction du plan 61
2.3.3. Interprétation du plan d'expériences 67

2.4. Conclusion 76

3. Processus expérimental de croissance de fiabilité des accès voyageurs 79

3.1. Introduction 80

3.2. Présentation du système accès voyageurs 80

3.2.1. Présentation du sous-système « porte » 81
3.2.2. Présentation des sous-systèmes « comble-lacune UFR » et « marche mobile PMR » 83
3.2.3. Présentation de l'unité de contrôle / commande 85

3.3. Description du processus expérimental de croissance de fiabilité 87

3.3.1. Campagne d'essais de fiabilité du fournisseur 88
3.3.2. Campagne d'essais de fiabilité sur le banc d'essais BOMBARDIER : Processus expérimental 88

3.4. Construction des plans d'expériences 91

3.4.1. Les données d'entrée (facteurs) 92
3.4.2. Les données de sortie (réponses) 93
3.4.3. Plan d'expériences et planning projet 93
3.4.4. L'optimisation de l'ordre des essais 95

3.5. Application du processus expérimental aux accès voyageurs 98

3.5.1. Définition d'un essai 98
3.5.2. Critères de succès 99
3.5.3. Liste des facteurs à tester 100
3.5.4. Campagne 1 : Essais aggravés sur la porte avec sollicitations externes uniquement 100
3.5.5. Campagne 2 : essais aggravés sur les accès voyageurs avec l'ensemble des sollicitations 101
3.5.6. Campagne 3 : essais accélérés 102
3.5.7. Campagne 4 : Campagne de validation aggravée 102

3.6. Le banc d'essais 103

3.6.1. Synoptique du banc d'essais 103
3.6.2. Réalisation technique des sollicitations 104
3.6.3. Instrumentation et acquisition des données 106
3.6.4. Mise sous surveillance des accès voyageurs 107

3.7. Conclusion 108

4. Analyse Statistique 111

4.1. Introduction 112

4.2. Méthode de création des indicateurs 112

4.2.1. Caractérisation des données : Les signaux temporels 112
4.2.2. Indicateurs basés sur le signal position $P_p(t)$ 114
4.2.3. Indicateurs basés sur le signal intensité du moteur *Ip(t)* 115

4.3. Résultats qualitatifs liés aux campagnes d'essais 1 à 3 117

4.3.1. Défaillances mécaniques 117
4.3.2. Défaillances électroniques 120
4.3.3. Défaillances de réglage 120
4.3.4. Défaillance de qualité du prototype 122

4.4. Analyse quantitative de la campagne 1 122

4.5. Analyse quantitative de la campagne 4 123

4.5.1. Les facteurs du plan 4 123
4.5.2. Analyse descriptive 124
4.5.3. Analyse inférentielle 132

4.6. Conclusion 140

Conclusion générale et Perspectives 143

Références Bibliographiques 150

ANNEXES : 153

Annexe 1 : Les Interfaces Homme-Machine (IHM) de SAS-JMP 155

Annexe 2 : Plan d'expériences de l'exemple simulé 163

Annexe 3 : Définition des sollicitations et des efforts appliqués 181

Annexe 4 : Plans d'expériences 199

Introduction

La fiabilité opérationnelle est devenue un enjeu majeur pour les responsables d'exploitation de matériels roulants ferroviaires. De nos jours, l'utilisateur final de ce mode de transport, c'est-à-dire le voyageur, est de plus en plus en attente d'un produit qui doit répondre certes à des critères de sécurité, de confort, de performances, mais également de ponctualité. Tout comme le constructeur, l'exploitant est par conséquent garant d'un service. La fiabilité opérationnelle est un indicateur important pour l'exploitant de s'assurer que le matériel roulant va remplir sa mission selon des engagements stricts pris par le constructeur.

Dans ce contexte, il est admis que le système Accès Voyageurs, à savoir les portes d'accès voyageurs et, le cas échéant, les marches mobiles, représente une part non négligeable de la *non fiabilité* du matériel roulant (entre 30 et 40 % selon les applications). Ce constat s'explique entre autres par le fait qu'il s'agit véritablement du seul système directement en interface avec le voyageur. Accroître de façon notable la fiabilité opérationnelle des accès voyageurs pour le constructeur est donc une nécessité vis-à-vis du client, mais également un avantage certain de compétitivité par rapport à la concurrence.

En tant qu'intégrateur, le constructeur de matériels roulants n'a pas pour vocation de développer le système d'accès voyageurs. Il travaille en collaboration avec des équipementiers qui ont en charge de proposer un produit répondant à une spécification technique et fonctionnelle. Néanmoins, la problématique expliquée ci-avant incite le constructeur à s'impliquer davantage non pas dans la conception à proprement parlé du système, mais dans la phase de validation du produit vis-à-vis de son application sur un matériel roulant donné.

Dans l'optique de mieux caractériser le sujet, une étude interne au sein de l'entreprise réalisée sur plus de dix projets actuellement en service commercial, a révélé les principales causes à l'origine des incidents de service imputés aux accès voyageurs. L'une des causes majeures s'avère être une prise en compte non adéquate de la combinaison des sollicitations que subit le système lors de son exploitation. A titre d'illustration, le système est régulièrement soumis simultanément à des sollicitations de type dévers associées à la charge

des voyageurs dans le train ainsi qu'au vandalisme induit par les usagers. Ces trois sollicitations, lorsqu'elles sont combinées, peuvent avoir un impact direct ou davantage à long terme sur la capacité du système à fonctionner selon un cahier des charges prédéfini lors de la phase d'appel d'offres.

L'équipementier, de par son expérience multi-projets, a d'ores et déjà intégré les principales causes à l'origine des défaillances rencontrées en exploitation. La difficulté actuelle réside à proposer un produit dont on exige désormais une fiabilité opérationnelle quatre ou cinq fois plus élevée et ce, dans un laps de temps très court. Malgré un effort d'anticipation non négligeable des équipementiers, ceux-ci ne disposent pas forcément de l'ensemble des moyens et ressources nécessaires à une réactivité en adéquation avec la demande. Le constructeur, en tant que responsable du matériel roulant envers le client, se doit d'accompagner ce changement s'il souhaite tenir ses engagements. Cet accompagnement, tout en respectant les rôles de chaque partie, passe notamment par une action renforcée de la validation du produit à l'échelle du système, c'est-à-dire lorsque celui-ci est installé sur le train.

Il a donc été décidé, concernant un projet phare pour l'entreprise sur le marché français, de mettre en place une démarche innovante visant à améliorer la fiabilité opérationnelle des accès voyageurs dès la phase de conception. Cette activité pratique de recherche et développement a été considérée par le management comme l'une des priorités du projet. L'entreprise dispose ainsi des moyens a la hauteur de cette ambition.

Suite à ce constat, Bombardier à décidé de concevoir un outil expérimental où l'on cherche à se rapprocher au mieux des conditions rencontrées en service commercial. Plus précisément, l'approche retenue s'appuie sur les *essais de fiabilité dit aggravés* dont le principe consiste à réduire la durée de vie des produits par l'aggravation des dégradations provoquant la défaillance.

Le mémoire décrivant les travaux réalisés au cours de cette thèse comporte quatre parties. La première partie consiste en une analyse préliminaire de la littérature consacrée à la modélisation de la fiabilité de structures mécaniques complexes. Elle a clairement montré que la méthode par les essais aggravés évite l'écueil de se confronter à d'autres approches, déterministes ou probabilistes, qui nécessitent quant à elles une connaissance fine des lois de comportement. Identifier l'ensemble des sollicitations que va subir le système en exploitation, puis développer un moyen expérimental qui permet de les combiner simultanément, fut l'une

des premières tâches de cette thèse. Cette démarche, initiée en mars 2007 après plusieurs séances de travail avec les experts de l'entreprise, a abouti à la rédaction d'une spécification d'un *banc d'essais à échelle 1*. Les premiers essais ont débuté en mai 2008. La notion de combinaison des paramètres est également à l'origine de la méthode expérimentale finalement choisie à savoir les *plans d'expériences*. A noter que ce banc d'essais n'a pas d'équivalent dans le ferroviaire en termes d'outil expérimental à cette échelle (système), associé à une démarche de plans d'expériences.

Dans un deuxième temps, après la phase de conception du banc d'essais, il a fallu définir le processus expérimental permettant d'améliorer et de valider la fiabilité opérationnelle du système d'accès voyageur avant la mise en service commerciale du matériel roulant. Cette partie a nécessité l'utilisation combinée des plans d'expériences et des essais de fiabilité. Les contraintes temporelles associées à ce travail induites par le planning du projet, ont nécessité de faire appel à des outils statistiques décrits dans la partie 2. Ils ont permis au final de compresser en moins de deux ans quatre campagnes distinctes d'essais.

La troisième partie présente le spécimen, le domaine expérimental et le processus expérimental. En effet, afin de répondre au mieux à la problématique, une méthodologie expérimentale a été mise en place. Elle est composée de quatre campagnes d'essais accélérés et aggravés permettant d'améliorer la robustesse du système. Elle se conclut par la validation du spécimen. Ce chapitre se conclu par la présentation du banc d'essais des accès voyageurs.

La quatrième partie est dédiée à l'interprétation statistique des résultats des essais obtenus au cours des campagnes successives. Cette interprétation des résultats a nécessité de bien maîtriser la partie *analyse des données* issue de la méthodologie des plans d'expériences. Le système étant soumis à des contraintes volontairement plus sévères que les conditions nominales, une phase importante du travail a consisté à *analyser les défaillances et les avaries de composants à dominante mécanique (analyse qualitative)*. Il s'agissait d'identifier de façon rigoureuse, en s'appuyant sur les techniques de laboratoire les plus modernes, les causes à l'origine des défaillances du système soumis à des contraintes d'essais données. Il est en effet fondamental de bien comprendre la façon dont les éléments mécaniques se dégradent jusqu'à perdre leurs fonctions, pour ensuite proposer le cas échéant des actions correctives de conception permettant au final, de rendre le produit plus *robuste*. A l'issue des quatre premières campagnes d'essais, une étape d'interprétation des résultats a permis de dresser un modèle comportemental du système d'accès voyageurs soumis à des sollicitations combinées.

Ce modèle a été obtenu par l'utilisation combinée des méthodes d'analyse quantitative descriptive (analyse en composantes principales), et d'une méthode d'analyse quantitative inférentielle permettant d'établir un modèle linéaire liant les performances du système d'accès voyageurs aux sollicitations combinées exercées par le milieu extérieur.

La dernière partie de ce mémoire présente la conclusion et les perspectives d'avenir et d'amélioration de ce travail.

1. Etude bibliographique : Approche statistique pour accroître la fiabilité d'un système complexe

1.1. Introduction 16

1.2. La sûreté de fonctionnement 16

1.2.1. Définitions des grandeurs de la sureté de fonctionnement ____ 17
1.2.2. Notion de défaillance ____ 19
1.2.3. Notion de réparation ____ 20

1.3. Complexité des systèmes 21

1.4. Croissance de fiabilité 22

1.4.1. La croissance de fiabilité dans le déroulement d'un projet ____ 23
1.4.2. Premier objectif d'un programme de fiabilité : Spécifier les exigences ____ 26
1.4.3. Second objectif d'un programme de fiabilité : Assurer la fiabilité de conception ____ 26
1.4.3.1. Les plans d'expériences ____ 28
1.4.3.2. Les essais aggravés ____ 29
1.4.4. Troisième objectif d'un programme de fiabilité : Valider la fiabilité ____ 32
1.4.4.1. Essais accélérés ____ 32
1.4.4.2. Essais de fiabilité en production ____ 33
1.4.4.3. Essais de qualification de la fiabilité ____ 33
1.4.5. Dernier objectif d'un programme de fiabilité : Maintenir la fiabilité sur le cycle de vie 34

1.5. Démarche statistique 36

1.5.1. Objectifs sur le plan statistique ____ 36
1.5.2. Les différentes étapes ____ 38

1.6. La méthodologie des plans d'expériences 41

1.6.1. Définitions ____ 42
1.6.2. Les différents types de plans d'expériences ____ 44

1.7. Conclusion 45

1.1. Introduction

Dans le cadre de la problématique d'amélioration de la fiabilité opérationnelle des accès voyageurs en ferroviaire, il convient de définir au préalable la notion de *fiabilité* qui peut être considérée comme un sous-domaine de la *Sûreté De Fonctionnement (SDF)* dont les grandeurs caractéristiques sont brièvement rappelées. Les principes de base de la systémique pour un *système* dit *complexe* sont ensuite exposés. Les activités liées à la phase de *croissance de fiabilité* d'un produit ou système au sein d'un projet sont décrites en mettant davantage l'accent sur les méthodes expérimentales telles que les essais aggravés. Le traitement des données expérimentales est explicité en faisant appel à deux approches complémentaires qui sont utilisées en parallèle dans le cadre de ces travaux ; d'une part, au travers des *concepts de statistique* via les outils d'analyse descriptive multifactorielle et multivariée et d'autre part, grâce à la méthodologie des *plans d'expériences*.

1.2. La sûreté de fonctionnement

D'un point de vue général, la Sûreté De Fonctionnement (SDF), est la confiance attribuée à un système ou, selon la définition proposée par Jean-Claude Laprie [LAP.95], « la propriété qui permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre ». Elle se caractérise par la mise en place d'un processus d'étude intégré aux différentes phases de développement dudit système. Ce processus d'étude de sûreté de fonctionnement, souvent appelé études FDMS (Fiabilité Disponibilité Maintenabilité Sécurité), est axé autour de quatre grandeurs que sont la *fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécutité.*

La fiabilité, en anglais 'reliability', a commencé à être étudiée en 1937 avec notamment l'apparition du modèle de Waloddi-Weibull [WEI.39], dont l'objectif initial était d'améliorer la fiabilité des roulements à billes pour les applications ferroviaires. Les secteurs militaires et électroniques développèrent dans les années 1970 des outils fort usités de nos jours tels que les AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance et de leur Criticité), ainsi que les Arbres de Défaillances. A l'heure actuelle, la fiabilité est un domaine reconnu de l'ingénierie mais également par d'autres disciplines et ce, dans toutes les branches industrielles. Elle constitue désormais, du moins pour le marché ferroviaire français, un

engagement contractuel obligatoire de la part du constructeur de matériel roulant lors de la réponse à des appels d'offres publics.

1.2.1. Définitions des grandeurs de la sureté de fonctionnement

Toutes les définitions s'appliquent à une entité dénommée par la suite « E ».

La Fiabilité ('Reliability'), se définit par l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [AFN.88b]. D'un point de vue probabiliste, la fiabilité est la probabilité pour qu'une entité remplisse une fonction requise dans des conditions définies et pendant une période précise [PAG.95] :

R(t) = Probabilité {E soit non défaillante sur [0, t[}

La Maintenabilité ('Maintainability'), est dans des conditions données d'utilisation, l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie sur un intervalle de temps donné, dans un état dans laquelle elle peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits [AFN.94] soit,

M(t) = 1 - Probabilité {E soit non réparée sur [0, t[}

La Disponibilité ('Availaibility'), est l'aptitude d'une entité, sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenance et de l'organisation de sa maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps données [AFN.88b] :

A(t) = Probabilité {E soit non défaillante à l'instant t}

Enfin, la Sécurité ('Safety'), se définit par l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données sans provoquer d'événement catastrophique [AFN.94] :

S(t) = Probabilité {E soit sans défaillance catastrophique sur [0,t]}

Les grandeurs caractéristiques de la sûreté de fonctionnement sont régies par un certain nombre d'interactions (Figure 1.1) [CAU.05] :

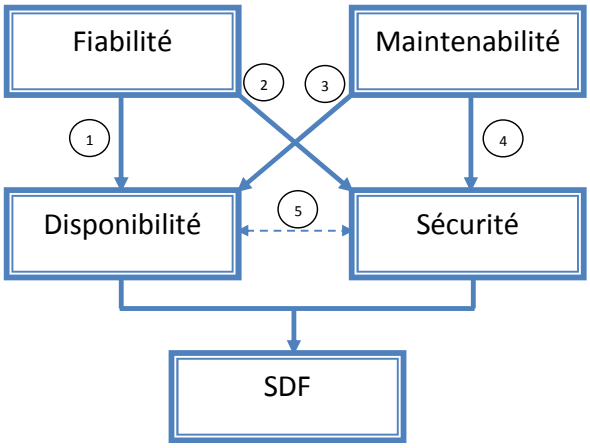


Figure 1.1 : Les interactions entre les grandeurs de la Sûreté De fonctionnement (SDF) [CAU.05]

La Figure 1.1 montre que :

- une mauvaise fiabilité peut impliquer une mauvaise disponibilité du système dans le cas d'une forte fréquence de défaillances (interaction 1),
- une mauvaise fiabilité peut impliquer une mauvaise sécurité car il est statistiquement prouvé que l'occurrence d'accident est souvent liée à l'apparition d'une défaillance du système (interaction 2),
- une mauvaise maintenabilité peut impliquer une mauvaise disponibilité puisque qu'elle provoque une augmentation du nombre de défaillances (interaction 3),
- une mauvaise maintenabilité peut impliquer une mauvaise sécurité. En effet, de même que pour la fiabilité, les statistiques montrent que l'occurrence d'accident est également liée à l'apparition d'une défaillance du système (interaction 4),
- des contraintes élevées en matière de sécurité conduisent à une mauvaise disponibilité (interaction 5).

Remarque importante : Un système peut être fiable et maintenable sans pour autant être sécuritaire.

1.2.2. Notion de défaillance

Le taux de défaillance est défini par [PAG.95] :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} Probabilité\left(\begin{matrix} E\ tombe\ en\ panne\ entre\ t\ et\ t+\Delta t \\ sachant\ qu'il\ n'y\ a\ pas\ eu\ de\ défaillance\ sur\ [0,t] \end{matrix}\right)$$

Ou encore :

$$\lambda(t) = \frac{\frac{-dR(t)}{dt}}{R(t)}$$

Équation E1.1 : Equation du taux de défaillance

La Figure 1.2 donne la représentation graphique de l'équation E-1.1 qui conduit à la courbe dite « en baignoire » caractérisant l'évolution du taux de défaillance du système tout au long de son cycle de vie.

Cette courbe se décompose en trois grandes périodes :

- Défaillances de jeunesse (« J ») : Période durant laquelle le taux de défaillance est fortement décroissant. Cette phase correspond au déverminage d'un système.
- Défaillances de maturité (« M ») : Cette phase représente la période de maturité du système. Dans le cas des systèmes à dominante mécanique, elle est légèrement croissante et rend compte des phénomènes d'usure, de fatigue et de corrosion du système. S'agissant des composants électroniques, elle est considérée comme constante durant toute la phase de maturité du système.
- Défaillances de vieillesse (« V ») : Cette phase représente la période durant laquelle le taux de défaillance est fortement croissant, ce qui correspond à la fin de vie du système.

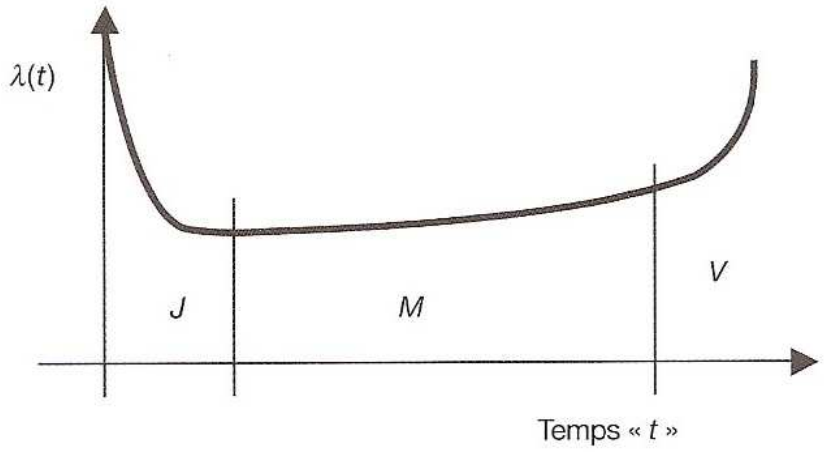


Figure 1.2 : Evolution en fonction du temps du taux de défaillance λ _ Courbe dite « en baignoire » (illustration d'un système mécanique)

D'un point de vue pratique, la mesure du taux de défaillance instantané λ est le rapport entre le nombre de défaillances observées *n* et le temps cumulé de fonctionnement T_c [LYO.06] :

$$\lambda = \frac{n}{T_c}$$ Équation E1.2 : Equation de la mesure du taux de défaillance

1.2.3. Notion de réparation

Le taux de réparation est défini comme la probabilité que l'entité soit réparée entre les instants t et t+Δt sachant qu'elle était en panne à l'instant t [ZWI.99].

Cela se traduit par la relation [PAG.95] :

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} Probabilité\left(\begin{matrix} E\ est\ réparée\ entre\ t\ et\ t+\Delta t \\ sachant\ qu'elle\ a\ été\ en\ panne\ sur\ [0,t[\end{matrix}\right)$$

Ou encore :

$$\mu(t) = \frac{\frac{dM(t)}{dt}}{1-M(t)}$$ Équation E1.3 : Equation du taux de réparation

Si les grandeurs de la sûreté de fonctionnement, et notamment celles directement liées à la fiabilité, sont mathématiquement clairement définies, leurs estimations précises dans la pratique sont le plus souvent délicates. Il convient avant tout de bien délimiter les frontières du système étudié et d'appréhender sa complexité.

1.3. Complexité des systèmes

De nos jours, sans généraliser outre mesure, la tendance actuelle montre qu'un système n'est plus uniquement mécanique, électronique ou informatique, mais résulte de ces trois domaines ce qui a d'ailleurs donné naissance au terme « mécatronique ». D'après la norme NF EN-01-010 [NFE.04], la mécatronique se définit par :

« Une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité ».

Un système est considéré par Vesely [VES.87] comme étant un ensemble d'éléments discrets, interconnectés ou en interaction, qui opèrent pour réaliser une mission prédéterminée [COC.97]. Les systèmes peuvent rapidement devenir très complexes et cette complexité revêt différents aspects [BEN.04] :

- Complexité fonctionnelle : Elle est représentative du nombre des fonctions que le système doit assurer. Plus les fonctions sont nombreuses, plus la complexité fonctionnelle est importante.
- Complexité de taille : Le nombre d'éléments composant un système a une influence directe sur sa sûreté de fonctionnement ; plus il est élevé, plus la probabilité que le système fasse l'objet de défaillances est importante.
- Complexité d'états : La complexité d'états est souvent en relation avec la complexité de taille. Les états d'un système sont multiples ; il peut s'agir d'états de fonctionnement, de défaillances, d'arrêts. Identifier en phase de conception tous les états d'un système et caractériser le passage d'un état à l'autre sont des tâches peu aisées.
- Complexité technologique : L'innovation des composants dans un système permet généralement d'implémenter des nouvelles fonctions plus complexes, mais provoque de par leur nouveauté des nouvelles contraintes [CAU.95]. En effet, l'utilisation de nouvelles technologies et leurs sorties parfois prématurées sur le marché dues à des

contraintes économico-financières ainsi que l'emploi de COTS ('Component of the self'), peuvent conduire à des défaillances essentiellement dues par l'ignorance et le manque de retour d'expériences sur leur fonctionnement.

- Complexité structurelle : Le système complexe est ici défini comme un ensemble de composants, sous-systèmes, formant une structure composite complexe. Cette structure admet de nombreuses interactions aussi bien horizontales que verticales représentées sous forme de schémas blocs, eux-mêmes orientés sans boucle contenant une entrée et une sortie. A noter que cette approche ne s'applique qu'à des systèmes cohérents se basant sur la théorie des probabilités [COC.97].
- Complexité d'agrégation : La complexité d'agrégation tend à répondre à la question « qu'est-ce que cela devient ? ». Il est légitime en effet de se demander ce qui résulte, pour un système global, de l'agrégation d'entités disparates en interaction au sein d'un système.
- Complexité stochastique : La complexité stochastique est la caractérisation d'un processus stochastique matérialisant le comportement d'un système au cours du temps [FOA.02]. Elle traduit ce qui résulte pour le système global de l'agrégation d'entités (complexité d'agrégation) présentant chacune un nombre d'états (complexité d'états), et des lois probabilistes de transition inter-états. Sur ce point, le concept de fiabilité dynamique qui tend à se développer a pour objectif de prendre en compte les variations des paramètres d'un système par la présence de défaillances. La défaillance d'un composant peut en effet modifier la loi de défaillances d'autres composants.

Après avoir présenté les principales caractéristiques de la sûreté de fonctionnement et de la complexité d'un système, le paragraphe suivant décrit les activités liées à la croissance de fiabilité au sein d'un projet. En effet, le concepteur de tout système innovant est confronté au problème d'atteindre le plus rapidement possible la phase de maturité du système en s'affranchissant des problèmes de jeunesse. Ceci relève d'activités liées à la croissance de fiabilité. L'accent a volontairement été mis sur les méthodes expérimentales.

1.4. Croissance de fiabilité

La croissance de fiabilité se définit comme un ensemble de moyens à déployer afin de respecter les engagements de fiabilité contractuels imposés par le client et ce, dès la phase

d'offre ou d'avant-projet. L'objectif est que le système soit au début de la phase de maturité de la courbe en baignoire lors de la mise en service opérationnel et que le déverminage (phase de jeunesse de la courbe en baignoire) ait été idéalement effectué avant livraison chez le client (cf. Figure 1.2).

Pour ce faire, chaque entreprise ou organisme apporte des solutions adaptées à son environnement. Néanmoins, les pratiques usuelles du secteur ferroviaire suivent un déroulement relativement « classique » d'activités de croissance de fiabilité. Cette partie se focalise sur les activités relatives à cette phase et en particulier sur la notion de robustesse. Cette notion peut se caractériser par la capacité d'un système à maintenir ses performances malgré des variations des sollicitations externes, dans des conditions extérieures dans lequel le système évolue et la présence d'incertitudes liées à ses paramètres ou à ses composants [FOW.00]. Une autre définition de la robustesse est donnée dans [CET.05] : « la robustesse caractérise un produit dont les performances ne sont pas (ou peu) altérées par les différentes sources de variabilité liées à la conception, aux éléments constitutifs, aux matériaux utilisés, à la production et à l'utilisation [CET.05] »

1.4.1. La croissance de fiabilité dans le déroulement d'un projet

L'amélioration de la fiabilité d'un système ferroviaire débute dès l'étape de conception et se termine au retrait du service du matériel. Il s'agit donc d'un processus continu. La Figure 1.3 donne le cycle dit en « V » d'un système ferroviaire d'après la norme EN 50126 [EN5.86], celui-ci reposant sur douze phases. La croissance de fiabilité fait partie intégrante de ce cycle. La phase descendante du cycle correspond au développement du produit, et la phase ascendante à sa réalisation et à son exploitation jusqu'au retrait. Cette représentation en « V » suppose que les tâches en vis-à-vis dans les phases descendante et ascendante soient liées par une activité de validation transverse via des critères prédéfinis.

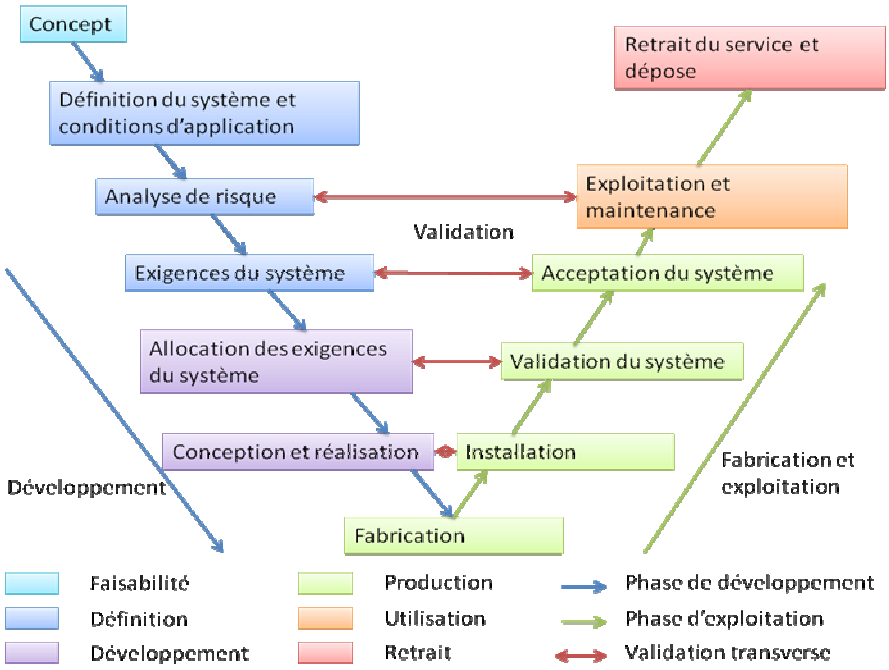


Figure 1.3 : Cycle en « V » d'un produit ou système (phases de Développement et de Fabrication puis, d'Exploitation et de Retrait du Service)

Dans [CET.05], il existe une décomposition plus synthétique en six phases tel que décrite ci-après :

- Faisabilité (phase 1) : Elle comprend l'identification du besoin et des risques, ainsi que la définition des objectifs de performances, de coûts et de délais.
- Définition (phase 2) : Elle s'attache à l'étude des diverses solutions technologiques répondant aux besoins, à la rédaction des spécifications techniques et à l'allocation quantitative des objectifs.
- Développement (phase3) : Cette étape aboutit au choix de la meilleure solution technologique et à son étude détaillée.
- Production (phase4) : Elle décrit le développement des méthodes de production ainsi que la définition des moyens de contrôle associés, et enfin les activités liées à l'élaboration du produit.
- Utilisation (phase 5) : Elle concerne la mise en service, l'exploitation et la maintenance du système.
- Retrait (phase 6) : Cette dernière décrit la cessation d'activité et le retrait du produit.

Lorsque la mise en service opérationnel du système ferroviaire révèle que les objectifs de fiabilité ne sont pas atteints, ceci a un impact direct sur le coût du projet, la satisfaction du client mais aussi sur les usagers (impact sociétal). Etant données les lourdes pénalités induites par la *non fiabilité* d'un produit et parfois également, par des extensions de garantie, les risques associés aux choix de conception et aux technologies retenues pendant l'avant projet doivent être clairement identifiés et maîtrisés tout au long du projet et donc, tout au long du cycle de vie du système (notion de PLM –'Product Life Management').

Un programme de fiabilité doit par conséquent répondre à quatre objectifs essentiels explicités ci-après en respectant un ordre chronologique bien précis [CET.05] (cf. Figure 1.4) :

- Spécifier les exigences de fiabilité (phase 1).
- Assurer la fiabilité lors de la conception (phase 2).
- Valider la fiabilité du produit (phase 3).
- Maintenir la fiabilité du produit sur son cycle de vie (phase 4).

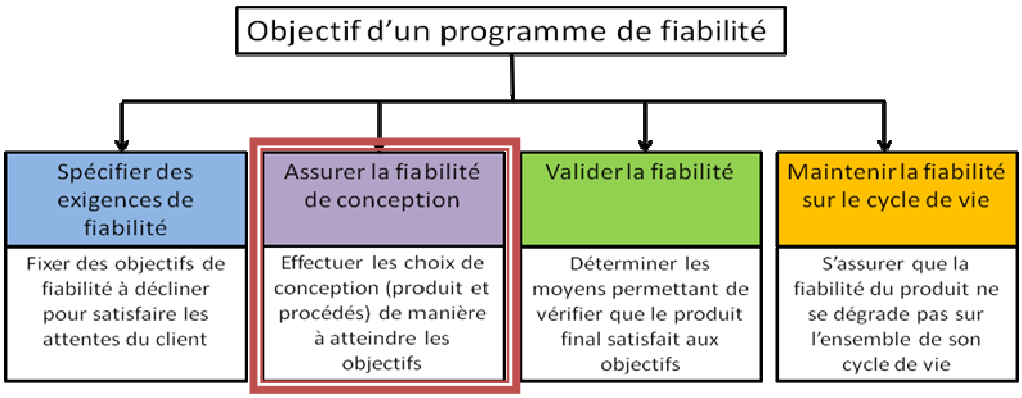


Figure 1.4 : Les quatre objectifs d'un programme de fiabilité extraits de [CET.05] (en rouge, le contexte essentiel dans lequel se situe cette étude)

Les travaux se sont donc essentiellement focalisés sur le second objectif du programme de fiabilité de la Figure 1.4 qui vise à assurer la fiabilité de conception d'un système accès voyageurs ferroviaire au travers de l'amélioration de sa robustesse. Pour ce faire, un banc d'essais spécifique, présenté dans le chapitre 3, a été développé.

1.4.2. Premier objectif d'un programme de fiabilité : Spécifier les exigences

Il s'agit de spécifier les exigences par la mise en place de tâches de fiabilité à développer à partir de l'expression des besoins fonctionnels et de diverses données d'entrée (Figure 1.5).

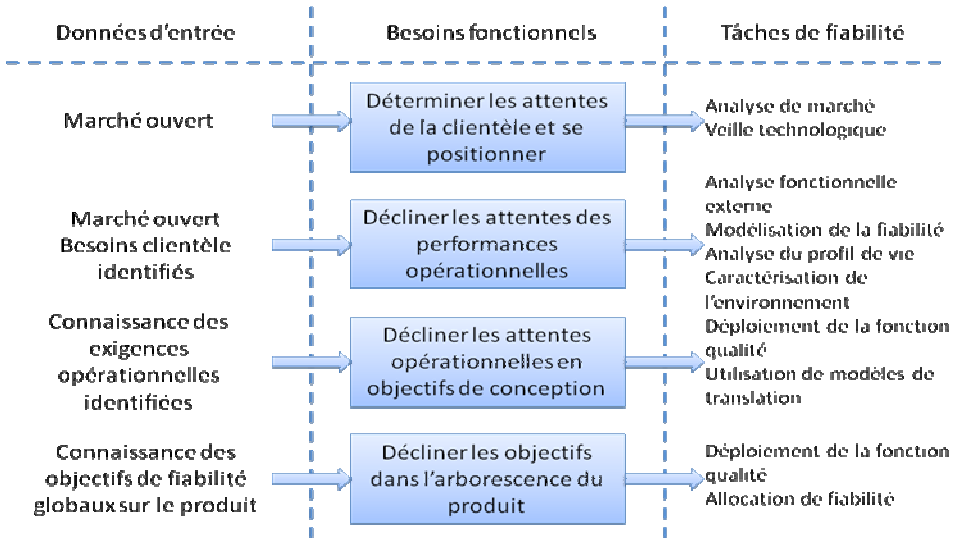


Figure 1.5 : Les Tâches de fiabilité liées au premier objectif de spécification des exigences [CET.05]

Cet objectif, relatif à la phase de l'appel d'offres, s'attache principalement à définir les activités de base telles que l'analyse fonctionnelle ou encore la modélisation de la fiabilité, pour les étapes ultérieures du projet. La description détaillée des tâches associées n'est pas développée dans le présent texte.

1.4.3. Second objectif d'un programme de fiabilité : Assurer la fiabilité de conception

Les étapes décrites ci-après (cf. Figure 1.6), assurent la mise en place concrète des activités de contrôle et d'aide aux choix technologiques de conception. On trouve notamment les besoins fonctionnels « Optimiser la robustesse » et « Favoriser la croissance de fiabilité ».

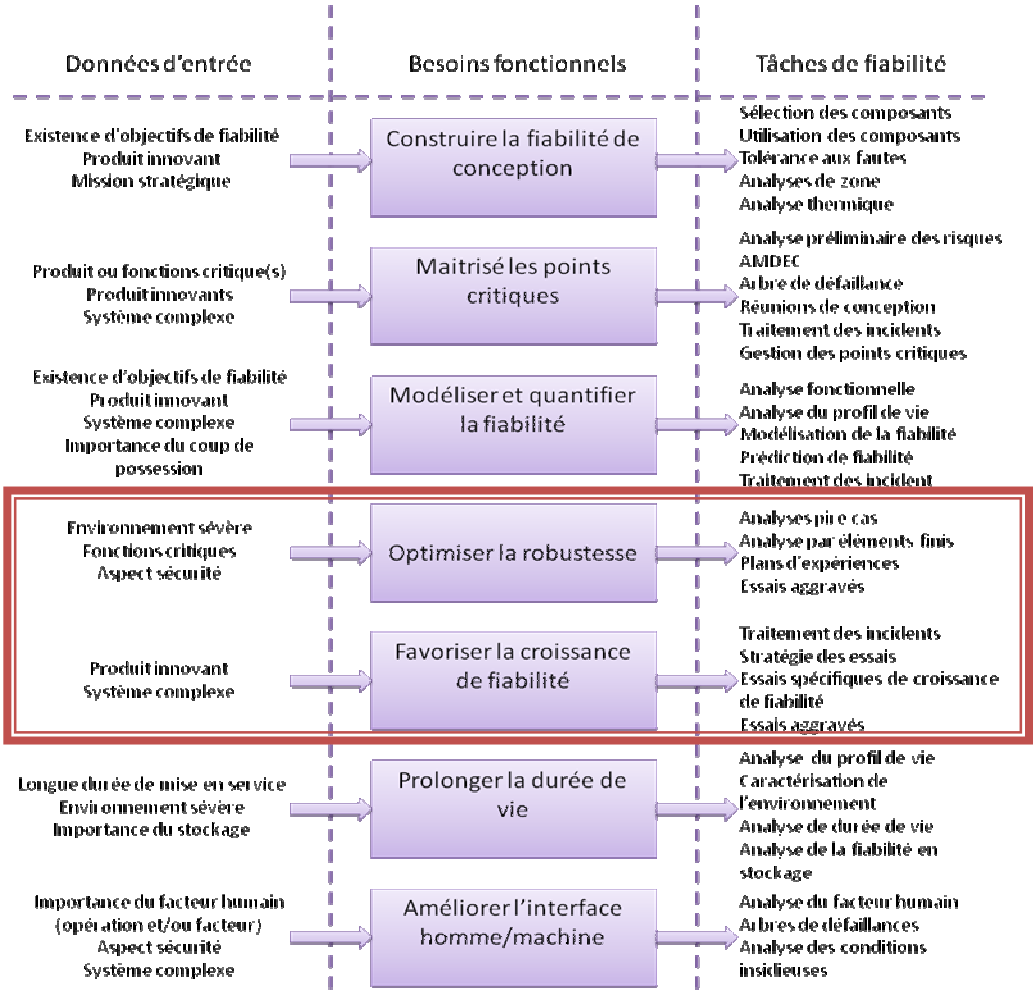


Figure 1.6 : Les Tâches de fiabilité liées au second objectif d'assurer la fiabilité de conception (le cadre rouge souligne un domaine utilisé dans cette thèse) [CET.05]

En particulier, une étape essentielle consiste à caractériser la stratégie des essais. Selon [CET.05], elle peut être décrite par :

« Une planification stratégique des essais de différentes natures qui apporte une plus value significative dans la construction, la validation et le maintien de la fiabilité d'un produit. Cette planification résulte d'un processus récurrent qui consiste à optimiser, en le faisant évoluer de manière progressive, le plan d'essais conçu initialement, en fonction des problèmes rencontrés en développement, des besoins de fiabilité ressentis, des résultats escomptés et des coûts et délais générés par la mise en œuvre de ces essais. ».

Le calendrier et le plan d'essais associés cherchent à optimiser le coût et à mesurer les délais rattachés pour obtenir la croissance de fiabilité escomptée grâce à l'expérimentation. Si elle est correctement réalisée, elle permettra de manière efficace et au plus tôt de :

- détecter les faiblesses de conception,
- accélérer le processus de maturation,
- construire et valider la robustesse d'un produit et son procédé de fabrication associé,
- valider l'obtention des objectifs de fiabilité de conception,
- limiter les risques de remise à niveau du matériel roulant pendant l'exploitation,
- maintenir les niveaux de fiabilité contractuelle en phase d'exploitation.

Certaines approches expérimentales, détaillées dans les paragraphes 1.4.3.1 et 1.4.3.2, répondent aux besoins fonctionnels mentionnés ci-avant à savoir :

- Les Plans d'expériences.
- Les Essais Aggravés.

Le choix, quant à la définition des méthodes expérimentales et des essais, s'est exclusivement porté sur celles fournies par le CETIM dont la pertinence a été jugée satisfaisante [CET.05]. Cela permet également d'obtenir une certaine cohérence dans les termes employés au vu notamment du nombre important de type d'essais liés à la fiabilité.

1.4.3.1. Les plans d'expériences

« Un plan d'expériences est une méthode d'expérimentations basée sur un protocole d'essais structurés dans lequel on fait varier simultanément les valeurs (ou les niveaux) de plusieurs facteurs (variables d'entrée) d'un essai à un autre afin d'observer l'impact de ces variations sur une ou plusieurs performances (variables de sortie) d'un produit ou d'un procédé. Cette méthode, dont le fondement est de nature statistique, permet aux concepteurs de maîtriser, à l'aide d'un nombre minimal d'essais, les paramètres de conception qui, de manière individuelle ou en interaction avec d'autres facteurs, ont un effet significatif sur les performances du produit (ou des procédés) et de pouvoir régler ces paramètres de manière à optimiser les performances étudiées. ». [CET.05]

La description détaillée des plans d'expériences et des choix réalisés dans le cadre de la thèse fait l'objet du chapitre 2. L'approche par les plans d'expériences est présentée dans le paragraphe 1.6 de ce présent chapitre.

1.4.3.2. Les essais aggravés

« Les essais aggravés consistent à soumettre une entité matérielle de conception nouvelle (pièce, composant, assemblage, etc.), à des contraintes d'environnement et/ou de fonctionnement sous des niveaux croissants pouvant atteindre les limites de résistance des technologies, à évaluer les marges de fonctionnement et à déceler rapidement, pour pouvoir les corriger, les défauts inhérents à la conception (produit et/ou procédés qui réduisent ces marges à des valeurs inacceptables). ». [CET.05]

Les essais aggravés sont en général préconisés pour trois catégories de produit ou système :

- Les nouveaux systèmes (en particulier lorsque ceux-ci revêtent un caractère complexe et/ou innovant).
- Les systèmes soumis à de lourdes contraintes sécuritaires.
- Les systèmes évoluant dans des environnements sévères et/ou difficiles à quantifier.

Les essais aggravés permettent d'améliorer :

- la robustesse du système par l'amélioration des marges de fonctionnement,
- le processus de maturation rendant par définition le système davantage « mâture ».

C'est dans le domaine de l'électronique qu'est apparu la méthodologie des essais aggravés. Il s'agissait en réalité d'un besoin qui s'est fait rapidement ressentir suite à de cuisants échecs notamment lorsque le système a pour vocation de ne servir qu'une seule fois (exemple d'une défaillance de l'électronique lors d'un tir de missile). Parmi les différentes méthodes expérimentales, les essais HALT ('Highly Accelerated Life Testing'), se rapprochent le mieux de notre problématique.

La méthode des essais aggravés se propose d'améliorer la robustesse du système par l'analyse de ses défaillances, lorsque celui-ci est soumis volontairement à un environnement de sollicitations extrêmement sévères allant au-delà des spécifications techniques exigées par le client et imposées par les réglementations en vigueur [GUE.01]. Chaque défaillance observée montre en effet une faiblesse du système. Dans le cadre des essais HALT, le système subit des sollicitations échelonnées de diverses natures : climatiques, vibratoires, électriques,

etc., en franchissant trois paliers jusqu'à sa destruction (Figure 1.7). Le principe est globalement le suivant : si le système montre une défaillance avant d'atteindre les limites de chaque palier alors, celui-ci a une faiblesse latente nécessitant une action corrective ciblée [NEL.90]. Bien entendu, les corrections sont adaptées suivant qu'il s'agisse par exemple des limites de fonctionnement ou de destruction. Le choix peut être fait de ne pas modifier le produit lorsque la défaillance est apparue entre ces deux limites car on estime que la marge de conception est suffisante ou encore que cette « ultime » limite ne sera jamais atteinte.

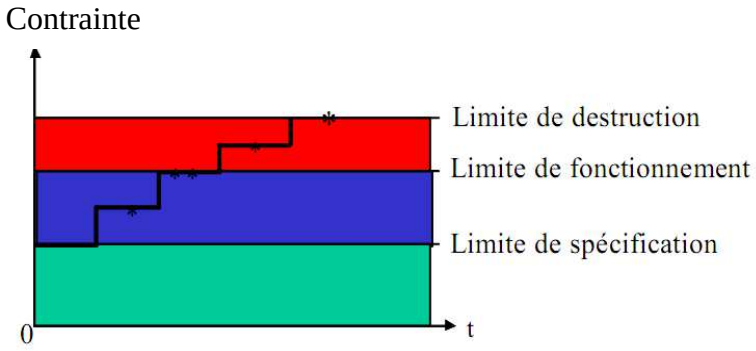


Figure 1.7 : Profil de sollicitations échelonnées en fonction du temps lors d'un essai aggravé de type HALT ('Highly Accelerated Life Testing') – Application : Electronique

L'intérêt d'un essai HALT est de déterminer le diagramme des zones caractéristiques du système, mettant ainsi en évidence quatre zones distinctes dimensionnées par les quatre axes représentant les sollicitations imposées (cf. Figure 1.8) :

- La zone de conformité correspondant à la spécification du cahier des charges (en vert).
- La zone de robustesse dite aussi marge de fonctionnement (en bleu).
- La zone de fonctionnement dégradé (en rouge).
- La zone de destruction (NB : Domaine irréversible).

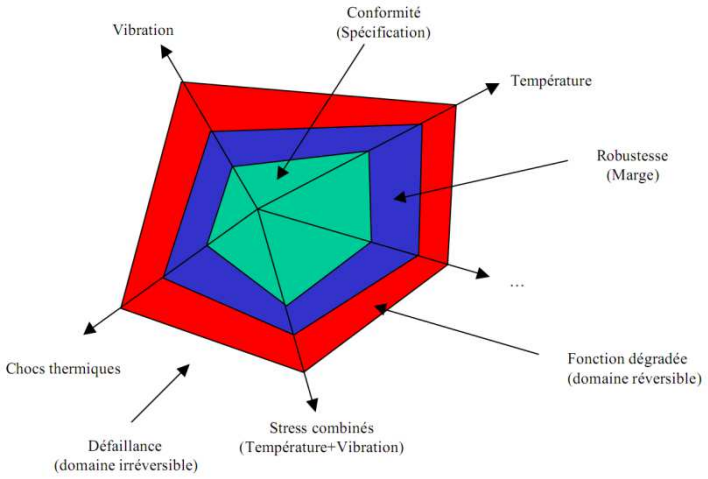


Figure 1.8 : Diagramme des zones caractéristiques du système suivant les axes de sollicitations lors d'un essai de type HALT ('Highly Accelerated Life Testing') – Application : Electronique

En résumé, un essai de type HALT correctement mené permet :

- de définir les limites le plus souvent méconnues du système (technologiques, de destruction),
- de rendre un produit plus robuste dès la phase d'étude c'est-à-dire plus fiable et ce, lorsque les premiers prototypes représentatifs de la série sont disponibles.
- au final, d'améliorer de façon significative la fiabilité opérationnelle du système.

Néanmoins, dans la mesure du possible, l'essai de type HALT réalisé lors de la phase d'étude doit être complété par des essais en phase de production du système voire lors de son exploitation. On parle alors d'essais de type HASS ('Highly Accelerated Stress Screen') ou HASA ('Highly Accelerated Stress Audit'), qui se rapprochent des essais de fiabilité en production mentionnés au paragraphe 1.4.4.2. Le but de ces tests est de s'assurer que le système n'admet pas de dérives compromettant sa robustesse, liées par exemple à une non qualité ou une mauvaise maîtrise de l'obsolescence des composants électroniques et ce, lors de son cycle de vie et notamment pendant la période de "Jeunesse". A noter que ces essais sont certes sévères en termes de sollicitations imposées, mais pas destructifs puisqu'ils sont réalisées systématiquement (essais HASS), ou par échantillonnage (essais HASA), sur les produits de série. Pour plus de détails, le lecteur peut se reporter aux références [MCL.98], [GUE.01].

1.4.4. Troisième objectif d'un programme de fiabilité : Valider la fiabilité

La validation de la fiabilité consiste à déployer les moyens qui permettent de vérifier que le système final remplit effectivement les objectifs de fiabilité (Figure 1.9).

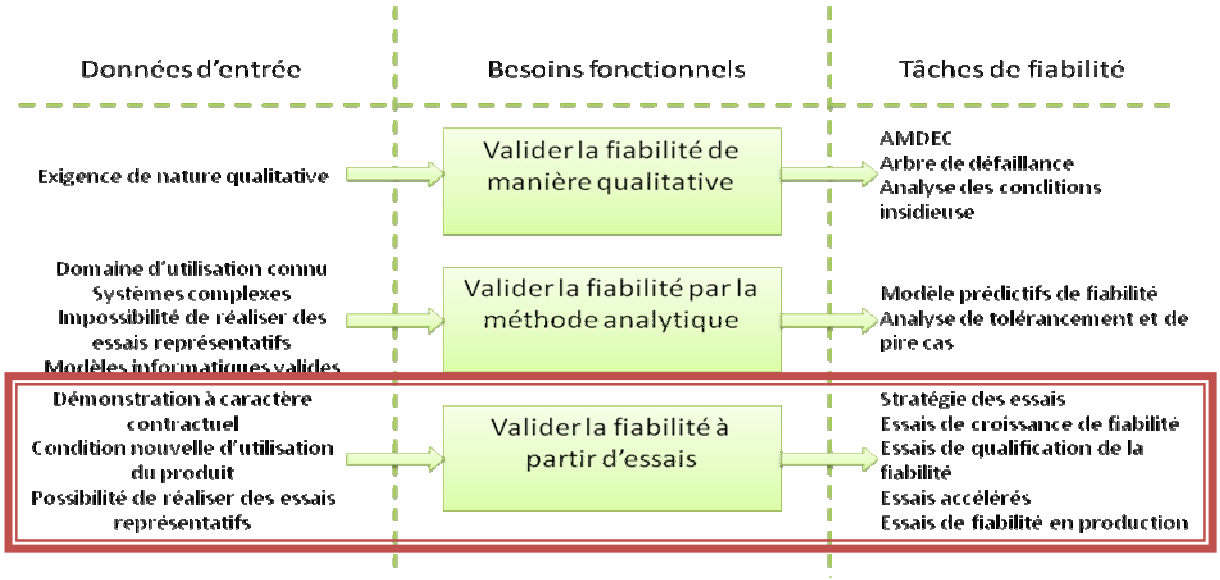


Figure 1.9 : Les Tâches de fiabilité liées au troisième objectif de validation de la fiabilité (le cadre rouge souligne un domaine utilisé dans cette thèse) [CET.05]

De même que pour le second objectif de fiabilité, les méthodes expérimentales tiennent également une place prédominante.

1.4.4.1. Essais accélérés

Les essais accélérés sont utiles lorsque l'objectif est de quantifier la fiabilité généralement des premiers prototypes représentatifs du produit série. La définition proposée par [CET.05] est la suivante :

« Les essais accélérés sont conçus pour pouvoir prédire, de manière économique et sur un laps de temps réduit, l'évolution dans le temps d'une (ou plusieurs) performance(s) fonctionnelle(s) ainsi que la durée de vie d'une entité matérielle utilisée dans ses conditions normales d'emploi. Ils consistent à soumettre cette entité à un ou plusieurs niveaux supérieurs aux niveaux spécifiés en utilisation normale, et à extrapoler les résultats obtenus à

l'aide de modèles analytiques validés par l'expérience. En général, l'entité considérée correspond à un composant, à un assemblage de matériaux ou à des structures simples. ».

Ce type d'essais permet notamment de valider la durée de vie d'un produit / d'un système dans un temps d'essais relativement optimisé, en s'appuyant sur une interprétation statistique détaillée [TEB.05], [NEL.90], [LEW.94] et [NIK.07]. Ils mettent surtout en évidence les défauts de conception du produit liés au phénomène de fatigue et se rapprochent des essais qualifiés le plus souvent d'endurance en ce qui concerne les systèmes à dominante mécanique.

1.4.4.2. Essais de fiabilité en production

Ce sont des essais de validation principalement mais ils peuvent détecter, à l'instar des essais HASS ou HASA dans l'électronique (cf. § 1.4.3.2.), des défaillances imputables à des dérives du processus de production voire, à des erreurs de conception qui seraient passées inaperçues lors des étapes précédentes du cycle en « V ». La définition proposée par [CET.05] est :

« Les essais de fiabilité en production (EFP) ont pour vocation de s'assurer que la fiabilité de conception ne se dégrade pas sur l'ensemble du cycle de production. Ils apportent au client une garantie suffisante pour que les exemplaires livrés continuent à satisfaire à ses exigences ou à ses attentes exprimées en terme de fiabilité ».

Cependant, il est à noter que la correction des défaillances identifiées en production est coûteuse pour l'entreprise car elles sont détectées tardivement dans le cycle de vie du produit.

1.4.4.3. Essais de qualification de la fiabilité

Ce type d'essais constitue la validation finale d'un programme d'essais de fiabilité. La définition proposée par [CET.05] est la suivante :

« Un essai de qualification de la fiabilité (EQF) est un essai spécifique ayant pour objectif essentiel de démontrer avec un degré de confiance suffisant la conformité du niveau de fiabilité d'un produit avec l'objectif spécifié. De ce fait, l'EQF contribue à valider l'adéquation de la conception retenue avec la valeur correspondante à cet objectif.

Contrairement à l'essai de croissance de fiabilité, l'EQF est un essai de type « constat » qui ne vise pas à relever des défauts encore non identifiés afin de les corriger. Sa réalisation est en principe la résultante d'une exigence contractuelle. Pour cette raison, il est dimensionné de manière statique, en intégrant à la fois le risque 'client' et 'fournisseur' ».

Il a pour objectif d'offrir une garantie contractuelle suffisante aux deux parties, fournisseurs et clients, afin de permettre la mise en production du système. Ces essais font souvent appel à des normes applicables à chaque secteur de l'industrie.

L'une des spécificités du secteur ferroviaire à l'échelle du marché français mais également au-delà, est que la fiabilité d'un système et a fortiori d'un matériel roulant, n'est pas mesurée avant le début de son exploitation commerciale. Les raisons sont principalement historiques et économiques mais également politiques, puisque le planning de développement d'un projet imposé par les organismes publics ne permet pas en général de déployer en temps et en heure des essais poussés de qualification de la fiabilité.

1.4.5. Dernier objectif d'un programme de fiabilité : Maintenir la fiabilité sur le cycle de vie

Cette phase vise à définir les méthodes pour quantifier et suivre l'évolution de la fiabilité du système lors de son exploitation (cf. Figure 1.10). Le maintien de la fiabilité sur le cycle de vie du système permet en effet de valider ou de donner des axes de réflexion à l'amélioration de la méthodologie de croissance de fiabilité.

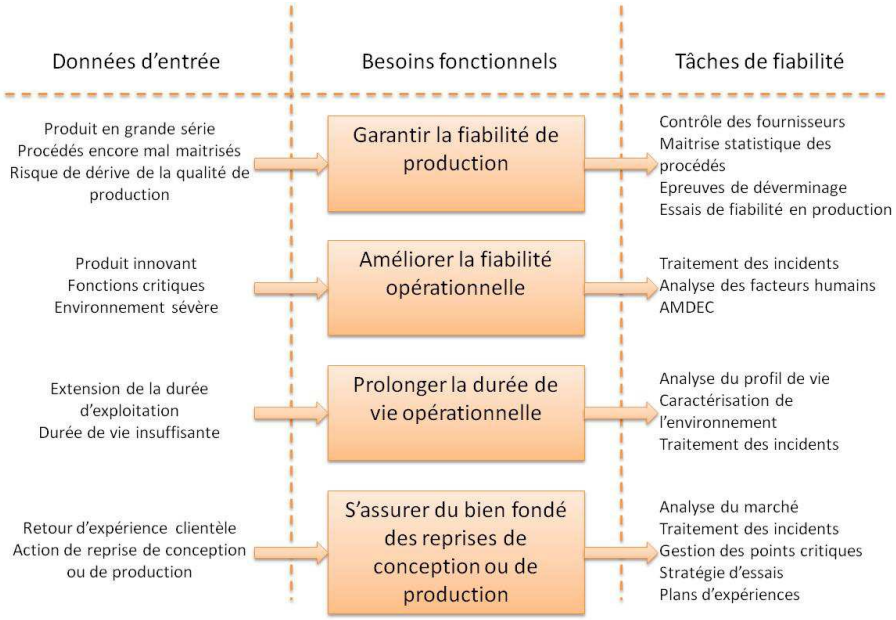


Figure 1.10 : Les Tâches de fiabilité liées au dernier objectif de maintenir la fiabilité sur le cycle de vie du système d'après [CET.05]

Cet objectif se décompose en quatre besoins fonctionnels qui génèrent principalement un contrôle renforcé des fournisseurs, une meilleure caractérisation de l'environnement (maintenance, facteur humain), et le traitement des incidents en exploitation. C'est à ce stade également du programme de fiabilité que le processus de retour d'expériences, notamment vis-à-vis des nombreuses analyses réalisées en phase d'études, prend toute sa valeur.

En conclusion, il a été clairement montré la place conséquente des méthodes par les essais à différents niveaux selon les objectifs recherchés. Etant donné que nos travaux se focalisent particulièrement sur l'amélioration de la fiabilité des accès voyageurs au travers d'essais de robustesse (cf. § 1.4.3), les derniers paragraphes de l'étude bibliographique décrivent deux aspects complémentaires relatifs à l'accroissement des connaissances sur un système à partir du recueil de données ; l'un, est qualifié de *Démarche statistique* au travers des concepts de statistique (cf. § 1.5) et l'autre, est relatif à la théorie des *Plans d'expériences* (cf. § 1.6).

1.5. Démarche statistique

1.5.1. Objectifs sur le plan statistique

Dans le cadre de la démarche statistique, l'étude d'un système est considérée via deux ensembles de grandeurs :

- l'**ensemble** des **variables** $\mathbb{V}=\{Y_v, v=1, \ldots, V\}$, mesurées directement sur le système [ROB.05] ou non (par exemple, fournies par un opérateur humain : Un utilisateur, un expert, etc.) [LAN.01] [LOS.06]. Une grandeur peut alors être supportée par un des quatre modèles mathématiques d'échelles usuellement employés en statistique : nominal, ordinal, d'intervalle et de rapport [STE.74] ;
- l'**ensemble** des **facteurs** $\mathbb{U}=\{X_u, u=1, \ldots, U\}$, dont les éléments peuvent avoir une influence sur le système. Ici aussi, une distinction selon les quatre types d'échelles doit être faite. Outre cet aspect d'échelle, trois sous-ensembles essentiels de facteurs sont à distinguer [LOS.96] :
  - un premier correspondant aux grandeurs que l'opérateur fait varier durant l'étude, s'il y a lieu (donc dans le cadre d'une étude expérimentale) ;
  - un deuxième contenant les caractéristiques maintenues constantes tout au long de l'étude, mais qui peuvent avoir une influence sur le système (comme la pression exercée de l'extérieur lors du cycle *ouverture/fermeture de la porte du train*) ;
  - un troisième relatif aux facteurs qui ne sont pas contrôlés mais qui peuvent avoir une influence sur le système.

Ajoutons qu'une variable Y_v peut être temporelle (générant donc des signaux ou des séries chronologiques de valeurs) ou non (généralement obtention d'une valeur unique, comme un avis d'expert). Le temps, au sens chronologique, est alors un facteur. Ces différents ensembles de grandeurs étant définis, l'étude du système peut alors se résumer selon la Figure 1.11 ci-après.

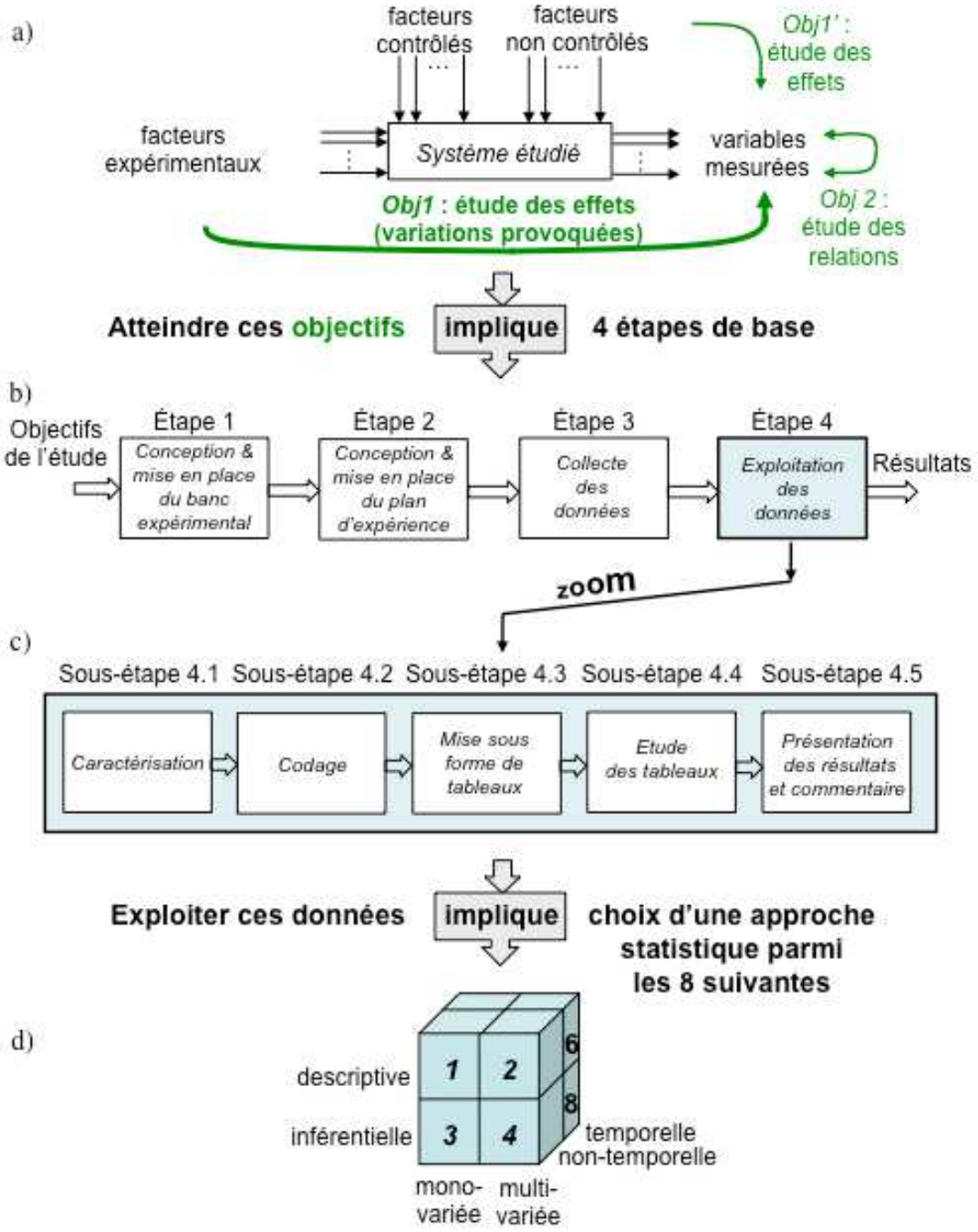


Figure 1.11 : Une façon de présenter synthétiquement l'étude d'un système sous l'angle statistique [LOS.96] a) Entrées, sorties et objectifs pour l'étude (cas par l'approche expérimentale) ; b) Les 4 étapes de base de l'étude expérimentale ; c) Les 5 sous-étapes de l'étape 4 ; d) Taxinomie en 3 dimensions des approches statistiques

La Figure 1.11 met en exergue deux (en vert), parmi les trois objectifs essentiels d'une étude empirique à savoir :

- étudier les effets de facteurs sur les variables. Sachant que dans une étude expérimentale les trois types de facteurs mentionnés plus haut existent, il faut distinguer l'objectif essentiel - *Comment se manifestent les variations provoquées* (*Obj1) ?* -, d'un objectif secondaire - *Etudier les effets des deux autres types de facteurs* (*Obj1'*). Dans une étude basée sur l'observation de systèmes, uniquement *Obj1'* existe ;
- étudier les relations entre les variables (*Obj2*). Atteindre un tel objectif peut être important dans les cas spécifiques où des signaux multidimensionnels (donc $V > 1$), sont enregistrés et/ou lorsque l'on veut mettre en relation des données fournies par des experts et des capteurs ;
- construire des ensembles d'indicateurs (*Obj3),* non montrés sur la Figure 1.11.a, dans l'optique qu'ils servent de références (moyenne d'une vitesse de circulation d'un train, fréquence d'une panne, coût cumulé des pièces de rechange par unité de temps, etc.). Précisons que de tels indices peuvent avoir peu de sens, comme dans le cas de la présence de plusieurs modes pour un histogramme d'amplitude (mono ou multivarié). Il peut dans ce cas être nécessaire de recourir à des méthodes de classification [SAP.90].

1.5.2. Les différentes étapes

La Figure 1.11.b présente les quatre étapes de base de l'accroissement de la connaissance sur un système à partir de l'approche statistique dans le cadre d'une étude expérimentale :

1. **Conception et/ou mise en œuvre du banc expérimental**. Cette étape intègre bien entendu tout ce qui est relatif à l'obtention des données (capteurs plus conditionnement des signaux, grilles permettant la saisie des problèmes survenant tout au long de la phase de récolte de données et, s'il y a lieu, questionnaires) ;

2. **Conception et/ou mise en œuvre du plan d'expériences**. Il s'agit ici de préciser les facteurs, leurs modalités, les façons de les combiner, etc. (cf §1.6). Dans un souci d'être suffisamment général, il est à préciser qu'il existe également la notion de *plan*

d'observations [LEG.86]. Si certaines disciplines font essentiellement appel à ce type d'investigation, comme la sociologie ou l'astronomie, un plan d'observation peut également intervenir en ingénierie, par exemple dans le cadre du recueil quotidien des incidents sur les trains ;

3. **Collecte de données**. Il faut garder à l'esprit que, pour des raisons multiples et variées, de nombreux problèmes peuvent survenir au cours de cette phase (comme la défaillance de capteurs, sachant qu'on peut ne pas s'en rendre compte immédiatement par exemple). Ces problème génèrent des données « douteuses », voire l'absence de données ;

4. **Exploitation des données**. Il s'agit ici de passer des données brutes, qui peuvent être notamment temporelles ou non temporelles, qualitatives ou quantitatives et objectives ou subjectives, à des résultats qui sont exprimés sous la forme d'un modèle mathématique (modèle d'une régression ou d'une distribution, etc.), d'un graphique (nuage de dispersion, histogramme, Pareto, etc.) ou verbale (conclusion d'un test d'hypothèse, modèle qualitatif, etc.).

La Figure 1.11.c propose une description détaillée de cette dernière étape selon cinq sous-étapes [LOS.01] :

4.1. **Caractérisation de données**. Cette sous-étape est surtout nécessaire en présence de données temporelles dans la mesure où les signaux peuvent être traduits sous la forme d'indicateurs plus ou moins synthétiques. Par exemple, dans le cas d'une variable continue, considérer une moyenne arithmétique est plus synthétique que de découper la plage de variation en fenêtres spatiales puis, caractériser chaque fenêtre par une fréquence calculée pour la durée du signal ; cette approche étant elle même plus synthétique que de combiner des fenêtres spatiales et des fenêtre temporelles (ce cheminement peut être également mise en œuvre avec des fenêtres fréquentielles [LOS.96]) ;

4.2. **Codage des données**. Cette sous-étape peut être présente si les données ne sont pas compatibles avec les données requises par une méthode spécifique (par exemple, nécessité de passer par un tri par ordre croissant pour un test paramétrique), ou ne sont pas compatibles entre elles dans l'optique d'une analyse multivariée (codage par centrage-réduction avec une analyse en composantes principales) ;

4.3. **Mise sous forme de tableaux de données**. Les méthodes ayant pour objectif d'atteindre les objectifs 1, 2 et 3 cités ci-avant ont souvent comme entrée une matrice [DID.82]. Ceci étant, les données issues d'une étude empirique génèrent souvent plusieurs matrices voire même plusieurs ensembles de données à plus de deux entrées ; cas MultiFactoriel (U>1) et MultiVarié (V>1), cas noté MFMV, avec la présence de données temporelles. Une étape de « mise en forme » des données s'impose alors.

4.4. **Etude des tableaux de données** (dans l'optique d'atteindre essentiellement les objectifs 1 et 2, Figure 1.11.a). Plusieurs dimensions taxinomiques peuvent être considérées pour distinguer les méthodes permettant une telle étude. La Figure 1.11.c en suggère trois :

1) Descriptif *vs*. inférentiel : Soit, seules les données disponibles sont concernées soit, elles ne proviennent que d'échantillons et le but est d'extrapoler les résultats à la (les) population(s) dont elles sont issues ;

2) Mono *vs*. multivarié : En présence de V variables, on peut faire, par exemple, V analyses univariées ou une seule analyse multivariée (à V variables).

3) Temporel *vs*. non temporel : En présence de données temporelles, le facteur temps peut intervenir ou non dans le modèle mathématique. Combiner ces trois dimensions taxinomiques à deux modalités revient alors à distinguer huit familles de méthodes [LOS.01].

4.5. **Présentation des résultats statistiques et commentaires**. Les sorties issues des programmes informatiques utilisés dans la sous-étape précédente sont souvent « ardues » à lire pour le non spécialiste (cas des nombreux tableaux et graphiques des méthodes multidimensionnelles factorielles ou des tests d'hypothèses avec plus de

deux variables en présence d'interactions). En conséquence, les sorties statistiques doivent être accompagnées de graphiques plus simples [TUF.83], ainsi que des textes venant commenter, sous le sens « physique », ces résultats. Tout ceci fait l'objet de cette dernière sous-étape.

Il est à noter qu'il est tout à fait possible que les enchaînements montrés sur les Figures 1.11.b&c ne suffisent pas. Il faut alors des re-bouclages (pour ne pas alourdir la Figure 1.11, ils n'ont pas été montrés). C'est notamment le cas en présence de données non temporelles ; l'analyse statistique débute alors avec une approche descriptive de type MFMV (cf. case 2, Figure 1.11.c), ce qui nécessite les cinq sous-étapes décrites sur la Figure 1.11.c, suivie d'une approche inférentielle (case 1 ou 3 de la Figure 1.11.c), et dès lors cinq nouvelles sous-étapes [LOS.01a].

Le paragraphe ci-dessus a présenté, de manière très synthétique, la démarche générale d'analyse statistique. Dans le cadre de l'amélioration de la performance des systèmes industriels, il est souvent nécessaire de tester l'influence de nombreux facteurs (cas où le système est placé dans des situations reproduisant des conditions usuelles de son utilisation ou en les aggravant), et/ou du facteur temps (par exemple, dans le cas d'essais d'endurance). Ceci passe par une organisation *spatiale* (*spatiale* au sens que les modalités des facteurs et leurs combinaisons sont précisées), et parfois *temporelle* (l'ordre des combinaisons testées est alors indiqué). L'obtention de cette organisation spatio-temporelle fait l'objet du paragraphe suivant via la méthodologie des plans d'expériences.

1.6. La méthodologie des plans d'expériences

La théorie des plans d'expériences provient de la fusion entre les méthodes expérimentales scientifiques et les outils statistiques. Ronald Aylmer Fisher fut le premier à développer et utiliser cette méthode pour l'agronomie en 1919 [FIS.25]. Bien qu'inventée pour l'agronomie, celle-ci fut rapidement utilisée dans d'autres domaines comme la médecine, la chimie, la mécanique, etc.

1.6.1. Définitions

- **Plan d'expériences :**

Un plan d'expériences est l'organisation d'une séquence d'essais expérimentaux pour obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences et la meilleure précision possible sur les réponses calculées par le modèle [GOU.00].

- **Facteur :**

L'objectif d'un essai est de lier mathématiquement un effet à une sollicitation. Dans le cadre des plans d'expériences, les sollicitations sont dénommées les « facteurs » et les effets les « réponses ». Un facteur est défini par une plage sur laquelle la sollicitation est testée. Cette plage est appelée domaine du facteur et est bornée par deux niveaux : Le niveau bas et le niveau haut (Figure 1.12) [GOU.06]. Par convention, le niveau bas est appelé -1 et le niveau haut +1.



Figure 1.12 : Domaine d'un facteur

- **Espace expérimental :**

Lorsqu'il y a plus d'un facteur, chaque facteur possède un domaine de variation similaire compris entre -1 et +1. L'ensemble des facteurs crée un espace de dimensions égal au nombre de facteurs choisis. Cet espace est appelé espace expérimental.

- **Domaine expérimental :**

La réunion de tous les domaines de variation des facteurs définit le domaine expérimental (Figure 1.13).

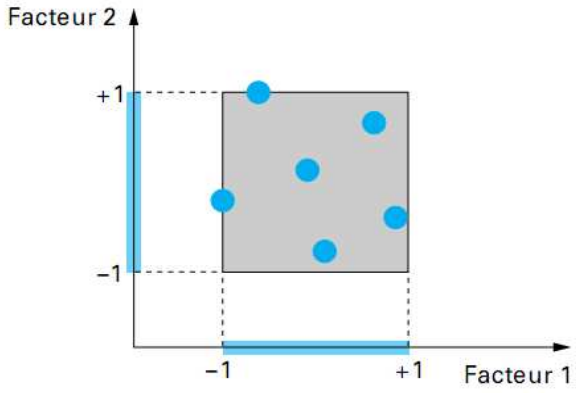


Figure 1.13 : Domaine expérimental (dans cet exemple, de dimension deux)

- **Point expérimental :**

Dans cet espace expérimental sont définis des points expérimentaux. Si X_i est une coordonnée du facteur *i* alors, un point d'un espace expérimental de dimension *n* aura pour coordonnées (X_1, X_2, …, X_i, …, X_n).

Notion importante d'interaction : Une particularité des plans d'expériences est qu'elle s'intéresse au facteur seul mais aussi aux combinaisons possibles de facteurs. Un facteur seul est dit d'ordre 1 et une combinaison de *n* facteurs est dite interaction d'ordre *n*.

Exemple d'un plan de trois facteurs où toutes les interactions possibles sont analysées. Celui-ci possède :

- 3 facteurs d'ordre 1 : F1, F2 et F3.
- 3 facteurs d'ordre 2 : F12 et F13 et F23.
- 1 facteur d'ordre 3 : F123.

- **Surface de réponse :**

La surface de réponse est définie comme étant l'espace de dimension *n*+1 associant a tous les *n* facteurs une réponse (cf. Figure 1.14 pour un exemple de surface de réponse de dimension trois correspondant à un plan expérimental de dimension deux).

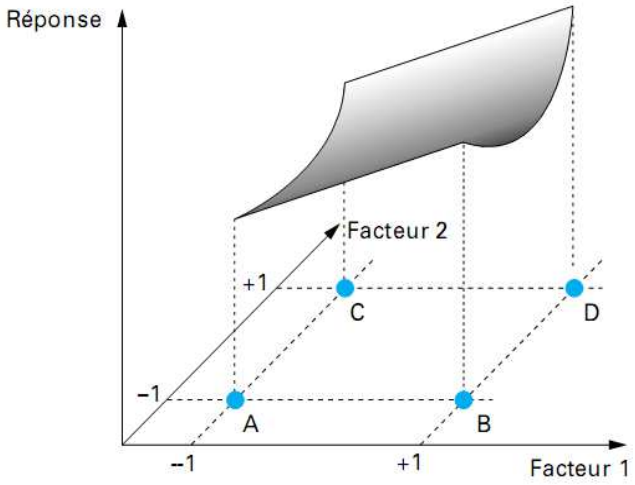


Figure 1.14 : Surface de réponse de dimension trois correspondant à un plan expérimental de dimension deux

1.6.2. Les différents types de plans d'expériences

Il existe un nombre important de plans d'expériences, chacun permettant de répondre à des problématiques expérimentales différentes [GAU.05] et [GOU.06]. Chaque type de plan résulte d'un compromis entre le nombre d'essais et la précision souhaitée des réponses, mais également tient compte des contraintes du domaine expérimental étudié.

Au moyen d'un cube taxinomique, la Figure 1.15 présente une façon schématique les huit grandes catégories de plans d'expériences élaborés suivant le modèle mathématique employé, la nature des facteurs et enfin le type de plan.

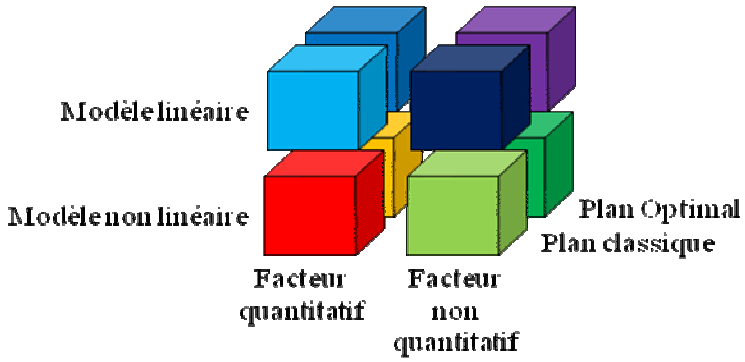


Figure 1.15 : Les huit catégories de plans d'expériences (représentation schématique sous la forme d'un cube taxinomique)

Chaque partie du cube taxinomique contient plusieurs types de plans d'expériences. Ceux-ci ne sont pas détaillés dans le cadre de ces travaux. En effet, notre cas d'étude étant défini par une mixité de facteurs quantitatifs et non quantitatifs, le modèle sera supposé linéaire tout en se laissant néanmoins la possibilité d'explorer des aspects non linéaires. De plus, la quantité importante de facteurs à considérer rend l'utilisation des plans classiques difficile. D'après le cube taxinomique décrit ci-avant, notre choix de plan doit s'orienter vers le plan contenu dans la « case verte foncée ». Le plan D-optimal fait partie de cette classe de plans d'expériences et est décrit dans le chapitre 2.

1.7. Conclusion

Dans un premier temps, les grandeurs de la *sûreté de fonctionnement* dont la *fiabilité*, qui reste le « fil conducteur » de la thèse, ont été présentées. Le point de vue de la *systémique* a ensuite permis de mieux cerner la problématique de caractérisation de la *complexité* d'un système tel que les accès voyageurs en ferroviaire. La prise en compte de la *croissance de fiabilité* à travers quatre objectifs qui suivent le déroulement chronologique d'un projet (cycle en « V » dans le cadre de cette étude bibliographique), a mis en évidence un ensemble exhaustif de tâches à réaliser répondant à divers besoins fonctionnels. Un focus particulier a été apporté sur les méthodes expérimentales et notamment les différents types d'essais en fiabilité tels que les essais aggravés permettant d'améliorer au plus tôt la robustesse d'un produit. Enfin, deux méthodes complémentaires de traitement des données expérimentales ont

été décrites à savoir d'une part, la *démarche statistique* et d'autre part, la théorie des *plans d'expériences*.

Le Chapitre suivant traite de l'état de l'art des plans d'expériences de type D-Optimal utilisés dans le cadre de ces travaux. Après un rappel des principes mathématiques associés à l'emploi du critère de D-optimalité et des algorithmes permettant de générer les plans d'expériences. Un exemple simple de génération d'un plan d'expériences utilisant le critère D-optimal et l'interprétation des résultats via le logiciel SAS-JMP termine ce deuxième chapitre.

Table des illustrations

Figure 1.1 : Les interactions entre les grandeurs de la Sûreté De fonctionnement (SDF) [CAU.05]..... 18
Figure 1.2 : Evolution en fonction du temps du taux de défaillance λ _ Courbe dite « en baignoire » (illustration d'un système mécanique)..... 20
Figure 1.3 : Cycle en « V » d'un produit ou système (phases de Développement et de Fabrication puis, d'Exploitation et de Retrait du Service)..... 24
Figure 1.4 : Les quatre objectifs d'un programme de fiabilité extraits de [CET.05] (en rouge, le contexte essentiel dans lequel se situe cette étude)..... 25
Figure 1.5 : Les Tâches de fiabilité liées au premier objectif de spécification des exigences [CET.05] 26
Figure 1.6 : Les Tâches de fiabilité liées au second objectif d'assurer la fiabilité de conception (le cadre rouge souligne un domaine utilisé dans cette thèse) [CET.05] 27
Figure 1.7 : Profil de sollicitations échelonnées en fonction du temps lors d'un essai aggravé de type HALT ('Highly Accelerated Life Testing') – Application : Electronique 30
Figure 1.8 : Diagramme des zones caractéristiques du système suivant les axes de sollicitations lors d'un essai de type HALT ('Highly Accelerated Life Testing') – Application : Electronique..... 31
Figure 1.9 : Les Tâches de fiabilité liées au troisième objectif de validation de la fiabilité (le cadre rouge souligne un domaine utilisé dans cette thèse) [CET.05]..... 32
Figure 1.10 : Les Tâches de fiabilité liées au dernier objectif de maintenir la fiabilité sur le cycle de vie du système d'après [CET.05]..... 35
Figure 1.11 : Une façon de présenter synthétiquement l'étude d'un système sous l'angle statistique [LOS.96] a) Entrées, sorties et objectifs pour l'étude (cas par l'approche expérimentale) ; b) Les 4 étapes de base de l'étude expérimentale ; c) Les 5 sous-étapes de l'étape 4 ; d) Taxinomie en 3 dimensions des approches statistiques.... 37
Figure 1.12 : Domaine d'un facteur..... 42
Figure 1.13 : Domaine expérimental (dans cet exemple, de dimension deux) 43
Figure 1.14 : Surface de réponse de dimension trois correspondant à un plan expérimental de dimension deux 44
Figure 1.15 : Les huit catégories de plans d'expériences (représentation schématique sous la forme d'un cube taxinomique) 45

2. Les plans D-Optimaux

2.1. Introduction 50

2.2. Les plans d'expériences D-optimaux 50

2.2.1. Définition ____ 50
2.2.2. Définition du modèle ____ 51
2.2.3. Définition du plan d'expériences ____ 52
2.2.4. Calcul des *p* paramètres du vecteur β ____ 53
2.2.4.1. Critère de D-optimalité ____ 54
2.2.4.2. Exemple ____ 54
2.2.5. Algorithme d'échange des coordonnées D-optimal ____ 56
2.2.5.1. Etape 1 : Définition de la matrice *F* ____ 57
2.2.5.2. Étape 2 : Définition de la matrice X ____ 57
2.2.5.3. Etape 3 : Définition du vecteur *v* ____ 58
2.2.5.4. Etape 4 : Echange des coordonnées de la matrice X ____ 59
2.2.5.5. Etape 5 : Critère d'arrêt ____ 59

2.3. Exemple d'utilisation de JMP à partir d'un exemple simulé 60

2.3.1. Définition du modèle simulé ____ 61
2.3.2. Etape 1 : Construction du plan ____ 61
2.3.2.1. Définition de la (des) réponse(s) ____ 61
2.3.2.2. Définition des facteurs ____ 64
2.3.2.3. Sélection du nombre d'essais ____ 65
2.3.2.4. Réalisation des essais ____ 66
2.3.3. Interprétation du plan d'expériences ____ 67
2.3.3.1. Choix de la méthode statistique d'interprétation ____ 67
2.3.3.2. Evaluation de la qualité du plan d'expériences ____ 67
2.3.3.3. Comparaison des différents modèles de l'exemple simulé ____ 73
2.3.3.4. Les outils graphiques ____ 75

2.4. Conclusion 76

2.1. Introduction

Comme exposé dans le précédent chapitre, la *méthodologie des plans d'expériences* s'avère être la plus adaptée pour répondre à la problématique de la réalisation d'une campagne d'essais de robustesse compatible avec le planning d'un projet industriel ferroviaire. L'analyse bibliographique et la prise en compte de ces contraintes ont conduit au choix du plan d'expériences de type *D-optimal du premier ordre*. La nature du modèle mathématique est quant à elle fortement corrélée au nombre de facteurs quantitatifs et qualitatifs nécessaires au bon déroulement des essais de robustesse des accès voyageurs. Dans notre cas, le modèle linéaire sera postulé et devra être validé par l'expérimentation. Cette étape fait l'objet du chapitre 4.

La première partie du présent chapitre décrit le critère de D-optimalité. Ce modèle D-optimal présente trois avantages : une forte réduction du nombre d'essais lié à une expérimentation, la possibilité de prendre en compte des facteurs de type qualitatif et quantitatif et un développement logiciel suffisamment avancé pour être employé dans l'industrie. La deuxième partie traite de la *construction algorithmique* des plans D-Optimaux via la méthode d'échange des coordonnées. Le logiciel SAS-JMP, utilisé dans le cadre de ces travaux, fait appel à un algorithme basé sur le critère de D-Optimalité. L'utilisation de cet algorithme clôture la seconde partie. Afin de mieux comprendre le fonctionnement et les possibilités d'analyses offertes par le plan d'expériences D-Optimal et le logiciel SAS-JMP, ce chapitre se termine par une troisième partie présentant un *exemple de génération d'un plan d'expériences D-Optimal* à trois facteurs et trois interactions, ainsi que son interprétation.

2.2. Les plans d'expériences D-optimaux

2.2.1. Définition

La théorie des plans d'expériences D-optimaux a été décrite pour la première fois par Fisher dans les années 1925 à 1930 [FIS.25] [FIS.35], puis reprise par Kiefer et Fedorov en 1960 [FED.72] [KIE.59]. Contrairement au plan classique (reposant sur l'exploitation des

matrices de Hadamar), les plans d'expériences D-optimaux sont basés sur un modèle de construction algorithmique (cf. notamment les travaux de Fedorov et de Silvey [SIL.80]).

Les notations considérées dans ce chapitre sont celles employées dans l'article de Gauchi [GAU.05]. Dans la suite, nous supposerons que les facteurs étudiés (qualitatifs ou quantitatifs) sont contrôlables et que les erreurs de réglage peuvent être négligées.

2.2.2. Définition du modèle

Le modèle étudié est celui de la régression linéaire avec lequel on estime une réponse continue *y* à partir du vecteur des *h=1,…,H* facteurs.

Les réponses s'expriment en fonction des facteurs par la relation :

$$y_{i,k} = f(x_{h,i})^T \beta + \varepsilon_{i,k}$$

Où :

- y_i est la k^{ème} observation de la réponse du $i^{ème}$ point expérimental (*i=1,.., I*) de coordonnées $x_{h,i}$.
- *k* est le nombre de répétition du modèle (nombre d'observations associées à un point expérimental $x_{h,i}$). Selon les valeurs de *k (k=1,..,K)*:
  - dans le cas ou *k=1* il n'y a pas de répétition le point expérimental i n'est mesuré qu'une seule fois,
  - Dans le cas ou *k>1* il y a *k* essais effectuer pour un point expérimental.
- $x_{h,i}$ est le vecteur contenant les valeurs des *h* facteurs appelé conditions expérimentales attachées au $i^{ème}$ point expérimental (*i=1,.., I*).
- $f(x_{h,i})$ est la fonction qui lie la réponse *y* aux différents facteurs $x_{h,i}$.
- β est le vecteur *(P×1)* des *p* paramètres du modèle β_p (*p=0,.., P-1*).
- ε_i est l'erreur expérimentale attachée à l'observation de la réponse du $i^{ème}$ point expérimental. Elle est supposée suivre une loi de Laplace-Gauss centrée d'écart type constant $\sigma>0$.

ou encore, sous sa forme matricielle par :

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{x\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

où :

- $\boldsymbol{y}$: Vecteur $(I\times 1)$ des $y_{i,k}$.
- $\boldsymbol{x}$: Vecteur $(I\times 1)$ des $\boldsymbol{f}(x_{h,i})^T$.
- $\boldsymbol{\varepsilon}$: Vecteur $(I\times 1)$ des $\varepsilon_{i,k}$.

On définit aussi :

- $\mathbb{H}_S$: Ensemble des points d'expériences possibles.
- $\mathbb{H}$: Ensemble des points d'expériences choisis parmi $\mathbb{H}_S$.

2.2.3. Définition du plan d'expériences

De façon à déterminer les p paramètres du modèle, un système de p équations est créé, chaque équation est donnée par un point expérimental. L'ensemble des points expérimentaux est défini par la matrice d'expérimentation $\xi_{I\times H,k}$:

$$\xi_{I\times H,k} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,I} \\ \vdots & & x_{h,i} & & \vdots \\ x_{H,1} & \cdots & x_{H,i} & \cdots & x_{H,I} \\ x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,I} \\ \vdots & & x_{h,i} & & \vdots \\ x_{H,1} & \cdots & x_{H,i} & \cdots & x_{H,I} \\ & & \vdots & & \\ x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,I} \\ \vdots & & x_{h,i} & & \vdots \\ x_{H,1} & \cdots & x_{H,i} & \cdots & x_{H,I} \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \} \ k=0 \\ \\ \\ \} \ k=1 \\ \\ \cdots \\ \\ \\ \} \ k=K \end{matrix}$$

où

$\xi_{I\times H,k}$: Plan discret à I expériences, répétées k fois, appartenant à Ψ

- (l'ensemble discret des combinaisons possibles engendrées par toutes les valeurs possibles de $\mathbb{H}_s$), définissant la valeur de $x_{h,i}$ associée au $i^{ème}$ point expérimental (parmi $\mathbb{H}$).

2.2.4. Calcul des *p* paramètres du vecteur $\boldsymbol{\beta}$

Pour estimer le vecteur $\boldsymbol{\beta}$ (les valeurs des *p* paramètres du vecteur β), l'estimateur issu de la méthode des moindres carrés élaborée par Gauss en 1809 et Legendre en 1805 a été utilisé. Cette méthode est basée sur le concept de minimisation de la somme quadratique des erreurs des mesures expérimentales $\mathbf{S}(\beta)$ [GAU.09]. Il s'agit de trouver le modèle mathématique associé à une série de mesures expérimentales qui minimise l'erreur expérimentale.

$S(\boldsymbol{\beta})$est défini par :

$$S(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{I} (y_{i,k} - f(x_i)^T \boldsymbol{\beta})^2 = \sum_{i=1}^{I} \varepsilon_{i,k}{}^2$$

Le vecteur $\tilde{\boldsymbol{\beta}}_{mc}$ du modèle minimise $S(\boldsymbol{\beta})$, ce qui revient à chercher les solutions du système $grad[S(\boldsymbol{\beta})] = 0$ dont la solution matricielle est :

$$\tilde{\boldsymbol{\beta}}_{mc} = (\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X}\ )^{-1} \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{y}$$

Dans un souci de définition les notations suivantes sont utilisées :

$$\boldsymbol{M}_N(\xi_{I\times H,k}) = \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{X}$$

où $\boldsymbol{M}_N$ désigne la matrice d'information et

$$\boldsymbol{M_N^N(\xi_{I\times H,k}) = \frac{1}{I \times K} X^T X}$$

où $\boldsymbol{M_N^N}$ désigne la matrice d'information moyenne [GOU.06].

Ce qui donne :

$$\boldsymbol{\hat{\beta}_{mc} = M_N{}^{-1} X^T y}$$

Les outils étant définis, le paragraphe suivant s'attache à caractériser le critère choisi pour optimiser et définir la matrice d'essais parmi toutes les matrices d'essais existantes de $\boldsymbol{\Psi}$ (à savoir l'ensemble discret des combinaisons possibles engendrées par toutes les valeurs possibles de l'ensemble $\mathbb{I}_s$).

2.2.4.1. Critère de D-optimalité

Il existe un nombre important de critères d'optimalité. Seul le critère D-optimal sera utilisé et détaillé. Commençons par expliquer en premier lieu le critère D-optimal qui est défini mathématiquement pour *I* expériences par la relation :

$$\boldsymbol{\xi_{I\times H,k}^D = Arg\left\{\max_{\xi_I \in \Psi} Det\left[M_N(\xi_{I\times H,k})\right]\right\}}$$

La matrice d'expérimentation optimisée $\boldsymbol{\xi_{I\times H}^D}$ est celle qui, parmi toutes les matrices d'expérimentation $\boldsymbol{\xi_{I\times H}}$ de $\boldsymbol{\Psi}$, maximise $\boldsymbol{Det\left[M_N(\xi_{I\times H})\right]}$.

La théorie de la D-optimalité (D pour déterminant), repose par conséquent sur la maximisation du déterminant de la matrice d'information $\boldsymbol{M_N = X^T X}$.

2.2.4.2. Exemple

Cet exemple est basé sur le modèle suivant :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

Pour déterminer les paramètres β_0, β_1 et β_2, quatre plans d'expériences D-optimaux sont proposés :

$$\xi^1_{3\times 2,1} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \xi^2_{3\times 2,1} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \xi^3_{2\times 2,1} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \xi^4_{2\times 2,2} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Rappelons que le nombre de lignes correspond au nombre d'essais effectués. Les déterminants des matrices d'information $Det\left[M_N\left(\xi_{I\times H,k}\right)\right]$ associés aux quatre plans sont :

$$Det^1\left(M_N\left(\xi^1_{3\times 2,1}\right)\right) = 6,\ Det^2\left(M_N\left(\xi^2_{3\times 2,1}\right)\right) = 8$$

$$Det^3\left(M_N\left(\xi^3_{2\times 2,1}\right)\right) = 4,\ Det^4\left(M_N\left(\xi^4_{2\times 2,2}\right)\right) = 16$$

Les déterminants des matrices d'information moyenne $Det\left[M^N_N\left(\xi_{I\times H,k}\right)\right]$ associés aux quatre plans sont :

$$Det^1\left(M^N_N\left(\xi^1_{3\times 2,1}\right)\right) = 0.67,\ Det^2\left(M^N_N\left(\xi^2_{3\times 2,1}\right)\right) = 0.89$$

$$Det^3\left(M^N_N\left(\xi^3_{2\times 2,1}\right)\right) = 1,\ Det^4\left(M^N_N\left(\xi^4_{2\times 2,2}\right)\right) = 1$$

L'optimalité des plans 1 et 2 vis-à-vis du nombre d'essais est inférieure à celle des plans 3 et 4. En effet, les $Det\left(M^N_N\right)$ des plans 1 et 2 sont plus petits que les $Det\left(M^N_N\right)$ des plans 3 et 4. En revanche les plans 1 et 2 fournissent plus d'information que le plan 3 ($Det\left(M_N\right)$ de 1 et 2 sont plus grands que le $Det\left(M_N\right)$ de 3).

Le plan 4 est celui qui a le déterminant maximal pour les deux matrices : matrice d'information et matrice d'information moyenne. Il est donc le meilleur choix possible pour l'expérimentateur (bien entendu, au sens des critères définis précédemment, c'est-à-dire au sens du nombre d'essais et au sens de la D-optimalité).

2.2.5. Algorithme d'échange des coordonnées D-optimal

L'algorithme d'échange des coordonnées [COO.89][MIT.74] pour le critère d'optimalité D-optimal s'effectue en cinq étapes illustrées avec l'exemple de modèle suivant :

$$y = (\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3) + (\beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_1 x_3 + \beta_6 x_2 x_3) + \varepsilon$$

où ε est l'erreur expérimentale qui est supposée suivre une loi de Laplace-Gauss centrée d'écart type constant σ strictement positif.

où $\boldsymbol{\beta}_{pri}$ est le vecteur primaire composé des effets des facteurs principaux, $\boldsymbol{x}_{pri}$ qui sont les plus influents, et $\boldsymbol{\beta}_{pot}$ le vecteur potentiel qui comprend les effets des interactions $\boldsymbol{x}_{pot}$ qui sont potentiellement influentes.

A partir de ce modèle, les vecteurs $\boldsymbol{x}$ et $\boldsymbol{\beta}$ sont définis de la manière suivante :

$$\boldsymbol{x}_{pri} = [x_1, x_2, x_3]$$

$$\boldsymbol{x}_{pot} = [x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3]$$

$$\boldsymbol{\beta}_{pri} = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3]$$

$$\boldsymbol{\beta}_{pot} = [\beta_4, \beta_5, \beta_6]$$

On obtient ainsi le modèle matriciel :

$$y = x^T \beta + \varepsilon$$

où :

$$x^T \beta = {x_{pri}}^T \times \beta_{pri} + {x_{pot}}^T \times \beta_{pot}$$

Le nombre d'essais doit obligatoirement être supérieur au nombre de paramètres du vecteur β mais reste à la discrétion de l'expérimentateur en fonction du temps qu'il a pour réaliser sa campagne d'essais. Dans cet exemple, nous utiliserons un plan d'expériences à 8 essais (nombre d'essais recommandé par JMP pour ce type de modèle, voir paragraphe 2.3.2.3).

2.2.5.1. Etape 1 : Définition de la matrice *F*

La matrice ***F*** est une matrice dont les dimensions dépendent du plan d'expériences : le nombre de lignes de la matrice ***F*** correspond au nombre d'essais (c'est-à-dire *I=8*), et le nombre de colonnes de la matrice ξ correspond au nombre de facteurs du plan. La matrice est ensuite remplie de manière aléatoire par des valeurs comprises entre 0 et 1.

Exemple :

$$\xi_{8\times3,1} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & Rand[0,1] & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{8,1} & x_{8,2} & x_{8,3} \end{bmatrix}$$

L'exemple comprend trois facteurs et huit expériences soit une matrice ***F*** à 3 colonnes et 8 lignes.

2.2.5.2. Étape 2 : Définition de la matrice *X*

La matrice $\boldsymbol{X}$ est la matrice du modèle (c'est-à-dire que le nombre de lignes correspond au nombre d'essais, et le nombre de colonnes au nombre de paramètres du modèle).

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & f_{1,3} & f_{1,4} & f_{1,5} & f_{1,6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{i,0} & f_{i,1} & f_{i,2} = x_{i,2} & f_{i,3} & f_{i,4} = x_{i,1} \times x_{i,2} & f_{i,5} = x_{i,1} \times x_{i,3} & f_{i,6} = x_{i,2} \times x_{i,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{8,0} & f_{8,1} & f_{8,2} & f_{8,3} & f_{8,4} & f_{8,5} & f_{8,6} \end{bmatrix}$$

Pour cet exemple, nous avons *P=7* paramètres ($\boldsymbol{\beta}$ est un vecteur *(P×1)*), et une matrice $\boldsymbol{X}$ à 7 colonnes et 8 lignes. Dans cette matrice, la colonne 1 correspond à X_0 (variable liée au paramètre constant du modèle β_0). Les colonnes 2 à 4 contenant $f_{i,1}$, $f_{i,2}$, $f_{i,3}$ correspondent aux paramètres $\boldsymbol{\beta}_{pri} = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3\}$ liés aux facteurs primaires $f_{i,1}(x) = x_{i,1}$, $f_{i,2}(x) = x_{i,2}$, $f_{i,3}(x) = x_{i,3}$ du modèle. Et enfin, les colonnes 5 à 7 contenant $f_{i,4}$, $f_{i,5}$, $f_{i,6}$ aux paramètres $\boldsymbol{\beta}_{pot} = \{\beta_4, \beta_5, \beta_6\}$ liés aux interactions des facteurs primaires $f_{i,4}(x) = x_{i,1}x_{i,2}$, $f_{i,5}(x) = x_{i,1}x_{i,3}$, $f_{i,6}(x) = x_{i,2}x_{i,3}$ du modèle. Le nombre de lignes est toujours défini par 8 essais.

2.2.5.3. Etape 3 : Définition du vecteur *v*

Le vecteur ***v*** est le vecteur composé des niveaux possibles des facteurs. Il définit les différentes valeurs de substitution à prendre en compte dans l'optimisation de la matrice du modèle ($\boldsymbol{X}$).

Exemple : Les facteurs x_1, x_2 et x_3 sont des facteurs continus variant entre -1 et 1 ; dans notre cas, on restreint les valeurs des facteurs primaires à :

$\boldsymbol{v} = \{-1, +1\}$.

2.2.5.4. Etape 4 : Echange des coordonnées de la matrice $\boldsymbol{X}$

Les coordonnées de la première colonne de $\boldsymbol{X}$ correspondant aux paramètres constants β_0 du modèle sont intégralement remplacées par la valeur 1.

$f_{i,0} = 1$ pour $i=1,\ldots, I=8$

Le déterminant de $\boldsymbol{M_N}$ ($\boldsymbol{M_N = X^T X}$) est ensuite calculé.

La boucle d'échange démarre en remplaçant le coefficient $f_{1,1}$ par une des valeurs de $\boldsymbol{v}$. Pour chaque valeur de $\boldsymbol{v}$, $Det'(M_N)$ (déterminant calculé après le remplacement de $f_{1,1}$) est recalculé. Le $Det'(M_N)$ le plus grand indiquera par quelle valeur de V nous devons remplacer le coefficient $f_{1,1}$ avant de passer à l'itération suivante. Ce procédé est répété pour la coordonnée $f_{1,2}$ puis, pour toutes les autres coordonnées de X avec i variant de 1 à I pour chaque valeur de h variant de 1 à H (où H est le nombre de conditions expérimentales de X).

Exemple : Après transformation, $\boldsymbol{X}$ prend la forme :

$$\boldsymbol{X} = \left[\begin{array}{c|ccc|ccc} 1 & \pm 1 & \pm 1 & \pm 1 & \pm 1 & \pm 1 & \pm 1 \\ f_{i,0} = 1 & f_{i,1} = \pm 1 & f_{i,2} = x_{i,2} = \pm 1 & f_{i,3} = \pm 1 & f_{i,4} = x_{i,1} \times x_{i,2} & f_{i,5} = x_{i,1} \times x_{i,3} & f_{i,6} = x_{i,2} \times x_{i,3} \\ f_{8,0} & f_{8,1} & f_{8,2} & f_{8,3} & f_{8,4} & f_{8,5} & f_{8,6} \end{array}\right]$$

β_0 $\quad$ β_{pri} $\quad$ β_{pot}

On obtient ainsi une matrice $\boldsymbol{X}$ où chaque composante qui à l'origine était aléatoirement choisie entre [0,1], est désormais soit par +1 soit par -1 (composante de $\boldsymbol{v}$), de façon à maximiser $Det(\boldsymbol{M_N})$ au final.

2.2.5.5. Etape 5 : Critère d'arrêt

L'itération s'arrête lorsque la matrice $\boldsymbol{X}$ est complètement remplie par des valeurs de $\boldsymbol{v}$. Dans ce cas, le déterminant $Det(\boldsymbol{M_N})$ a atteint un maximum local. La matrice d'essais du plan,

$\xi^{D}_{3\times8}$, est la matrice dont le nombre de lignes correspond au nombre d'essais *I* du plan et le nombre de colonnes au nombre de facteurs de ***X***.

Exemple : La matrice d'expériences $\xi^{D}_{3\times8,1}$ s'écrit :

$$\xi^{D}_{3\times8,1} = \begin{bmatrix} \pm1 & \pm1 & \pm1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \pm1 & \pm1 & \pm1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \pm1 & \pm1 & \pm1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice $\xi^{D}_{3\times8,1}$ est la matrice dont les colonnes sont les colonnes correspondante au x_{pri} de la matrice ***X*** optimisée.

Cette construction algorithmique, de part le choix aléatoire des valeurs de départ de $\xi^{D}_{3\times8,1}$, n'a pas une solution unique.

Si l'on souhaite effectuer des répétitions par exemple *k=3* la matrice s'appellera $\xi^{D}_{3\times8,3}$ et sera définit par :

$$\xi^{D}_{3\times8,3} = \begin{bmatrix} \xi^{D}_{3\times8,1} \\ \xi^{D}_{3\times8,1} \\ \xi^{D}_{3\times8,1} \end{bmatrix}$$

2.3. Exemple d'utilisation de JMP à partir d'un exemple simulé

De nombreux mathématiciens ont travaillé sur la construction d'algorithmes pour déterminer des plans D-optimaux. Parmi les différents algorithmes existants, nous avons choisi de présenter l'algorithme d'échange des coordonnées D-optimal qui est utilisé par le logiciel SAS-JMP.

2.3.1. Définition du modèle simulé

Le plan d'expériences utilisé dans le cadre de cet exemple est basé sur un modèle linéaire à trois facteurs et trois interactions. La mise en équation de ce modèle s'exprime sous la forme (déjà décrit aux § 2.2.5 et 2.2.6) :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_1 x_3 + \beta_6 x_2 x_3 + \varepsilon$$

où x_1, x_2 et x_3 sont des facteurs continus dans l'intervalle [-1, 1], et ε suit une loi normale centrée (μ=0) avec un écart-type σ a priori strictement positif.

Les différentes valeurs de x_1, x_2 et x_3 sont définies au cours de l'expérimentation par le plan d'expériences D-optimal généré par le logiciel JMP (cf. § 1.4.2).

Les valeurs des paramètres ont été fixées arbitrairement à :

$$\beta_0 = 10,\ \beta_1 = 5,\ \beta_2 = -3,\ \beta_3 = -1,\ \beta_4 = 0.5,\ \beta_5 = -0.8\ et\ \beta_6 = -0.3$$

Les réponses y du modèle sont simulées pour chaque cas expérimental du plan d'expériences en considérant 3 cas : σ =0 (aucune erreur expérimentale), σ =0,5 et σ =1.

2.3.2. Etape 1 : Construction du plan

Le logiciel SAS-JMP propose divers types de plans d'expériences. Afin que l'outil puisse générer le plan d'expériences D-optimal, il est nécessaire en premier lieu de définir la (les) réponse(s) que l'on souhaite observer et optimiser, ainsi que les facteurs constitutifs du modèle. Les Interfaces Homme Machine (IHM) du logiciel sont présentés dans l'Annexe 1. Les différents plans d'expériences disponibles sous JMP sont montrés en IHM 1 de l'Annexe 1. L'IHM 2 de l'Annexe 1 montre comment choisir le critère D-optimal.

2.3.2.1. Définition de la (des) réponse(s)

Lors de la définition de la réponse, trois types d'optimisation sont proposés. Cette indication permet de définir les courbes de désirabilité (fonction établie par Derringer et Suich, elle permet de trouver le meilleur compromis entre plusieurs réponses [DER.80]) :

- *« maximise »* cherche à maximiser *y* en fonction des modalités des x_i ;
- *« minimise »* cherche à minimiser *y* en fonction des modalités des x_i ;
- *« target »* cherche à cibler *y* autour d'une valeur prédéfinie en fonction des modalités des x_i.
- *« none »* sans objectif

Remarque : Le nombre de réponses n'influe pas sur le nombre d'essais du plan d'expériences. On peut donc étudier un nombre illimité de réponses en un même nombre d'expériences.

Exemple d'optimisation de la réponse et de courbe de désirabilité :

Celui-ci est extrait de [GOU.06] (cf. pages 50 à 66). Il montre la courbe de désirabilité associée à la maximisation de la réponse du gonflement d'une galette des rois. Dans cet exemple, on souhaite obtenir un décollement supérieur à 2,5 *mm* c'est-à-dire que l'expérimentateur définit la réponse comme satisfaisante si et seulement si y > 2.5 *mm*. Dans ce cas, la courbe de désirabilité correspondante est représentée sur la Figure 2.1. La désirabilité *D* varie de 0 à 1 ; 0 représentant la valeur que l'expérimentateur cherche à éviter et 1 l'objectif à atteindre. Sur ce graphique, la désirabilité maximale correspond à y > 2.5 *mm*.

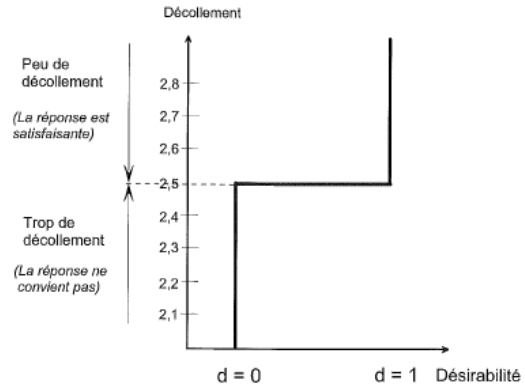


Figure 2.1 : Courbe de désirabilité y>2,5 [GOU.06]

Cette courbe peut s'exprimer plus finement et ce sera le cas dans nos interprétations par l'ajout d'une troisième zone où on considère que la réponse est partiellement satisfaisante. Sur la Figure 2.2 on distingue 3 zones :

- Zone *y < 2.3 mm*, la réponse est non satisfaisante,
- Zone *2.3 mm <y <2.8 mm*, la réponse est partiellement satisfaisante,
- Zone *y > 2.8 mm*, la réponse est totalement satisfaisante.

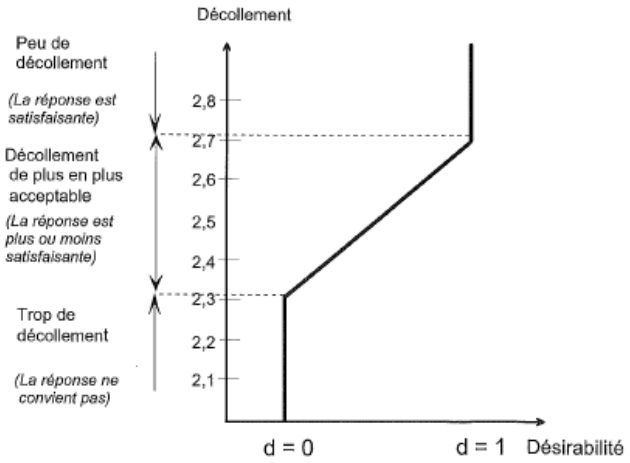


Figure 2.2 : Courbe de désirabilité 2.3<y<2.8 [GOU.06]

Cette courbe permet de comparer l'évolution de la désirabilité facteur par facteur (ici le poids, les trous, le chauffage et la cuisson) et ainsi de pouvoir déterminer un réglage optimal des combinaisons de facteurs pour obtenir une désirabilité maximale. Dans ce cas, la courbe de désirabilité ($d_{Désirabilité}$) est directement fonction des facteurs. La désirabilité observée sur la Figure 2.3 (définie comme satisfaisante pour un y > 2,5 *mm*), a une forme qui dépend des niveaux des quatre facteurs étudiés. Cette figure montre que le décollement obtenu est satisfaisant pour un poids avec un niveau +1, des trous avec un niveau -1, un chauffage avec un niveau entre -1 et 0 et une cuisson avec un niveau entre -1 et 0,7.

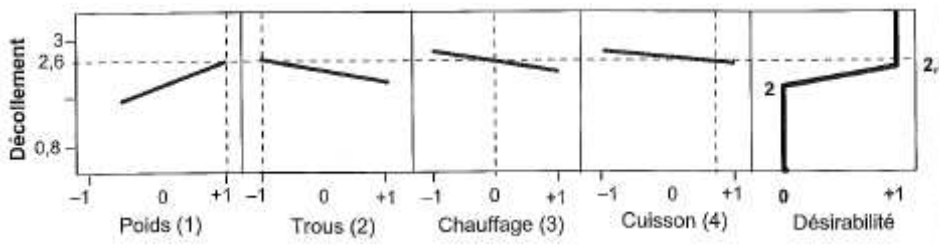


Figure 2.3 : Courbe de désirabilité application à 4 facteurs et y>2,5mm [GOU.06]

Dans le cas où plusieurs réponses sont étudiées, le logiciel calcule une fonction de désirabilité globale *D* dépendante des niveaux des quatre facteurs et des différentes

désirabilités locales d (la desirabilité locale est l'indicateur de satisfaction attaché à une réponse parmi l'ensemble des réponses étudiées et la désirabilité globale est l'indicateur de satisfaction de l'ensemble des réponses étudiées). La satisfaction globale de toutes les désirabilités locales *d* est atteinte pour une désirabilité globale *D=1*. La Figure 2.4 permet de conclure sur l'expérimentation en exprimant une réponse globale optimale (D=0,996) pour un poids de 1, des trous de -1, un chauffage de 0 et une cuisson de 0,67.

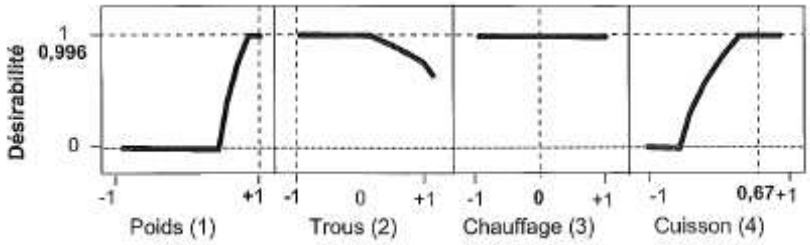


Figure 2.4 : Courbe de désirabilité à 4 facteurs et y > 2,5 [GOU.06]

2.3.2.2. Définition des facteurs

Le logiciel JMP permet de définir plusieurs types de facteurs (cf. l'IHM 4 de l'Annexe 1) :

- Les facteurs quantitatifs continus sont des facteurs pouvant prendre toutes les valeurs comprises entre -1 et +1 (par exemple : la variation du poids des voyageurs dans un train de la valeur -1 correspond à 0 personne par mètre carré, et +1 à 10 personnes par mètre carré).
- Les facteurs quantitatifs discrets sont des facteurs qui physiquement pourraient être définis comme continus, mais sont technologiquement limités à quelques valeurs de variation (par exemple : le dévers est un facteur qui peut physiquement varier de -7° à +7° mais en pratique ne prendra que trois valeurs -7°, 0 et +7°).
- Les facteurs qualitatifs sont des facteurs qui physiquement ne sont pas continus. Ils peuvent décrire un état (la sollicitation obstacle n'a que 2 états : présence ou absence) ou un contexte (les sollicitations « pluie » ou « poussière » sont aussi définit par deux états : présence ou absence).
-

Une fois les facteurs définis, une option du logiciel permet de rajouter au modèle des interactions d'ordre 1 ou 2. Dans l'exemple simulé, seules sont ajoutées les interactions d'ordre 1 : x_1x_2, x_1x_3 et x_2x_3 (cf. l'IHM 5, Annexe 1).

2.3.2.3. Sélection du nombre d'essais

Après avoir défini les facteurs, le logiciel propose quatre suggestions de nombre d'essais :

- « *minimal* » c'est-à-dire le nombre nécessaire d'essais à la réalisation de la régression linéaire.
- « *recommandé* » : nombre d'essais légèrement supérieur à la suggestion « *minimal* » déterminé de manière heuristique par le logiciel [GOU.06].
- « *intermédiaire* » : nombre d'essais intermédiaire entre la suggestion « *recommandé* » et la suggestion «*Complet*».
- «*Complet*» contient le nombre maximal d'essais possible ($I=I_S$.)

L'expérimentateur peut bien entendu ne pas suivre les recommandations du logiciel et fixer lui-même un nombre d'essais supérieur au nombre minimal d'essais. Enfin, il est également possible d'ajouter aux essais du plan d'expériences des points centraux (point ajouté au centre du domaine expérimental) et des répétitions (tous les points définis dans le plan seront testés un nombre de fois égal à la valeur de la répétition). Ces types de points (centraux et avec répétition) améliorent fortement la qualité des plans (cf. l'IHM 6 de l'Annexe 1) [GOU.06].

Intérêt des point centraux : en comparant les mesures de la variable dépendante au point central avec la moyenne du reste du plan. Il s'agit d'un contrôle de courbure (voir Box et Draper, 1987) : si la moyenne de la variable dépendante au centre du plan est significativement différente de la moyenne globale de tous les autres points du plan, nous avons alors de bonnes raisons de penser que l'hypothèse selon laquelle les facteurs seraient liés linéairement à la variable dépendante, est erronée.

Intérêt de la répétition : Elle permet d'estimer ultérieurement l'erreur pure de l'expérience. Il est en effet possible de calculer la dispersion des mesures pour chaque combinaison différente de niveaux de facteurs. Cette dispersion nous donne une indication de l'erreur aléatoire des mesures (facteurs incontrôlés, du manque de fiabilité de l'instrument de

mesure, etc.), puisque les observations répétées sont prises sous des conditions identiques (paramétrage des niveaux de facteurs). L'estimation de l'erreur pure peut être utilisée pour évaluer la taille et la significativité statistique de la dispersion attribuable aux facteurs manipulés.

Dans l'exemple cité, les plans sont traités suivent 4 configurations :

- Configuration 1 : Nombre d'essais minimal (8 essais).
- Configuration 2 : Nombre d'essais minimal avec un point central (9 essais = 8+1 point central).
- Configuration 3 : Nombre d'essais minimal avec trois répétitions ($k=3$) (24 essais = 8×3).
- Configuration 4 : Nombre d'essais minimal avec un point central et avec trois répétitions (27 essais = (8+1)×3).

La description des plans d'expériences est disponible en Annexe 2.

2.3.2.4. Réalisation des essais

Tous les essais du plan doivent être réalisés sans exception (condition sine qua non). En revanche, l'ordre des essais est aléatoirement défini par le logiciel JMP (les essais définis aléatoirement peuvent être déroulés dans n'importe quel ordre). Cet ordre peut être réajusté par l'expérimentateur notamment dans l'objectif d'optimiser les temps entre les essais consacrés à la maintenance et/ou aux réglages de certains paramètres du système (cf. § 3.4.4). Une fois la totalité des réponses déterminées et implantées dans le tableur du logiciel JMP, l'interprétation des résultats peut commencer.

Dans le cadre de cet exemple, pour chaque type de plan déterminé dans le paragraphe 2.3.2.3, le vecteur y est simulé avec une erreur ε définie par une loi normale centrée en 0 et d'écart-type $\sigma = 0$ (cas 1) (pas d'erreur expérimentale), $\sigma = 0{,}5$ (cas 2) (Tableau 2.1) et $\sigma = 1$ (cas 3). L'intégralité des vecteurs réponses est donnée en Annexe 2. Pour la valeur $\sigma = 1$, 2 cas sont distingués : le cas normal et le cas avec un point aberrant (point volontairement définit loin du modèle).

Le tableau 2.1 présente les résultats calculés pour le plan d'expériences à 9 essais comprenant un point central.

Essais	X_1	X_2	X_3	Y	*Erreur ε (σ =0,5)*
1	1	1	-1	15,082	0,482
2	0	0	0	10,260	0,260
3	1	-1	1	15,990	-0,010
4	1	-1	-1	18,983	-0,017
5	1	1	1	10,001	-0,399
6	-1	-1	-1	8,909	0,509
7	-1	1	1	0,933	-0,067
8	-1	-1	1	8,243	-0,357
9	-1	1	-1	2,676	0,676

Tableau 2.1 : Plan d'expériences avec neuf essais, un point central et un écart-type de l'erreur de 0.5

2.3.3. Interprétation du plan d'expériences

2.3.3.1. Choix de la méthode statistique d'interprétation

Lorsque les données sont rentrées dans le logiciel JMP, celui-ci propose plusieurs méthodes d'estimation des paramètres du modèle. Seule la méthode '*Standard Least Square*' (cf. § 2.2.4.), reposant sur la régression linéaire basée sur l'hypothèse des moindres carrés ordinaires, est utilisée dans le cadre de ces travaux. (cf. l'IHM 10 de l'Annexe1).

2.3.3.2. Evaluation de la qualité du plan d'expériences

2.3.3.2.1. Evaluation de la qualité du modèle

Le logiciel JMP fournit un graphique et deux tables permettant d'évaluer la qualité du modèle :

- « *Summary of fit* » (voir Annexe 1, IHM 11) : Cette analyse fournit plusieurs indicateurs de la qualité du modèle tels que le coefficient de détermination '*RSquare*'. Plus ce coefficient est proche de 1, meilleure est la qualité du modèle. Par exemple, un R^2 de 0.84 signifie que 84% de la variable étudiée « *y* » est expliquée par le modèle.

$$R^2 = \frac{Somme\ des\ carrés\ des\ réponses\ calculées}{Somme\ des\ carrés\ des\ réponses\ mesurées} = \frac{\sum_{i=1}^{I} \hat{y}_{i,k}{}^2}{\sum_{i=1}^{I} y_{i,k}{}^2}$$

Les résultats des coefficients de détermination R^2 dans notre exemple sont donnés dans le tableau 2.2 suivant :

Plans		R^2
8 essais Conf. 1	σ =0,5	0,9999
	σ =1	0,99
	σ =1+point aberrant	0,91
9 essais Conf. 2	σ =0,5	0,9994
	σ =1	0,98
	σ =1+point central aberrant	0,25
	σ =1+point aberrant	0,83
27 essais Conf. 4	σ =0,5	0,99
	σ =1	0,97
	σ =1+point central aberrant	0,44
	σ =1+point aberrant	0,58

Tableau 2.2 : Comparaisons des R pour les plans d'expériences - la couleur rouge est utilisée pour indiquer des valeurs relativement faibles pour R^2

Au vu de ces résultats, on constate que les R^2 diminuent en fonction de l'augmentation de la valeur de σ. Cela traduit la détérioration de qualité du modèle initial. On constate aussi que l'ajout de points aberrants (centraux ou pas) est immédiatement détecté par des valeurs très mauvaises du R^2 (valeurs en rouge).

- « *Predicted plot* » est une fonction du logiciel JMP (cf. Figure 2.5). Elle permet de comparer les réponses calculées par le modèle avec les réponses mesurées par celui-ci. La bissectrice de ce graphique (en rouge) représente la droite de correspondance entre le modèle et la réalité. Plus les points d'expérimentation sont proches de cette droite et plus le modèle est satisfaisant. Les zones elliptiques délimitées en pointillé de part et d'autre de la bissectrice permettent d'indiquer les points expérimentaux aberrants. Les courbes en pointillé rouge correspondent aux zones de confiance du modèle à 95% (cf. Figure 2.5). Les points

d'expériences proches du modèle se situent entres les deux hyperboles en pointillé rouge [GOU.06]. La ligne bleue représente la moyenne $y_{i,k}$ mesurés

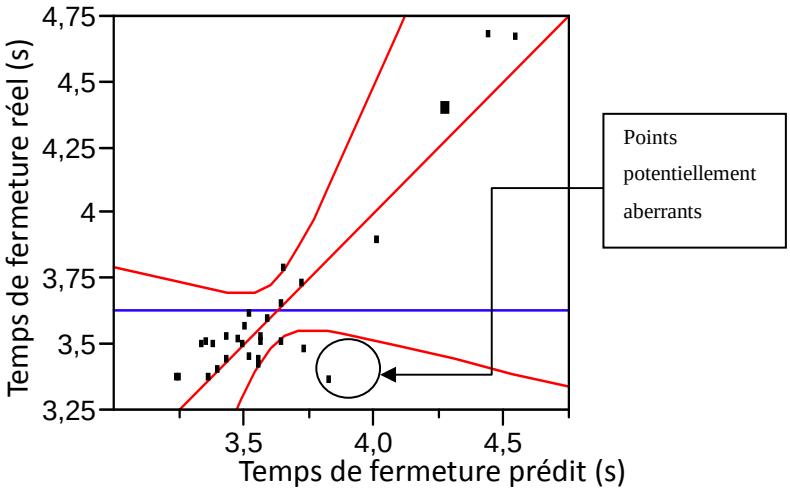


Figure 2.5 : Graphique de prédiction de l'indicateur temps de fermeture – la ligne bleue représente la moyenne des temps de fermeture réels

- « *Analysis of variance* » (voir Annexe 1, IHM 11). Cette analyse décompose la somme des carrés des écarts à la moyenne des réponses mesurées (*'sum of square'*) en deux sommes : la somme des écarts à la moyenne des réponses calculées (*'model sum of square'*) et la somme des carrés des résidus (*'error sum of square'*). Le calcul est le suivant :

$$\sum_{i=1}^{I}(y_i-\bar{y})^2=\sum_{i=1}^{I}(\hat{y}_i-\bar{y})^2+\sum_{i=1}^{I}(r_i)^2$$

où :

- y_i est la valeur observée de *y* au point expérimental *i*.
- $\bar{y}$ est la valeur moyenne des *y* sur l'ensemble des expérimentations.
- $\hat{y}_i$ est la valeur estimée de *y* pour l'expérimentation *i*.
- r_i est le résidu associé à l'expérimentation *i*. $r_i = y_i - \hat{y}_i$

Pour obtenir les carrés moyens ou variance ($V(r_i)$) (‘*Mean square*’), on divise ces sommes par les degrés de liberté (DF).

$$V(r_i) = \frac{1}{I-H}\sum_{i=1}^{I}(r_i)^2$$

où :

- I est le nombre de point expérimentaux.
- P est le nombre de paramètres.

$$Fratio = \frac{\text{somme des carrés du modèle}}{\text{somme des carrés des résidus}} = \frac{\sum_{i=1}^{I}(\hat{y}_{i,k} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{I}(r_i)^2}$$

Le ‘*F ratio*’ est le rapport entre la somme des carrés du modèle (basé sur les écarts type) et la somme des carrés des résidus. Ce rapport est appelé rapport de Fisher [SAP.90]. Plus le rapport est grand, plus la variation de la réponse est due aux variations des facteurs. Inversement, si le rapport de Fisher est proche de 1 alors le facteur a peu d’effet sur la réponse.

Observons dès lors les résultats des ‘*F-ratio*’ (tableau 2.3) :

Plans		F-ratio
8 essais Conf. 1	σ =0,5	29738
	σ =1	21,82
	σ =1+pt aberrant	1,89
9 essais Conf. 2	σ =0,5	625,6
	σ =1	23,5
	σ =1+ptc aberrant	0,11
	σ =1+pt aberrant	1,66
27 essais Conf. 4	σ =0,5	598,2
	σ =1	154,3
	σ =1+ptc aberrant	2,7
	σ =1+pt aberrant	4,636

Tableau 2.3 : Comparaisons des rapports de Fisher des plans d’expériences de l’exemple (les valeurs en rouge correspondent à des F-ratio insuffisants)

Le tableau montre bien qu'une erreur volontairement grande implique un rapport de Fisher de plus en plus proche de 1. Ainsi un modèle avec un $\sigma = 0,5$ est meilleur qu'un modèle avec un $\sigma = 1$. De plus la valeur du F-ratio chute immédiatement dans le cas où des points aberrants sont présents, alertant ainsi l'expérimentateur sur la qualité de ses expériences.

2.3.3.2.2. Evaluation de la qualité des paramètres du vecteur β

Après avoir déterminé par la méthode des moindres carrés les paramètres du modèle, l'estimation de la qualité de ces paramètres peut être obtenue via les résultats du test de Student [SAP.90].

Définition du test de Student : Le test de Student est un test paramétrique qui compare la moyenne observée d'un échantillon statistique à une valeur fixée, ou encore la probabilité observée d'un caractère à une probabilité théorique. Il permet aussi de comparer les moyennes de deux échantillons statistiques. En pratique pour un échantillon de n observations pour lesquelles le caractère A a été observé k fois et où l'hypothèse testé *H0="P(A)=p0"* avec un risque d'erreur a. Il est possible de dérouler le test suivant :

1. Calcule la probabilité observée :

$$p = \frac{k}{n}$$

2. Calcule l'écart du test :

$$t = \frac{|p - p_0|}{\sqrt{p(1-p)}} \times \sqrt{n}$$

3. recherche de l'écart critique t_a dans la table de la loi normale (si $a=0,05$, $t_a=1,96$, si $a=0,02$, $t_a=2,32$, si $a=0,01$, $t_a=2,58$).
4. si $t<t_a$, on accepte l'hypothèse, si $t>t_a$, on la rejette.

A partir du t calculé JMP calcule la probabilité que le paramètre soit négligeable *'Prob>|t|'* dit aussi *'p-value'*(cf. Figure 2.6).

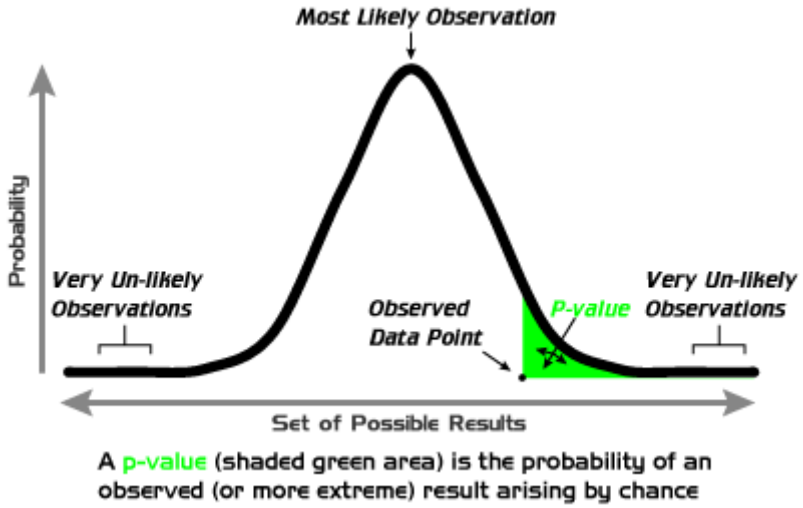


Figure 2.6 : Graphique d'illustration des p-value

La valeur de la p-value, est définie en recherchant la valeur pour laquelle l'aire en vert est égale à α de l'aire totale.

Cette *'p-value'* permet d'identifier dans le modèle les facteurs statistiquement pertinents. La plupart du temps, seuls les facteurs du modèle dont la *p*-value est inférieure à α seront retenus, α étant choisi par l'expérimentateur en fonction de son ressenti vis-à-vis de l'expérimentation. Néanmoins, il est usuel d'utiliser la valeur 0,05 voir 0,01 pour les modèles plus complets (modèle utilisé pour les applications militaires ou médicales) (voir Annexe 1 IHM 12).

Examinons les résultats des *'p-value'* pour l'exemple cité (cf Tableau 2.4) :

		β_1=5		β_2=-3	
		Valeur	Prob>|t|	Valeur	Prob>|t|
8 essais Conf. 1	σ =0,5	5,1	0,0018	-3,04	0,003
	σ =1	4,7	0,07	-3,37	0,97
	σ =1+pt aberrant	8,6	0,24	0,6	0,88
9 essais Conf. 2	σ =0,5	4,9	0,0004	-2,9	0,001
	σ =1	4,5	0,013	-3,9	0,017
	σ =1+ptc aberrant	4,5	0,6	-3,9	0,65
	σ =1+pt aberrant	8,7	0,13	0,23	0,133
27 essais Conf 3.	σ =0,5	5,1	<0,0001	-3	<0,0001
	σ =1	4,9	<0,0001	-2,9	<0,0001
	σ =1+ptc aberrant	4,9	0,003	-2,9	0,06
	σ =1+pt aberrant	6,2	<0,0001	-1,58	0,22

Tableau 2.4 : Comparaisons des *'p-value'* pour les coefficients β_1 et β_2 dans les plans d'expériences (les valeurs de *'p-value' trop grande sont marquées en rouge)*

Dans ce cas présent, le paramètre β_1 est identifié comme statistiquement pertinent pour un critère de *'p-value'* de 0,01, pour les cas :

- Conf. 1 et σ =0,5,
- Conf. 2 et σ =0,5,
- Conf. 3 et σ =0,5, σ =1 et σ =1 plus un point aberrant non central

Dans les autres cas, le facteur β_1 sera considéré comme nul (négligeable).

Ici, seules les estimations de β_1 comprises entre 4,9 et 5,1 ont bien une *p-value* acceptable.

2.3.3.3. Comparaison des différents modèles de l'exemple simulé

Suite à la génération des différents plans exposés ci-dessus, le tableau récapitulatif (tableau 2.5) résume les différents indicateurs de qualité et modèles générés par JMP. Dans ce tableau, les lignes rouges sont des lignes qui doivent être rejetées et les lignes vertes correspondent à des données acceptables.

		β_1=5		β_2=-3		β_3=-1		β_4=0,5		β_5=-0,8	
		Valeur	Prob>|t|	Valeur	Prob>|t|	Valeur	Prob>|t|	Valeur	Prob>|t|	Valeur	Prob>|t|
8 essais	σ=0,5	5,1	0,0018	-3,04	0,003	-0,9	0,0096	0,5	0,0183	-0,5	0,0164
	σ =1	4,7	0,07	-3,37	0,97	-0,15	0,8	0,69	0,4	-1,14	0,27
	σ =1+pt aberrant	8,6	0,24	0,6	0,88	3,8	0,46	4,6	0,4	2,8	0,56
9 essais	σ =0,5	4,9	0,0004	-2,9	0,001	-1,3	0,0054	0,4	0,422	-0,7	0,0018
	σ =1	4,5	0,013	-3,9	0,017	-1,14	0,164	0,31	0,61	-1,2	0,15
	σ =1+ptc aberrant	4,5	0,6	-3,9	0,65	-1,14	0,8	0,3	0,97	-1,2	0,88
	σ =1+pt aberrant	8,7	0,13	0,23	0,133	3,05	0,95	4,5	0,33	2,9	0,48
27 essais	σ =0,5	5,1	<0,0001	-3	<0,0001	-1	<0,0001	0,5	<0,0001	-0,8	<0,0001
	σ =1	4,9	<0,0001	-2,9	<0,0001	-0,88	0,0002	0,22	0,26	-0,9	<0,0001
	σ =1+ptc aberrant	4,9	0,003	-2,9	0,06	-0,88	0,55	0,22	0,87	-0,94	0,52
	σ =1+pt aberrant	6,2	<0,0001	-1,58	0,22	0,44	0,73	1,55	0,23	0,37	0,76

		β_6=-0,3		β_0=10		R^2	R^2ajst	RMSE	F-ratio	Prob>F
		Valeur	Prob>|t|	Valeur	Prob>|t|					
8 essais	σ =0,5	-0,5	0,0187	10,2	0,0009	0,9999	0,9999	0,04	29738	0,0044
	σ =1	-0,07	0,91	10,006	0,03	0,99	0,94	1,47	21,82	0,16
	σ =1+pt aberrant	3,9	0,46	14	0,15	0,91	0,43	14	1,89	0,5
9 essais	σ =0,5	-0,39	0,552	10,1	<0,0001	0,9994	0,997	0,27	625,6	0,0016
	σ =1	-0,88	0,23	10,2	0,0024	0,98	0,94	1,5	23,5	0,04
	σ =1+ptc aberrant	-0,88	0,91	13,65	0,19	0,25	-1,9	21,3	0,11	0,98
	σ =1+pt aberrant	3,3	0,44	13,9	0,05	0,83	0,33	10	1,66	0,42
27 essais	σ =0,5	-0,51	<0,0001	9,9	<0,0001	0,99	0,99	0,5	598,2	<0,0001
	σ =1	-0,53	0,012	9,5	<0,0001	0,97	0,97	0,95	154,3	<0,0001
	σ =1+ptc aberrant	-0,53	0,72	10,7	<0,0001	0,44	0,28	7,17	2,7	0,04
	σ =1+pt aberrant	0,79	0,54	10,7	<0,0001	0,58	0,45	6,2	4,636	0,0042

Tableau 2.5 : Comparaisons des plans d'expériences de l'exemple : les lignes rouges sont des lignes qui doivent être rejetées et les lignes vertes correspondent à des données acceptables

Il existe un seul plan qui donne des réponses acceptables à chaque test. Celui-ci est constitué de 27 essais avec $\sigma=0.5$. En effet, le cas de 27 essais est le seul à avoir des coefficients très proches du modèle postulé au départ. Ceci est confirmé par les *p-value* toujours inférieures à 0.0001. Le R^2 est très proche de 1 et le *F-ratio* très grand ce qui confirme la qualité du modèle. Néanmoins, cette campagne d'essais est aussi la plus coûteuse avec 27 essais à réaliser.

Si on compare cette campagne avec celle de 9 essais pour la même valeur de σ (excepté le coefficient β_7 et β_4) toutes les *p-value* sont inférieures à 0.01. Le R^2 et le *F-ratio* sont très bons. Il semble plus rentable économiquement de ne pas effectuer la campagne à 27

essais mais la campagne à 9 essais. En revanche, dans le cas ou σ=1, le modèle obtenu avec une campagne à 9 essais est insuffisant ce qui suppose l'utilisation d'une campagne à 27 essais.

2.3.3.4. Les outils graphiques

En plus des différents outils statistiques, le logiciel JMP propose à l'expérimentateur un grand nombre d'outils graphiques pour l'aider à analyser ces résultats (voir Annexe 1, IHM 12&13). Parmi ces graphiques, il existe des graphiques 2D dont les plus importants sont :

- Graphique 1 : *'Prediction profiler'* : Il montre la fonction désirabilité permettant de déterminer la meilleure combinaison de facteurs pour une réponse donnée (cf. le paragraphe 2.3.2.1).
- Graphique 2 : *'Interaction profiler'* : Celui-ci affiche un graphique permettant de voir l'influence des interactions. La Figure 2.7 montre le graphique des interactions du modèle simulé. Dans ce graphique, chaque interaction x_1x_2, x_1x_3 et x_2x_3. est exprimée de 2 manières. En effet, l'interaction x_1x_2 s'exprime de 2 manières ; la première est la variation de x_1 pour les différentes modalités de x_2 et la deuxième est la variation de x_2 pour les différentes modalités de x_1.

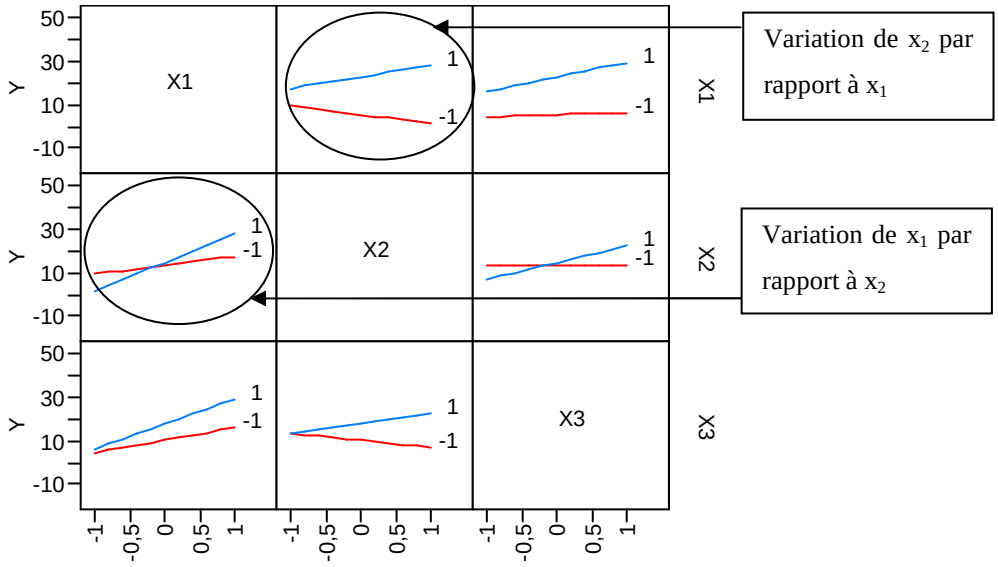


Figure 2.7 : Graphique des interactions

2.4. Conclusion

La première partie de ce chapitre a exposé les différents principes mathématiques permettant de définir la D-optimalité. La deuxième partie a explicité comment il était possible de déterminer les plans d'expériences D-optimaux, la troisième partie a proposé d'expliquer la construction mathématique d'un plan D-optimal grâce au logiciel SAS JMP. Cette démonstration fût accompagnée d'un exemple pratique qui a permis de vérifier que le logiciel a correctement répondu aux attentes de l'expérimentateur.

Dans ce chapitre, on a également montré que l'utilisation des plans d'expériences implique une rigueur et un protocole bien spécifiques pour réaliser les essais (variation simultanée des facteurs, ordre des essais, etc.). Cette constatation oblige à concevoir un banc d'essais adapté aux différentes spécificités de l'expérimentation.

Le chapitre suivant est donc consacré aux hypothèses mises en place pour concevoir le processus expérimental lié au banc d'essais des accès voyageurs.

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Plan d'expériences avec neuf essais, un point central et un écart-type de l'erreur de 0.5..... 67
Tableau 2.2 : Comparaisons des R pour les plans d'expériences - la couleur rouge est utilisée pour indiquer des valeurs relativement faibles pour R^2..... 68
Tableau 2.3 : Comparaisons des rapports de Fisher des plans d'expériences de l'exemple (les valeurs en rouge correspondent à des F-ratio insuffisants)..... 70
Tableau 2.4 : Comparaisons des 'p-value' pour les coefficients β_1 et β_2 dans les plans d'expériences (les valeurs de 'p-value' trop grande sont marquées en rouge)..... 73
Tableau 2.5 : Comparaisons des plans d'expériences de l'exemple : les lignes rouges sont des lignes qui doivent être rejetées et les lignes vertes correspondent à des données acceptables..... 74

Table des illustrations

Figure 2.1 : Courbe de désirabilité y>2,5 [GOU.06]..... 62
Figure 2.2 : Courbe de désirabilité 2.3<y<2.8 [GOU.06]..... 63
Figure 2.3 : Courbe de désirabilité application à 4 facteurs et y>2,5mm [GOU.06]..... 63
Figure 2.4 : Courbe de désirabilité à 4 facteurs et y > 2,5 [GOU.06]..... 64
Figure 2.5 : Graphique de prédiction de l'indicateur temps de fermeture – la ligne bleue représente la moyenne des temps de fermeture réels..... 69
Figure 2.6 : Graphique d'illustration des p-value..... 72
Figure 2.7 : Graphique des interactions..... 75

3. Processus expérimental de croissance de fiabilité des accès voyageurs

3.1. Introduction 80

3.2. Présentation du système accès voyageurs 80

3.2.1. Présentation du sous-système « porte » ____ 81
3.2.2. Présentation des sous-systèmes « comble-lacune UFR » et « marche mobile PMR » __ 83
3.2.3. Présentation de l'unité de contrôle / commande ____ 85

3.3. Description du processus expérimental de croissance de fiabilité 87

3.3.1. Campagne d'essais de fiabilité du fournisseur ____ 88
3.3.2. Campagne d'essais de fiabilité sur le banc d'essais BOMBARDIER : Processus expérimental 88

3.4. Construction des plans d'expériences 91

3.4.1. Les données d'entrée (facteurs)____ 92
3.4.2. Les données de sortie (réponses)____ 93
3.4.3. Plan d'expériences et planning projet ____ 93
3.4.4. L'optimisation de l'ordre des essais ____ 95

3.5. Application du processus expérimental aux accès voyageurs 98

3.5.1. Définition d'un essai ____ 98
3.5.2. Critères de succès ____ 99
3.5.3. Liste des facteurs à tester____ 100
3.5.4. Campagne 1 : Essais aggravés sur la porte avec sollicitations externes uniquement 100
3.5.5. Campagne 2 : essais aggravés sur les accès voyageurs avec l'ensemble des sollicitations 101
3.5.6. Campagne 3 : essais accélérés ____ 102
3.5.7. Campagne 4 : Campagne de validation aggravée ____ 102

3.6. Le banc d'essais 103

3.6.1. Synoptique du banc d'essais ____ 103
3.6.2. Réalisation technique des sollicitations____ 104
3.6.3. Instrumentation et acquisition des données____ 106
3.6.4. Mise sous surveillance des accès voyageurs ____ 107

3.7. Conclusion.....108

3.1. Introduction

Les deux précédents chapitres ont posé les bases scientifiques des expérimentations à mener dans le cadre de la thèse. Ils montrent que pour un système complexe et un domaine expérimental étendu, l'une des voies la mieux à même de répondre à la problématique de l'amélioration par les essais de la fiabilité des accès voyageurs est de recourir à des plans d'expériences D-Optimaux.

Ce chapitre décrit dans un premier temps le système étudié appelé par la suite « spécimen » ainsi que le domaine expérimental associé et le processus expérimental retenu (c.-à-d. la composition des différents essais). Cette démarche doit permettre au final d'augmenter la robustesse du spécimen et de valider la fiabilité globale qui doit avoir atteint a fortiori le niveau escompté. La présentation du banc d'essais développé spécifiquement pour cette étude fait l'objet de la dernière partie de ce chapitre.

Les notations et termes utilisés dans ce paragraphe sont explicités de manière détaillée dans le glossaire.

3.2. Présentation du système accès voyageurs

Le spécimen testé est un accès voyageurs d'un matériel roulant de type RER circulant sur le réseau ferré français (région parisienne). De par sa localisation et du fait de la très forte urbanisation, le train est soumis à une exploitation de type métro et par conséquent, à une sollicitation accrue des accès voyageurs due à de fréquents arrêts et à un flux important de passagers. Les accès voyageurs diffèrent suivant qu'ils sont montés sur les véhicules d'extrémité (équipés pour l'accessibilité des UFR (Unité en Fauteuil Roulant) et des PMR (Personne à Mobilité Réduite)), ou sur les véhicules intermédiaires (uniquement accès PMR). Etant donné que le véhicule d'extrémité a la configuration maximale en termes d'accès voyageurs, c'est celle-ci qui a été retenue pour les essais. Il va sans dire que les améliorations potentielles à l'issue des essais seront également répercutées pour les équipements des véhicules intermédiaires. Afin de répondre aux exigences du Client et en particulier, permettre une accessibilité au moyen de transport à tous les usagers, les accès voyageurs se

décomposent au final en trois parties distinctes : une large porte à double vantail, un comble-lacune UFR et une marche mobile PMR (cf. Figure 3.1).

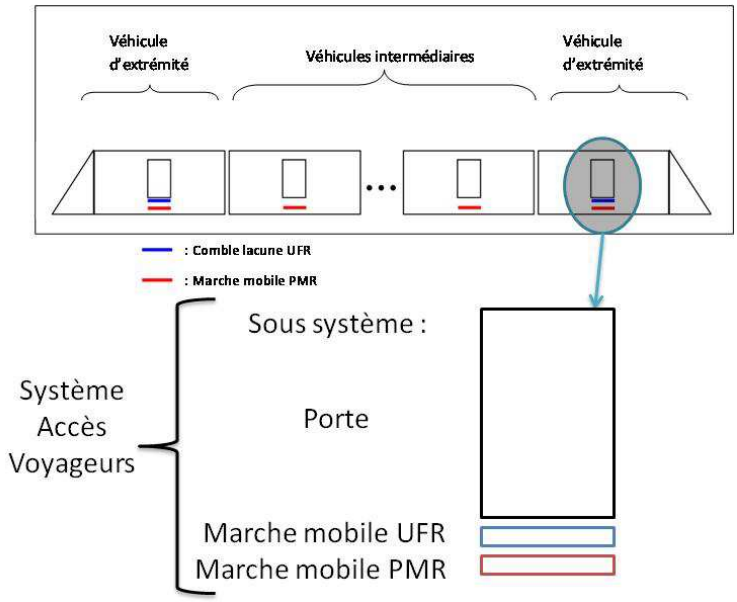


Figure 3.1 : Disposition des sous-systèmes accès voyageurs sur les véhicules du train

3.2.1. Présentation du sous-système « porte »

Chaque véhicule est équipé d'une porte par face située au centre du véhicule. La porte a une largeur libre de passage d'environ deux mètres (l'une des plus larges en exploitation en Europe). Elle est composée de deux vantaux animés d'un mouvement de coulissement extérieur. La porte est motorisée par un motoréducteur à courant continu, qui est accouplé à un système de vis sans fin convertissant le mouvement initial de rotation en un mouvement de translation. La vis sans fin est à pas inversés en son milieu donnant à chaque vantail un mouvement de translation symétriquement opposé.

La porte est constituée des sous-ensembles suivants :

- Sous-ensemble 1: Vantaux.
- Sous-ensemble 2 : Patins inférieurs des vantaux.
- Sous-ensemble 3 : Bâti.
- Sous-ensemble 4 : Vis sans fin.
- Sous-ensemble 5 : Accouplement poulie/courroie.

La Figure 3.2 représente le graphe de liaisons mécaniques entre les différents sous-ensembles du système.

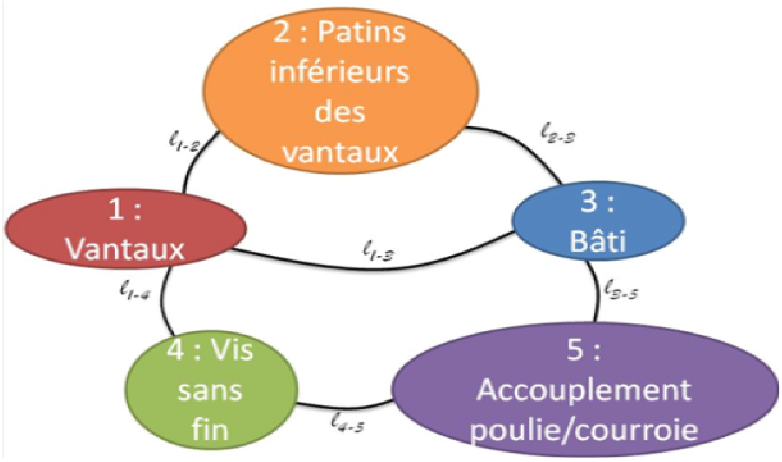


Figure 3.2 : Graphe de liaisons mécaniques entre les sous-ensembles du système

Les sous-ensembles sont donc liés par les liaisons mécaniques suivantes :

- $l_{1\text{-}2}$: Liaison encastrement entre (1) et (2).
- $l_{1\text{-}3}$: Liaison pivot glissant entre (1) et (3).
- $l_{2\text{-}3}$: Liaison appui plan entre (2) et (3).
- $l_{1\text{-}4}$: Liaison hélicoïdale entre (1) et (4).
- $l_{3\text{-}5}$: Liaison pivot entre (5) et (3).
- $l_{4\text{-}5}$: Liaison linéaire rectiligne entre (5) et (4).

La Figure 3.3 présente le schéma cinématique du sous-système porte.

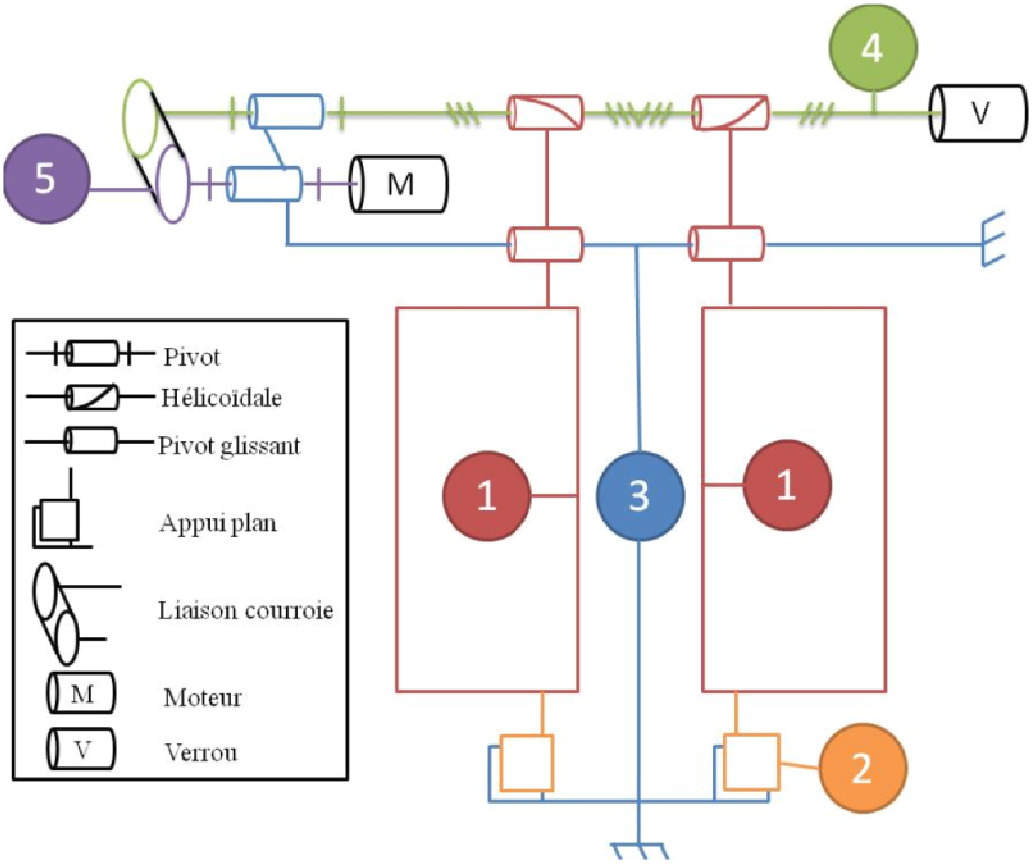


Figure 3.3 : Schéma cinématique du sous-système porte

3.2.2. Présentation des sous-systèmes « comble-lacune UFR » et « marche mobile PMR »

Ces deux sous-systèmes sont mécaniquement identiques. Seuls leurs fonctionnels diffèrent. La description ci-après s'applique par conséquent aux deux types de marches mobiles. Comme présenté en début de chapitre, le véhicule d'extrémité est équipé d'un comble-lacune UFR permettant l'accès aux usagers au niveau du plancher, et d'une marche mobile PMR située à un niveau intermédiaire entre le quai dit « bas » et le plancher du véhicule. Le véhicule intermédiaire est quant à lui uniquement équipé d'une marche mobile PMR qui permet l'accès au train à partir d'un quai « bas ». Quant à l'accès au quai dit « haut », il se fait via les comble-lacunes UFR et directement depuis le quai pour les véhicules intermédiaires.

La marche mobile est de type coulissant et est motorisée par un motoréducteur à courant continu. Le mouvement de rotation est converti par un système de poulies courroies.

La partie mobile de la marche est en liaison glissière avec le bâti. Le mouvement de translation est transmis par un système de pince courroie qui relie mécaniquement les courroies à la partie mobile de la marche.

Les principaux sous-ensembles du système sont :

- Sous-ensemble 1 : Poulie avant.
- Sous-ensemble 2 : Bâti.
- Sous-ensemble 3 : Marche mobile.
- Sous-ensemble 4 : Poulie arrière.
- Sous-ensemble 5 : Arbre moteur.
- Sous-ensemble 6 : Courroie.

La Figure 3.4 représente le graphe de liaisons mécaniques entre les sous-ensembles du système.

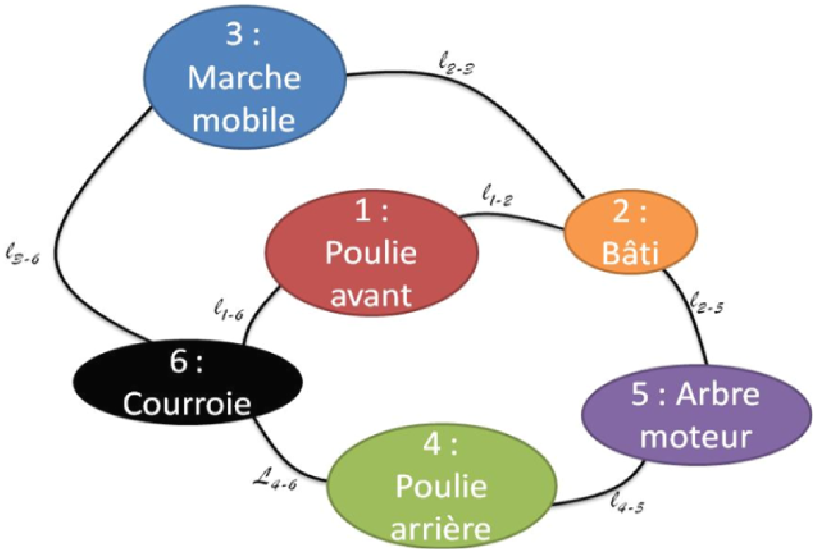


Figure 3.4 : Graphe de liaisons mécaniques entre les composants du système

Les sous-ensembles sont liés par les liaisons mécaniques suivantes :

- $l_{1\text{-}2}$: Liaison pivot entre (1) et (2).
- $l_{2\text{-}5}$: Liaison pivot entre (2) et (5).

- $l_{4\text{-}5}$: Liaison engrenage entre (4) et (5).
- $l_{4\text{-}6}$: Liaison poulie/courroie entre (4) et (6).
- $l_{1\text{-}6}$: Liaison poulie/courroie entre (6) et (1).
- $l_{3\text{-}6}$: Liaison encastrement entre (6) et (3).
- $l_{2\text{-}5}$: Liaison glissière entre (5) et (2).

La Figure 3.5 représente le schéma cinématique de la marche mobile ainsi que les liaisons entre chaque sous-ensemble du système.

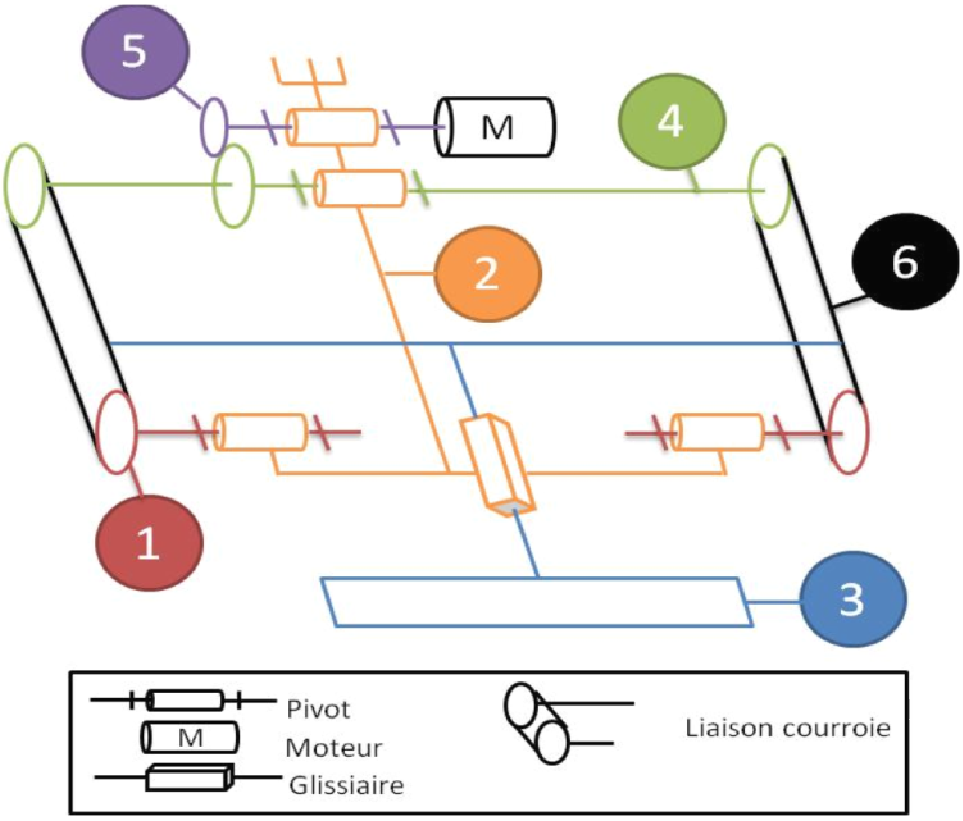


Figure 3.5 : Schéma cinématique du sous-système marche mobile

3.2.3. Présentation de l'unité de contrôle / commande

Les trois sous-systèmes (porte, comble-lacune UFR et marche mobile PMR) sont pilotés par une unité électronique communément appelée platine de contrôle / commande (en anglais 'DCU' pour Door Control Unit), alimentée en courant continu pour une valeur de 72

V. Chaque accès voyageurs est ainsi équipé d'une platine. Celle-ci a pour principale fonction d'assurer le relais entre les informations de pilotage envoyées par la cabine du conducteur et la commande mécanique de chaque sous-système (Figure 3.6).

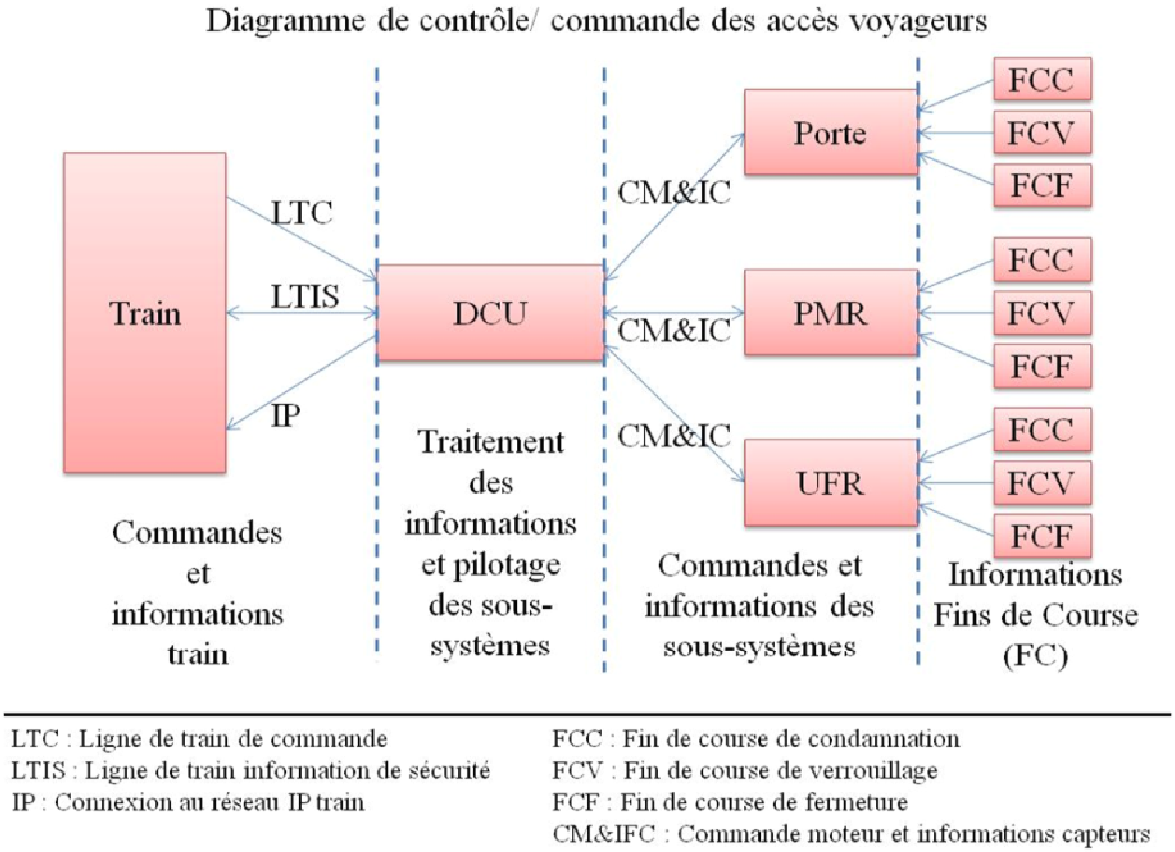


Figure 3.6 : Diagramme de contrôle / commande des sous-systèmes accès voyageurs

3.3. Description du processus expérimental de croissance de fiabilité

La définition du domaine expérimental pose trois difficultés majeures :

- Il est composé au total d'une quarantaine de facteurs. De plus, il est souhaitable de pouvoir analyser lors de ces essais l'influence directe des facteurs mais aussi, l'influence des interactions entre les facteurs. Au final, cela conduit à un domaine expérimental très vaste et difficile à parcourir en un nombre raisonnable d'essais.
- Le système est constitué de trois sous-systèmes mécaniquement indépendants de par leur conception. Du fait de son architecture, celui-ci rend le domaine expérimental complexe car les sollicitations doivent être appliquées de façon spécifique et non simultanées à chacun des sous-systèmes. Par exemple, lorsque les marches mobiles sont déployées, le poids des passagers sur les marches ne doit pas influer sur les performances de la porte.
- La dernière difficulté réside dans la nature même du domaine expérimental. L'ensemble des facteurs est constitué de facteurs de type quantitatif (exemple : la poussée des voyageurs est un facteur quantitatif variant de 0 à 13 kPa), et de facteurs de type qualitatif (exemple : la présence d'un obstacle lors de la fermeture de la porte ne peut prendre que deux niveaux « présence » ou « absence » d'un obstacle).

La prise en compte de l'ensemble de ces contraintes rend donc le domaine expérimental très complexe et demande une approche spécifique. Il n'est pas réaliste du point de vue des délais industriels de chercher à vouloir étudier l'ensemble des facteurs appliqués simultanément de manière individuelle. Pour cette raison, il a été décidé de créer un processus expérimental de croissance de fiabilité en trois étapes.

La première étape est constituée d'essais d'endurance réalisés chez le fournisseur au niveau des composants élémentaires du système et au niveau du système dans un environnement contraint.

La deuxième étape représente le cœur de la thèse. Elle est réalisée sur un banc d'essais conçu spécifiquement par les équipes de Bombardier pour tester le système accès voyageurs dans un environnement fortement sollicité représentatif des sollicitations observables en

service commercial. Cette étape s'articule autour de plusieurs campagnes d'essais successives explicitées ultérieurement.

La dernière étape correspond à un essai de vieillissement accéléré cette fois-ci sur train. C'est en quelque sorte une validation quasi finale des améliorations potentielles apportées lors des phases précédentes juste avant la mise en service commerciale effective.

3.3.1. Campagne d'essais de fiabilité du fournisseur

Le fournisseur du système accès voyageurs joue un rôle prépondérant dans la démarche d'amélioration anticipée de la fiabilité du produit qu'il livre au constructeur de matériel roulant. En tant que concepteur du système, il est à ce titre responsable des choix technologiques liés à la conception du produit. La première étape est de s'assurer, chez le fournisseur, et donc avant la livraison du produit, que tous les composants élémentaires constitutifs du système ont bien les niveaux attendus de fiabilité. En pratique, les efforts se portent principalement sur les composants ou sous-ensembles jugés critiques pour la fiabilité de service. On peut s'appuyer pour cela sur les études FMDS telles que l'APF (Analyse Préliminaire de Fiabilité) [APF.10].

Ainsi, chaque composant élémentaire dit critique a été soumis à un test de robustesse qui diffère suivant la nature du composant. En général, il s'agit d'un essai de vieillissement suivi d'un essai d'endurance. Une fois cette étape terminée, les composants élémentaires sont montés sur une maquette pour un essai d'endurance à un niveau sous-ensemble.

Les spécifications de ces essais sont définies d'un commun accord entre le constructeur de matériel roulant et le fournisseur. Cette phase représente une étape contractuelle indispensable à la validation de la conception.

3.3.2. Campagne d'essais de fiabilité sur le banc d'essais BOMBARDIER : Processus expérimental

Cette partie du processus expérimental s'articule autour de C campagnes d'essais successives avec chacune un objectif précis. Les C-1 premières campagnes d'essais ont pour but de déverminer le système et la dernière, de valider le système après prise en compte des

actions correctives liées aux défaillances observées antérieurement. Pour notre application, compte tenu du système étudié et des délais impartis, *C*=4 s'est avéré suffisant.

La Figure ci-après illustre la méthodologie expérimentale déployée dans le cadre de ces travaux. Au final, le but recherché est une amélioration de la courbe dite « en baignoire » avant expérimentation. L'effet attendu est une diminution de la durée de la période de jeunesse, une diminution de la valeur moyenne du taux de défaillances pendant la période de maturité, ainsi qu'un allongement de cette dernière période [GUE.01]. Le processus se décompose en trois étapes[TUR.10].

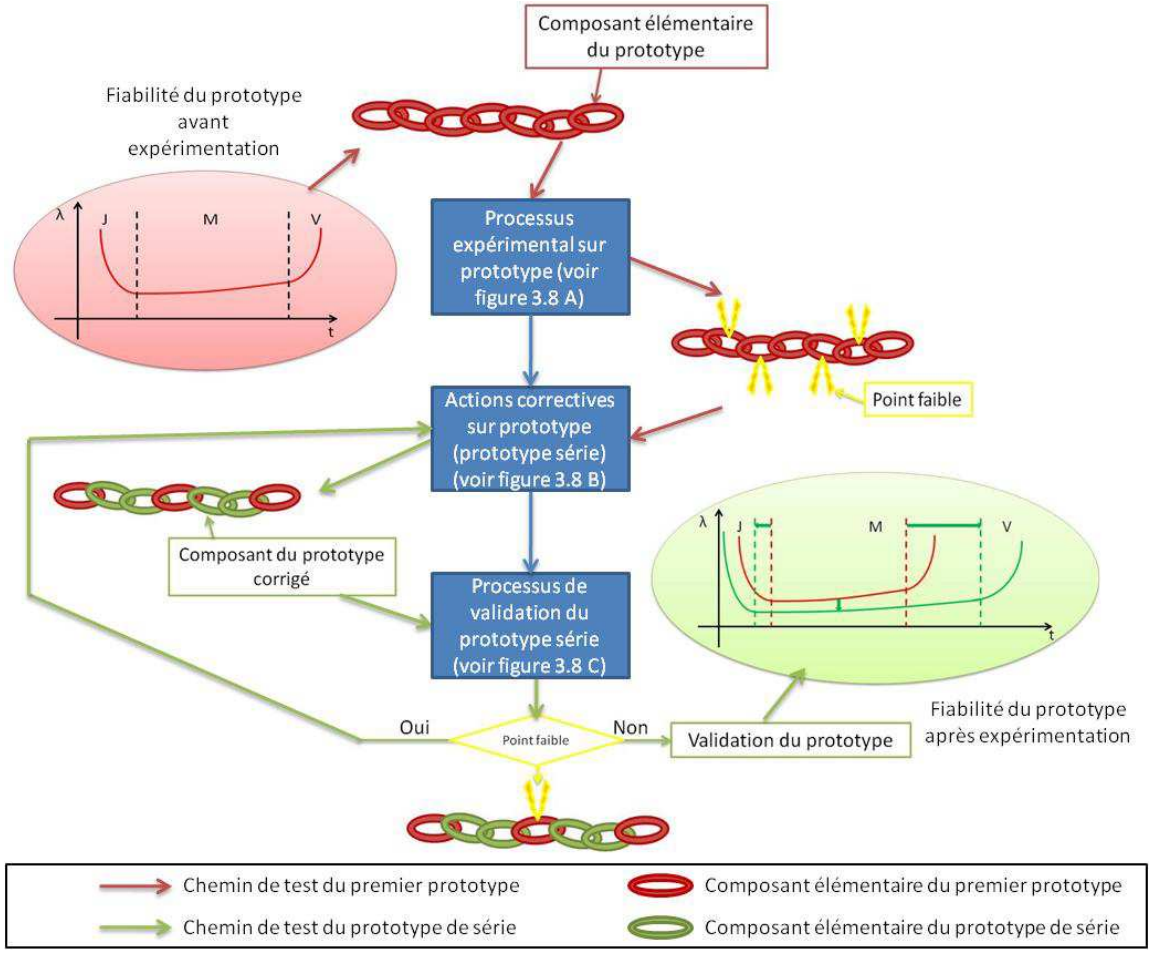


Figure 3.7 : Description schématique du processus expérimental d'amélioration de la fiabilité du système accès voyageurs

3.3.2.1. Processus expérimental sur prototype

Un **prototype** désigne le premier, ou l'un des premiers exemplaires d'un produit industriel. Cet exemplaire permet de faire des tests afin de valider les choix de conception de l'ensemble. La phase « Processus expérimental sur prototype » permet de détecter les faiblesses significatives à l'échelle des composants élémentaires du système accès voyageurs [CAU.12]. Cette première se décompose en trois campagnes d'essais (Figure 3.8, cadres 1, 2 et 3). Les campagnes 1 et 2 sont basées sur la méthode des essais de fiabilité dits essais aggravés [CET.05], réalisés non pas par une augmentation progressive des contraintes, mais par une succession d'applications de combinaisons de facteurs définie par un plan d'expériences. La campagne 1 soumet le système à un ensemble restreint de facteurs « sévérisés » (Figure 3.8, cadre 1). La deuxième campagne d'essais soumet le système à l'ensemble de tous les facteurs « sévérisés » (Figure 3.8, cadre 2). Les résultats des deux premières campagnes d'essais permettent de définir le « pire cas de sollicitations » du système servant à effectuer la campagne 3. Cette dernière est basée sur des essais accélérés (Figure 3.8, cadre 3). Elle soumet le système à une endurance par l'intermédiaire du jeu de facteurs définis précédemment jusqu'à l'apparition de la première défaillance du système. Cette défaillance sera expertisée et réparée.

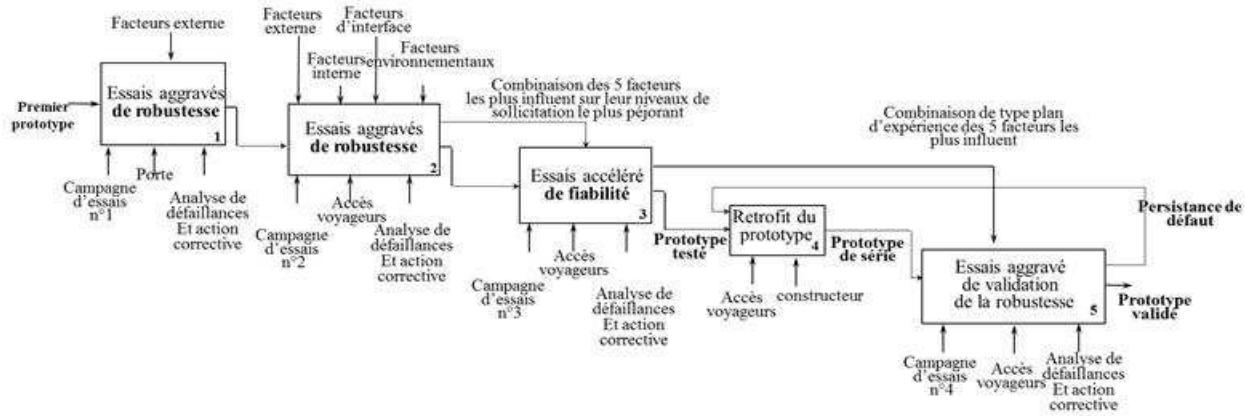


Figure 3.8 : Description schématique du processus expérimental d'amélioration de la fiabilité du prototype

3.3.2.2. Action corrective sur prototype

Toutes les défaillances relevées lors des trois premières campagnes d'essais sont remontées via des réunions communes avec le fournisseur et corrigées par le fournisseur. Le nouveau prototype qui en découle est appelé prototype de série (cf. Figure 3.8, cadre 4).

3.3.2.3. Processus de validation du prototype de série

Le prototype de série (réalisé à partir d'outillage de série), est utilisé dans de cadre de la campagne d'essais 4 qui a pour objectif de valider la robustesse du nouveau prototype par un essai de validation basé sur la même méthodologie que les campagnes d'essais 1 et 2 (cf. Figure 3.8, cadre 5).

Si cet essai n'est pas concluant alors, on revient à la phase deux du processus d'essais jusqu'à obtenir un niveau de robustesse acceptable vis-à-vis des sollicitations d'exploitation.

3.4. Construction des plans d'expériences

Ce paragraphe présente les hypothèses émises et les contraintes en phase d'avant-projet prises en compte pour le dimensionnement du plan d'expériences répondant aux besoins de l'étude. La première étape a consisté à définir le domaine expérimental que doit couvrir le plan d'expériences. Celui-ci est défini par l'ensemble des domaines de variation des facteurs constitutifs du plan d'expériences [GOU.00]. Il s'agit donc de lister en premier lieu toutes les sollicitations pouvant influer sur les accès voyageurs. Dans cette optique, plusieurs rencontres avec les différents experts métiers confrontés à cette problématique ont conduit à la détermination d'une liste exhaustive de sollicitations. Cette liste est par la suite traduite en termes de facteurs paramétrables pour les essais. Elle se décompose en quatre types de facteurs distincts décrits ci-après.

3.4.1. Les données d'entrée (facteurs)

Les facteurs peuvent être vus comme les variables d'entrée d'un plan d'expériences (cf. Figure 1.11.a). L'ensemble des facteurs des plans d'expériences sont issus de sollicitations exercées par le milieu extérieur sur le système d'accès voyageurs. Ils se décomposent en quatre catégories :

- **Sollicitations externes :**

Les sollicitations externes exercées sur le système accès voyageurs lors de l'exploitation du train sont : le dévers, le poids des voyageurs présents dans le train, le poids des voyageurs sur les marches mobiles lors de la montée et de la descente du train, la poussée des voyageurs sur la porte en position fermée, les ondes de pression, et les actes de vandalisme (chocs et obstacles).

- **Sollicitations d'interfaçage :**

Le système d'accès voyageurs est fixé sur une structure métallique mécano-soudée qui possède un nombre limité de tolérances de fabrication pouvant influer sur ses performances. Les contraintes dues à l'interface du système accès voyageurs avec le train sont appelés sollicitations d'interfaçage (exemple : le positionnement des plats de fixation du mécanisme de porte ou la configuration géométrique du trou de caisse).

- **Sollicitations internes :**

En partant du postulat qu'un système réglé lors de son montage en production ou lors de sa maintenance est susceptible de se dérégler en exploitation (exemples : positionnement des fins de course, réglage des tensions de courroies, ajustement de certaines pièces mécaniques, etc.), il convient d'étudier l'influence que peuvent avoir ces réglages sur les performances du système. Ainsi, l'ensemble des réglages internes au système accès voyageurs définit les sollicitations internes.

- **Sollicitations environnementales :**

Le train évoluant en climat tempéré, ces aspects n'ont pas une influence majeure et ne sont donc pas tous considérés hormis l'effet de la pluie, des différents produits d'entretien et de la poussière.

Remarque : Les sollicitations *obstacle* et *choc* sont trop destructives pour pouvoir être utilisées à chaque cycle d'ouverture/fermeture. De plus, lors de l'utilisation réelle en exploitation des accès voyageurs, les obstacles et les chocs ne sont effectivement pas présents à chaque cycle. Pour ces deux raisons, l'application de l'obstacle (en milieu de course du sous-système) et du choc (sur les sous-systèmes en position complètement ouvert ou complètement fermé) sur le banc de porte se fera de manière périodique (c-à-d. une sollicitation tous les *X* cycles). Dans notre cas, il a été décidé que la période d'application est définie par un cycle avec obstacle pour dix cycles « normaux » et par un cycle avec choc pour vingt cycles « normaux ».

3.4.2. Les données de sortie (réponses)

Pour chaque essai, les sorties initiales sont les signaux enregistrés. A partir des données temporelles recueillies, de nouvelles sorties peuvent être considérées, par exemple une série d'indicateurs de performance déterminée de façon à pouvoir, grâce à la méthode de régression des moindres carrés, établir la loi de variation de chaque indicateur en fonction des facteurs et des interactions entre eux. Les sorties initiales sélectionnées sont les positions et vitesse des parties mobiles des sous-systèmes et l'intensité des moteurs de chaque sous-système. Le détail de la construction des indicateurs est exposé dans le chapitre 4.

3.4.3. Plan d'expériences et planning projet

La question du temps d'expérimentation est cruciale. En effet, sur les trois années de développement, la conception et la réalisation du premier prototype se sont étalées sur environ un an et demi. Il restait donc un an et demi pour réaliser les quatre campagnes d'essais en prenant en compte le temps d'intégration du prototype au niveau du banc, le déroulement des essais, le processus de remontée et d'exploitation des données vers le fournisseur, les temps nécessaires à l'expertise de chaque défaillance et de chaque plan d'expériences et enfin, les corrections effectives de la conception du système jusqu'à sa validation.

Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été alors retenues :

- Première hypothèse : Le domaine expérimental est découpé en trois domaines expérimentaux distincts. En effet, les trois sous-systèmes porte et marches mobiles sont mécaniquement indépendants comme décrits précédemment.
- Deuxième hypothèse : En toute rigueur, l'utilisation des plans d'expériences implique d'utiliser un spécimen neuf pour chaque campagne d'essais ce qui, compte-tenu des contraintes budgétaires, n'est pas réalisable. Dans le cadre de cette étude, le nombre de cycles effectué lors de chaque campagne d'essais est très inférieur au nombre de cycles dont peut faire l'objet une porte et une marche mobile durant sa vie complète en exploitation, excluant ainsi les phénomènes de dégradation dus à la fatigue durant la période de maturité (justifiée par le nombre de cycles très limité). Cette hypothèse est valable uniquement dans le cas ou l'étude expérimentale porte sur la robustesse (recherche de pannes durant la période de jeunesse du système), contrairement à une étude de fiabilité qui va s'intéresser à une recherche de pannes durant toutes les phases de vie du système.
- Troisième hypothèse : La deuxième catégorie de facteurs portant sur les aléas de fabrication de la « caisse » c-à-d. la structure représentative du véhicule, n'entre pas en considération dans le cadre de ces travaux. Il serait en effet trop contraignant et trop coûteux de prévoir sur le banc un ensemble de « caisses interchangeables » permettant de représenter toutes les configurations possibles. Nous avons donc choisi un « pire cas » en termes de tolérances de fabrication de la caisse.
- Quatrième hypothèse : Le modèle de régression est supposé linéaire avec une erreur gaussienne.

Exemple pour la campagne d'essais numéro 2 : Le plan d'expériences du système contient 30 facteurs ce qui, pour un plan complet avec interactions (ξ_2), imposerait une campagne de 1 048 576 essais ! Alors que le fait d'utiliser un plan D-optimal (cf. chapitre 2) conduit à un nombre d'essais de 661 (ξ_{D2}).

L'application de la première hypothèse ramène le nombre de facteurs à 10 pour chacun des trois sous-systèmes et au final, la campagne comprend 77 essais ($\xi_{D2.1}$, $\xi_{D2.2}$ et $\xi_{D2.3}$). Une campagne de 77 essais devient dès lors réalisable en trois mois. Dans la pratique, le nombre d'expériences est légèrement supérieur de façon à obtenir par la méthode de régression des moindres carrés une approximation satisfaisante du modèle mathématique liant

les performances (indicateurs) aux facteurs, mais aussi une meilleure approximation de l'erreur expérimentale.

Une fois que le plan d'expériences est défini, il reste à déterminer l'ordre des essais. En général, lorsqu'un plan d'expériences est généré, l'ordre des essais est aléatoire. Dans notre cas, celui-ci a été optimisé de façon, là encore, à gagner du temps dans la réalisation des essais. En effet, chaque passage de l'essai *n* à n+1 demande le réglage d'une nouvelle configuration de facteurs. Or certains facteurs nécessitent davantage de temps de réglages (exemple : le passage d'un dévers de -7° à +7° demande 2 min alors que le passage d'une tension de courroies d'une valeur minimale à une valeur maximale va demander 30 min d'intervention sur le sous-système). Il est donc possible, en choisissant un ordre judicieux d'essais, de réduire le temps de réglages entre les essais et donc d'optimiser le temps global de la campagne d'essais [MUL.08] et [CHE.10].

3.4.4. L'optimisation de l'ordre des essais

Rappelons que le logiciel JMP génère un plan d'expériences où l'ordre des expérimentations qui le compose est aléatoire (le plan généré n'est pas unique mais la qualité de tous les plans générés est équivalente, au sens du critère retenu, ce qui explique notre choix de n'en considérer qu'un seul). De manière à minimiser la durée cumulée d'un plan d'expériences, nous pouvons optimiser l'ordre des essais en optimisant le temps de maintenance requis entre tous les essais. Le plan utilisé dans l'exemple ci-dessous est un plan à cinq facteurs (X_1 à X_5) chaque facteurs est normé et peut prendre 3 niveaux (-1, 0, 1). Cette optimisation se fait en deux étapes

L'étape une consiste à effectuer la première phase du tri en définissant des facteurs dits « prioritaires ». Le premier facteur prioritaire variera avec un minimum de transition (une seule transition par exemple pour un facteur ayant deux modalités (niveaux)). Le second variera en fonction du premier, c'est-à-dire au sein de chaque bloc du premier facteur prioritaire, et ainsi de suite.

Le Tableau 3.1 ci-après illustre ce premier tri avec ici X_3 définit comme premier facteur prioritaire et X_4 comme deuxième facteur prioritaire. La Table 1 est celle générée par

JMP2, la Table 2 représente le premier tri selon X_3 et la Table 3 le tri en respectant les priorités de X_3 et X_4.

Table 1					
Essais	**X_1**	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**X_5**
1	1	-1	0	-1	1
2	-1	-1	0	1	1
3	1	-1	-1	1	1
4	-1	1	-1	1	1
5	-1	1	0	1	-1
6	-1	-1	0	-1	-1
7	-1	-1	-1	1	-1
8	-1	1	-1	-1	-1
9	1	-1	-1	-1	-1
10	-1	-1	-1	1	0
11	-1	1	0	1	0
12	0	0	1	1	-1
13	-1	-1	-1	-1	1
14	1	1	0	-1	-1
15	0	0	1	1	0
16	1	-1	0	1	-1
17	-1	1	0	-1	1
18	0	0	1	-1	0
19	1	1	-1	1	-1
20	0	0	1	-1	-1
21	-1	-1	0	-1	0
22	1	-1	-1	-1	0
23	-1	1	-1	-1	0
24	0	0	1	-1	1
25	1	1	-1	1	0
26	1	-1	0	1	0
27	1	1	-1	-1	1
28	1	1	0	1	1
29	1	1	0	-1	0

Table 2					
Essais	**X_1**	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**X_5**
4	-1	-1	1	1	1
5	-1	0	1	1	-1
8	-1	-1	1	-1	-1
11	-1	0	1	1	0
14	1	0	1	-1	-1
17	-1	0	1	-1	1
19	1	-1	1	1	-1
23	-1	-1	1	-1	0
25	1	-1	1	1	0
27	1	-1	1	-1	1
28	1	0	1	1	1
29	1	0	1	-1	0
12	0	1	0	1	-1
15	0	1	0	1	0
18	0	1	0	-1	0
20	0	1	0	-1	-1
24	0	1	0	-1	1
1	1	0	-1	-1	1
2	-1	0	-1	1	1
3	1	-1	-1	1	1
6	-1	0	-1	-1	-1
7	-1	-1	-1	1	-1
9	1	-1	-1	-1	-1
10	-1	-1	-1	1	0
13	-1	-1	-1	-1	1
16	1	0	-1	1	-1
21	-1	0	-1	-1	0
22	1	-1	-1	-1	0
26	1	0	-1	1	0

Table 3					
Essais	**X_1**	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**X_5**
4	-1	-1	1	1	1
5	-1	0	1	1	-1
11	-1	0	1	1	0
19	1	-1	1	1	-1
25	1	-1	1	1	0
28	1	0	1	1	1
8	-1	-1	1	-1	-1
14	1	0	1	-1	-1
17	-1	0	1	-1	1
23	-1	-1	1	-1	0
27	1	-1	1	-1	1
29	1	0	1	-1	0
12	0	1	0	1	-1
15	0	1	0	1	0
18	0	1	0	-1	0
20	0	1	0	-1	-1
24	0	1	0	-1	1
2	-1	0	-1	1	1
3	1	-1	-1	1	1
7	-1	-1	-1	1	-1
10	-1	-1	-1	1	0
16	1	0	-1	1	-1
26	1	0	-1	1	0
1	1	0	-1	-1	1
6	-1	0	-1	-1	-1
9	1	-1	-1	-1	-1
13	-1	-1	-1	-1	1
21	-1	0	-1	-1	0
22	1	-1	-1	-1	0

Tableau 3.1 : Tri par la priorité des facteurs

La seconde étape consiste à optimiser la durée inter essais. La modification d'un paramètre peut exiger un démontage et/ou un remontage de quelques pièces. Pour réduire le temps nécessaire afin de réaliser tous les essais du plan d'expériences, il faut chercher à

diminuer au maximum le temps de transition entre les essais. Ce temps de transition dépend des opérations à effectuer entre les deux essais et en particulier des réglages et les tâches de maintenance induites par le changement des conditions expérimentales.

Ce procédé s'effectue à l'issue du tri par la priorité autrement dit, au sein de chaque bloc du dernier facteur prioritaire. Le Tableau 3.2 illustre ce tri sur les 12 premières lignes (constituant le bloc ou $X_3=1$) du Tableau 3.1.

Table 3					
Essais	**X1**	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**
4	-1	-1	1	1	1
5	-1	0	1	1	-1
11	-1	0	1	1	0
19	1	-1	1	1	-1
25	1	-1	1	1	0
28	1	0	1	1	1
8	-1	-1	1	-1	-1
14	1	0	1	-1	-1
17	-1	0	1	-1	1
23	-1	-1	1	-1	0
27	1	-1	1	-1	1
29	1	0	1	-1	0

Table 4					
Essais	**X1**	**X2**	**X3**	**X4**	**X5**
4	-1	-1	1	1	1
5	-1	0	1	1	-1
11	-1	0	1	1	0
28	1	0	1	1	1
19	1	-1	1	1	-1
25	1	-1	1	1	0
27	1	-1	1	-1	1
8	-1	-1	1	-1	-1
23	-1	-1	1	-1	0
17	-1	0	1	-1	1
14	1	0	1	-1	-1
29	1	0	1	-1	0

Tableau 3.2 : Tri par le temps de maintenance des facteurs

Le tri s'effectue par itération à partir de l'essai 4. L'objectif est de trouver le temps de maintenance entre l'essai 4 et les essais 5, 11, 19, 25 et 28 de façon à déterminer quel essai va remplacer le 5 dans la séquence d'essais optimisée. Dans le cas présent, le 5 est le meilleur successeur au 4 (tout comme le 11). Par contre l'essai 28 s'avère vis-à-vis de l'essai 19 un meilleur successeur pour l'essai 11. A la fin du tri, nous obtenons l'ordre final des essais.

3.5. Application du processus expérimental aux accès voyageurs

3.5.1. Définition d'un essai

Le processus expérimental mis en place, il s'agit désormais de définir les essais constitutifs de chaque campagne.

Chaque essai est une combinaison unique de facteurs associés aux sous-systèmes du système accès voyageurs. Mettre en évidence un défaut de conception ne se fait pas lors d'une seule ouverture et fermeture de porte, mais nécessite un certain nombre de cycles pour constater la défaillance et ce, sans pour autant trop contraindre le produit avec le risque de faire apparaître des phénomènes liés à la fatigue. Un essai est défini comme un ensemble de cycles élémentaires (un cycle élémentaire est la succession d'une ouverture suivie d'une fermeture pour chaque sous-système). Le nombre de cycles constitutifs de l'essai est calculé en fonction du nombre d'essais prédéfini et du temps associé à la réalisation de la campagne. Dans les campagnes d'essais numéros un, deux et quatre, le nombre de cycles par essais a été fixé à *N*. Cette valeur de *N* est calculée au moyen d'une formule (EQ.3.1.) reliant les variables du Tableau 3.3.

Variable	Valeur
Tps de réglage/essai (Tr) en heure	0,25
% tps maintenance (Tm)	5
% marge sécurité (Ms)	5
Tps travail/jour (Tj) en heure	7,5
Nb jour travaillé/mois (Nbj)	10
Duré de l'essai en mois (De)	1
Nb essais du PLEX (Nbe)	29
Tps de réglage préliminaire (Trp) en minute	30
Tps d'un cycle d'essai en seconde (Tc) en seconde	35

Calcul	Valeur
Tps total d'essais (heure) (TTe)	75
Tps total de réglage (TTr)	7,25
Tps total de maintenance (TTm)	3,75
Tps total de sécurité (TTs)	3,75
Tps disponible pour les essais (TDes)	60,25
Tps disponible pour un essai (TDe)	2,07758621
Nb cycle par essai (N)	162,26601

Tableau 3.3 : Tableau de calcul du nombre de cycles. Le tableau de gauche représente les variables de base servant au calcul des variables de droite conduisant à *N*.

On calcule le nombre de cycles au moyen de la formule suivante :

$$N = \frac{TDe \times 3600 - Trn \times 60}{Tc} \qquad \text{(EQ.3.1)}$$

où,

$$TDe = \frac{TDes}{Nbe} \quad \text{(EQ.3.2)}$$

$$TDes = TTe - (TTr + TTm + TTs) \quad \text{(EQ.3.4)}$$

$$TTe = Tj \times Nbj \times De \quad \text{(EQ.3.5)}$$

$$TTr = Tr \times Nbe \quad \text{(EQ.3.6)}$$

$$TTm = \frac{TTe \times Tn}{100} \quad \text{(EQ.3.7)}$$

$$TTs = \frac{TTe \times Ts}{100} \quad \text{(EQ.3.8)}$$

Le nombre de cycles *N* attribué au plan d'expériences 1 sera de *N*=160 cycles.

3.5.2. Critères de succès

L'objectif premier des campagnes 1, 2 et 3 est la détection de défaillances significatives. Par conséquent, tout arrêt du banc pour un dysfonctionnement peut être considéré au premier abord comme un « succès » (mis à part une défaillance liée au banc d'essais). Lorsqu'un essai arrive au terme des *N* cycles, on le considère comme un succès. Si une défaillance survient avant la fin des *N* cycles, il convient alors d'expertiser et de réparer le défaut de façon à terminer les *N* cycles et ainsi, de déclarer l'essai comme un succès.

Le second objectif est l'obtention des indicateurs de performance de façon à pouvoir déterminer les lois de comportement des sous-systèmes.

Inversement aux campagnes 1, 2 et 3 qui ont pour objectif de créer des défaillances, l'objectif premier de la campagne d'expériences 4 consiste à obtenir la loi de comportement de performance des sous-systèmes en fonction des sollicitations les plus influentes. Ainsi, tout essai atteignant les N cycles est déclaré comme un succès. Autrement dit, il ne devrait a priori plus avoir de défaillances significatives du système lors de cette campagne d'essais, chaque sous-système ayant été « corrigé » lors des phases précédentes.

3.5.3. Liste des facteurs à tester

Le Tableau 3.4 montre la liste des facteurs retenus par les experts de Bombardier.

Système accès voyageurs			
Type	**Nom du facteur**	**Min**	**Max**
Externe	Dévers	-7°	+7°
Externe	Charge des voyageurs	0 pers./m²	10 pers./m²
Externe	Choc	0 kN	8,7 kN
Interne	Chauffage des moteurs	20°	70°
Environnement	Pluie	sans	avec
Environnement	Poussière	sans	avec
Environnement	Produit de nettoyage	sans	avec
Sous-système porte			
Externe	Obstacle	0 obs./essais	16 obs./essais
Externe	Poussée des voyageurs	0 kPa	13 kPa
Interne	Réglage du patin inférieur	1 mm	5 mm
Interne	Réglage du fin de course fermeture	-2 mm	+2 mm
Sous-système comble-lacune UFR			
Externe	Charge sur comble-lacune	0 kg	275 kg
Interne	Réglage des tensions des courroies	9 mm	13 mm
Interne	Réglage du fin de course fermeture	-2 mm	+2 mm
Sous-système marche mobile PMR			
Externe	Obstacle	0 obs./essais	16 obs/.essais
Externe	Charge sur marche mobile	0 kg	275 kg
Interne	Réglage des tensions des courroies	9 mm	13 mm
Interne	Réglage du fin de course fermeture	-2 mm	+2 mm

Tableau 3.4 : Liste des facteurs appliqués au système d'accès voyageurs

3.5.4. Campagne 1 : Essais aggravés sur la porte avec sollicitations externes uniquement

Cette campagne consiste en des essais aggravés portant sur un nombre restreint de facteurs. Dans notre cas~~,~~ les retards de livraison induits par le fournisseur ont fait démarrer la campagne 1 avec uniquement le sous-système porte. Les facteurs étudiés sont les facteurs externes uniquement.

L'objectif de cette campagne est la prise en main de la méthode et du banc d'essai grâce un plan relativement court et ciblé sur la catégorie de facteurs qui, d'après l'avis des

experts, est la plus critique pour le système. Elle a aussi pour objectif de valider les programmes de traitement informatique (système d'acquisition sous FAMOS et traitement du signal sous MATLAB) des signaux associés à l'interprétation des résultats.

La liste des sollicitations appliquées est la suivante (Tableau 3.5) :

Sous-système porte			
Type	**Nom du facteur**	**Min**	**Max**
Externe	Dévers	-7°	+7°
Externe	Charge des voyageurs	0 pers./m²	10 pers./m²
Externe	Choc	0 kN	8,7 kN
Externe	Obstacle	0 obs./essais	16 obs./essais
Externe	Poussée des voyageurs	0 kPa	13 kPa

Tableau 3.5 : Liste des facteurs de la campagne d'essai 1

Le plan d'expériences associé est composé de 29 essais. Les 29 essais sont composés d'un plan D-optimal de 24 essais (nombre d'essais recommandé par JMP), plus 5 points d'essais centraux (essais référencés 13 à 17). Les points centraux sont ajoutés, à la demande de l'expérimentateur, pour augmenter la précision du plan d'expériences.

Cette campagne a été réalisée en septembre 2008 et a duré 1 mois. Les résultats qualitatifs de cette campagne d'essais sont exposés dans le paragraphe 4.4.

3.5.5. Campagne 2 : essais aggravés sur les accès voyageurs avec l'ensemble des sollicitations

La campagne 2 est composée du système accès voyageurs (sous-systèmes : porte marche mobile et comble lacune), soumis à l'intégralité des facteurs (explicité dans le Tableau 3.4).

Comme décrit dans l'exemple du paragraphe 3.4.3, l'hypothèse d'indépendance des systèmes permet de séparer le plan d'expériences sur les accès voyageurs en trois plans D-optimaux de 106 essais (les 106 essais sont composés des 96 essais recommandés par le logiciel JMP accompagnés de 10 essais représentant les points centraux). Chaque plan correspond au test d'un sous-système.

L'objectif de cette campagne est de faire ressortir l'intégralité des maillons faibles du prototype.

Cette campagne d'essais débuta en décembre 2008 et dura 3 mois. Les résultats qualitatifs de cette campagne d'essais sont exposés dans le paragraphe 4.4.

3.5.6. Campagne 3 : essais accélérés

La campagne 3 est un essai accéléré de 70 000 cycles. Les facteurs choisis pour cette accélération sont un dévers à + 4° et une charge voyageur à 8 personnes par mètre carré pour les trois sous-systèmes. Sont ajoutés à cela une poussé des voyageurs à 6 kPa pour la porte et une forte tension de courroies dans les marches.

Cette campagne débuta en avril 2009 et dura 5 mois.

3.5.7. Campagne 4 : Campagne de validation aggravée

Le plan de validation est un plan D-optimal de 24 essais et 5 points centraux du même type que la campagne une. Cette campagne s'applique aux trois sous-systèmes avec les facteurs explicités dans le Tableau 3.6. Dans ce tableau, on trouve en première partie les facteurs qui sont appliqués sur les trois sous-systèmes simultanément et ensuite, les facteurs appliqués spécifiquement sur chaque système (au final, il y a 5 facteurs par sous-système) :

Système accès voyageurs			
Type	**Nom du facteur**	**Min**	**Max**
Externe	Dévers	-7°	+7°
Externe	Charge des voyageurs	0 pers./m²	10 pers./m²
Externe	Choc	0 kN	8,-7 kN
Sous-système porte			
Externe	Obstacle	0 obs./essais	16 obs./essais
Externe	Poussée des voyageurs	0 kPa	13 kPa
Sous-système comble-lacune UFR			
Externe	Charge sur comble-lacune	0 kg	275 kg
Interne	réglage des tensions des courroies	9 mm	13 mm
Sous-système marche mobile PMR			
Externe	Obstacle	0 obs./essais	16 obs/.essais
Externe	Charge sur marche mobile	0 kg	275 kg

Tableau 3.6 : Liste des facteurs de la campagne d'essai 4

Le plan de validation fut réalisé en septembre 2010 sur un prototype conforme au système d'accès voyageurs livré sur les premiers trains de série.

La campagne 4 est composée de trois plans D-optimaux à 29 essais (un par sous-système). Les plans d'expérience liés à la campagne 4 sont donnés en annexe 4.

Les plans d'expérience étant définis, le paragraphe suivant va décrire succinctement le banc d'essais associé aux différentes campagnes.

3.6. Le banc d'essais

3.6.1. Synoptique du banc d'essais

Le banc d'essais peut être séparé en 5 sous-parties (Figure 3.9) :

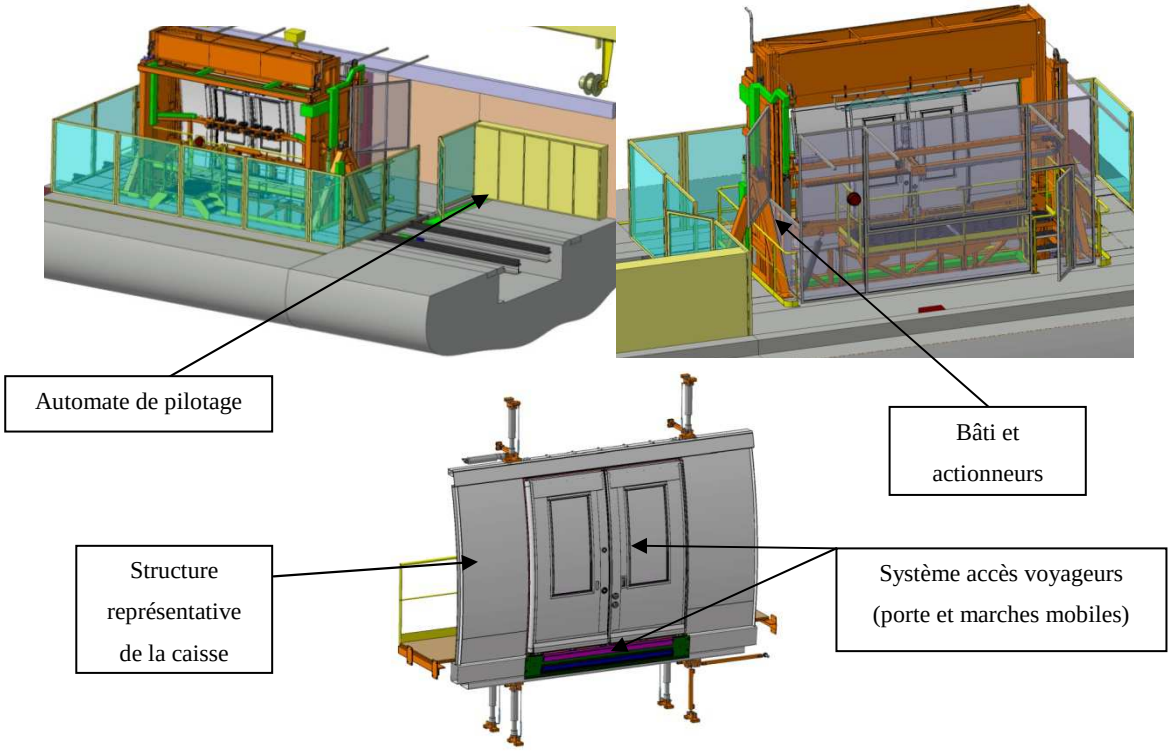


Figure 3.9 : Le banc d'essais des accès voyageurs

- Le spécimen de test ; dans ce cas présent, le système d'accès voyageurs.
- La structure représentative de la caisse, qui correspond en fait à une « réplique » d'une partie du véhicule dans laquelle le système est implanté.
- Le bâti du banc et les actionneurs à savoir, les différents dispositifs électromécaniques et électropneumatiques permettant de solliciter le spécimen.
- L'automate, qui contrôle la commande de tous les actionneurs.
- La centrale de pilotage et d'acquisition qui est un système informatisé gérant la commande du spécimen et la synchronisation des différents actionneurs, la transmission et la récupération de toutes les informations et enfin, l'acquisition des capteurs placés sur le spécimen ou directement sur le banc.

3.6.2. Réalisation technique des sollicitations

Les plans d'expériences définissent des combinaisons de facteurs. Ces combinaisons doivent être appliquées simultanément lors de la réalisation des *N* cycles représentant un essai. Cette simultanéité des sollicitations a nécessité une étude approfondie de

l'encombrement et des séquences d'activation de chaque actionneur (cf. Tableau 3.7), afin qu'ils ne se chevauchent pas lors de l'application de plusieurs sollicitations au cours d'un cycle. La réalisation précise des dispositifs simulant les sollicitations est fournie en Annexe 3. Les différents types d'actionneur sont décrits dans le Tableau 3.7 suivant, et leur disposition est décrite sur la Figure 3.10 :

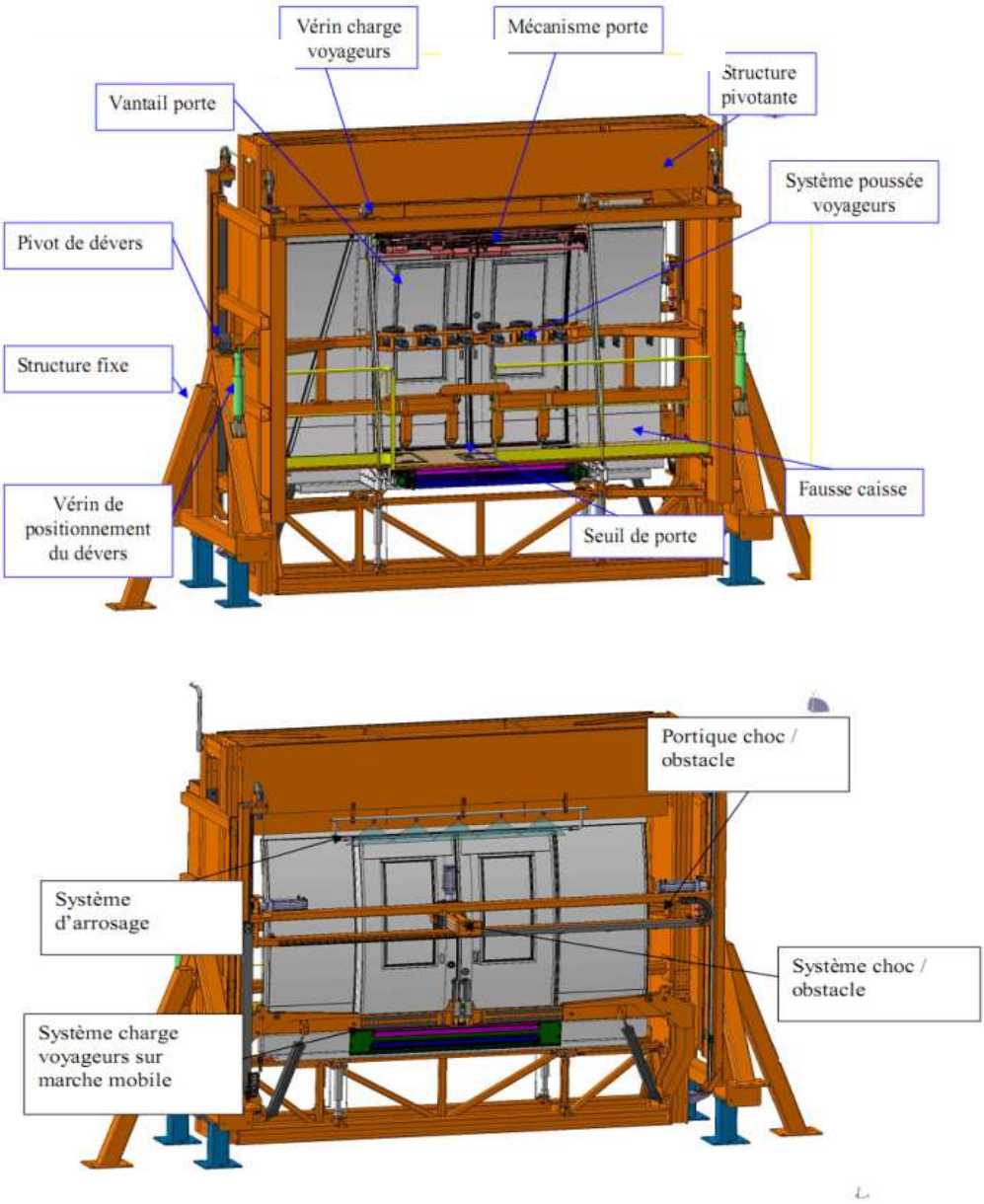


Figure 3.10 : Implantation des actionneurs sur le banc d'essais des accès voyageurs

système accès voyageurs		
Type	Nom du facteur	Type d'actionneur
Externe	Devers	Vérins électrique (pas à pas)
Externe	Charge des voyageurs	Vérins électrique (pas à pas)
Externe	Choc	Vérins pneumatiques avec bloqueur de piston
Interne	Chauffage des moteurs	Tapis chauffant électrique
Environnement	Pluie	Buses d'arrosage
Environnement	Poussière	Manuelle
Environnement	Produit de nettoyage	Buses d'arrosage
Sous système porte		
Externe	Obstacle	Palette rétractable
Externe	Poussée des voyageurs	Vérins pneumatiques
Interne	Réglage du patin inférieur	Manuelle
Interne	Réglage du fin de course fermeture	Manuelle
Sous système marche UFR		
Externe	Charge sur marche	Vérins pneumatiques
Interne	Réglage des tensions des courroies	Manuelle
Interne	Réglage du fin de course fermeture	Manuelle
Sous système marche PMR		
Externe	Obstacle	Palette rétractable
Externe	Charge sur marche	Vérins pneumatiques
Interne	Réglage des tensions des courroies	Manuelle
Interne	Réglage du fin de course fermeture	Manuelle

Tableau 3.7 : Liste des actionneurs utilisés pour la réalisation technique des facteurs

3.6.3. Instrumentation et acquisition des données

Le fonctionnement du banc d'essais est supervisé par une centrale d'acquisition qui pilote les ouvertures et fermetures du système ainsi que l'ensemble des actionneurs pneumatiques et électriques implantés dans le banc. Celle-ci centralise l'enregistrement de tous les capteurs du banc d'essais, que ce soit les capteurs servant à la commande ou à l'analyse des résultats. Cet enregistrement est géré par le logiciel FAMOS distribué par la société « Integrated measurement and control ». La centrale d'acquisition récupère notamment les signaux à partir desquels les indicateurs de performance sont calculés (voir Tableau 3.8) : trois capteurs de courant instrumentés sur les moteurs pour relever le courant (*I(t)*) et quatre capteurs de position instrumentés sur la partie mobile de chaque sous-système.

Signal Mesuré	Type
Position vantail droit	Capteur résistif filaire
Position vantail gauche	Capteur résistif filaire
Position marche UFR	Capteur laser
Position marche PMR	Capteur laser
Intensité moteur porte	Sonde de courant
Intensité moteur marche UFR	Sonde de courant
Intensité moteur marche PMR	Sonde de courant

Tableau 3.8 : Liste des capteurs

Au début du processus expérimental, il avait été décidé d'utiliser la platine de contrôle/commande de la porte pour mesurer l'ensemble des signaux. Celle-ci est en effet équipée de sondes de courant et calcule les positions des sous-systèmes à l'aide des codeurs instrumentés au niveau de chaque moteur. Toutefois, la fréquence d'échantillonnage est limitée à 10 Hz. Cette fréquence d'échantillonnage étant insuffisante, le banc d'essais a été instrumenté avec les capteurs du Tableau 3.8 avec un échantillonnage à 100Hz. En effet, les fortes variations du courant (fort pic de courant pendant les phases de démarrage du système) imposent d'après le théorème de Shannon l'utilisation d'une vitesse d'acquisition supérieure à 10 Hz.

3.6.4. Mise sous surveillance des accès voyageurs

Les sollicitations lors des essais de type aggravé peuvent, en théorie, dégrader le spécimen jusqu'à le rendre hors service (recherche des limites technologiques). Cette dégradation, qui peut être acceptable au niveau d'un composant élémentaire, ne l'est pas pour le spécimen. Le banc d'essais a donc été instrumenté, en se basant sur les calculs d'éléments finis du système, de jauges de déformation (échantillonnage à 1000 Hz, ce choix d'échantillonnage a été réalisé par le service essais de bombardier) contrôlant que le système travaille toujours dans le domaine élastique. Tout dépassement des limites élastiques déclenche donc l'arrêt immédiat du banc et est considéré comme une défaillance de conception du spécimen.

3.7. Conclusion

Ce chapitre a posé les bases des expérimentations menées durant cette thèse. La première partie a présenté le spécimen à tester puis le domaine expérimental associé dont la principale caractéristique est d'être très étendue. La deuxième partie montre l'articulation entre les différents essais pour atteindre les objectifs d'amélioration de fiabilité escomptée. Enfin, la dernière partie de ce chapitre a présenté le banc d'essais conçu dans le cadre de cette thèse pour réaliser les jeux de données à exploiter statistiquement de façon à mettre en évidence les différents points d'amélioration du système, les marges de robustesse du système et les équations reliant la performance aux sollicitations rencontrées en exploitation

Le chapitre suivant a pour objet de présenter les différents résultats issus des campagnes d'essais qu'ils soient qualitatifs (expertise des défaillances) ou quantitatifs (analyse statistique des résultats).

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Tri par la priorité des facteurs..... 96
Tableau 3.2 : Tri par le temps de maintenance des facteurs..... 97
Tableau 3.3 : Tableau de calcul du nombre de cycles. Le tableau de gauche représente les variables de base servant au calcul des variables de droite conduisant à NBc..... 98
Tableau 3.4 : Liste des facteurs appliqués au système d'accès voyageurs..... 100
Tableau 3.5 : Liste des facteurs de la campagne d'essai 1..... 101
Tableau 3.6 : Liste des facteurs de la campagne d'essai 4..... 103
Tableau 3.7 : Liste des actionneurs utilisés pour la réalisation technique des facteurs..... 106
Tableau 3.8 : Liste des capteurs..... 107

Table des illustrations

Figure 3.1 : Disposition des sous-systèmes accès voyageurs sur les véhicules du train..... 81
Figure 3.2 : Graphe de liaisons mécaniques entre les sous-ensembles du système..... 82
Figure 3.3 : Schéma cinématique du sous-système porte..... 83
Figure 3.4 : Graphe de liaisons mécaniques entre les composants du système..... 84
Figure 3.5 : Schéma cinématique du sous-système marche mobile..... 85
Figure 3.6 : Diagramme de contrôle / commande des sous-systèmes accès voyageurs..... 86
Figure 3.7 : Description schématique du processus expérimental d'amélioration de la fiabilité du système accès voyageurs..... 89
Figure 3.8 : Description schématique du processus expérimental d'amélioration de la fiabilité du prototype..... 90
Figure 3.9 : Le banc d'essais des accès voyageurs..... 104
Figure 3.10 : Implantation des actionneurs sur le banc d'essais des accès voyageurs..... 105

4. Analyse Statistique

4.1. Introduction 112

4.2. Méthode de création des indicateurs 112

4.2.1. Caractérisation des données : Les signaux temporels _____ 112
4.2.2. Indicateurs basés sur le signal position $P_p(t)$ _____ 114
4.2.3. Indicateurs basés sur le signal intensité du moteur *Ip(t)* _____ 115

4.3. Résultats qualitatifs liés aux campagnes d'essais 1 à 3 117

4.3.1. Défaillances mécaniques _____ 117
4.3.2. Défaillances électroniques _____ 120
4.3.3. Défaillances de réglage _____ 120
4.3.4. Défaillance de qualité du prototype _____ 122

4.4. Analyse quantitative de la campagne 1 122

4.5. Analyse quantitative de la campagne 4 123

4.5.1. Les facteurs du plan 4 _____ 123
4.5.2. Analyse descriptive _____ 124
4.5.3. Analyse inférentielle _____ 132

4.6. Conclusion 140

4.1. Introduction

Dans un premiers temps, le processus de calcul des indicateurs à partir des signaux temporels extraits des différentes campagnes d'essais est présenté.

Ce chapitre expose ensuite les résultats obtenus grâce à ce processus expérimental avec en première partie, les résultats qualitatifs liés aux trois premières phases du processus puis en seconde partie, les résultats quantitatifs obtenus lors de la phase de validation du prototype.

4.2. Méthode de création des indicateurs

4.2.1. Caractérisation des données : Les signaux temporels

Chaque essai est constitué de N cycles (rappel : Un cycle est composé d'un mouvement d'ouverture suivi d'un mouvement de fermeture du système accès voyageurs). Ce nombre de cycles a été défini comme le nombre minimal d'essais nécessaires pour visualiser une défaillance, mais suffisamment faible pour que la somme de tous les cycles de l'ensemble des campagnes d'essais soit inférieur au nombre de cycles effectués par un accès voyageur durant la phase de jeunesse en exploitation commerciale (env. 70 000). Ce choix permet de valider l'hypothèse que chaque défaillance (ou diminution) des performances observée, est effectivement due à un réel problème de robustesse et non à des effets de fatigue. De plus, le nombre de cycles est limité par le planning du projet. Ici, N=160 cycles ouverture/fermeture.

Conformément à la démarche d'analyse statistique en 5 étapes évoquée dans le premier chapitre, il est nécessaire de construire un ensemble d'indicateurs à partir de signaux temporels issus de capteurs (étape de caractérisation). Quinze signaux temporels ont été utilisés :

- Le signal booléen de commande du sous-système « porte $C_p(t)$, comble-lacune UFR $C_{ufr}(t)$ et marche mobile PMR $C_{pmr}(t)$ », enregistré à partir du pupitre de commande du banc d'essais, à la fréquence de 100 Hz.

- Le signal booléen de détection du sous-système ouvert « porte $O_p(t)$, comble-lacune UFR $O_{ufr}(t)$ et marche mobile PMR $O_{pmr}(t)$ », enregistré à partir d'une estimation basée sur des mesures faites par la platine de contrôle / commande des sous-systèmes (fréquence de 10 Hz).
- Le signal booléen de détection du sous-système fermé et verrouillé « porte $CL_p(t)$, comble-lacune UFR $CL_{ufr}(t)$ et marche mobile PMR $CL_{pmr}(t)$ », enregistré à partir de la relecture des fins de course fermeture et verrouillage des sous-systèmes (fréquence de 10 Hz).
- Le signal de position des sous-systèmes « porte $P_p(t)$, comble-lacune UFR $P_{ufr}(t)$ et marche mobile PMR $P_{pmr}(t)$ », enregistré à partir d'un capteur résistif filaire instrumenté sur les vantaux de la porte, et à partir de deux capteurs laser installés sur les marches mobiles UFR et PMR (fréquence de 100 Hz) (cf. Figure 4.1).
- Le signal d'intensité des courants moteurs « porte $I_p(t)$, comble-lacune UFR $I_{ufr}(t)$ et marche mobile PMR $I_{pmr}(t)$ », enregistré à partir de sondes de courant à la fréquence de 100 Hz (cf. Figure 4.1).

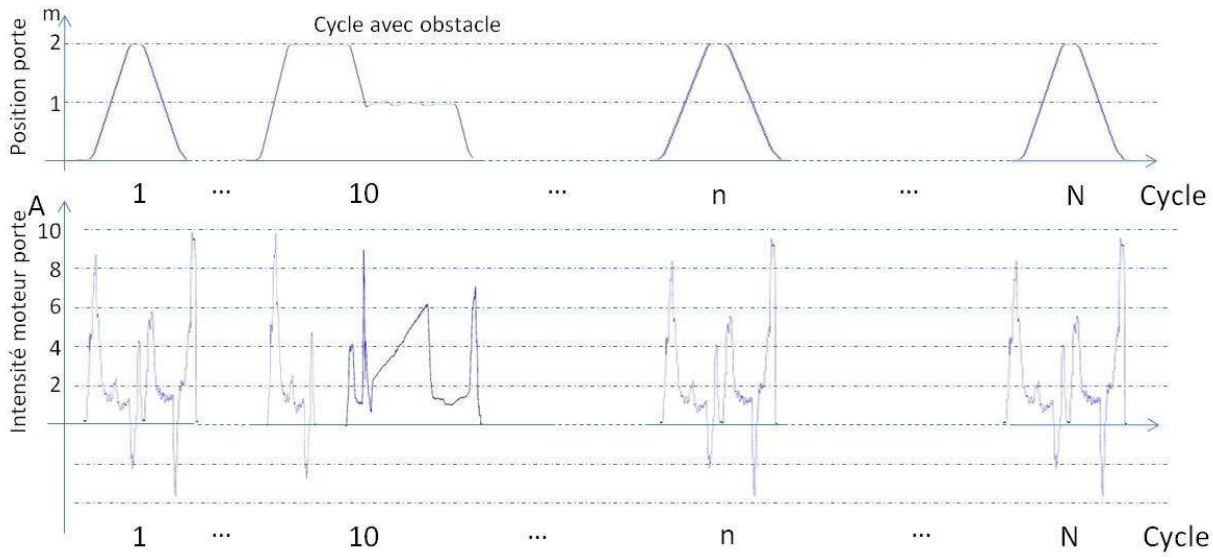


Figure 4.1 : Les signaux temporels Position Porte Pp(t) (position relative entre les deux vantaux) et Intensité Courant Moteur Porte Ip(t)

Chaque signal temporel est ensuite analysé grâce à un programme spécifique conçu avec le logiciel Matlab pour finalement obtenir six indicateurs. Le détail de la construction des indicateurs est exposé ci-dessous.

4.2.2. Indicateurs basés sur le signal position $P_p(t)$

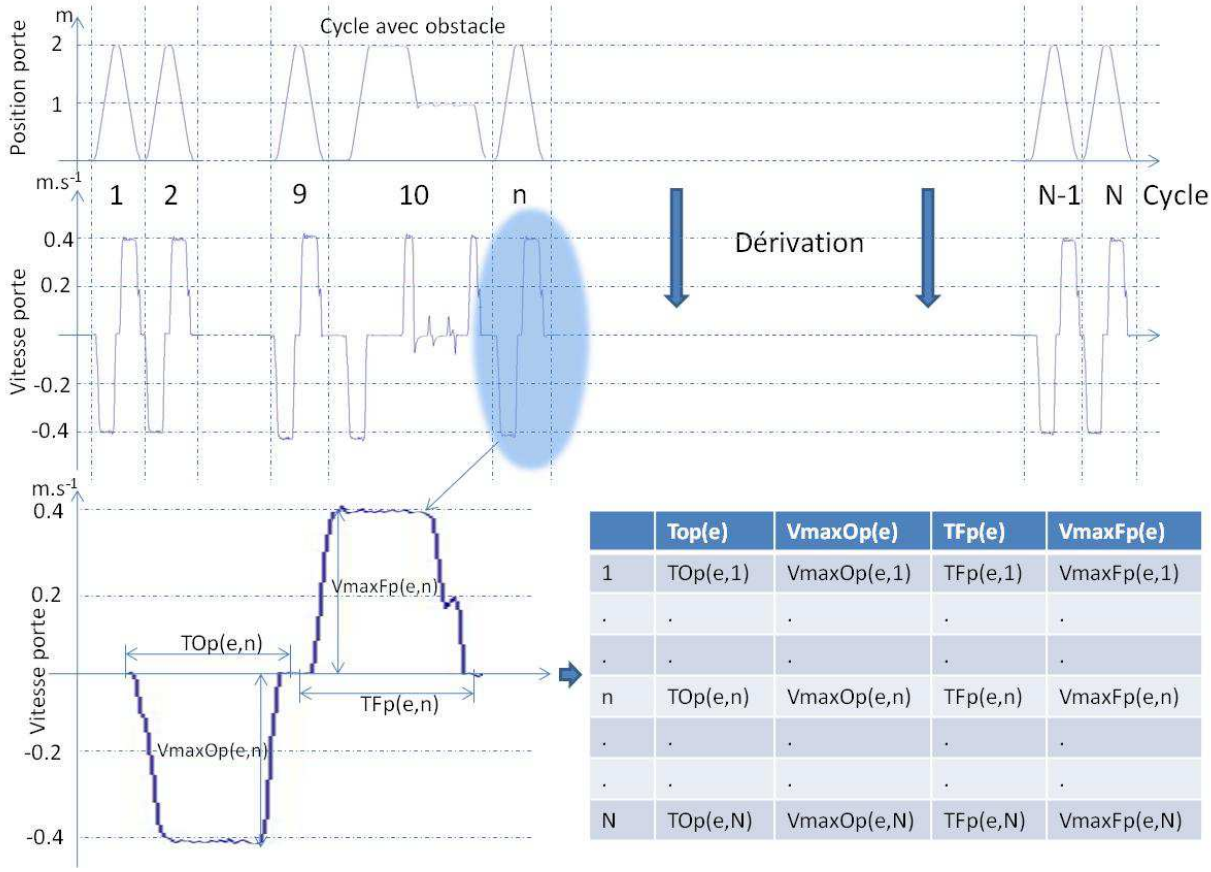
Les indicateurs sont calculés pour chaque cycle puis, pour caractériser l'essai, on utilise la moyenne arithmétique. Quatre indicateurs de performance sont définis à partir de $P_p(t)$:

- Le temps d'ouverture de chaque sous-système sur l'essai *e* : $TO_P(e)$.
- Le temps de fermeture de chaque sous-système sur l'essai *e* : $TF_P(e)$.
- La vitesse maximale atteinte par chaque sous-système durant une ouverture sur l'essai *e* : $VmaxO_P(e)$.
- La vitesse maximale atteinte par chaque sous-système durant une fermeture sur l'essai *e* : $VmaxF_P(e)$.

La vitesse de la porte en ouverture « $Vo_P(t)$ » est calculée à partir de la dérivée de la position en ouverture « $Po_P'(t)$ ». Ensuite, la recherche du maximum de $Vo_P(t)$ permet de déterminer la vitesse maximale « $VmaxO_P(e,n)$ » pendant l'ouverture de la porte (cf. Figure 4.2).

On obtient ensuite l'indicateur $VmaxO_P(e)$, où *e* est le numéro de l'essai, en effectuant la moyenne sur les N cycles de $VmaxO_P(e,n)$, définie par l'équation suivante :

$$VmaxO_p(e) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} VmaxO_p(e,n)$$



	Top(e)	VmaxOp(e)	TFp(e)	VmaxFp(e)
1	TOp(e,1)	VmaxOp(e,1)	TFp(e,1)	VmaxFp(e,1)
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
n	TOp(e,n)	VmaxOp(e,n)	TFp(e,n)	VmaxFp(e,n)
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
N	TOp(e,N)	VmaxOp(e,N)	TFp(e,N)	VmaxFp(e,N)

Figure 4.2 : Elaboration des indicateurs relatifs aux temps d'ouverture et de fermeture, et aux vitesses maximales d'ouverture et de fermeture.

4.2.3. Indicateurs basés sur le signal intensité du moteur *Ip(t)*

Deux indicateurs de performance sont définis à partir de $I_p(t)$:

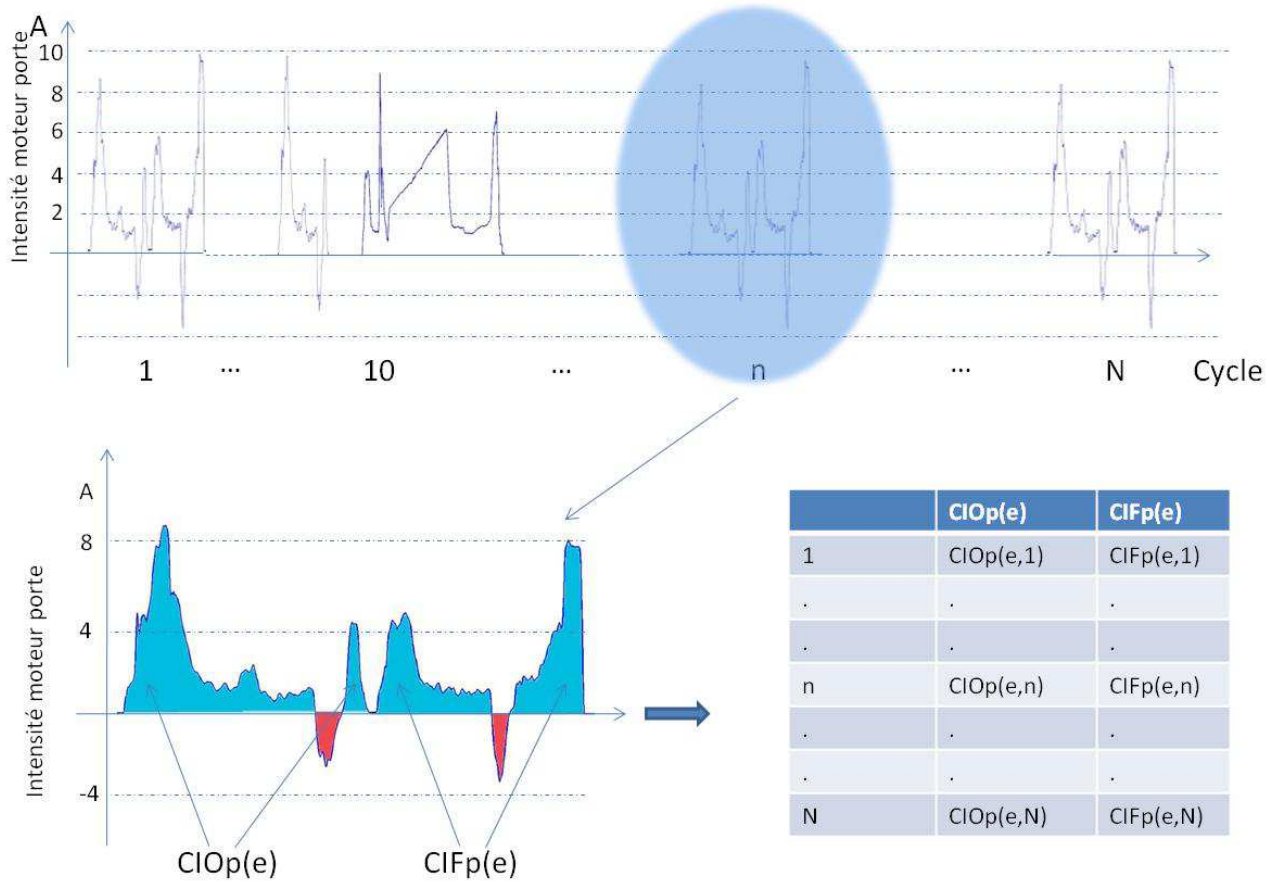
- La moyenne des quantités de courant utilisées par le moteur de chaque sous-système durant une ouverture sur un essai $CIO_P(e)$.
- La moyenne des quantités de courant utilisées par le moteur de chaque sous-système durant une fermeture sur un essai $CIF_P(e)$.

L'intensité du moteur de la porte ($I_P(t)$) permet de définir un indicateur basé sur la moyenne des quantités de courant injectées dans le moteur de porte durant un demi-cycle $CIO_P(e)$ et $CIF_P(e)$. Pour cela, on calcule l'intégrale sur un demi-cycle des valeurs positives d'$I_P(t)$ (cf. Figure 4.3). $CIO_P(e,n)$ est défini par l'équation suivante :

$$CIO_p(n) = \int_{demi-cycle} I_p(t)dt \ si \ I_p(t) > 0$$

L'indicateur CIO_P est ensuite obtenue par l'équation suivante :

$$CIO_p(e) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} CIO_p(e,n)$$



	ClOp(e)	ClFp(e)
1	ClOp(e,1)	ClFp(e,1)
.	.	.
.	.	.
n	ClOp(e,n)	ClFp(e,n)
.	.	.
.	.	.
N	ClOp(e,N)	ClFp(e,N)

Figure 4.3 : Elaboration des indicateurs relatifs à l'intensité du courant en ouverture et en fermeture

De cette manière, on définit $CIO_P(e)$, $CIF_P(e)$, $CIO_{PMR}(e)$, $CIF_{PMR}(e)$, $CIO_{UFR}(e)$, $CIF_{UFR}(e)$.

En résumé et en reprenant les notations du Chapitre I paragraphe 1.5, l'ensemble initial de données est l'ensemble $\mathbb{V}0$ contenant tous les signaux et $\mathbb{V}0_p$ contenant les signaux liés au sous-système porte.

$\mathbb{V}\boldsymbol{0}$=*{$C_p(t)$, $C_{ufr}(t)$, $C_{pmr}(t)$, $O_p(t)$, $O_{ufr}(t)$, $O_{pmr}(t)$, $CL_p(t)$, $CL_{ufr}(t)$, $CL_{pmr}(t)$, $P_p(t)$, $P_{ufr}(t)$, $P_{pmr}(t)$, $I_p(t)$, $I_{ufr}(t)$, $I_{pmr}(t)$}*

$\mathbb{V}\boldsymbol{0_p}$=*{$C_p(t)$, $O_p(t)$, $CL_p(t)$, $P_p(t)$, $I_p(t)$}*

L'étape de caractérisation a d'abord conduit à retenir des indicateurs calculés pour chaque demi-cycle *n* de l'essai *e*, c'est-à-dire conduisant à l'ensemble $\mathbb{V}\boldsymbol{1c}$ ($\mathbb{V}\boldsymbol{1c_P}$ pour le sous- système porte).

$\mathbb{V}\boldsymbol{1c}$=*{$TO_P(e,n)$, $TF_P(e,n)$, $VmaxF_P(e,n)$, $VmaxO_P(e,n)$, $TO_{PMR}(e,n)$, $TF_{PMR}(e,n)$, $VmaxF_{PMR}(e,n)$, $VmaxO_{PMR}(e,n)$, $TO_{UFR}(e,n)$, $TF_{UFR}(e,n)$, $VmaxF_{UFR}(e,n)$, $VmaxO_{UFR}(e,n)$, $CIO_P(e,n)$, $CIF_P(e,n)$, $CIO_{PMR}(e,n)$, $CIF_{PMR}(e,n)$, $CIO_{UFR}(e,n)$, $CIF_{UFR}(e,n)$}*

$\boldsymbol{V1c_P}$ =*{$TO_P(e,n)$, $TF_P(e,n)$, $VmaxF_P(e,n)$, $VmaxO_P(e,n)$, $CIO_P(e,n)$, $CIF_P(e,n)$}*

Ensuite, toujours dans cette étape de caractérisation, des indicateurs ont été construits pour chaque essai, générant l'ensemble $\mathbb{V}\boldsymbol{1e}$ ($\mathbb{V}\boldsymbol{1e_P}$ pour le sous-système porte).

$\mathbb{V}\boldsymbol{1e}$=*{$TO_P(e)$, $TF_P(e)$, $VmaxF_P(e)$, $VmaxO_P(e)$, $TO_{PMR}(e)$, $TF_{PMR}(e)$, $VmaxF_{PMR}(e)$, $VmaxO_{PMR}(e)$, $TO_{UFR}(e)$, $TF_{UFR}(e)$, $VmaxF_{UFR}(e)$, $VmaxO_{UFR}(e)$, $CIO_P(e)$, $CIF_P(e)$, $CIO_{PMR}(e)$, $CIF_{PMR}(e)$, $CIO_{UFR}(e)$, $CIF_{UFR}(e)$}*

$\mathbb{V}\boldsymbol{1e_P}$=*{$TO_P(e)$, $TF_P(e)$, $VmaxF_P(e)$, $VmaxO_P(e)$, $CIO_P(e)$, $CIF_P(e)$}*

4.3. Résultats qualitatifs liés aux campagnes d'essais 1 à 3

Les campagnes d'essais aggravés et accélérés ont provoqué plusieurs défaillances montrant ainsi les faiblesses du système accès voyageurs. Ces défaillances sont de quatre types : mécanique, électronique, réglages et qualité.

4.3.1. Défaillances mécaniques

4.3.1.1. Gonflement des vantaux

Sous l'effet de la pression exercée lors de chocs répétés, la mousse interne au vantail de porte libère un gaz qui fait gonfler le vantail pouvant entraîner des interférences entre la caisse et le vantail de porte conduisant à la panne (Figure 4.4).

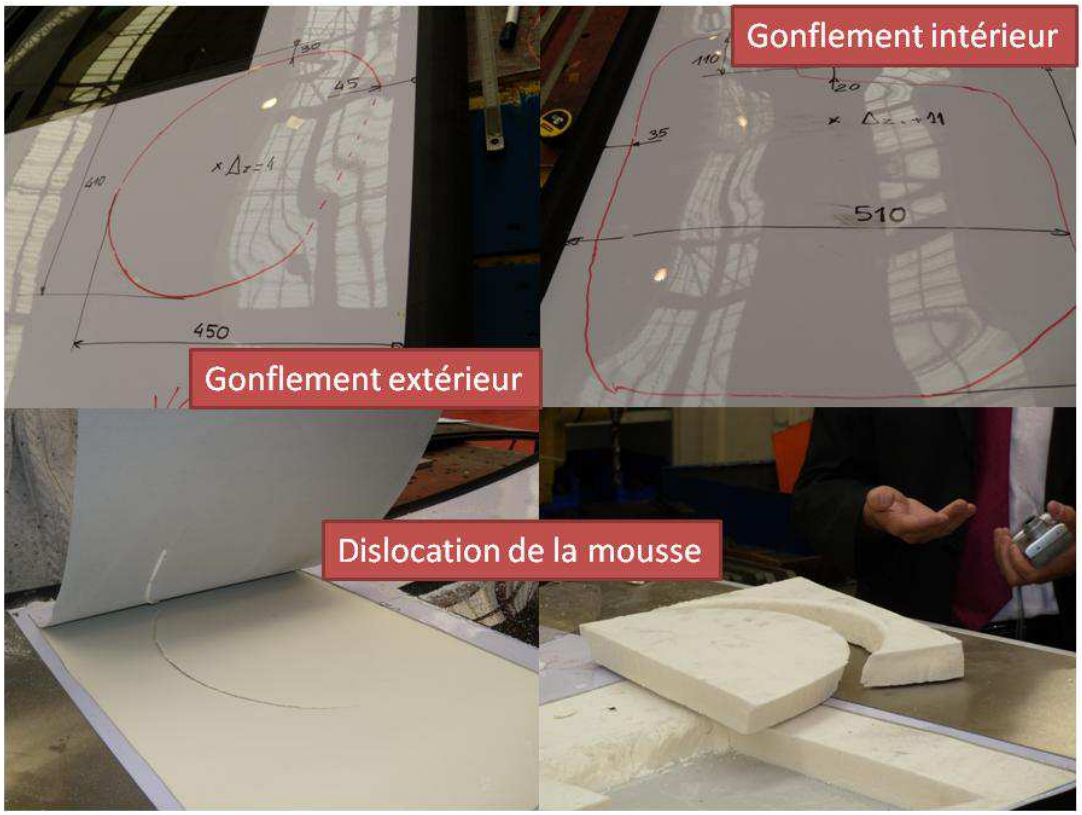


Figure 4.4 : Expertise du gonflement des vantaux

L'action corrective choisie pour résoudre ce problème est le passage d'une technologie de construction de vantail en mousse à une technologie de construction de vantail en nid d'abeilles.

4.3.1.2. Sous-dimensionnement de la pièce de reprise d'effort latéral de la marche

Sous l'effet de chocs répétés, la pièce métallique censée reprendre les efforts latéraux de la marche et du comble-lacune, se déforme plastiquement conduisant à la « mise en crabe » de la marche et à son blocage, ce qui entraîne au final la non fermeture et le non verrouillage de celle-ci (Figure 4.5).

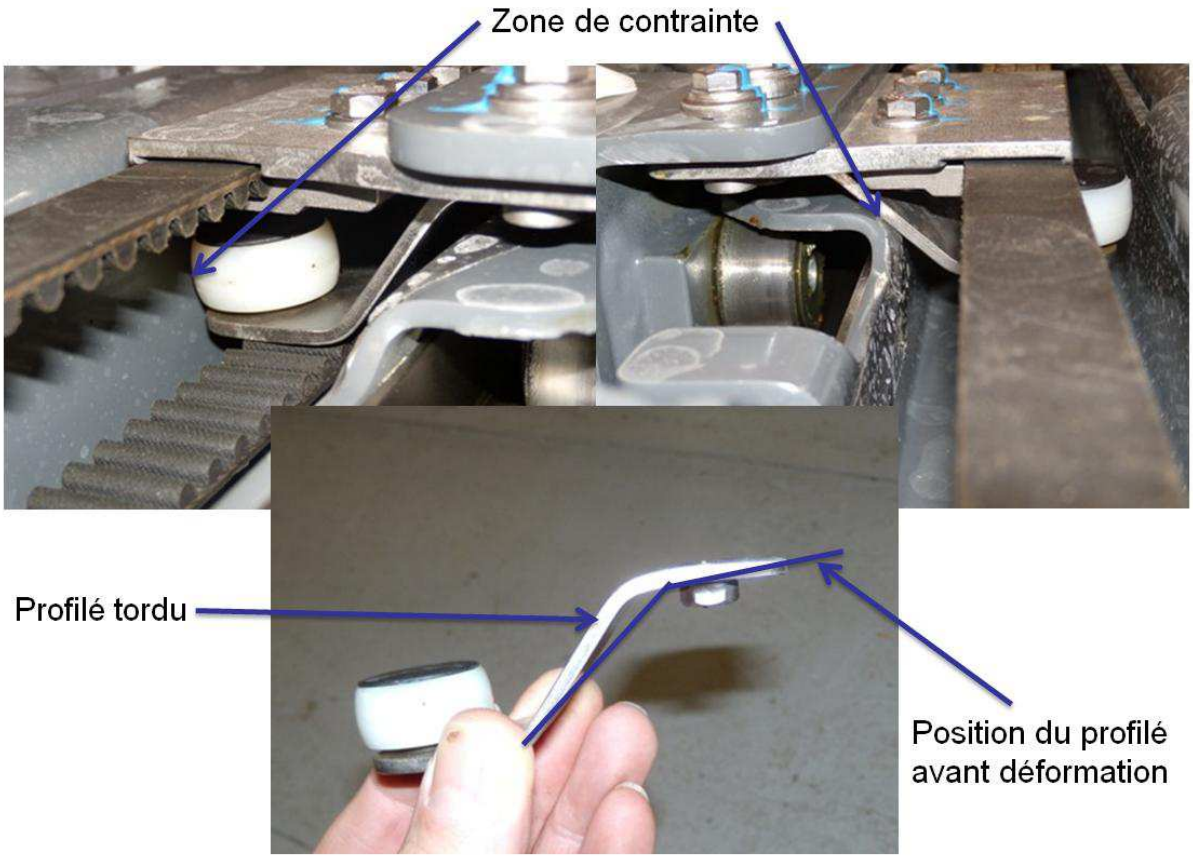


Figure 4.5 : Expertise de la déformation de la pièce de reprise d'effort latéral du galet de la marche mobile

L'action corrective choisie a été l'augmentation de l'épaisseur de la pièce de 2 mm à 4 mm.

4.3.1.3. Sous-dimensionnement de la commande du moteur

Sous l'effet de sollicitation comme le dévers ou la poussée voyageurs, la motorisation s'est avérée insuffisante pour respecter les performances attendues lors de l'ouverture de la porte.

L'action corrective a été d'augmenter le courant envoyé au moteur afin qu'il délivre une puissance plus importante.

4.3.2. Défaillances électroniques

De nombreuses défaillances électroniques ont été constatées sur le banc d'essais (panne de la commande des portes et remontée de faux défauts). Elles ont toutes été attribuées à des problèmes de CEM (Compatibilité Electro-Magnétique) récurrents (apparition aléatoire et fréquente du défaut), liés à la conception de la platine destinée à piloter les moteurs.

Le fournisseur a testé 10 versions de platines électroniques différentes. La résolution des problèmes de CEM est toujours en cours.

4.3.3. Défaillances de réglage

4.3.3.1. Défaillance de réglage des patins inférieurs de porte

Le réglage préconisé correspond à un réglage du patin de la porte à 1 mm du seuil. Après une série de cycles effectués sur ce réglage, il apparaît que le patin vient frotter sur le seuil de porte voire, s'encastrer dans celui-ci au cours de la fermeture (cf. Figure 4.6).

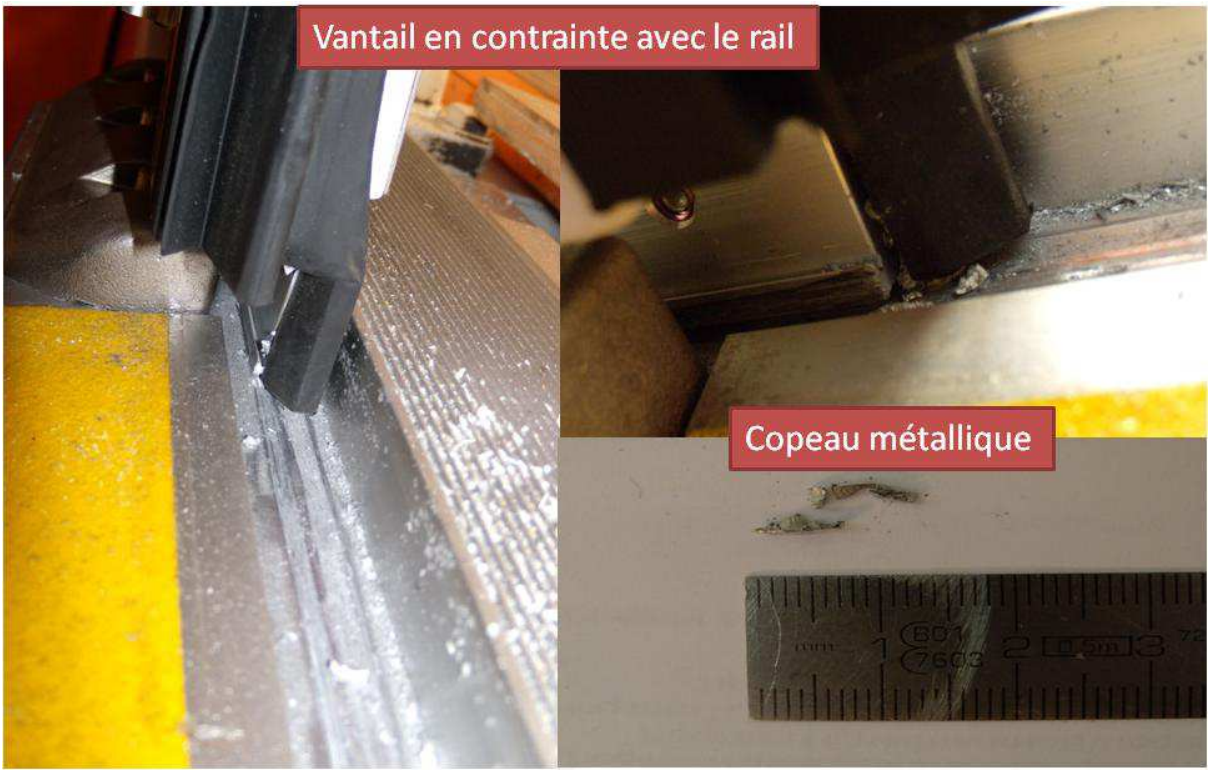


Figure 4.6 : Expertise de la défaillance due au réglage du patin inférieur de porte

En effet, le mouvement d'un vantail n'est pas un mouvement de translation suivant l'axe x (axe de déplacement des vantaux) comme l'étude initiale le suppose ; l'accélération imposée au vantail le fait légèrement pivoter suivant l'axe y (axe perpendiculaire au plan défini par les vantaux) provoquant la collision entre le seuil et le patin inférieur.

L'action corrective mise en place a consisté en une modification du réglage en le remplaçant par une cote de réglage minimal de 2 mm.

Lors du test avec un réglage de 2mm et de la présence d'amas de poussière de différentes tailles, après avoir constaté des blocages dus à la géométrie du seuil de porte et à une hauteur de patin inférieur insuffisante, le réglage du patin inférieur a été relevé à 3 mm.

4.3.3.2. Réglage du fin de course lors de la fermeture de la marche

Un défaut de calcul dans la gamme de réglage du fin de course de la marche a montré que, dans certains cas, une marche pouvait être en position « rentrée » et ne pas être détectée par le fin de course comme telle.

L'action corrective mise en place pour pallier à cette défaillance est la modification du réglage en usine du positionnement de ce fin de course.

4.3.4. Défaillance de qualité du prototype

Le banc de test n'a permis de mettre à jour qu'un seul défaut de qualité lié à la connectique défectueuse d'un lot de fins de course occasionnant des pertes de signaux « marche fermée » et « marche verrouillée », conduisant dès lors à une défaillance aléatoire des marches mobiles et comble-lacunes. Pour résoudre ce problème, la totalité des fins de course issue du lot incriminé a été remplacée.

4.4. Analyse quantitative de la campagne 1

L'analyse quantitative de la campagne 1 se base sur une étude de type ACP (Analyse en Composantes Principales) et a pour objectif de prouver que l'hypothèse de la non-influence du temps sur un essai est envisageable.

Pour cela, nous avons effectué une ACP sur 10 fenêtres temporelles [FTU.09]. Dans cette étude, les signaux $\mathbb{V}\boldsymbol{0_p}$ ont été caractérisés avec les indicateurs de cycle $\mathbb{V}\boldsymbol{1n_P}$ puis ramenés aux indicateurs d'essais $\mathbb{V}\boldsymbol{1e_P}$ dans un premier temps ; dans un deuxième temps, à des fenêtres temporelles de 16 cycles (160 essais découpés en 10 fenêtres temporelles) appelés $\mathbb{V}\boldsymbol{1e_{P,T1}}$ à $\mathbb{V}\boldsymbol{1e_{P,T10}}$. Ils sont ensuite mis sous forme d'un tableau dont les lignes sont les fenêtres temporelles de chacun des 29 essais constitutifs du plan d'expériences 1 et les colonnes sont les indicateurs $\mathbb{V}\boldsymbol{1e_{P,T1}}$ à $\mathbb{V}\boldsymbol{1e_{P,T10}}$.

L'ACP a été utilisée sur ce tableau et un des résultats est la non influence du temps [FTU.09].

4.5. Analyse quantitative de la campagne 4

L'analyse de la campagne 4 n'exposera que les résultats des portes (les résultats des marches mobiles ne seront pas présentés dans cette thèse). La première partie analyse des données via la méthode ACP. La deuxième partie de l'analyse se base sur les méthodes de régression linéaire. Elle permet de quantifier le comportement des performances du système en fonction des sollicitations et des combinaisons de sollicitations qui lui sont appliquées (méthode inférentielle) tel que présentée dans le chapitre 2 paragraphe 2.3.3.

Cette analyse (statistique) a été faite avec le support de plusieurs logiciels :

- MatLab : Traitement des signaux temporels,
- R : ACP,
- SAS-JMP : Analyse inférentielle et plan d'expériences.

4.5.1. Les facteurs du plan 4

Système Porte				
Facteurs continus				
Variable	**Nom du facteur**	**-1**		**+1**
X_1	Poussée des voyageurs	0 kPa		6 kPa
X_2	Choc	0 kN		5 kN
X_3	Charge des voyageurs	0 pers./m²		10 pers./m²
Facteur à deux niveaux				
Variable	**Nom du facteur**	L_1		L_2
$X_4[L1]$ et $X_4[L2]$	Obstacle	0 obs./essais		16 obs./essais
Facteurs à trois niveaux				
Variable	**Nom du facteur**	L_1	L_2	L_3
$X_5[L1]$, $X_5[L2]$ et $X_5[L3]$	Dévers	-7°	0°	+7°

Tableau 4.1 : Facteurs du sous-système porte du plan d'expériences 4

Pour résumer, l'ensemble des cinq facteurs est

$\mathbb{U}=\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$

Le plan d'expériences vise essentiellement à étudier les relations de causes à effet entre $\mathbb{U}$ et $\mathbb{V}\boldsymbol{1e_P}$. Cette analyse de relations commencera par une approche descriptive multidimensionnelle.

4.5.2. Analyse descriptive

Afin de préalablement vérifier s'il n'y a pas de données « douteuses » et de faire apparaître des tendances dans les relations entre les variables (réponse) et entre les facteurs (donnée d'entrée), une ACP est effectuée sur un tableau ***Tn*** (« *n* » pour cycle) où les colonnes représentent les 6 indicateurs de performance et les lignes les 160 cycles des 29 essais du plan d'expériences 4.

Ensuite, on étudie ***Te*** (« e » pour essais) où les colonnes représentent les 6 indicateurs de performance et les lignes les 160 cycles moins les cycles « douteux » des 29 essais du plan.

L'aspect temporel des données étant considérée comme négligeable suite à l'ACP réalisée pour le plan d'expériences 1, elle n'est pas prise en compte pour le plan d'expériences 4.

4.5.2.1. Filtrage des données douteuses

L'investigation des premières ACP effectuées sur ***Tn*** (tableau à 6 colonnes et 4660 lignes) réalisées sur les 160 cycles de chaque essai, a mis en évidence des données douteuses. Ces données sont dues à de fortes perturbations électromagnétiques des signaux temporels. La Figure 4.7 montre différents signaux temporels où l'intensité de porte est perturbée par des phénomènes CEM.

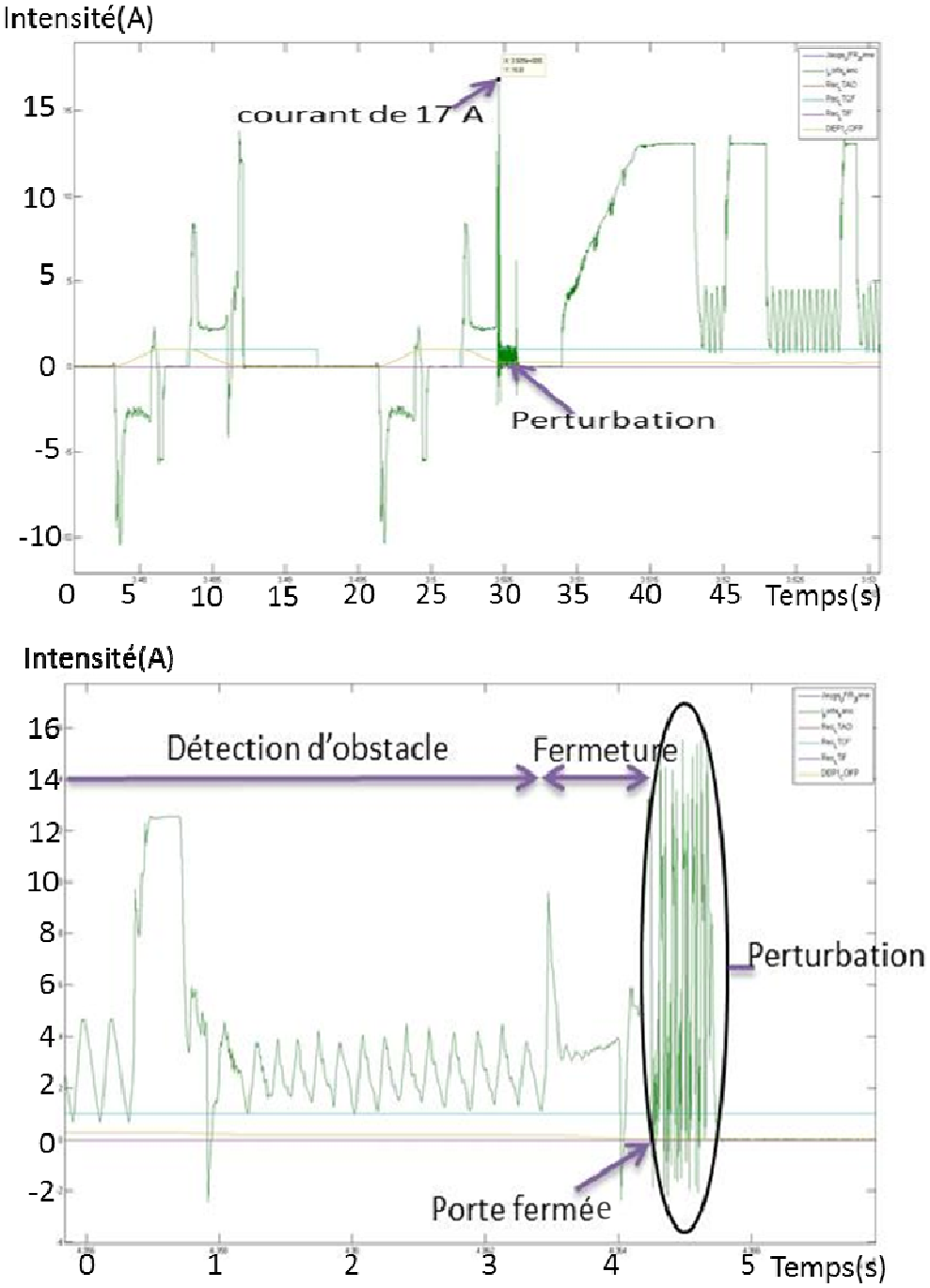


Figure 4.7 : $I_P(t)$ perturbés par des effets CEM

Les perturbations CEM sont dues à un composant élémentaire de la platine qui gère les informations reçues. Cet élément est sensible aux variations fortes et rapides des courants moteurs. On constate en effet dans l'analyse des courbes temporelles, des appels de courant instantané supérieurs à 15 A souvent dus à des blocages violents de la porte provoqués par des obstacles. Ces pics de courant perturbent la platine de manière aléatoire provoquant des défauts intempestifs de fonctionnement.

Pour éviter que les données ne perturbent l'analyse, certains essais sont tronqués de 160 à 10 cycles exploitables.

Te devient une table à 2029 lignes soit, 2631 lignes corrompues par les effets CEM, ce qui démontrent l'importance de ce problème pour le système étudié.

4.5.2.2. Analyse des variables

Les indicateurs choisis pour l'analyse sont des indicateurs de performances c'est-à-dire, que chaque indicateur a pour objectif de montrer une amélioration ou une dégradation de fonctionnement du système (ils sont ainsi le témoin de la performance globale du système d'accès des voyageurs). Ainsi on a :

- $TF_p(e)$ est un indicateur défini avec une cible de fonctionnement à 3,5 *sec* (spécifié par le cahier des charges). Si $TF_p(e)>3,5sec$ alors, le système est trop lent (performance diminuée) et si $TF_p(e)<3,5s$ alors, le système remplit son « contrat » mieux que prévu (performance augmentée).

- $VmaxF_p(e)$ est défini d'après les données fournisseurs comme un indicateur régulé par la platine de porte de façon à atteindre un $TO_p(e)$ ou un $TF_p(e)$ de 3,5 sec. La performance du système est inversement proportionnelle à la grandeur de la vitesse maximale atteinte pendant un cycle d'ouverture.

- CIF_p est défini d'après les données fournisseurs comme un indicateur calculé par la platine de la porte de façon à atteindre un $TO_p(e)$ ou un $TF_p(e)$ de 3,5 *sec*. CIF_p est l'image des frottements du système d'accès voyageurs ; plus CIF_p est élevée, plus la performance du système est dégradée.

La Figure 4.8 montre le graphique des variables de l'ACP de ***Te***. ***Te***, après correction de ***Tn***, est un tableau à 6 colonnes actives (indicateurs de performance) et 5 illustratives (chaque colonne indiquant le niveau du facteur pour chaque essai) et de 2029 lignes.

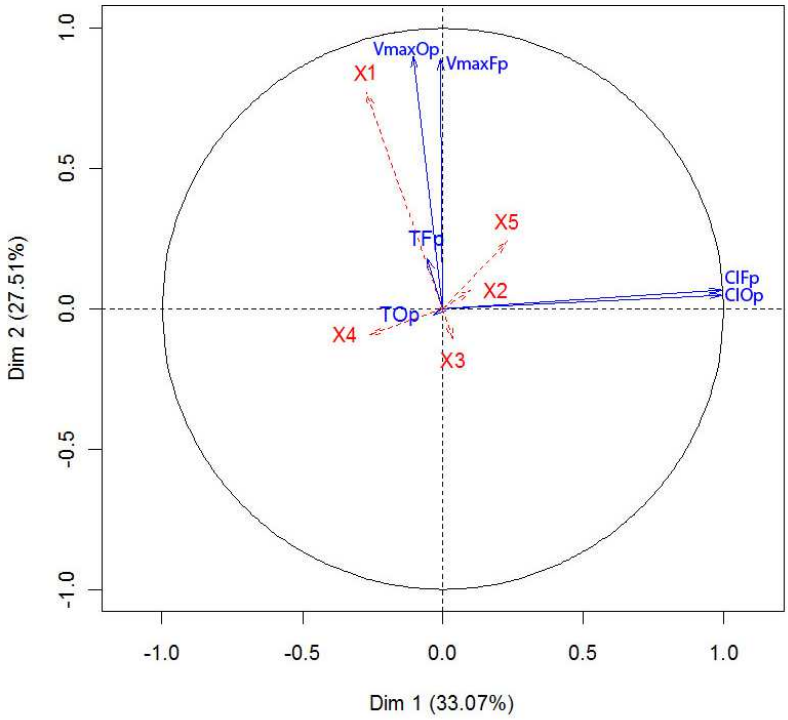


Figure 4.8 : Graphique des variables ACP de *Te* – Les variables représentent les indicateurs de performance, les facteurs sont les colonnes illustratives en rouge

L'analyse des variables montre que l'axe principal représente l'influence sur la consommation de courant ($CIO_p(e)$ et $CIF_p(e)$) et l'axe secondaire l'influence sur la vitesse maximale d'ouverture et de fermeture ($VmaxO_p(e)$ et $VmaxF_p(e)$). Les pourcentages cumulés d'inertie expliquent 60% de l'inertie totale. Il convient de rester prudent dans nos interprétations. Néanmoins dans ce plan, les variables illustratives montrent que les 2 facteurs les plus influents sont le dévers (X_5) et la poussée des voyageurs (X_1) ; le dévers a une influence sur les 2 axes et la poussée des voyageurs une influence très forte sur l'axe secondaire. Les temps d'ouverture et de fermeture restent quant à eux plutôt invariants. Ces résultats s'expliquent en plusieurs points :

- Les facteurs X_1 et X_5 sont ceux qui provoquent une augmentation très forte des frottements dans la porte, ce qui se traduit par une dégradation forte des indicateurs de performance.
- Le facteur X_1 paraît avoir beaucoup plus d'importance que X_5 d'après le graphique des variables, ce qui n'est en réalité pas le cas puisque X_5 est composé de 2 composantes d'effets inverses (voir paragraphe suivant).

- La régulation dans la platine a pour but de modifier la vitesse et la consommation de courant de façon à obtenir des temps d'ouverture et de fermeture invariants expliquant la faible variation de TO_p et TF_p. Ici, on peut conclure que le régulation est efficace car les fortes contraintes imposées au système ont peu d'influence sur TO_p et TF_p mais davantage sur les quatre autres.
- D'après le cercle de corrélation associés aux axes principaux, la platine régule en ajustant de manière relativement équivalente les 2 variables vitesse max et quantité de courant nécessaires au bon déroulement du cycle.

Remarque 1 : Le dévers a une influence complètement opposée sur le système selon son signe. Sur la Figure 4.9, le facteur X_5 est décomposé en un facteur X_5 positif ($X_5[P]$) et un facteur X_5 négatif ($X_5[N]$). L'effet du dévers négatif est favorable à la performance du système alors que le dévers positif a un effet défavorable sur le système.

Remarque 2 : Les points variables illustratifs sont relativement éloignés du cercle. Ils sont soit mal représentés sur ce plan soit de faible influence. Il convient donc de relativiser les conclusions.

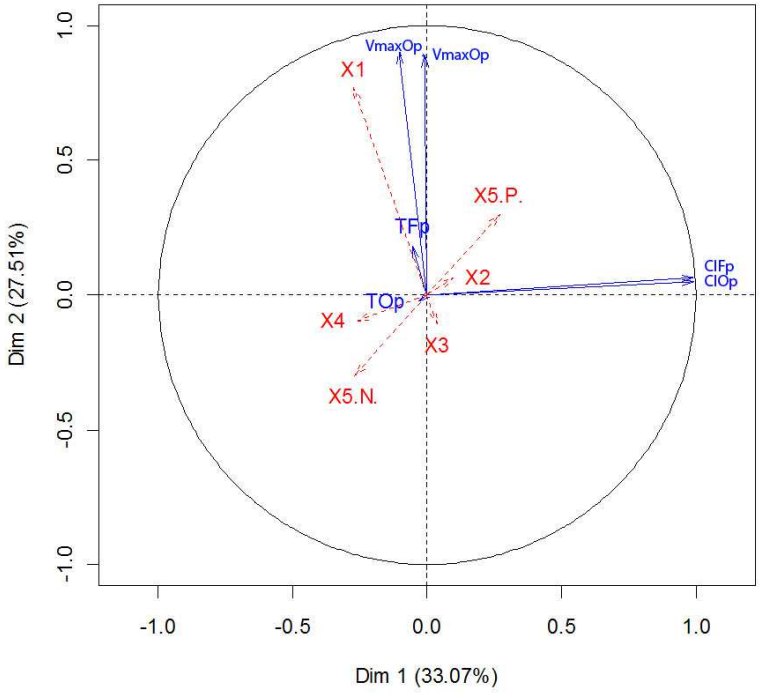


Figure 4.9 : Graphique des variables ACP – décomposition de *X5*

4.5.2.3. Analyse des individus

La Figure 4.10 ci-après montre le nuage d'individus correspondant aux essais du plan d'expériences n°4. Après suppression des données aberrantes ou fortement perturbées par la CEM, on arrive à obtenir un nuage de points homogènes et interprétables.

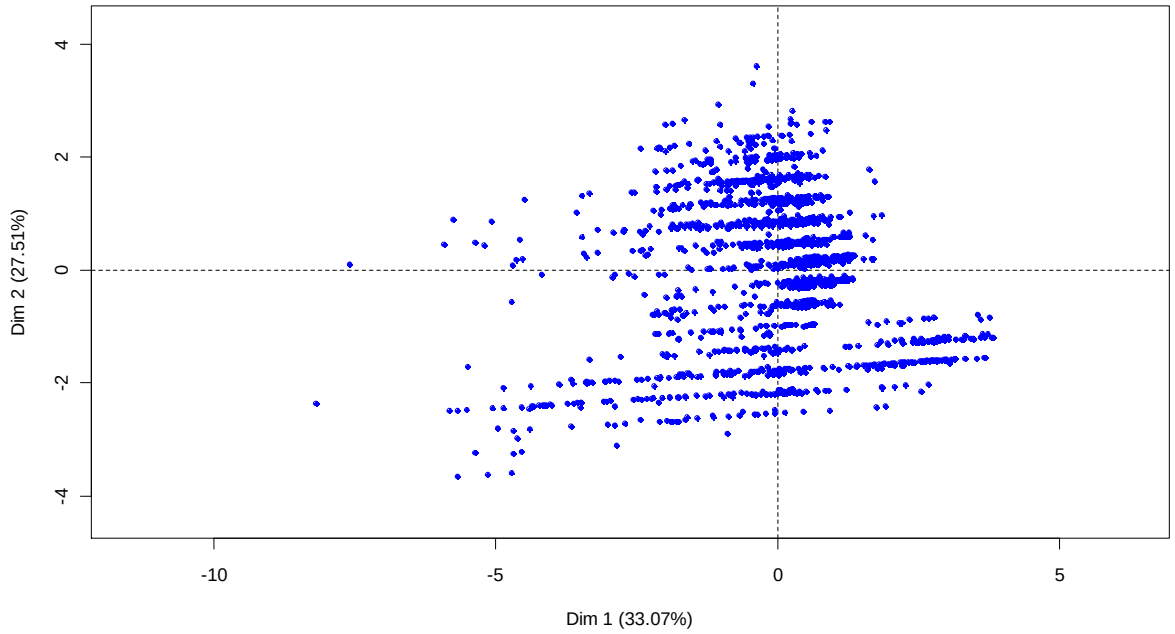


Figure 4.10 : Nuage de points PCA issue de *Te*

L'analyse de la Figure 4.11 montre que chaque essai constitue un sous-nuage de points homogène du nuage de points principaux. La position de chaque sous-nuage apporte de l'information sur les points ayant le plus d'influence sur les 2 axes principaux de cette ACP, ce qui permet de déduire les facteurs les plus influents sur le système porte.

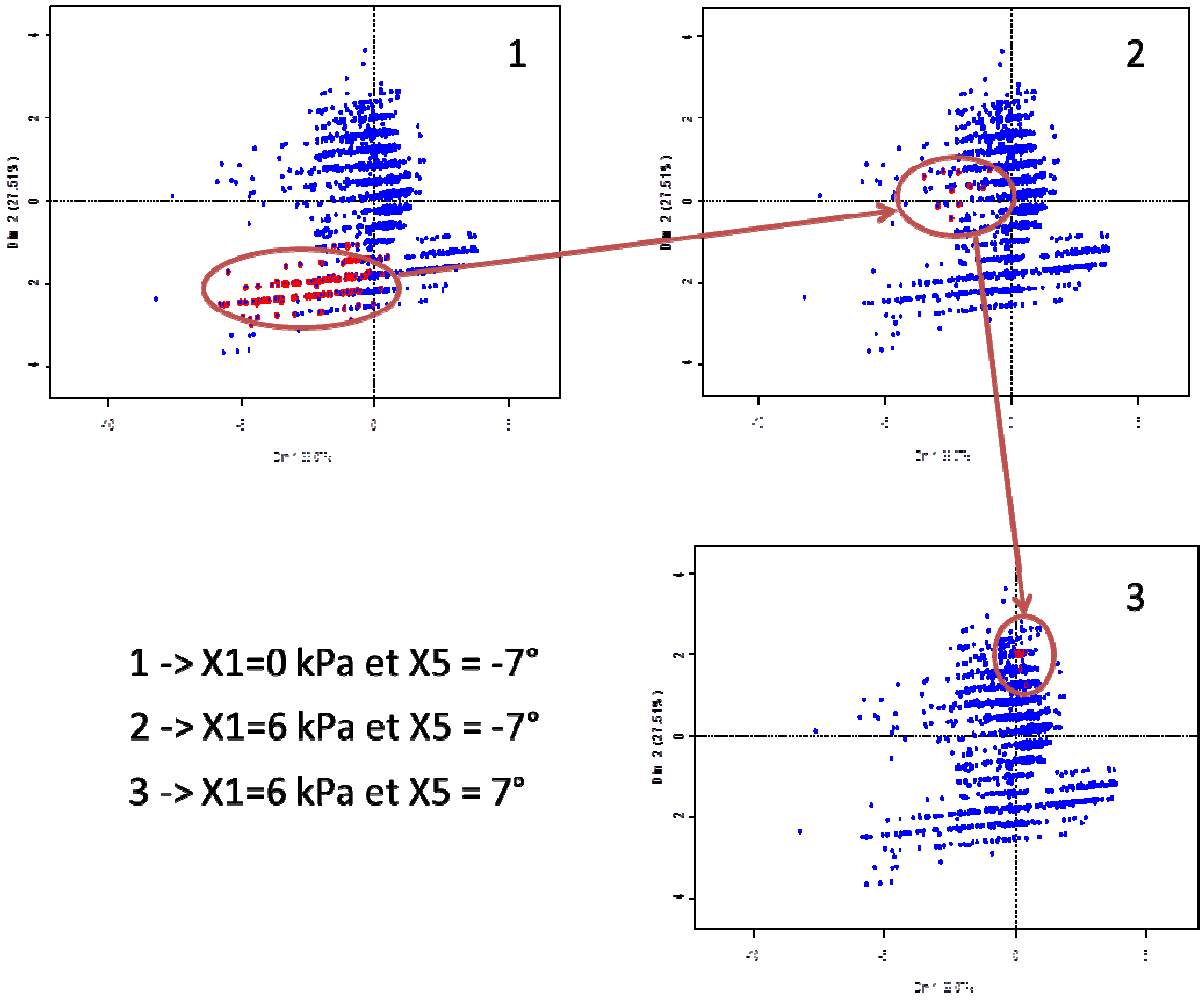


Figure 4.11 : Nuage de points PCA issu de Te plus les lignes illustratives (points rouge) : 1/ un essai ou *X1= 0kPa* et *X5 =-7* ; 2/ un essai ou *X1=6kPa* et *X5=-7°*; 3/ un essai ou *X1=6kPa* et *X5=7°* – Mise en évidence de l'influence du dévers et de la poussée voyageurs

Les nuages de points 1 à 3 montrent l'évolution de la position des sous-nuages de points liés à X_1 (poussée des voyageurs) et X_5 (dévers). Le fort déplacement des sous-nuages de points permet d'affirmer que X_1 et X_5 sont les 2 sollicitations les plus influentes sur le système. Le déplacement dans le sens positif des axes de l'ACP montre qu'un dévers négatif améliore les performances du système contrairement à un dévers positif car, en vertu du cercle de corrélation, $VmaxO_p(e)$, $VmaxF_p(e)$, $CIO_p(e)$ et $CIF_p(e)$ augmentent en fonction de X_1 et $X_5[P]$. La poussée des voyageurs entraîne, quant à elle, une dégradation de performance du système cumulable avec le dévers comme le montre le sous-nuage de points 3.

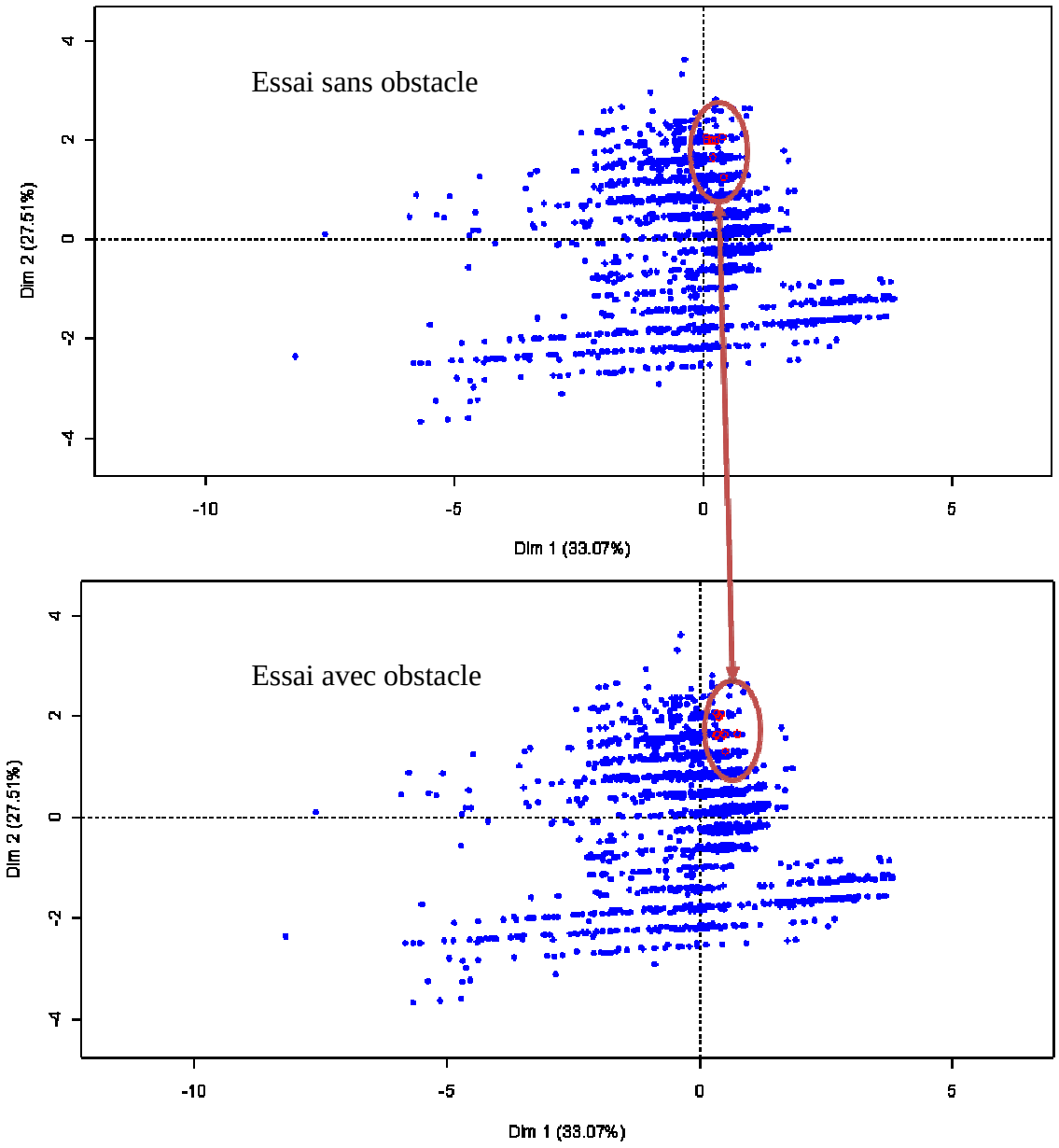


Figure 4.12 : Nuage de points PCA issu de Te plus les lignes illustratives (points rouge) : 1/ un essai ou *X4=L1* ; 2/ un essai ou *X4=L2* – Mise en évidence de la non-influence de l'obstacle

La Figure 4.12 ci-avant montre que, pour deux sous-nuages de points ayant la même configuration de X1, X2, X3 et X5 mais une valeur de X4 différente (Nuage 1 : X4=L1, et nuage 2 : X4=L0), il n'y a pas de variation de position entre les 2 sous-nuages. L'obstacle est donc très peu influent sur les performances du système.

L'analyse descriptive a permis de supprimer les données douteuses et a montré des premiers résultats sur les relations indicateurs/facteurs. Le chapitre suivant repart de la table

Te pour essayer d'aller plus loin dans l'analyse des relations indicateurs/facteurs et dans la modélisation du système porte.

4.5.3. Analyse inférentielle

Contrairement à l'analyse descriptive, l'analyse inférentielle démarre directement à partir de ***Te*** **;** il est donc impératif d'avoir effectué l'analyse descriptive avant de faire l'analyse inférentielle. Elle se déroule en plusieurs étapes :

1/ définition du modèle de régression,

2/ études des points aberrants du modèle et calcul de la représentativité du modèle,

3/ calcul des coefficients du modèle et de leurs influences,

4/ interprétation des valeurs des coefficients.

A l'aide d'un modèle, cette analyse a pour but d'extrapoler mathématiquement les résultats obtenus à l'ensemble du domaine expérimental.

4.5.3.1. Modèle de régression

Le modèle de régression est du type linéaire tel que défini dans le chapitre 2. Pour chaque sous-système, un modèle à 5 facteurs est composé de 3 facteurs continus, d'un facteur à 2 niveaux et d'un facteur à 3 niveaux (Tableau 4.1).

Ce qui donne le modèle mathématique suivant :

$$
\begin{aligned}
y = {} & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4[L1] + \beta_5 X_4[L2] + \beta_6 X_5[L1] + \beta_7 X_5[L2] \\
& + \beta_8 X_5[L3] + \beta_9 X_1 X_2 + \beta_{10} X_1 X_3 + \beta_{11} X_1 X_4[L1] + \beta_{12} X_1 X_4[L2] \\
& + \beta_{13} X_1 X_5[L1] + \beta_{14} X_1 X_5[L2] + \beta_{15} X_1 X_5[L3] + \beta_{16} X_2 X_3 + \beta_{17} X_2 X_4[L1] \\
& + \beta_{18} X_2 X_4[L2] + \beta_{19} X_2 X_5[L1] + \beta_{20} X_2 X_5[L2] \\
& + \beta_{21} X_2 X_5[L3] + \beta_{22} X_3 X_4[L1] + \beta_{23} X_3 X_4[L2] + \beta_{24} X_3 X_5[L1] \\
& + \beta_{25} X_3 X_5[L2] + \beta_{26} X_3 X_5[L3] + \beta_{27} X_4[L1] X_5[L1] + \beta_{28} X_4[L1] X_5[L2] \\
& + \beta_{29} X_4[L1] X_5[L3] + \beta_{30} X_4[L2] X_5[L1] + \beta_{31} X_4[L2] X_5[L2] \\
& + \beta_{32} X_4[L2] X_5[L3]
\end{aligned}
$$

Pour estimer ce modèle, 33 coefficients sont à déterminer.

4.5.3.2. Analyse de la qualité du modèle

Le logiciel JMP permet de générer des graphiques appelés « predicted plot » (cf. Figure 4.13) qui tracent la position des points calculés par le modèle par rapport aux points réels expérimentaux (voir chapitre 2, paragraphe 2.3.3.2).

Les courbes en pointillé rouge délimitent les zones de confiance.

Lorsque les points sont en dehors de la zone de confiance, il s'agit d'essais qui ne peuvent être expliqués par le modèle choisi. Une étude est alors à faire pour détecter si ce sont d'éventuels points aberrants.

Les points à l'intérieur de la zone de confiance représentent les essais considérés comme explicables par le modèle. Ils peuvent être classés en 2 catégories :

- Les points autour de la moyenne (trait en pointillé bleu), qui sont des points qui ont peu d'influence sur l'indicateur étudié,
- Les points éloignés de la moyenne montrent un essai ayant de l'influence sur l'indicateur étudié (points numérotés sur les figures).

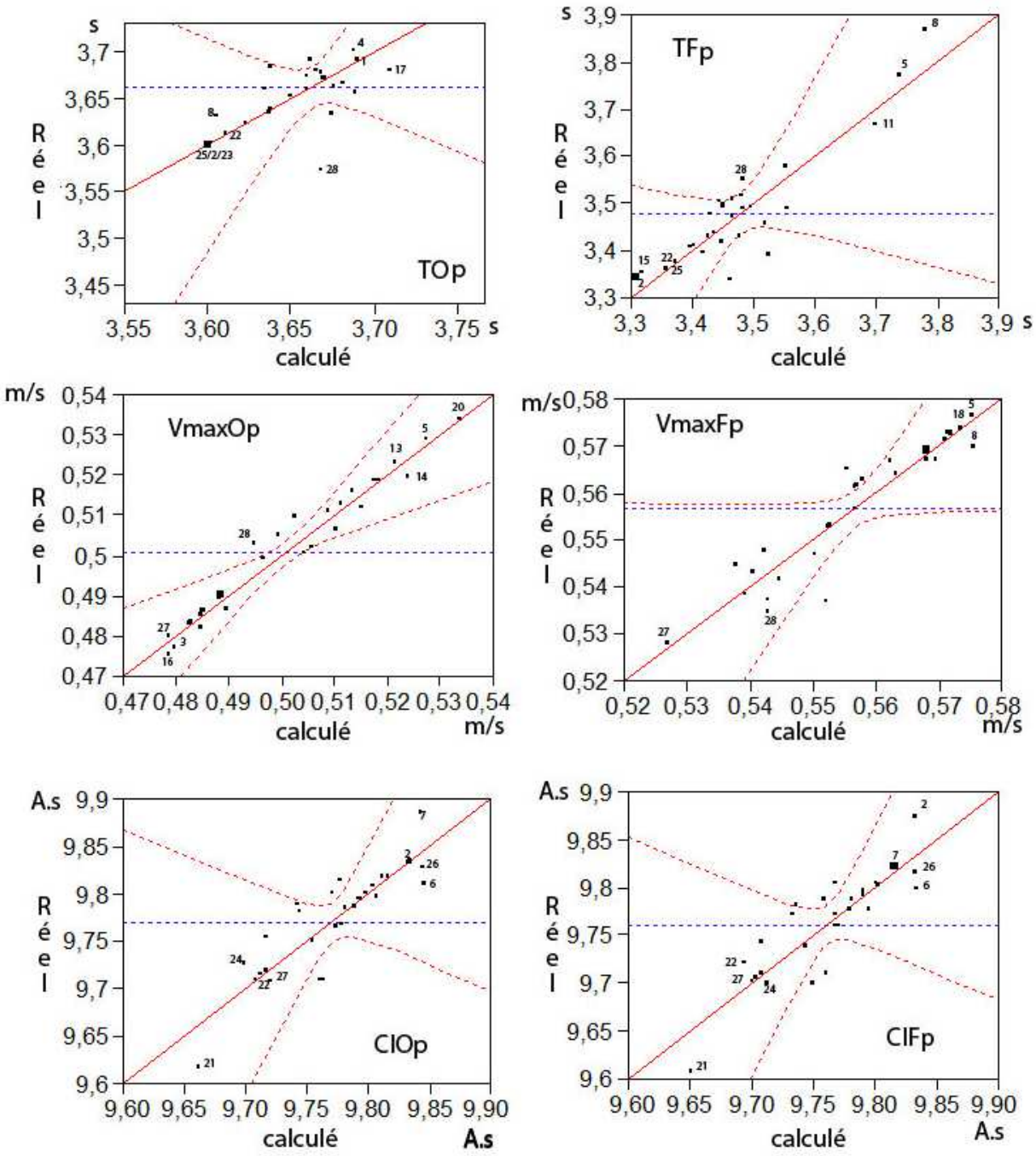


Figure 4.13 : Graphique d'évaluation de la qualité du modèle porte sur chaque indicateur de *V1eP* – « Predicted Plot »

La Figure 4.13 montre les « *predicted plot* » (voir chapitre 2, paragraphe 2.3.3.2.1.) associés aux indicateurs du sous-système porte. Parmi ces points, deux remarques se dégagent :

- Le point 28 semble être aberrant.

- Les points 5 et 8 semblent être les essais qui dégradent le plus les indicateurs de performance $TO_p(e)$, $TF_p(e)$, $VmaxO_p(e)$ et $VmaxF_p(e)$. Ils sont composés des facteurs donnés dans le Tableau 4.2 suivant. Il montre que les facteurs ou combinaison de facteurs qui dégrade la performance sont $X_1=1$, $X_3=1$, $X_4=L_1$ et $X_5=L_{3\ ou\ 2}$. Cela correspond à la présence de la poussée des voyageurs, à une charge voyageurs de 10 pers/m², à l'absence de l'obstacle et un dévers de +7° ou 0° (dévers positif).

Essais/indicateurs	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
5	1	-1	1	L_1	L_3
8	1	1	1	L_1	L_2

Tableau 4.2 : Expériences influentes sur Tp et Vmaxp ; en rouge, les facteurs influents

- Les points 2, 6, 7 et 26 semblent être les essais qui dégradent le plus les indicateurs de performance $CIO_p(e)$ et $CIF_p(e)$. Ils sont composés des facteurs donnés dans le Tableau 4.3 suivant. Il montre que les facteurs ou combinaisons de facteurs dégradants la performance sont $X_1=-1$ et $X_5= L_{3\ ou\ 2}$. Ceci correspond à l'absence de la poussée des voyageurs et un dévers de +7° ou 0° (dévers positif).

Essais/indicateurs	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
2	-1	1	1	L1	L3
6	-1	1	-1	L1	L2
7	-1	-1	1	L1	L2
26	-1	-1	-1	L2	L2

Tableau 4.3 : Expériences influentes sur CIOp et CIFp ; en rouge, les facteurs invariants supposés influents

Cette étude montre que tant que la poussée des voyageurs n'est pas appliquée, la platine arrive à réguler les temps d'ouverture et de fermeture en jouant uniquement sur la consommation de courant. Par contre, une fois que la poussée des voyageurs est appliquée au système, la consommation de courant atteint sa limite disponible, les pentes d'accélération deviennent par conséquent plus faibles. La platine doit alors compenser en augmentant la

vitesse maximale de déplacement des vantaux pour réussir à atteindre son objectif de 3,5 *sec* sur les temps d'ouverture et de fermeture.

Pour tous les indicateurs de performance, le R^2 associé à la régression linéaire est supérieur à 0.71, ce qui montre, que le modèle explique relativement bien les données expérimentales (le Tableau 4.4 donne les R^2 indicateur par indicateur).

Indicateurs	R^2	*F-ratio*
$TO_P(e)$	0.71	1
$TF_P(e)$	0.81	1.75
$VmaxO_P(e)$	0.96	10.7
$VmaxF_P(e)$	0.88	3.02
$CIO_P(e)$	0.77	1.3
$CIF_P(e)$	0.76	1.29

Tableau 4.4 : R^2 du sous-système porte du plan d'expériences 4

Un bon *F-ratio* doit être supérieur à 1 ce qui est bien le cas dans notre régression. Néanmoins, dans le cadre de cette application, le meilleur *F-ratio* est de 10,7 ce qui permet de valider le modèle dans le cas de $VmaxO_p(e)$. Par contre, dans le cas des autres indicateurs, le modèle n'est pas très significatif puisqu'on reste dans des F-ratio proche de 1. Ce modèle explique en bonne partie les résultats mais pourrait encore être affiné.

4.5.3.3. Analyse des β

Le Tableau 4.5 donne les valeurs et les *P-value* associées à chacun des coefficients du modèle.

Facteurs	TO_P		TF_P		$VmaxO_P$		$VmaxF_P$		CIO_P		CIF_P	
	valeur	*P-value*	*valeur*	*P-value*	*Valeur*	*P-value*	*valeur*	*P-value*	*valeur*	*P-value*	*valeur*	*P-value*
β_0	3,66	<,0001	3,47	<,0001	0,500	<,0001	0,557	<,0001	9,76	<,0001	9,76	<,0001
β_1	0,02	0,0513	0,045	0,0485	0,016	<,0001	0,009	0,0009	-0,011	0,2675	-0,010	0,3150
β_2	0,007	0,5153	0,012	0,5613	-0,001	0,3680	0,001	0,5196	0,005	0,6147	0,005	0,6206
β_3	-0,009	0,3859	0,038	0,0912	-0,002	0,0886	-0,001	0,3484	-0,006	0,5449	-0,005	0,5918
β_4	-0,009	0,3478	0,026	0,1787	0,0009	0,4050	0,004	0,0344	0,028	0,0155	0,0273	0,0160
β_5	0,009	0,3478	-0,026	0,1787	-0,0009	0,4050	-0,004	0,0344	-0,028	0,0155	-0,027	0,0160
β_6	0,007	0,5891	0,025	0,3447	-0,004	0,0131	-0,009	0,0040	-0,01	0,4400	-0,008	0,5322
β_7	-0,0006	0,9640	0,012	0,6292	0,0002	0,8599	0	0,9884	0,007	0,5547	0,006	0,6037
β_8	-0,006	0,6298	-0,038	0,1819	0,004	0,0197	0,009	0,0048	0,002	0,8538	0,001	0,9158
β_9	0,003	0,7677	0,005	0,7936	-0,001	0,3755	0	0,8668	0,014	0,2185	0,013	0,2341
β_{10}	-0,008	0,4847	0,034	0,1420	-0,0008	0,5185	0	0,9667	0,004	0,6642	0,005	0,6108
β_{11}	-0,017	0,1605	0,056	0,0275	0	0,9504	-0,001	0,5685	-0,003	0,7700	-0,001	0,8698
β_{12}	0,0172	0,1605	-0,056	0,0275	0	0,9504	0,001	0,5685	0,003	0,7700	0,001	0,8698
β_{13}	0,0001	0,9937	-0,055	0,0842	-0,003	0,1207	0,001	0,6668	0,011	0,4446	0,012	0,3958
β_{14}	-0,024	0,1430	0,003	0,8966	-0,0005	0,7717	0,001	0,4897	-0,032	0,0526	-0,032	0,0452
β_{15}	0,023	0,1448	0,051	0,1035	0,003	0,0761	-0,003	0,2754	0,02	0,1800	0,020	0,1789
β_{16}	0,004	0,7114	0,006	0,7721	0,001	0,4367	0,001	0,5574	0,014	0,2237	0,012	0,2581
β_{17}	-0,011	0,3267	-0,003	0,8762	0,001	0,4421	0	0,8065	0	0,9316	-0,001	0,8767
β_{18}	0,011	0,3267	0,003	0,8762	-0,001	0,4421	0,0004	0,8065	0,0009	0,9316	0,001	0,8767
β_{19}	0,022	0,1659	0,021	0,4638	0,001	0,5260	-0,002	0,3197	-0,002	0,8681	-0,001	0,9172
β_{20}	-0,016	0,3122	0,019	0,5000	0,0001	0,9170	0,003	0,2722	-0,009	0,5020	-0,008	0,5362
β_{21}	-0,006	0,6675	-0,041	0,1782	-0,001	0,4631	0	0,9088	0,012	0,4074	0,010	0,4727
β_{22}	-0,0001	0,9929	0,028	0,2107	0,002	0,2452	0,0008	0,6689	0,002	0,7961	0,004	0,6648
β_{23}	0,0001	0,9929	-0,028	0,2107	-0,001	0,2452	0	0,6689	-0,002	0,7961	-0,004	0,6648
β_{24}	-0,008	0,5910	-0,008	0,7684	-0,0004	0,8208	-0,002	0,4982	-0,009	0,5113	-0,01	0,4919
β_{25}	0,003	0,8102	0,007	0,7856	-0,001	0,3995	0	0,7626	-0,01	0,3745	-0,013	0,3751
β_{26}	0,004	0,7634	0,0006	0,9819	0,001	0,2936	0,003	0,3366	0,023	0,1422	0,02	0,1356
β_{27}	0,012	0,3748	-0,008	0,7543	0	0,9877	0,0004	0,8642	-0,011	0,4036	-0,011	0,3683
β_{28}	-0,003	0,7984	0,010	0,6864	0,0006	0,7085	0,0009	0,7489	0,005	0,6816	0,006	0,6374
β_{29}	-0,009	0,5303	-0,002	0,9289	-0,0005	0,7277	0	0,6353	0,005	0,6697	0,005	0,6646
β_{30}	-0,012	0,3748	0,008	0,7543	0,00002	0,9877	0	0,8642	0,011	0,4036	0,011	0,3683
β_{31}	0,003	0,7984	-0,010	0,6864	-0,0006	0,7085	0	0,7489	-0,005	0,6816	-0,006	0,6374
β_{32}	0,009	0,5303	0,002	0,9289	0,0006	0,7277	0,001	0,6353	-0,005	0,6697	-0,005	0,6646

Tableau 4.5 : Estimation et P-value des coefficients du sous-système porte du plan d'expériences 4. Les valeurs en rouge représentent les coefficients potentiellement influents sur la moyenne de l'indicateur

La P-value (paragraphe 2.3.3.2.2) caractérise les coefficients qui ont une influence sur la performance moyenne. Dans le cas présent, les coefficients β sont associés à des facteurs X qui montrent le manque de robustesse mécanique de notre système. Ici, on constate que :

- L'indicateur $TO_p(e)$ manque de robustesse vis-à-vis du coefficient β_1 correspondant à la poussée des voyageurs.
- L'indicateur $TF_p(e)$ manque de robustesse par rapport aux coefficients β_1 β_3 β_{11} β_{12} et β_{13} correspondant à la poussée des voyageurs, au poids des voyageurs et aux

interactions entre poussée des voyageurs/obstacles et poussée des voyageurs/dévers à -7°.

- Les indicateurs $VmaxO_p(e)$ et $VmaxF_p(e)$ sont eux sensibles à β_1 (poussée des voyageurs), β_6 (dévers -7°) et β_8 (dévers +7°). On remarquera que les interactions n'ont presque pas d'influence sur les indicateurs liés à la vitesse.
- Les indicateurs CIO_p et CIF_p manquent de robustesse face à β_4, β_5 et β_{14} à savoir, l'obstacle et l'interaction poussée des voyageurs/ dévers 0°. Ce résultat très surprenant vis-à-vis de l'interprétation précédente des données, laisse à penser que la marge de quantité de courant injectable par la platine est faible.

Sur l'ensemble des indicateurs, les coefficients β_1 β_6 et β_8 montrent que les sollicitations X_1, $X_5[L_1]$ et $X_5[L_3]$ ont le plus d'influence sur les performances du système (le signe positif du coefficient indique une performance négative pour β_1 et β_8 alors que le signe négatif de β_6 indique une amélioration des performances du système). Ces coefficients correspondent aux facteurs « poussée des voyageurs » et « dévers à -/+7°». Cela s'explique, mécaniquement, par une forte augmentation des frottements à l'intérieur du mécanisme. Pour la même raison, le coefficient β_{15} indique que l'interaction entre la poussée des voyageurs et le dévers à +7° est la plus pénalisante pour les indicateurs de performance. Les coefficients β_4, β_5 ont une influence sur l'indicateur CIO_P et CIF_p mais le signe négatif de cette influence indique une amélioration de la robustesse.

4.5.3.4. Analyse des interactions

Les graphiques des interactions associés à chaque indicateur montrent comment évolue chaque indicateur de performance en fonction des interactions possibles et met en évidence le peu d'influence des interactions excepté pour les interactions entre la poussée voyageurs et le dévers. La figure 4.14 montre le graphique des interactions appliquées à la consommation de courant durant l'ouverture.

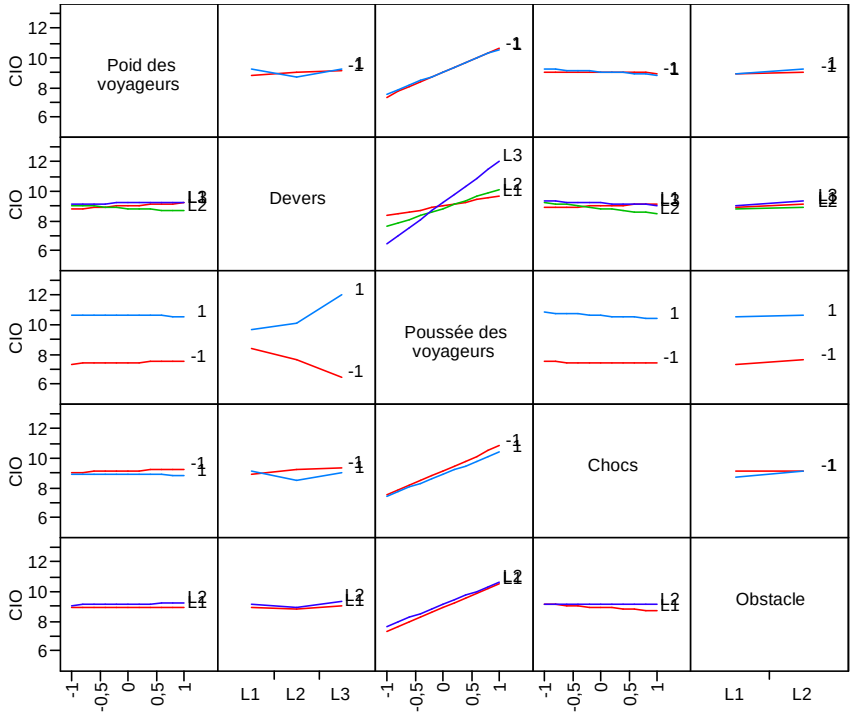


Figure 4.14 : Graphique d'évaluation des interactions entre les U facteur appliqué a CIO_p

Cette figure montre une grande variation de *CIOp* pour l'interaction entre X_1 et X_5 confirmant que cette interaction ne doit pas être négligée dans les interprétations et dans les futurs projets.

4.5.3.5. Analyse de la désirabilité

La Figure 4.15 ci-après représente le graphique de désirabilité du sous-système « porte ». Sur ce graphique, le pointillé horizontal rouge permet de repérer la désirabilité associée à une modalité d'une combinaison de facteurs ici, la combinaison est ($X_1=0$, $X_2=0$, $X_3=0$, $X_4=L_1$ et $X5=L_1$). Pour cette combinaison, la désirabilité est maximale pour $TO_P(e)$ mais minimale pour $TF_P(e)$. Néanmoins, la cible atteinte est inférieure au requis contractuel pour $TF_P(e)$, ce qui témoigne d'une marge de robustesse sur $TF_P(e)$.

Concernant la vitesse, la désirabilité est moyenne pour $VmaxO_P(e)$ et maximale pour $VmaxF_P(e)$. De la même manière, on atteint une désirabilité moyenne pour $CIO_P(e)$ et une désirabilité maximale pour CIF_P. Cela confirme que l'on a une bonne performance en ouverture mais peu de marge de robustesse, ainsi qu'une excellente performance en fermeture accompagnée d'une bonne marge de robustesse.

L'étude de la désirabilité liée à chaque facteur montre que seule la sollicitation « Dévers » provoque une importante variation de la désirabilité. Cela se traduit par une amélioration des performances dans le cas d'un dévers négatif (diminution des frottements internes au mécanisme), et une dégradation des performances dans le cas d'un dévers positif (augmentation des frottements internes au mécanisme).

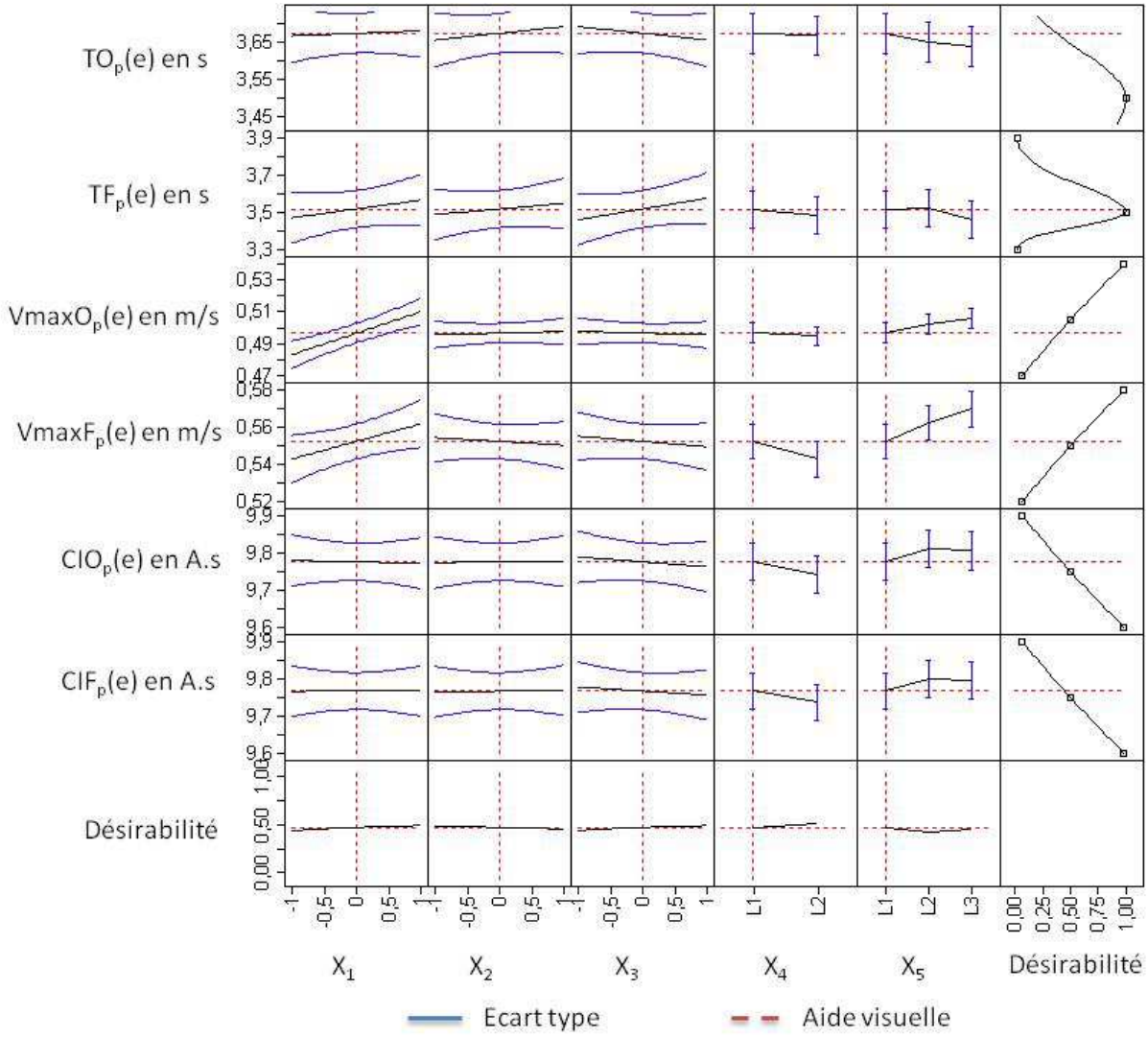


Figure 4.15 : Graphique de désirabilité du sous-système porte

4.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté une démarche d'extraction de connaissances sur le système accès voyageurs d'un matériel ferroviaire. Dans un premier temps, la première partie du processus expérimental a permis d'identifier les « maillons » les plus faibles du système (chapitre 4.2). Ensuite, après diverses améliorations apportées au système et un réel travail de

fond avec le fournisseur, nous avons obtenu un prototype qui lors de la phase de validation n'a plus montré de « maillons » faibles significatifs et a finalement permis d'établir un modèle comportemental prompt à juger de la présence ou de l'absence de marge de robustesse vis-à-vis des performances attendues du système.

Ce chapitre a également conforté les choix faits tout au long de cette thèse, que ce soit du point de vue du processus expérimental ou de celui concernant le choix du modèle de régression. Ce modèle peut encore être amélioré mais l'objectif pour la première campagne d'essais a été atteint.

Le chapitre suivant va présenter les conclusions de ce travail synthétisant les résultats et reprenant de manière critique les hypothèses choisies. Enfin, il fournira des pistes potentielles d'améliorations.

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Facteurs du sous-système porte du plan d'expériences 4 ..... *123*
Tableau 4.2 : Expériences influentes sur Tp et Vmaxp ; en rouge, les facteurs influents *135*
Tableau 4.3 : Expériences influentes sur ClOp et ClFp ; en rouge, les facteurs invariants supposés influents *135*
Tableau 4.4 : R² du sous-système porte du plan d'expériences 4 ..... *136*
Tableau 4.5 : Estimation et P-value des coefficients du sous-système porte du plan d'expériences 4. Les valeurs en rouge représentent les coefficients potentiellement influents sur la moyenne de l'indicateur *137*

Table des illustrations

Figure 4.1 : Les signaux temporels Position Porte Pp(t) (position relative entre les deux vantaux) et Intensité Courant Moteur Porte Ip(t) *113*
Figure 4.2 : Elaboration des indicateurs relatifs aux temps d'ouverture et de fermeture, et aux vitesses maximales d'ouverture et de fermeture. *115*
Figure 4.3 : Elaboration des indicateurs relatifs à l'intensité du courant en ouverture et en fermeture *116*
Figure 4.4 : Expertise du gonflement des vantaux *118*
Figure 4.5 : Expertise de la déformation de la pièce de reprise d'effort latéral du galet de la marche mobile .. *119*
Figure 4.6 : Expertise de la défaillance due au réglage du patin inférieur de porte *121*
Figure 4.7 : $I_P(t)$ perturbés par des effets CEM *125*
Figure 4.8 : Graphique des variables ACP de Te – Les variables représentent les indicateurs de performance, les facteurs sont les colonnes illustratives en rouge *127*
Figure 4.9 : Graphique des variables ACP – décomposition de X5 ..... *128*
Figure 4.10 : Nuage de points PCA issue de Te *129*
Figure 4.11 : Nuage de points PCA issu de Te plus les lignes illustratives (points rouge) : 1/ un essai ou X1= 0kPa et X5 =-7 ; 2/ un essai ou X1=6kPa et X5=-7°; 3/ un essai ou X1=6kPa et X5=7° – Mise en évidence de l'influence du dévers et de la poussée voyageurs *130*
Figure 4.12 : Nuage de points PCA issu de Te plus les lignes illustratives (points rouge) : 1/ un essai ou X4=L1 ; 2/ un essai ou X4=L2 – Mise en évidence de la non-influence de l'obstacle *131*
Figure 4.13 : Graphique d'évaluation de la qualité du modèle porte sur chaque indicateur de V1eP – « Predicted Plot » *134*
Figure 4.14 : Graphique d'évaluation des interactions entre les U facteur appliqué a ClO_p *139*
Figure 4.15 : Graphique de désirabilité du sous-système porte *140*

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale

Au-delà de la performance standard en fiabilité d'un système ferroviaire définie par les fournisseurs afin de respecter les requis contractuels, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont eu pour principal objectif de valider, par l'expérimentation, la robustesse du système accès voyageurs. Cette démarche a conduit implicitement à une amélioration de la fiabilité en exploitation. Le travail a ainsi consisté en la détection et correction de toutes les sources possibles de dysfonctionnement et ce, dès la phase de conception.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, un état de l'art pluridisciplinaire portant sur la sûreté de fonctionnement, la complexité des systèmes, les plans d'expérience et démarches statistiques associées, a permis d'identifier l'ensemble exhaustif de tâches à réaliser pour atteindre une croissance de fiabilité. Une attention toute particulière a été portée sur les méthodes expérimentales d'essais en fiabilité tels que les essais aggravés permettant d'améliorer au plus tôt la robustesse d'un produit. Deux méthodes complémentaires de traitement des données expérimentales ont été également décrites à savoir d'une part, la démarche statistique et d'autre part, la théorie des plans d'expériences.

Le deuxième chapitre de ce mémoire traite des plans d'expériences de type D-Optimal utilisés dans le cadre de ces travaux et a exposé les différents principes mathématiques permettant de définir la D-optimalité. Il a été ainsi montré comment il était possible de déterminer les plans d'expériences associés à différentes constructions algorithmiques. Ces constructions étant difficilement réalisables par l'Homme sans outil informatique, la construction mathématique d'un plan D-optimal grâce au logiciel SAS JMP a été exposée. Cette démonstration a été accompagnée d'un exemple pratique qui a permis de vérifier que le logiciel a correctement répondu aux attentes de l'expérimentateur. Il a été également montré que l'utilisation des plans d'expériences implique une rigueur et un protocole bien spécifiques pour réaliser les essais (variation simultanée des facteurs, ordre des essais, etc.). Cette constatation a entraîné la conception d'un banc d'essais adapté aux différentes spécificités de l'expérimentation.

Le troisième chapitre de ce mémoire présente le processus expérimental qui a été mis en place pour la croissance de fiabilité du système accès voyageurs. Il a posé les bases des expérimentations menées durant la thèse. Dans un premier temps, ont été présentés le spécimen à tester et le domaine expérimental associé dont la principale caractéristique est d'être très étendue. Puis, il a été montré l'articulation entre les différents essais pour atteindre les objectifs de croissance de fiabilité. Enfin, le banc d'essais conçu dans le cadre de ces travaux a été présenté ainsi que les jeux de données à exploiter statistiquement de façon à mettre en évidence les différents points d'amélioration du système, les marges de robustesse du système et les équations reliant la performance aux sollicitations rencontrées en exploitation.

Le quatrième chapitre a eu pour objet de présenter les différents résultats issus des campagnes d'essais qu'ils soient qualitatifs (expertise des défaillances) ou quantitatifs (analyse statistique des résultats). La première partie du processus expérimental a permis d'identifier les « maillons » les plus faibles du système. Après diverses améliorations apportées au système et un réel travail de fond avec le fournisseur, un prototype a été obtenu qui, lors de la phase de validation, n'a plus montré de « maillons » faibles significatifs et a finalement permis d'établir un modèle comportemental prompt à juger de la présence ou de l'absence de marge de robustesse vis-à-vis des performances attendues du système. Ceci a permis de conforter les choix faits tout au long de cette thèse, que ce soit du point de vue du processus expérimental ou de celui concernant le choix du modèle de régression. Ce modèle peut encore être amélioré mais l'objectif pour la première campagne d'essais a été atteint.

La conclusion générale de ce travail synthétisant les résultats et reprenant de manière critique les hypothèses choisies est exposée ci-après :

- en ce qui concerne l'étude qualitative, l'analyse des résultats a fait ressortir les défaillances qui seraient vraisemblablement apparues en exploitation. Ceci a donc permis de les anticiper et de faire modifier le système avant la mise en service commercial effective du matériel roulant. Suite aux retours d'expériences (plus de deux années d'exploitation à ce jour), nous pouvons clairement affirmer que cet objectif a été atteint pour l'ensemble des défaillances mécaniques constatées puisque seules deux défaillances significatives d'ordre

mécanique ont finalement été constatées. Par contre, de nombreuses défaillances d'ordre électronique ont été décelées durant ces deux premières années de service commercial.

- en ce qui concerne l'étude quantitative, elle a permis de vérifier la méthode d'acquisition. L'étude a montré que les courbes temporelles (et leur fréquence d'acquisition), ainsi que les indicateurs sélectionnés avant l'étude, ont été suffisants pour expliquer les phénomènes observés lors des différentes campagnes d'essais. Elle a également permis de vérifier la qualité des indicateurs sélectionnés (en exploitant au maximum les signaux disponibles sur un système d'accès voyageurs et a fortiori sur un train), et d'expliquer les phénomènes identifiés durant l'expérimentation. Les six indicateurs retenus ont été considérés de bonne qualité et ont permis de justifier tous les cas de dégradation de performances ou de dysfonctionnements du système accès voyageurs. Enfin, l'étude quantitative a conduit à caractériser une loi de comportement de la dégradation de la performance en reliant les indicateurs de performance à une loi linéaire. Les facteurs identifiés comme très influents sur la performance du système furent au final le dévers et la poussée des voyageurs.

Globalement, l'objectif industriel principal visant à diminuer le nombre de défaillances mécaniques en exploitation est pleinement atteint. Par contre, dans le cadre d'un projet ferroviaire, la durée de conception d'un système étant très courte, le planning initial de réalisation des essais a été largement dépassé. Plusieurs causes à cela :

- Le délai de conception du banc des accès voyageurs. Partant de zéro pour la réalisation du banc, le temps de conception fût plus long que prévu d'environ six mois.
- Le délai de livraison du prototype. Etant de la responsabilité du fournisseur, celui-ci a été un risque fort de dérive du planning. En effet, le début des expérimentations a été conditionné par la réception d'un prototype suffisamment représentatif du système définitif pour que les résultats soient interprétables. Dans notre cas, le retard fut de six mois.
- Le délai de réponse du fournisseur. Celui-ci a été responsable de la fourniture du prototype et de sa réparation entre les phases d'essais 3 et 4. Sa faible réactivité a conduit à une dérive du planning d'environ six mois sur le planning initial.
- Le délai de traitement des données. L'ensemble des routines de calcul et de traitement des données a dû être développé. Ce temps de conception a été sous-

estimé et a duré environ un an. L'étude ayant pour objectif de quantifier des phénomènes dégradants conduisant à la panne, il a été particulièrement délicat de trouver le bon compromis entre une donnée exploitable et une donnée trop dégradée pour être qualifiée d'exploitable. La recherche de ce compromis a impliqué plusieurs versions et plusieurs méthodologies de traitement de l'information des signaux bruts.

Certaines tâches décrites ci-avant étant en parallèle au final, le planning a dérivé d'un an et demi par rapport au planning industriel, celui-ci ayant démarré six mois avant le début officiel de la thèse.

Au final, peu de défaillances mécaniques sont apparues en exploitation. Fort de ce constat, on peut conclure que la phase d'investigation des défaillances (c-à-d. les trois premiers plans d'expériences) a été suffisante pour ce contrat et a répondu aux objectifs industriels.

Perspectives

Les perspectives liées à ce travail peuvent être divisées en deux catégories : les perspectives industrielles et les perspectives scientifiques.

Les perspectives industrielles :

- La notion de multi-projets. Le banc d'accès voyageurs n'a pas été conçu pour n'être utilisé que sur un seul contrat et les résultats positif obtenus sur le premier contrat doivent être validés pour les contrats en cours ou à venir.
- La maintenance prédictive. Le banc d'accès voyageurs offre une base de données avant exploitation extrêmement riche. L'une des utilisations possibles de cette base de données est la création et l'ajustement des indicateurs pouvant servir à la maintenance prédictive [GAN.11][GAN.12].
- Le type d'accès voyageurs. La méthodologie a permis d'avoir une connaissance théorique de la dégradation de la performance d'un système composé d'une marche mobile coulissante et d'une porte coulissante à double vantaux. Il faut maintenant continuer cette étude pour les autres types de marche mobile et de porte existante dans le ferroviaire (marche de type « gap bridge » et porte de type louvoyante double et simple vantail).

Les perspectives scientifiques :

- L'amélioration du modèle. Pour une première tentative, nous avons choisi d'utiliser un modèle linéaire d'ordre 1. Même si cela a donné des résultats satisfaisants, il est possible de faire mieux en considérant un modèle plus élaboré [GOU.95][GAU.97].
- L'amélioration des plans d'expériences. Les plans D-optimaux ont été choisis car ce sont les plans les plus couramment utilisés dans l'entreprise et les plus aisés à mettre en place. Néanmoins, l'avancée des logiciels donne maintenant d'autres perspectives. Il existe un grand nombre de plans optimum permettant d'avoir des nombres d'essais différents qui peuvent être plus adaptés à ce que l'on recherche industriellement.

- En particulier, les plans D-optimaux Bayésien. Ceux-ci peuvent permette de réduire le nombre d'essais en transgressant la règle du nombre minimal d'essais associé aux plans d'expériences classiques.
- Le plan de type I-optimal est un plan utilisant un autre critère que le critère d'optimisation D. Des articles ont montré que les résultats de ce type de plan étaient très adaptés à la problématique de l'ingénierie. Cette méthodologie est aussi gérée par le logiciel JMP [KAP.98].
- L'amélioration du choix des facteurs. Une des conclusions apportées par cette étude est le peu d'influence des interactions des facteurs. Le fait de mieux sélectionner les interactions que l'on souhaite étudier grâce au retour d'expériences acquis au cours de cette thèse, peut permettre de réduire significativement le nombre d'essais et par conséquent de passer sur des types de plans d'expériences compressant moins le domaine expérimental tout en restant dans un nombre raisonnable de cycles.
- L'amélioration du domaine expérimental. Le retour d'expériences en exploitation montre que l'étude de la partie mécanique ne suffit plus étant donné le degré de complexité du système. Il faut maintenant trouver un moyen d'intégrer l'étude de la robustesse électronique voir même informatique au modèle expérimental.
- L'amélioration de l'exploitation informatique et statistique de données. Dans notre application, les plans d'expériences ont généré de multiples signaux multidimensionnels cycliques (par exemple, ouverture/fermeture de porte). Si l'approche pour l'étude d'effets des facteurs via l'analyse de variance requiert de considérer en entrée des « indicateurs », il reste indéniable que passer des données temporelles à de tels indicateurs *et* exploiter ces indicateurs par une approche monovariée, engendrent une forte perte d'information. Se pose donc d'abord le choix de ces indicateurs, donc de la caractérisation de signaux cycliques, puis de l'analyse des effets en gardant les aspects multifactoriels *et* multivariés. Ces deux phases devraient également permettre de montrer plus rapidement des imperfections dans les données [CAU.12], [LOS.12].

L'ensemble de ces perspectives sont prévues d'être réalisées chez Bombardier par le lancement d'une campagne d'essais sur un nouveau contrat qui va, dans la mesure du possible, intégrer le retour d'expériences de ce travail. De plus, un projet de maintenance prédictive a été lancé en consortium entre bombardier, l'IFSTAR et l'université de

Valenciennes pour traiter les sujets de maintenance prédictive avec pour support le banc d'essais du système d'accès voyageurs.

Références Bibliographiques

[AFN.88b] Afnor (1988) **TERMINOLOGIE RELATIVE A LA FIABILITE – MAINTENABILITE – DISPONIBILITE**, afnor-Ute.

[AFN.94] Afnor (1994) **MAINTENANCE CONCEPTS ET DEFINITIONS DES ACTIVITES DE MAINTENANCE**, afnor-Ute.

[APF.10] Bombardier (2010) **ANALYSE PRELIMINAIRE DE FIABILITE**, Bombardier.

[CAU.05] Cauffriez L. (1995) **METHOD AND MODEL FOR DEPENDABILITY VALUATION OF COMPLEX AUTOMATED SYSTEM : APPLICATION TO THE PERFORMANCE OF PRODUCTION LINES – APPLICATION TO THE DESIGN OF INTELLIGENT DISTRIBUTED CONTROL, SYSTEMS,** Thèse de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

[CAU.12] Cauffriez L., Loslever P., Caouder N., Turgis F., Copin R. (2012). **ROBUSTNESS STUDY AND RELIABILITY GROWTH BASED ON EXPLORATORY DESIGN OF EXPERIMENTS AND STATISTICAL ANALYSIS. CASE STUDY USING A TRAIN DOOR TEST BENCH**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology

[CET.05] Le **MANAGEMENT DE LA FIABILITE DANS LES PROJETS : UN ENJEU STRATEGIQUE, PREFACE DE GUY PLANCHETTE PRESIDENT DE L'IMDR SDF**, ISBN 2-85400-655-0.

[CHE.10] Chen Weiji (2010) **STANDARDISATION DU PROGRAMME DE PLAN D'EXPERIENCES ASSOCIE AU BANC DE PORTE**, Bombardier.

[COC.97] Cocozza C. et Thivent (1997) **PROCESSUS STOCHASTIQUE ET FIABILITE DES SYTEMES**, Edition Springer.

[COO.89] Cook, R.D. and Nachtsheim, C.J. (1989), **COMPUTER-AIDED BLOCKING OF FACTORIAL AND RESPONSE-SURFACE DESIGNS**, Technometrics, 31, 339 -346

[DER.80] Derringer, G., and Suich, R., (1980), **SIMULTANEOUS OPTIMIZATION OF SEVERAL RESPONSE VARIABLES**, Journal of Quality Technology, 12, 4, 214-219.

[DID.82] DIDAY E., LEMAIRE J., POUJET J., TESTU F. (1982), **ELEMENTS D'ANALYSE DES DONNEES**, Editions Dunod, Paris.

[EN5.86] EN 50126 (1986) **RALWAY APPLICATIONS – THE SPECIFICATION AND DEMONSTRATION OF RELIABILITY, AVALIABILITY, MAINTENABILITY AND SAFETY.**

[FED.72] Fedorov V.V., **THEORIE OF OPTIMAL EXPERIMENTS**, Academic press NY.

[FIS.25] Fisher R.A. (1935) **STATISTICAL METHOD FOR RESEARCH WORKERS**, Oliver and Boyd.

[FIS.35] Fisher R.A. (1935) **THE DESIGN OF EXPÉRIMENTS**, Oliver and Boyd.

[FOA.02] Foata D.et Fuchs (2002) **PROCESSUS STOCHASTIQUE**, Editions Dunod.

[FOW.00] Fowlkes W.Y. (2000) **L'INGENIERIE ROBUSTE: METHODES TAGUCHI EN CONCEPTION,** Paris, France : Dunod.

[GAN.11] Gandibleux J., Cauffriez L. et Branger G. (2012) **IMPROVING THE RELIABILITY/AVAILABILITY OF A COMPLEX SYSTEM BY AN ACTIVE MONITORING BASED ONTO "AUGMENTATION CONCEPT": APPLICATION ONTO A RAILWAY SYSTEM**. ESREL 2011.

[GAN.12] Gandibleux J., Cauffriez L. et Branger G. (2012) **EVALUATION DE FMD D'UN SYSTEME DYNAMIQUE HYBRIDE PAR RESEAUX DE PETRI: APPLICATION A UN ACCES VOYAGEURS**. LambdaMu 18

[GAU.97] Gauchi J.P. (2005) **PLANS D'EXPERIENCES APPLICATION A L'ENTREPRISE** chap 7 et 8, TECHNIP.

[GAU.05] Gauchi J.P. (2005) **PLAN D'EXPERIENCES OPTIMAUX : UN EXPOSE DIDACTIQUE**, Modulab.

[GAU.09] Gauss C.F. (1809) **THEORIA MOTUS CORPORUM COELESTIUM IN SECTIONIBUS CONICIS SOLEM AMBIENTUM**, Hamburg Friedrich Perthes and I.H. Besser

[GUE.01] Guérin F, Lantieri P. et Dumon B. (2001) **APPROCHE THEORIQUE DES ESSAIS AGGRAVES**, Astelab.

[GOU.06] Goupy J. et Creighton L. (2006) **INTRODUCTION AUX PLANS D'EXPERIENCES**, Dunod.

[GOU.00] Goupy J. (2000) **MODELISATION PAR LES PLANS D'EXPERIENCES**, Technique de l'ingénieur R 275.

[GOU.95] Goupy J. (1995) **PLANS D'EXPERIENCES NON CONVENTIONNELS. THEORIE ET APPLICATIONS (OU COMMENT SAUVER UN PLAN RATE)**, Analysis.

[KAP.98] Kappele W.D.(1998), **USING I-OPTIMAL DESIGNS FOR NARROWER CONFIDENCE LIMITS**, IASI Orlando.

[KIE.59] Kiefer J. (1959) **OPTIMUM EXPERIMENTAL DESIGN**, J.R. Statist Soc.

[LAN.01] Lannoy A., Procacia H., **L'UTILISATION DE JUGEMENTS D'EXPERT EN SURETE DE FONCTIONNEMENT**, Editions Tec & Doc, Paris, 2001.

[LEW.94] Lewis E. E. (1994), **INTRODUCTION TO RELIABILITY ENGINEERING**, John Wiley & son.

[LOS.96] Loslever P. (1996). **MODELES DE CARACTERISATION DE DONNEES OBJECTIVES ET SUBJECTIVES POUR L'ANALYSE DES DONNEES MULTIDIMENSIONNELLES**. Habilitation à diriger les recherches de L'université de Valenciennes.

[LOS.01] Loslever P., (2001) **OBTAINING INFORMATION FROM TIME DATA STATISTICAL ANALYSIS IN HUMAN COMPONENT SYSTEM STUDIES**, Elsevier et Information science.

[LOS.06] Loslever P., Maquingen-Godillon A-P. (2006). **PRISE EN COMPTE DE DONNEES SUBJECTIVES DANS L'ETUDE DE SYSTEMES A COMPOSANTE HUMAINE**. JESA, 39(5-6), pp. 579-604.

[LOS.12] Loslever P., Cauffriez L., Caouder N., Turgis F., Copin R. (2012). **A SCALE FUZZY WINDOWING COMPARISON APPLIED TO MULTIVARIATE DESCRIPTIVE ANALYSIS. INTELLIGENT DATA ANALYSIS**, 16(2), pp. 279-303

[LYO.06] Lyonnet P. (2006) **INGENIERIE DE LA FIABILITE**, Lavoisier.

[MCL.98] Mc Lean H. (1998) **MANAGING HALT ISSUE**, Nepcon proceding.

[MUL.08] Muller Loic (2008). **PROGRAMATION DE L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE DU BANC D'ESSAI**, Bombardier.

[NEL.90] Nelson W. (1990) **ACCELERETED TESTING : STATISTICAL MODELS, TEST PLANS AND DATA ANALYSIS**, Ed. Wiley, New York.

[NFE.04] Norme Française (2004) **MECATRONIQUE – VOCABULAIRE**, afnor-Ute.

[NIK.07] Nikulin M., Gerville-Réache L. et Coualier Vincent (2007), **STATISTIQUE DES ESSAIS ACCELERE**, Broché.

[PAG.95] Pagès A. et Gondran M. (1995), **FIABILITE DES SYSTEMES**, Eyrolles.

[ROB.05] Robert M. Chovin A. Bayart M. et Conrard B. (2005), **CAPTEURS ET ACTIONNEURS INTELLIGENTS**, Techniques de l'ingénieur Ref S7520.

[SAP.90] Saporta G., (1990) **PROBABILITE, ANALYSE DES DONNEES ET STATISTIQUE**, Technip.

[SIL.80] Silvey S.D., (1980) **OPTIMAL DESIGN: AN INTRODUCTION TO THE THEORY FOR PARAMETER**, Kluwer Academic Publishers

[STE.74] Stevens S.S. (1974), **SCALING : A SOURCEBOOK FOR BEHAVIORAL SCIENTISTS**, Aldine Publishing Co., Chicago.

[TEB.05] Tebbi O. (2005) **ESTIMATION DES LOIS DE FIABILITE EN MECANIQUE PAR LES ESSAIS ACCELERES**, Thèse Ecole doctoral d'Angers.

[TUF.83] Tufte E. R. (1983) **THE VISUAL DISPLAY OF QUANTITATIVE INFORMATION**. Cheshire, CT, Graphics Press.

[TUR.10] Turgis F., Copin R., Loslever P., Cauffriez L., Caouder N. (2010). **PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR LA REALISATION D'ESSAIS DE FIABILITE SUR UN SYSTEME COMPLEXE D'ACCES VOYAGEUR**. Lambda MU 17, janvier .

[VES.87] Vesely, W.E. (1987) **FAULT TREE HANDBOOK**, Government Printing Office.

[WEI.39] Weibull W. (1939). **A STATISTICAL THEORY OF THE STRENGTH OF MATERIALS**. Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar Nr 151, Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm.

[ZWI.99] Zwingelstein G. (1999), **SURETE DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES INDUSTRIELS COMPLEXES**, Technique de l'ingénieur S8250.

ANNEXES :

Annexe 1 : Les Interfaces Homme-Machine (IHM) de SAS-JMP..... 155

Annexe 2 : Plan d'expériences de l'exemple simulé..... 163

1. Plan à 8 essais..... 163

1.1. **Cas 0 : dispersion(ε)=0 .....163**

1.2. Cas 1 : dispersion(ε)=0.5.....165

1.3. Cas 2 : dispersion(ε)=1 166

1.4. Cas 2 : dispersion(ε)=1 + 1 point aberrant 167

2. Plan à 8 essais + 1 point central..... 168

2.1. Cas 1 : dispersion(ε)=0.5.....168

2.2. Cas 2 : dispersion(ε)=1 169

2.3. Cas 3 : dispersion(ε)=1+1 point aberrant centrale 170

2.4. Cas 4 : dispersion(ε)=1+1 point aberrant.....171

3. Plan à 8 essais + 2 répétitions +1point central 172

3.1. Cas 1 : dispersion(ε)=0.5.....172

3.2. Cas 2 : dispersion(ε)=1 174

3.3. Cas 2 : dispersion(ε)=1+1 point de répétition aberrant.....176

3.4. Cas 2 : dispersion(ε)=1+1 point central de répétition aberrant.....178

Annexe 3 : Définition des sollicitations et des efforts appliqués 181

1. Sollicitations externes 181

1.1. Charge voyageurs sur le système.....181

1.2. Charge voyageurs sur marche mobile 182

1.3. Poussée voyageurs sur porte.....184

1.4. Fonction choc obstacle 186

1.5. Portique..... 186

2. Sollicitations internes..... 193

2.1. Sollicitation internes de la porte 193

2.2. Sollicitations internes de la marche mobile 194

2.3. Sollicitations internes communes 195

3. Sollicitations environnementales 196

3.1. Nettoyage intérieur..... 196

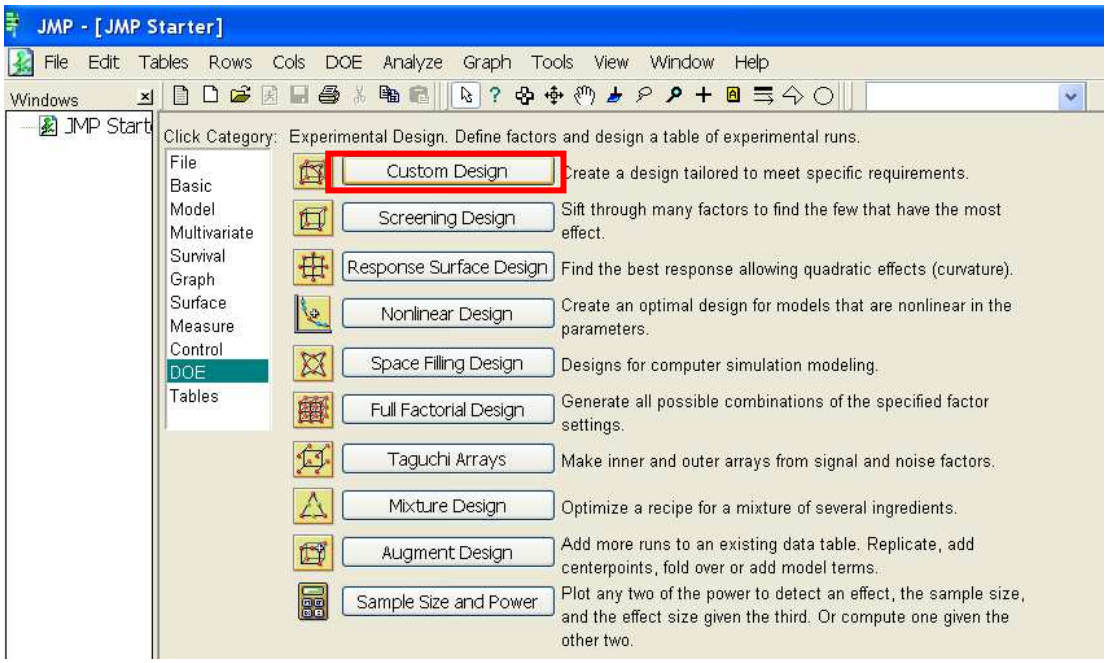
3.2. Poussière 196

3.3. Pluie 197

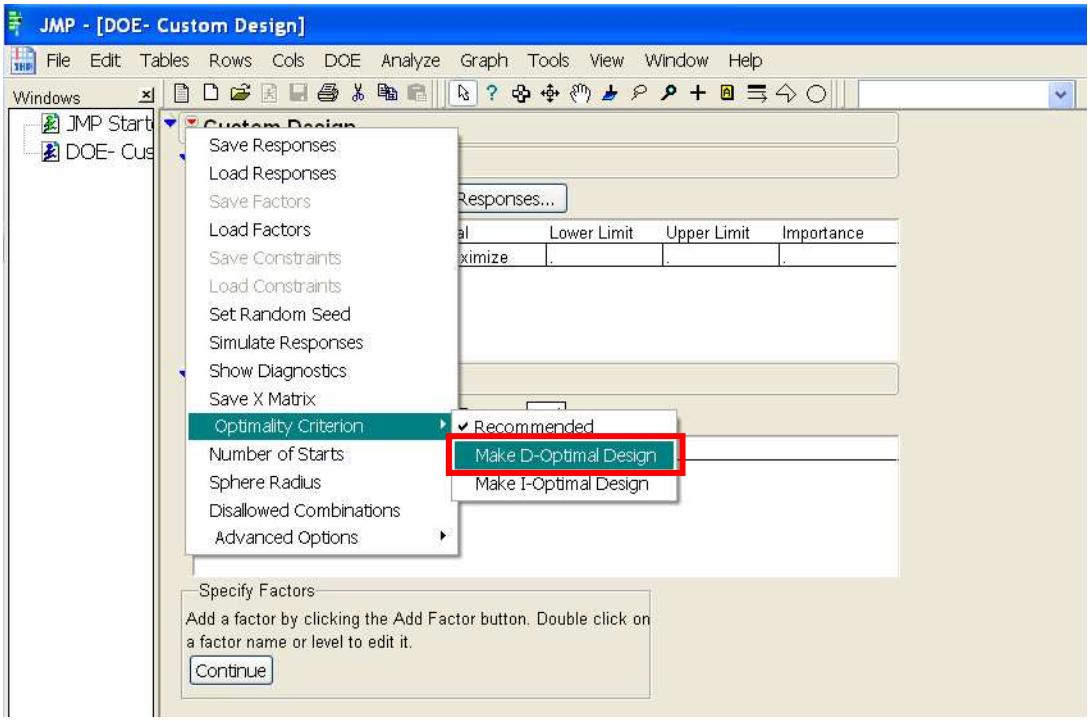
Annexe 4 : Plans d'expériences 199

Annexe 1 : Les Interfaces Homme-Machine (IHM) de SAS-JMP

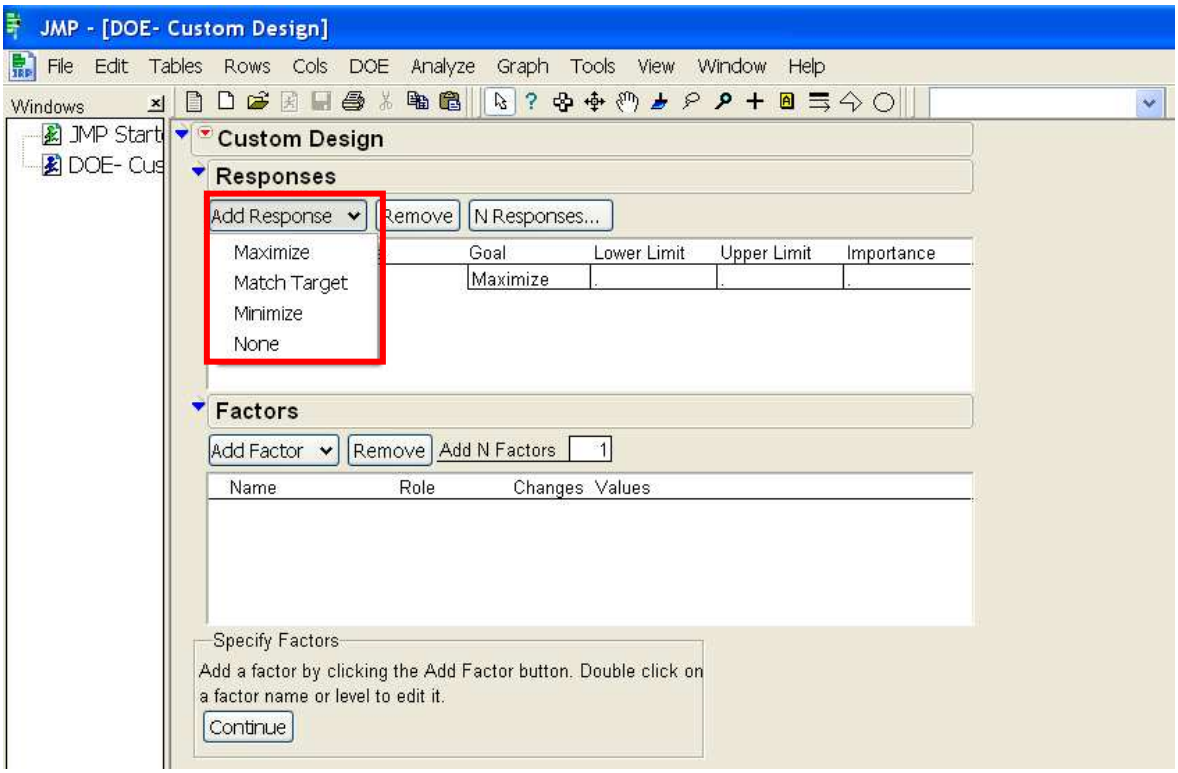
IHM 1 : Choix du plan



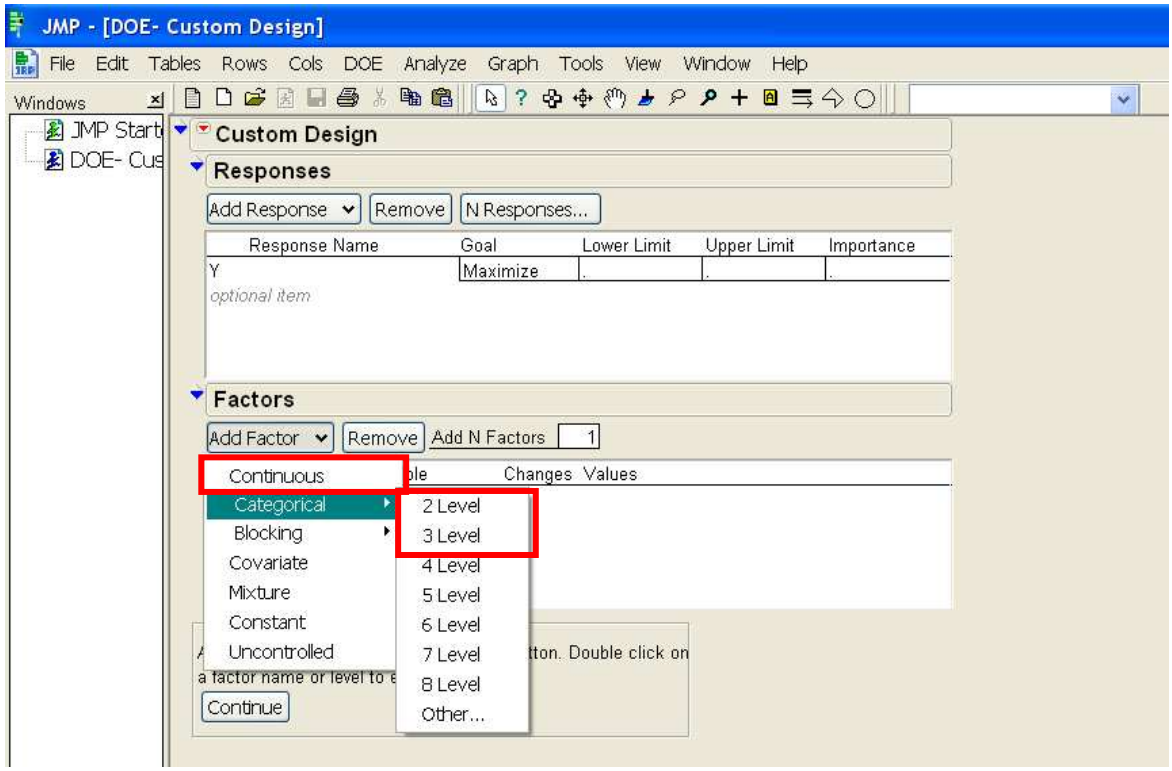
IHM 2 : Choix des réponses



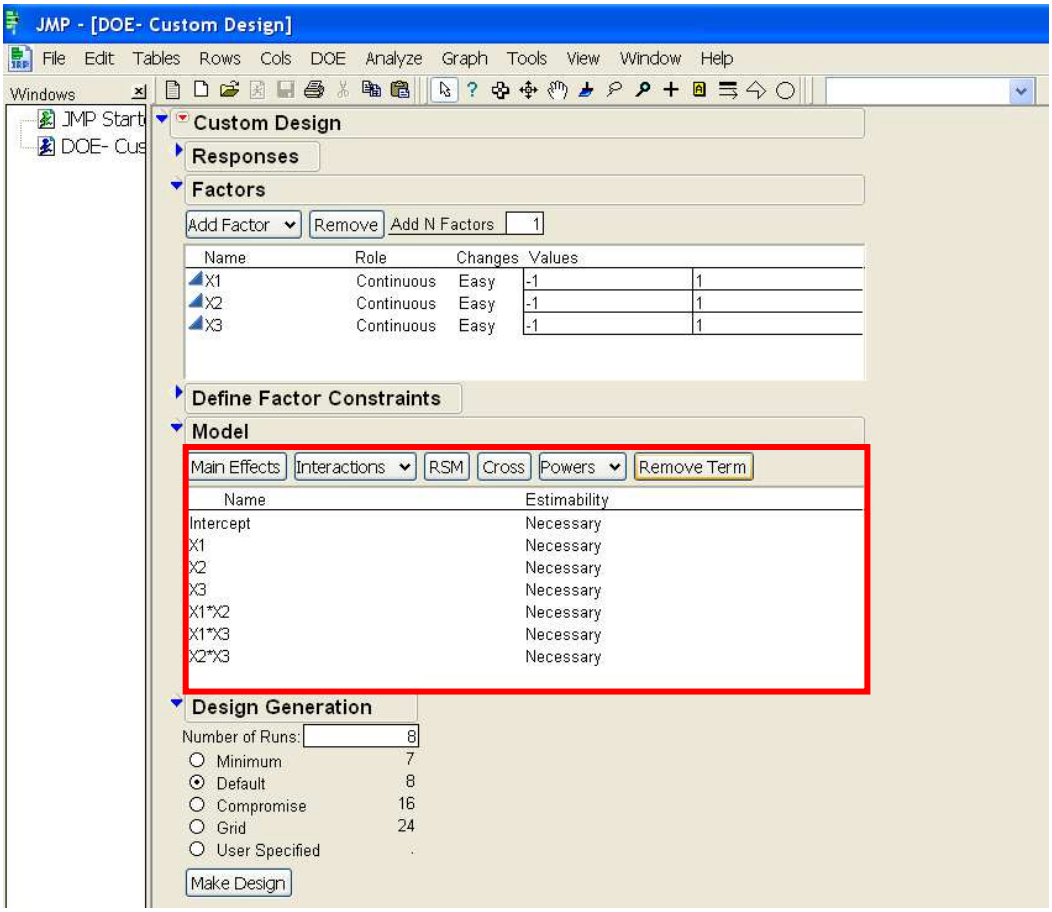
IHM 3 : Choix du type des réponses



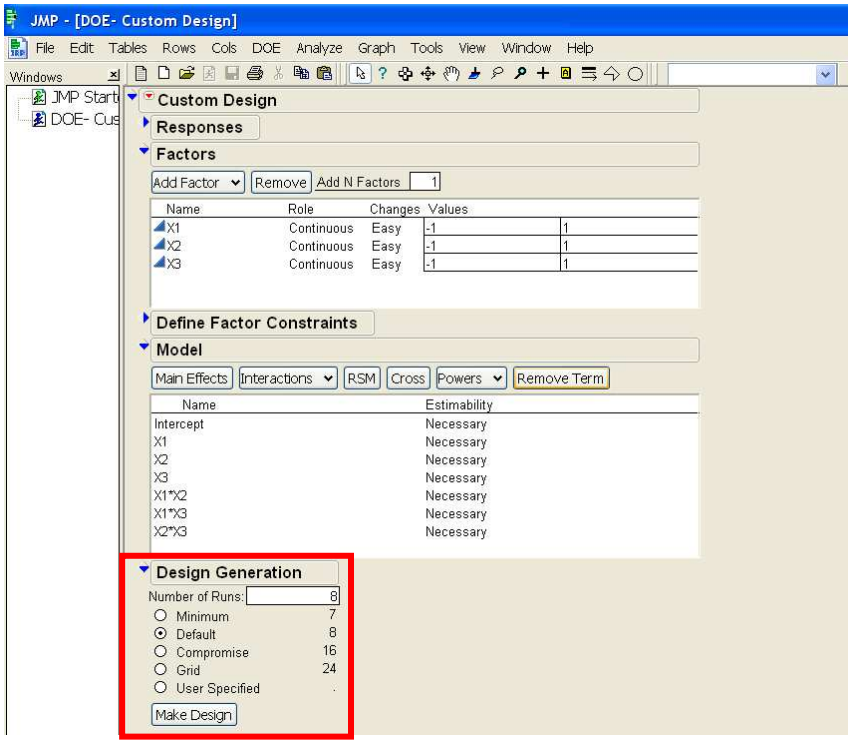
IHM 4 : Choix du type des facteurs



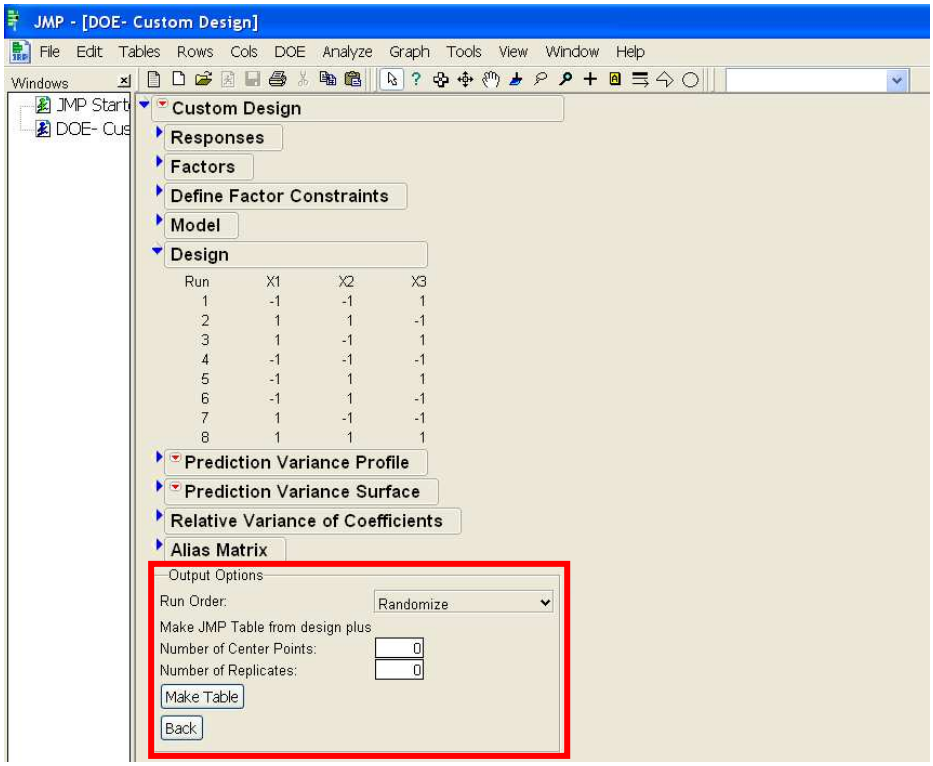
IHM 5 : Définition du modèle



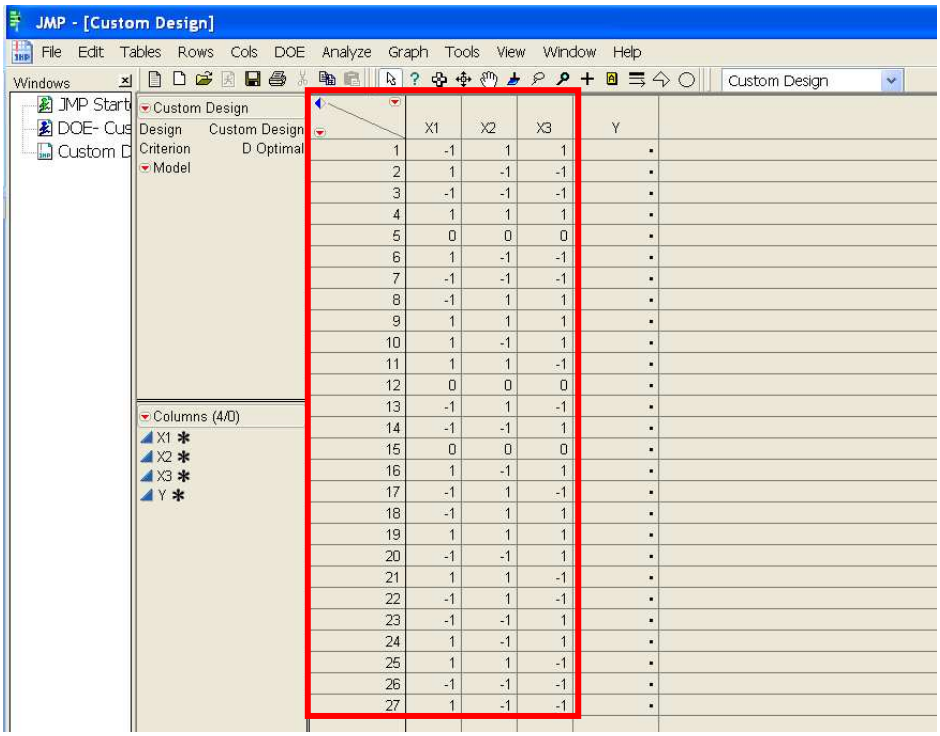
IHM 6 : Définition du nombre d'essais



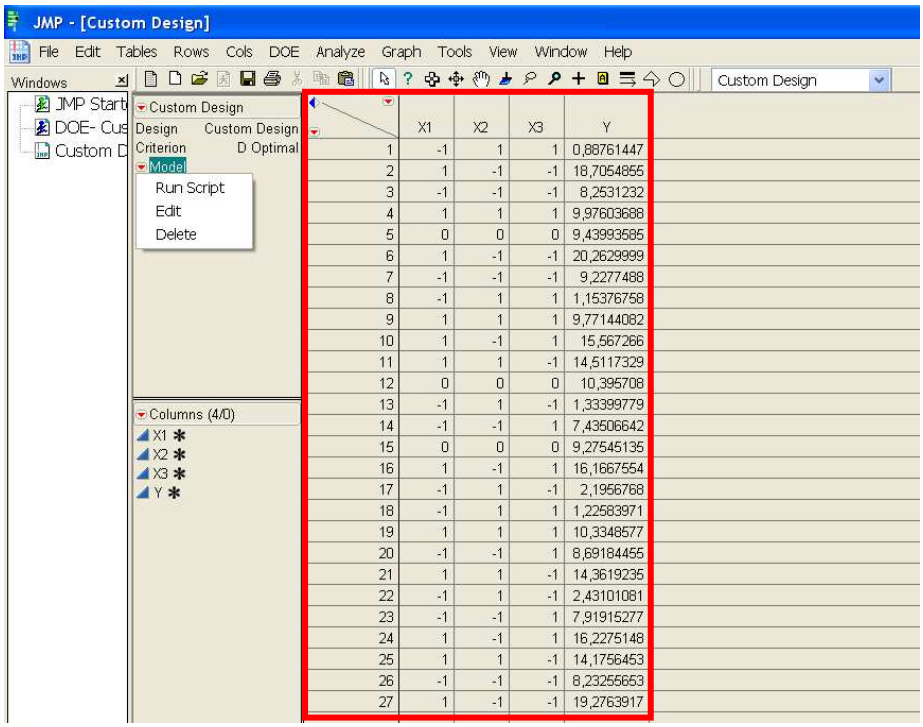
IHM 7 : Définition des réplications et des points centraux



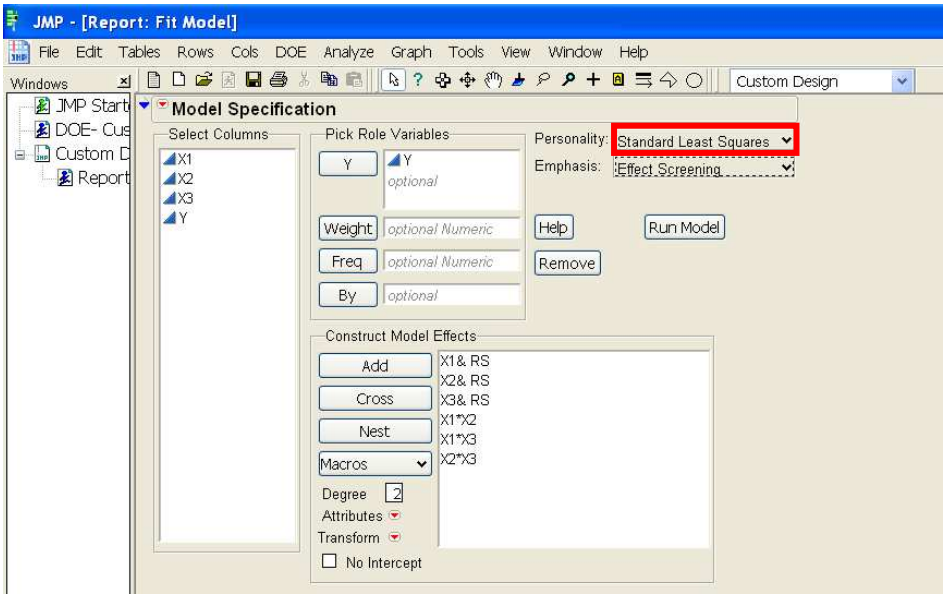
IHM 8 : Matrice d'essais



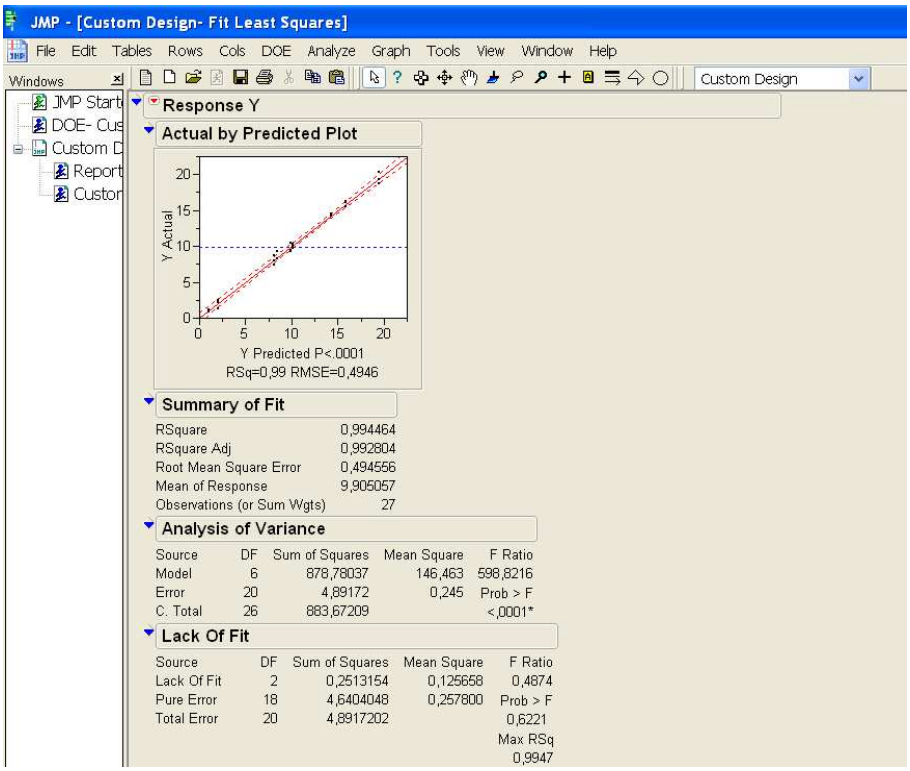
IHM 9 : Matrice d'essais avec les réponses remplies



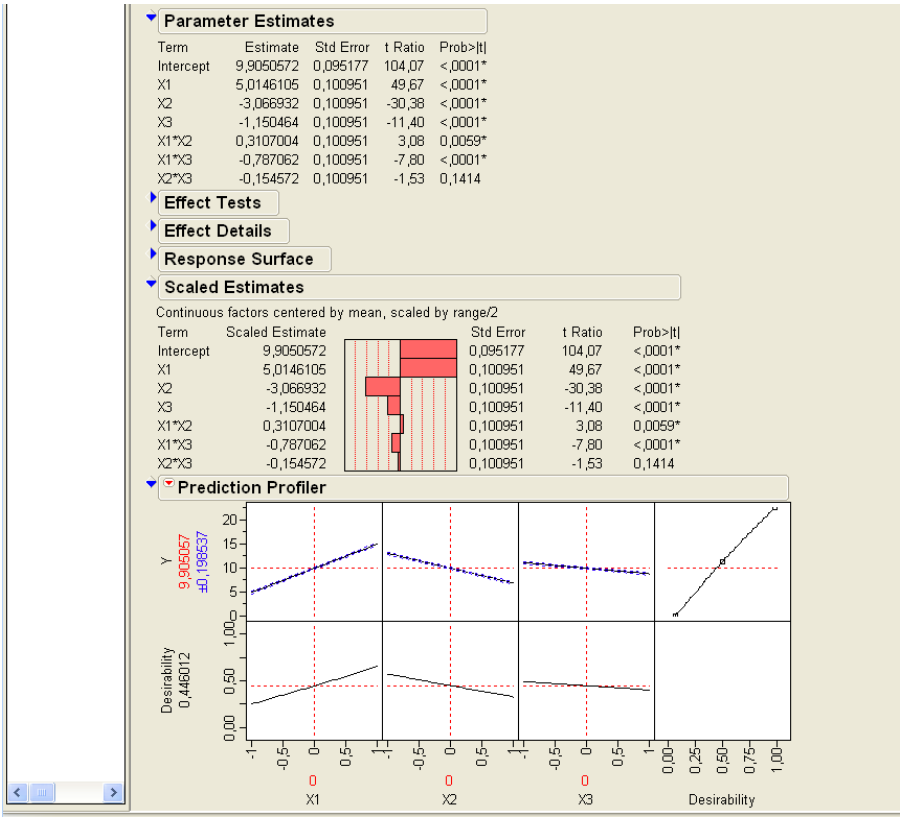
IHM 10 : Définition du modèle d'analyse



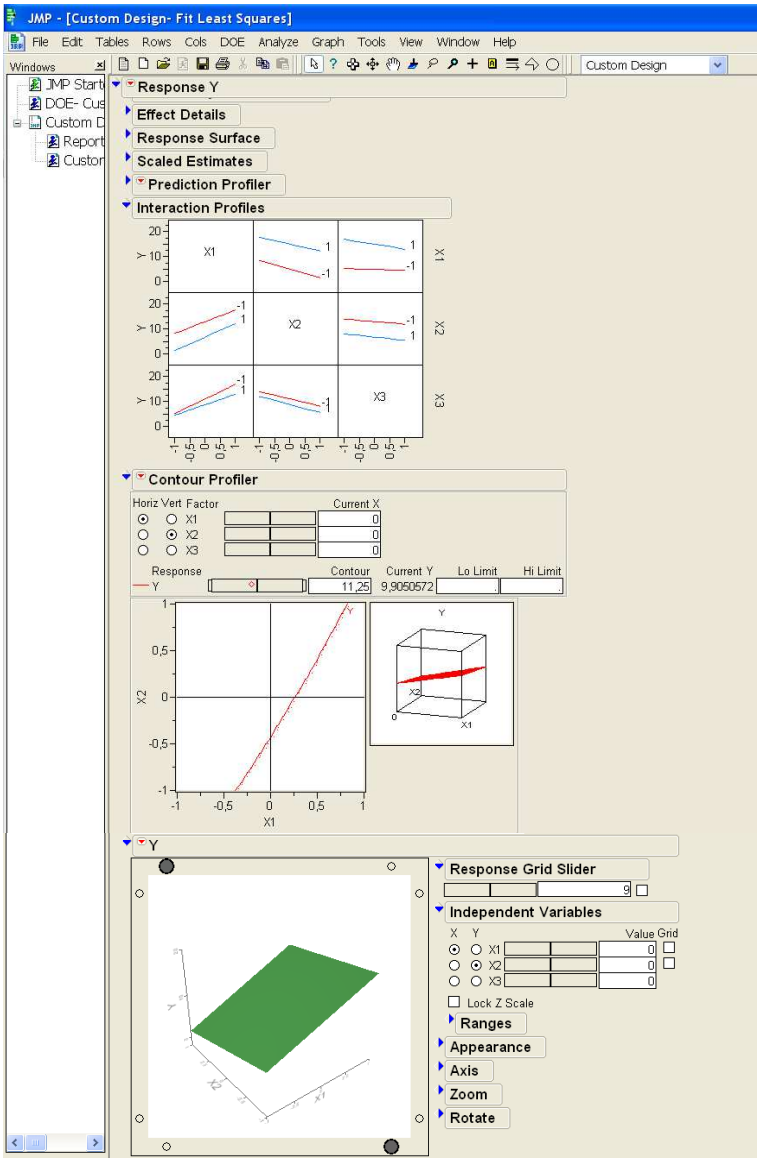
IHM 11 : Rapport d'analyse des résultats : qualité du modèle



IHM 12 : Rapport d'analyse des résultats : Détermination des coefficients



IHM 13 : Rapport d'analyse des résultats : Outils graphiques



Annexe 2 : Plan d'expériences de l'exemple simulé

1. Plan à 8 essais

1.1. Cas 0 : dispersion(ε)=0

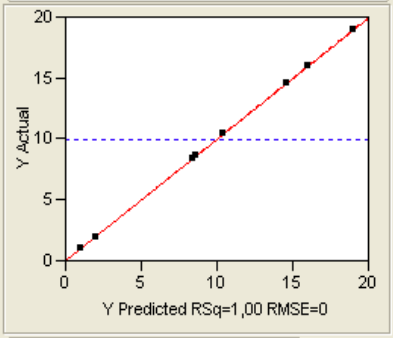
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	ε
1	1	1	-1	14,6	0
2	-1	-1	-1	8,4	0
3	1	-1	1	16	0
4	-1	1	1	1	0
5	1	1	1	10,4	0
6	-1	1	-1	2	0
7	1	-1	-1	19	0
8	-1	-1	1	8,6	0

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	1
RSquare Adj	1
Root Mean Square Error	0
Mean of Response	10
Observations (or Sum Wgts)	8

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	287,84000	47,9733	.
Error	1	0,00000	0,0000	Prob > F
C. Total	7	287,84000		.

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	10	0	.	.
X1	5	0	.	.
X2	-3	0	.	.
X3	-1	0	.	.
X1*X2	0,5	0	.	.
X1*X3	-0,8	0	.	.
X2*X3	-0,3	0	.	.

1.2. Cas 1 : dispersion(ε)=0.5

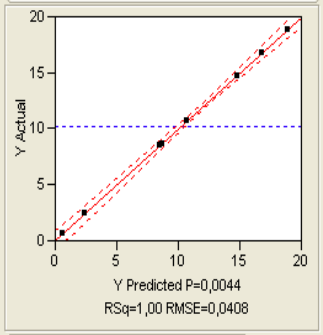
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	ε
1	1	1	-1	14,746	0,146
2	-1	-1	-1	8,499	0,099
3	1	-1	1	16,794	0,794
4	-1	1	1	0,598	-0,402
5	1	1	1	10,748	0,348
6	-1	1	-1	2,418	0,418
7	1	-1	-1	18,878	-0,122
8	-1	-1	1	8,708	0,108

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,999994
RSquare Adj	0,999961
Root Mean Square Error	0,040842
Mean of Response	10,17352
Observations (or Sum Wgts)	8

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	297,63638	49,6061	29738,17
Error	1	0,00167	0,0017	Prob > F
C. Total	7	297,63805		0,0044*

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	10,173519	0,01444	704,54	0,0009*
X1	5,1180056	0,01444	354,43	0,0018*
X2	-3,046165	0,01444	-211,0	0,0030*
X3	-0,961578	0,01444	-66,59	0,0096*
X1*X2	0,5016927	0,01444	34,74	0,0183*
X1*X3	-0,558866	0,01444	-38,70	0,0164*
X2*X3	-0,492737	0,01444	-34,12	0,0187*

1.3. Cas 2 : dispersion(ε)=1

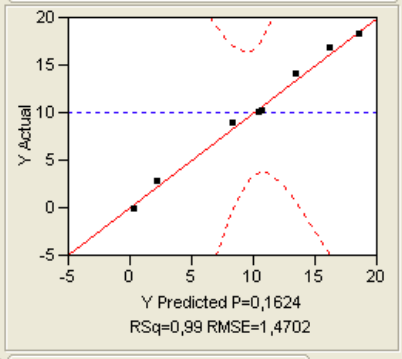
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	1	1	-1	14,000	-0,600
2	-1	-1	-1	8,890	0,490
3	1	-1	1	16,739	0,739
4	-1	1	1	2,712	1,712
5	1	1	1	10,206	-0,194
6	-1	1	-1	-0,138	-2,138
7	1	-1	-1	18,160	-0,840
8	-1	-1	1	9,955	1,355

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,99242
RSquare Adj	0,946939
Root Mean Square Error	1,470203
Mean of Response	10,06543
Observations (or Sum Wgts)	8

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	282,99242	47,1654	21,8207
Error	1	2,16150	2,1615	Prob > F
C. Total	7	285,15392		0,1624

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	10,065427	0,519795	19,36	0,0328*
X1	4,710904	0,519795	9,06	0,0700
X2	-3,370656	0,519795	-6,48	0,0974
X3	-0,162497	0,519795	-0,31	0,8071
X1*X2	0,6971003	0,519795	1,34	0,4079
X1*X3	-1,141215	0,519795	-2,20	0,2721
X2*X3	-0,073392	0,519795	-0,14	0,9107

1.4. Cas 2 : dispersion(ε)=1 + 1 point aberrant

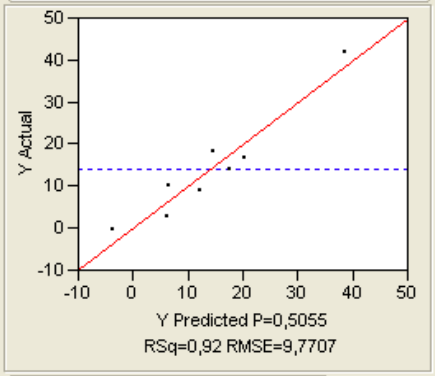
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	ε
1	1	1	-1	14,000	-0,600
2	-1	-1	-1	8,890	0,490
3	1	-1	1	16,739	0,739
4	-1	1	1	2,712	1,712
5	1	1	1	42,000	-0,194
6	-1	1	-1	-0,138	-2,138
7	1	-1	-1	18,160	-0,840
8	-1	-1	1	9,955	1,355

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,918999
RSquare Adj	0,432995
Root Mean Square Error	9,770717
Mean of Response	14,03969
Observations (or Sum Wgts)	8

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	1083,1259	180,521	1,8909
Error	1	95,4669	95,467	Prob > F
C. Total	7	1178,5929		0,5055

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	14,039692	3,45447	4,06	0,1536
X1	8,6851695	3,45447	2,51	0,2410
X2	0,603609	3,45447	0,17	0,8899
X3	3,8117688	3,45447	1,10	0,4687
X1*X2	4,6713658	3,45447	1,35	0,4054
X1*X3	2,8330508	3,45447	0,82	0,5627
X2*X3	3,9008736	3,45447	1,13	0,4614

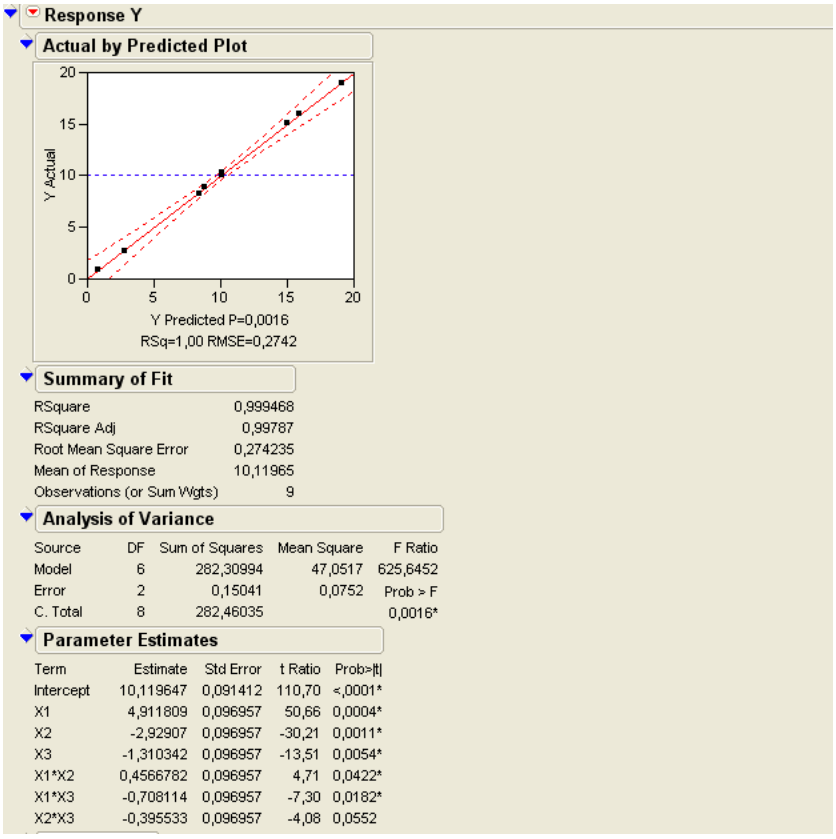
2. Plan à 8 essais + 1 point central

2.1. Cas 1 : dispersion(ε)=0.5

Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	1	1	-1	15,082	0,482
2	0	0	0	10,260	0,260
3	1	-1	1	15,990	-0,010
4	1	-1	-1	18,983	-0,017
5	1	1	1	10,001	-0,399
6	-1	-1	-1	8,909	0,509
7	-1	1	1	0,933	-0,067
8	-1	-1	1	8,243	-0,357
9	-1	1	-1	2,676	0,676

Résultat affiché par JMP :

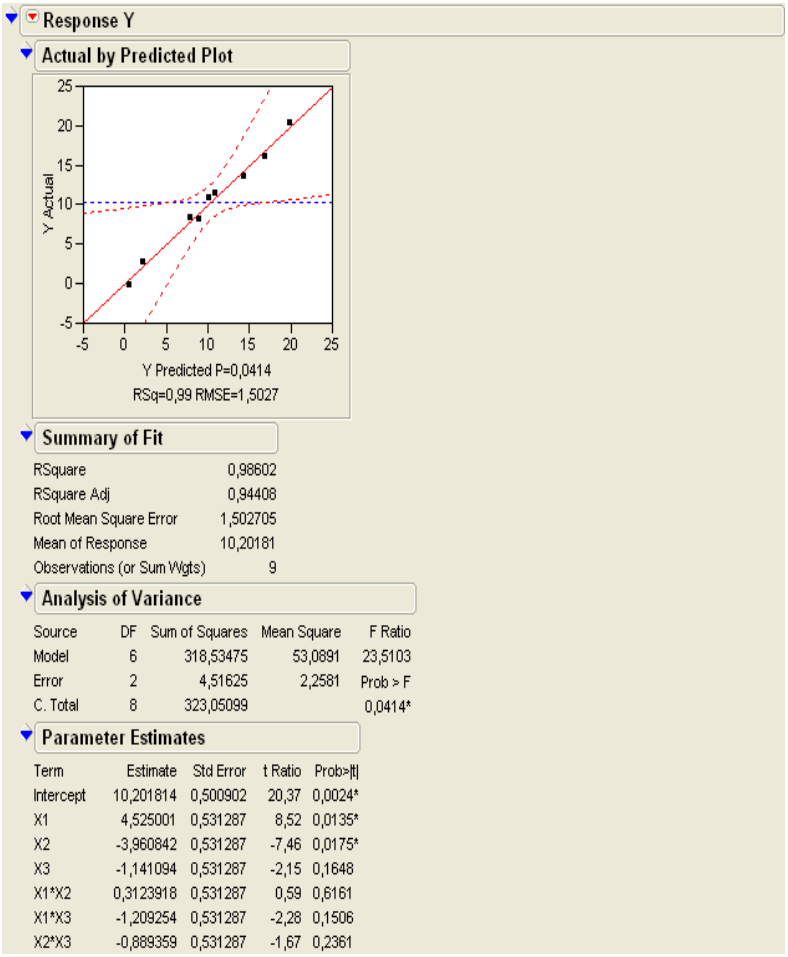


2.2. Cas 2 : dispersion(ε)=1

Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	ε
1	1	1	-1	13,528	-1,072
2	0	0	0	10,961	0,961
3	1	-1	1	16,124	0,124
4	1	-1	-1	20,437	1,437
5	1	1	1	8,439	-1,961
6	-1	-1	-1	8,202	-0,198
7	-1	1	1	-0,208	-1,208
8	-1	-1	1	11,508	2,908
9	-1	1	-1	2,825	0,825

Résultat affiché par JMP :



2.3. Cas 3 : dispersion(ε)=1+1 point aberrant centrale

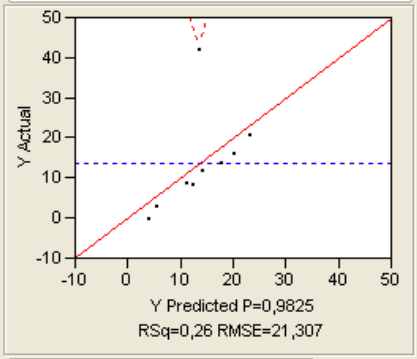
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	1	1	-1	13,528	-1,072
2	0	0	0	42,000	0,961
3	1	-1	1	16,124	0,124
4	1	-1	-1	20,437	1,437
5	1	1	1	8,439	-1,961
6	-1	-1	-1	8,202	-0,198
7	-1	1	1	-0,208	-1,208
8	-1	-1	1	11,508	2,908
9	-1	1	-1	2,825	0,825

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,259699
RSquare Adj	-1,9612
Root Mean Square Error	21,30748
Mean of Response	13,6506
Observations (or Sum Wgts)	9

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	318,5347	53,089	0,1169
Error	2	908,0176	454,009	Prob > F
C. Total	8	1226,5524		0,9825

Parameter Estimates

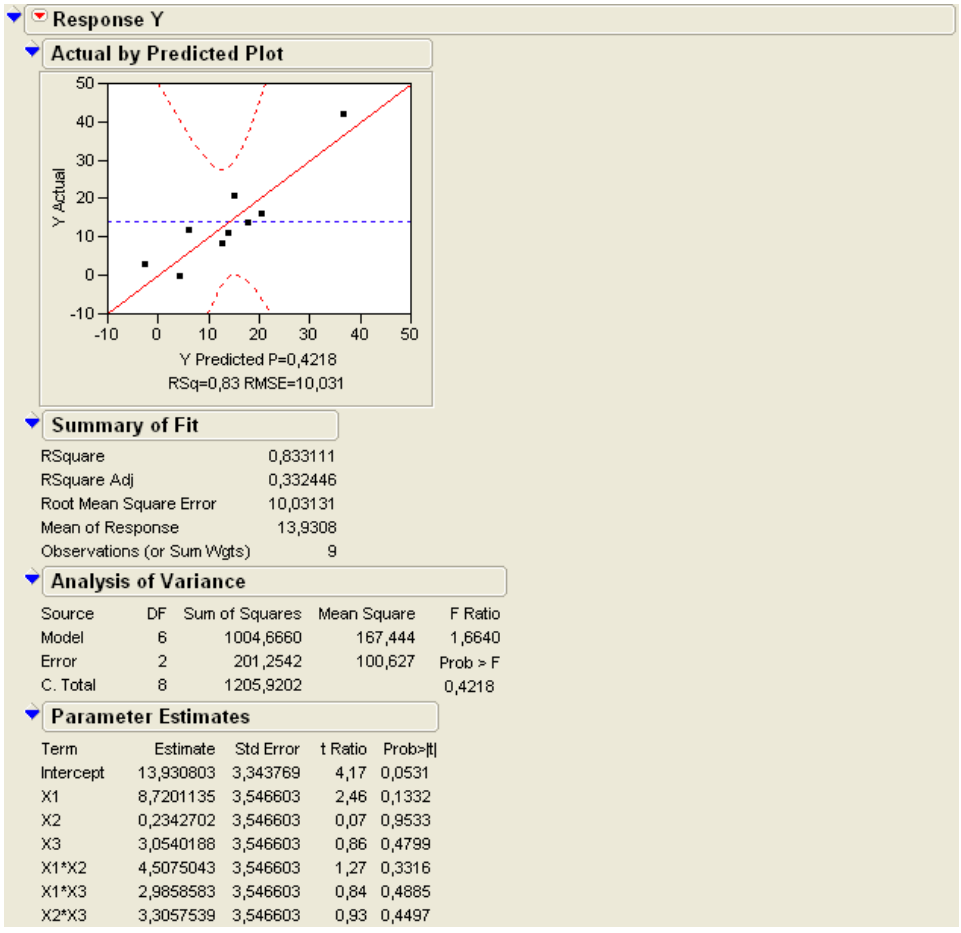
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	13,650597	7,102494	1,92	0,1946
X1	4,525001	7,533333	0,60	0,6091
X2	-3,960842	7,533333	-0,53	0,6515
X3	-1,141094	7,533333	-0,15	0,8935
X1*X2	0,3123918	7,533333	0,04	0,9707
X1*X3	-1,209254	7,533333	-0,16	0,8872
X2*X3	-0,889359	7,533333	-0,12	0,9168

2.4. Cas 4 : dispersion(ε)=1+1 point aberrant

Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	ε
1	1	1	-1	13,528	-1,072
2	0	0	0	10,961	0,961
3	1	-1	1	16,124	0,124
4	1	-1	-1	20,437	1,437
5	1	1	1	42,000	-1,961
6	-1	-1	-1	8,202	-0,198
7	-1	1	1	-0,208	-1,208
8	-1	-1	1	11,508	2,908
9	-1	1	-1	2,825	0,825

Résultat affiché par JMP :



3. Plan à 8 essais + 2 répétitions +1 point central

3.1. Cas 1 : dispersion(ε)=0.5

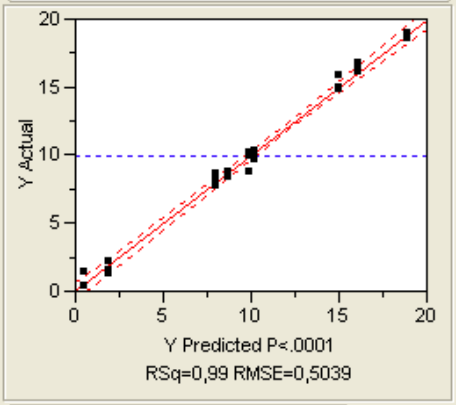
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	0	0	0	9,888	-0,112
2	1	-1	-1	18,705	-0,295
3	-1	-1	-1	8,253	-0,147
4	1	1	1	9,976	-0,424
5	-1	1	1	0,440	-0,560
6	1	1	-1	15,863	1,263
7	1	-1	1	16,828	0,828
8	0	0	0	10,154	0,154
9	-1	1	1	0,371	-0,629
10	1	-1	-1	18,567	-0,433
11	1	1	1	10,312	-0,088
12	1	1	-1	14,996	0,396
13	-1	1	-1	1,334	-0,666
14	0	0	0	8,835	-1,165
15	1	1	1	9,675	-0,725
16	-1	-1	1	8,767	0,167
17	-1	1	-1	2,196	0,196
18	1	-1	1	16,226	0,226
19	1	-1	-1	18,935	-0,065
20	1	-1	1	16,092	0,092
21	-1	-1	1	8,362	-0,238
22	-1	1	1	1,431	0,431
23	-1	-1	-1	7,719	-0,681
24	1	1	-1	14,828	0,228
25	-1	1	-1	1,576	-0,424
26	-1	-1	1	8,433	-0,167
27	-1	-1	-1	8,676	0,276

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,994459
RSquare Adj	0,992797
Root Mean Square Error	0,503946
Mean of Response	9,905057
Observations (or Sum Wgts)	27

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	911,59080	151,932	598,2470
Error	20	5,07923	0,254	Prob > F
C. Total	26	916,67003		<,0001*

Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	2	1,2582296	0,629115	2,9636
Pure Error	18	3,8210032	0,212278	Prob > F
Total Error	20	5,0792329		0,0772
				Max RSq
				0,9958

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	9,9050572	0,096984	102,13	<,0001*
X1	5,1435365	0,102868	50,00	<,0001*
X2	-3,023575	0,102868	-29,39	<,0001*
X3	-1,030648	0,102868	-10,02	<,0001*
X1*X2	0,5482749	0,102868	5,33	<,0001*
X1*X3	-0,868117	0,102868	-8,44	<,0001*
X2*X3	-0,51818	0,102868	-5,04	<,0001*

3.2. Cas 2 : dispersion(ε)=1

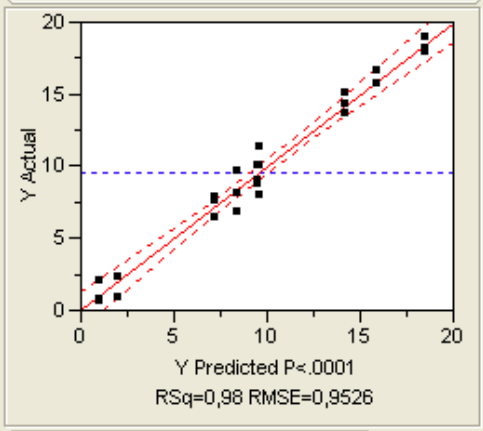
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	0	0	0	11,379	1,379
2	1	-1	-1	17,942	-1,058
3	-1	-1	-1	7,931	-0,469
4	1	1	1	10,128	-0,272
5	-1	1	1	2,098	1,098
6	1	1	-1	14,322	-0,278
7	1	-1	1	16,702	0,702
8	0	0	0	7,948	-2,052
9	-1	1	1	0,646	-0,354
10	1	-1	-1	18,176	-0,824
11	1	1	1	8,823	-1,577
12	1	1	-1	15,108	0,508
13	-1	1	-1	2,282	0,282
14	0	0	0	10,033	0,033
15	1	1	1	9,066	-1,334
16	-1	-1	1	9,727	1,127
17	-1	1	-1	2,350	0,350
18	1	-1	1	15,701	-0,299
19	1	-1	-1	19,023	0,023
20	1	-1	1	15,738	-0,262
21	-1	-1	1	6,850	-1,750
22	-1	1	1	0,714	-0,286
23	-1	-1	-1	7,569	-0,831
24	1	1	-1	13,621	-0,979
25	-1	1	-1	0,844	-1,156
26	-1	-1	1	8,066	-0,534
27	-1	-1	-1	6,397	-2,003

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,97886
RSquare Adj	0,972518
Root Mean Square Error	0,952639
Mean of Response	9,599471
Observations (or Sum Wgts)	27

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	840,44775	140,075	154,3485
Error	20	18,15044	0,908	Prob > F
C. Total	26	858,59818		<,0001*

Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	2	0,564149	0,282074	0,2887
Pure Error	18	17,586287	0,977016	Prob > F
Total Error	20	18,150436		0,7526
				Max RSq
				0,9795

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	9,5994711	0,183336	52,36	<,0001*
X1	4,9530627	0,194457	25,47	<,0001*
X2	-2,90918	0,194457	-14,96	<,0001*
X3	-0,887718	0,194457	-4,57	0,0002*
X1*X2	0,2246879	0,194457	1,16	0,2615
X1*X3	-0,94851	0,194457	-4,88	<,0001*
X2*X3	-0,533193	0,194457	-2,74	0,0126*

3.3. Cas 2 : dispersion(ε)=1+1 point de répétition aberrant

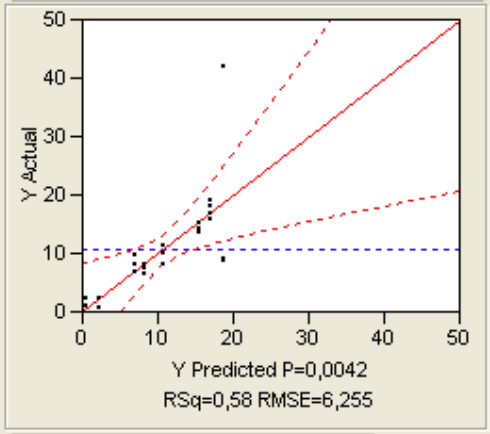
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	0	0	0	11,379	1,379
2	1	-1	-1	17,942	-1,058
3	-1	-1	-1	7,931	-0,469
4	1	1	1	42,000	-0,272
5	-1	1	1	2,098	1,098
6	1	1	-1	14,322	-0,278
7	1	-1	1	16,702	0,702
8	0	0	0	7,948	-2,052
9	-1	1	1	0,646	-0,354
10	1	-1	-1	18,176	-0,824
11	1	1	1	8,823	-1,577
12	1	1	-1	15,108	0,508
13	-1	1	-1	2,282	0,282
14	0	0	0	10,033	0,033
15	1	1	1	9,066	-1,334
16	-1	-1	1	9,727	1,127
17	-1	1	-1	2,350	0,350
18	1	-1	1	15,701	-0,299
19	1	-1	-1	19,023	0,023
20	1	-1	1	15,738	-0,262
21	-1	-1	1	6,850	-1,750
22	-1	1	1	0,714	-0,286
23	-1	-1	-1	7,569	-0,831
24	1	1	-1	13,621	-0,979
25	-1	1	-1	0,844	-1,156
26	-1	-1	1	8,066	-0,534
27	-1	-1	-1	6,397	-2,003

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,581657
RSquare Adj	0,456154
Root Mean Square Error	6,255025
Mean of Response	10,77993
Observations (or Sum Wgts)	27

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	1087,9825	181,330	4,6346
Error	20	782,5068	39,125	Prob > F
C. Total	26	1870,4894		0,0042*

Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	2	37,41517	18,7076	0,4519
Pure Error	18	745,09167	41,3940	Prob > F
Total Error	20	782,50684		0,6434
				Max RSq
				0,6017

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	10,779933	1,20378	8,96	<,0001*
X1	6,2810823	1,276802	4,92	<,0001*
X2	-1,581161	1,276802	-1,24	0,2299
X3	0,4403012	1,276802	0,34	0,7338
X1*X2	1,5527074	1,276802	1,22	0,2381
X1*X3	0,3795093	1,276802	0,30	0,7694
X2*X3	0,7948264	1,276802	0,62	0,5406

3.4. Cas 2 : dispersion(ε)=1+1 point central de répétition aberrant

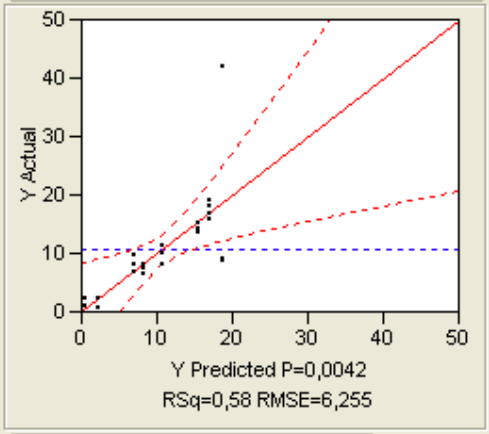
Tableau des essais et résultats :

Essais	X1	X2	X3	Y	E
1	0	0	0	42	1,379
2	1	-1	-1	17,942	-1,058
3	-1	-1	-1	7,931	-0,469
4	1	1	1	10,128	-0,272
5	-1	1	1	2,098	1,098
6	1	1	-1	14,322	-0,278
7	1	-1	1	16,702	0,702
8	0	0	0	7,948	-2,052
9	-1	1	1	0,646	-0,354
10	1	-1	-1	18,176	-0,824
11	1	1	1	8,823	-1,577
12	1	1	-1	15,108	0,508
13	-1	1	-1	2,282	0,282
14	0	0	0	10,033	0,033
15	1	1	1	9,066	-1,334
16	-1	-1	1	9,727	1,127
17	-1	1	-1	2,350	0,350
18	1	-1	1	15,701	-0,299
19	1	-1	-1	19,023	0,023
20	1	-1	1	15,738	-0,262
21	-1	-1	1	6,850	-1,750
22	-1	1	1	0,714	-0,286
23	-1	-1	-1	7,569	-0,831
24	1	1	-1	13,621	-0,979
25	-1	1	-1	0,844	-1,156
26	-1	-1	1	8,066	-0,534
27	-1	-1	-1	6,397	-2,003

Résultat affiché par JMP :

Response Y

Actual by Predicted Plot



Summary of Fit

RSquare	0,581657
RSquare Adj	0,456154
Root Mean Square Error	6,255025
Mean of Response	10,77993
Observations (or Sum Wgts)	27

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	6	1087,9825	181,330	4,6346
Error	20	782,5068	39,125	Prob > F
C. Total	26	1870,4894		0,0042*

Lack Of Fit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Lack Of Fit	2	37,41517	18,7076	0,4519
Pure Error	18	745,09167	41,3940	Prob > F
Total Error	20	782,50684		0,6434
				Max RSq
				0,6017

Parameter Estimates

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob>|t|
Intercept	10,779933	1,20378	8,96	<,0001*
X1	6,2810823	1,276802	4,92	<,0001*
X2	-1,581161	1,276802	-1,24	0,2299
X3	0,4403012	1,276802	0,34	0,7338
X1*X2	1,5527074	1,276802	1,22	0,2381
X1*X3	0,3795093	1,276802	0,30	0,7694
X2*X3	0,7948264	1,276802	0,62	0,5406

Annexe 3 : Définition des sollicitations et des efforts appliqués

1. Sollicitations externes

1.1. Charge voyageurs sur le système

La charge des voyageurs sur le système représente les déformations créées par le poids des voyageurs à l'intérieur du train. Ce poids est une donnée du cahier des charges SNCF sévérisée pour les besoins du banc.

Cette fonction est réalisée par 2 ensembles d'actionneurs. Un ensemble de 6 vérins déformant la géométrie du trou de caisse et un ensemble de 4 vérins déformant le seuil de la porte (cf. Figure A3-1).

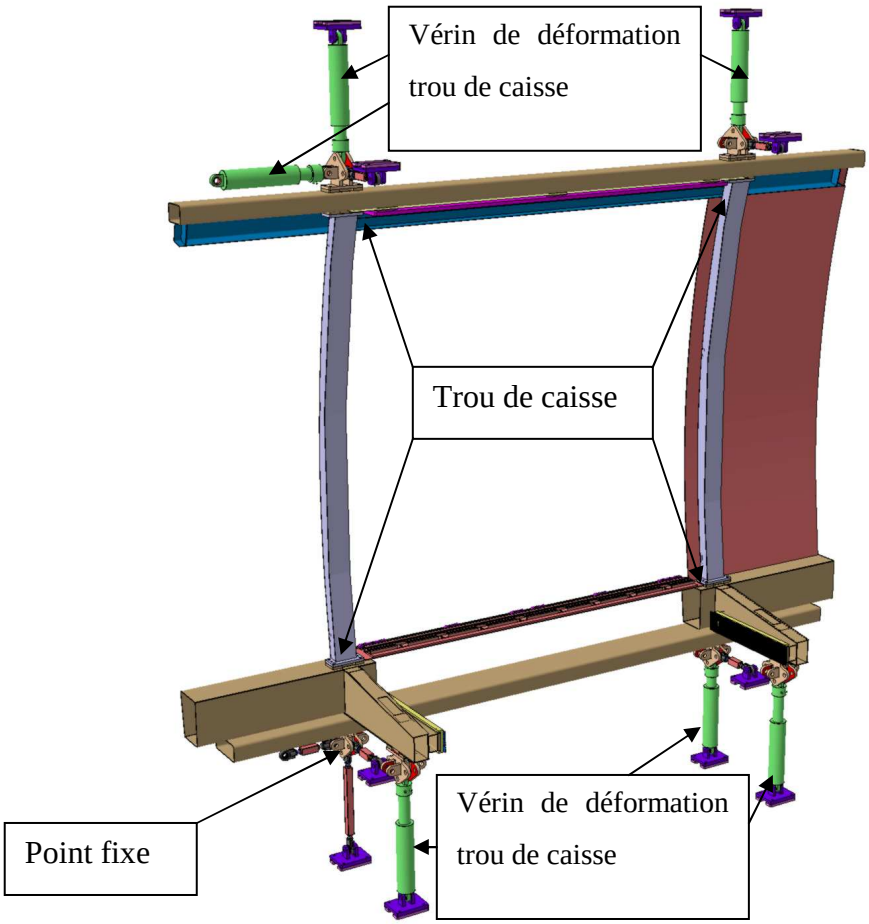


Figure A3-1 : Dispositif de sollicitation de la charge voyageurs à l'intérieur de la caisse

Les estimations des déformations à appliquer ont été réalisées à partir des notes de calculs d'éléments finis réalisées par Bombardier.

1.2. Charge voyageurs sur marche mobile

La charge des voyageurs sur la marche représente les déformations créées par le poids des voyageurs à leur montée dans le train. Ce poids est une donnée du cahier des charges SNCF sévérisée pour les besoins du banc à 275 kg.

Cette fonction est réalisée par un ensemble de 2 bras télescopiques repliables et de 2 vérins de charge appliquant l'effort sur les marches en 2 points prédéfinis.

1.2.1. Système en position parking

De façon à ce que le portique ne rentre pas en contrainte avec le système de charge voyageurs sur marche mobile, une position parking est définie pendant la phase de test des portes (cf. Figure A3-2).

Cette fonction est assurée par une liaison pivot commandée par un vérin pneumatique limité en pression à 6 bars.

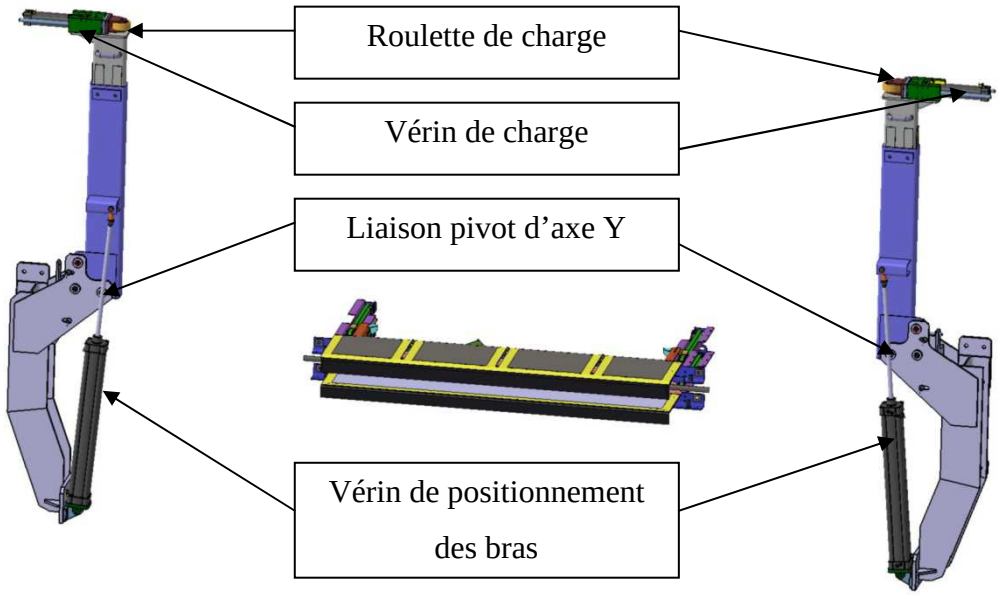


Figure A3-2 : Bras de charge sur marche levée en position parking

1.2.2. Système en position de charge sur marche mobile

Lors du test de la marche mobile, les bras sont à l'horizontal et la charge est appliquée en 2 points sur la marche (cf. Figure A3-3).

L'effort de 245 Kg est appliqué via un système de roulette en fin de vérin.

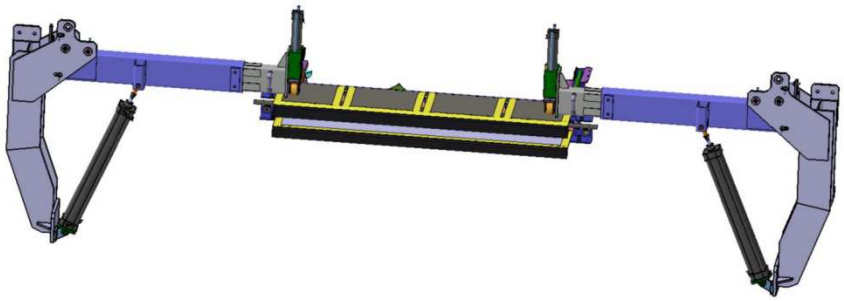


Figure A3-3 : Système en position de charge sur marche mobile

1.3. Poussée voyageurs sur porte

La poussée des voyageurs sur la porte représente les efforts créés par l'appui des voyageurs sur la porte dans les cas de charge exceptionnelle. Cet effort est une donnée du cahier des charges SNCF « sévérisé » pour les besoins du banc.

Le cahier des charges définit cet effort comme étant l'application d'une pression de 12 kPa sur une bande de 200 mm à 1,3 m du plancher de la plateforme d'accès voyageurs.

Cette fonction est réalisée par un ensemble de 6 vérins équipés de roues appliquant l'effort sur les portes dans une zone prédéfinie (cf. Figures A3-4 et A3-5).

Le système mécanique est accroché à un portique qui s'ouvre et se ferme manuellement, ce portique étant relié au bâti pivotant.

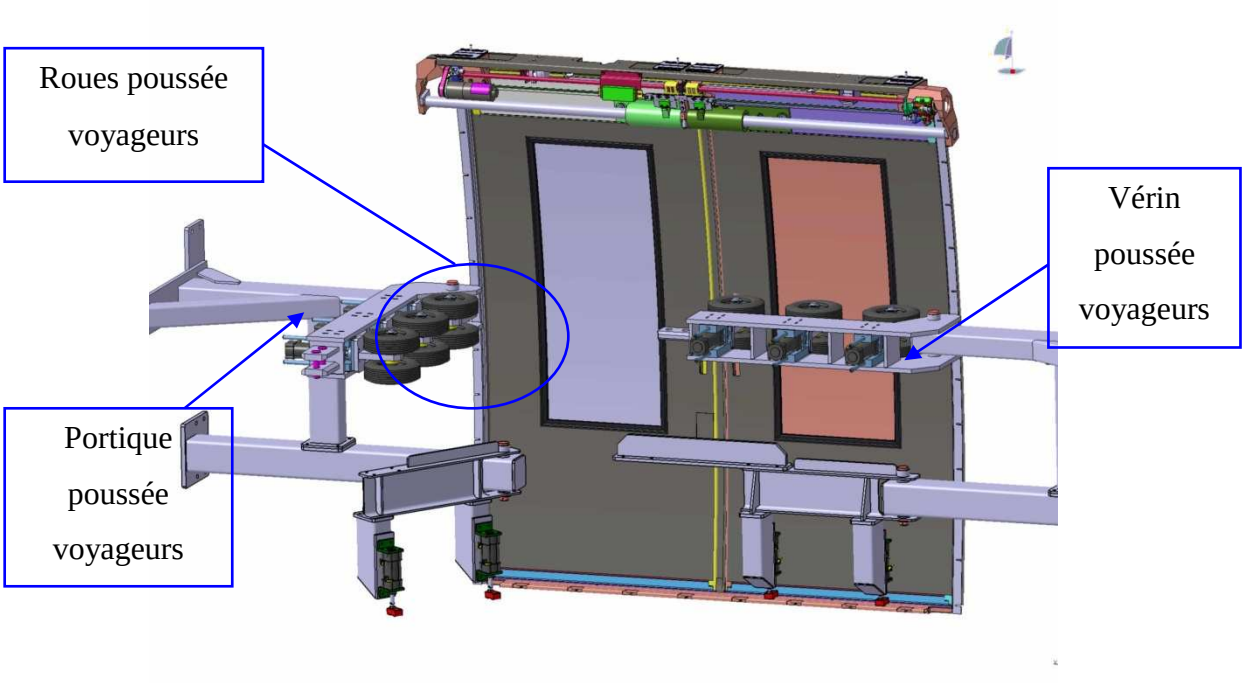


Figure A3-4 : Poussée voyageurs en position ouverte

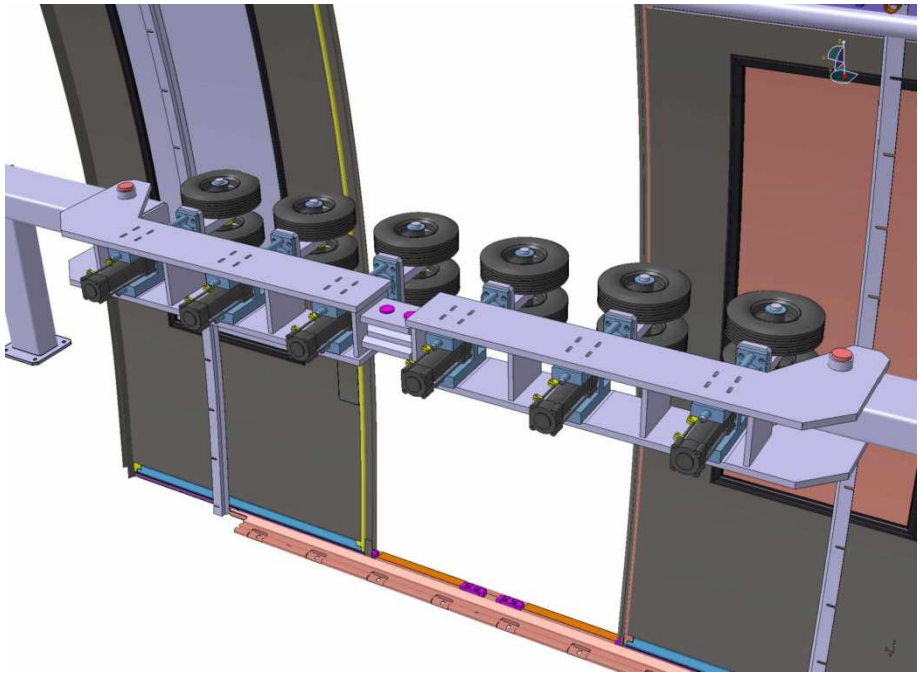


Figure A3-5 : Poussée voyageurs en fonctionnement

Afin d'assurer la fonction pendant la phase de fermeture de la porte, les vérins sont équipés de capteurs de détection de la porte qui empêchent le vérin d'être sorti si la porte n'est pas présente.

1.4. Fonction choc obstacle

Les obstacles sur la porte et sur les marches mobiles représentent les efforts créés lors de l'obstruction de la porte et des marches mobiles par un tiers lors de son ouverture ou de sa fermeture.

Les chocs sur la porte et les marches mobiles représentent les efforts créés lors d'action de vandalisme par un tiers lors de son ouverture, de sa fermeture, en position fermée ou ouverte.

Ces fonctions sont réalisées par un vérin de choc positionnable en Y équipé sur un portique de déplacement en X et Z (cf. Figures A3-6, A3-7,A3-8 et A3-9).

1.5. Portique

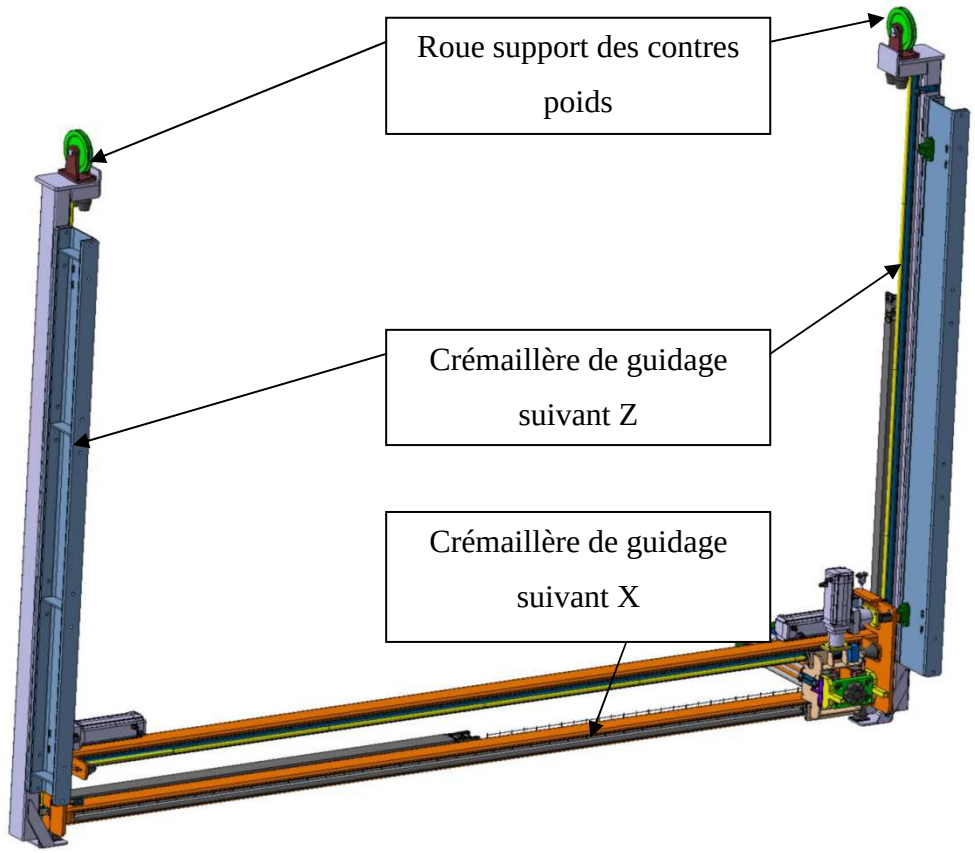


Figure A3-6 : Portique

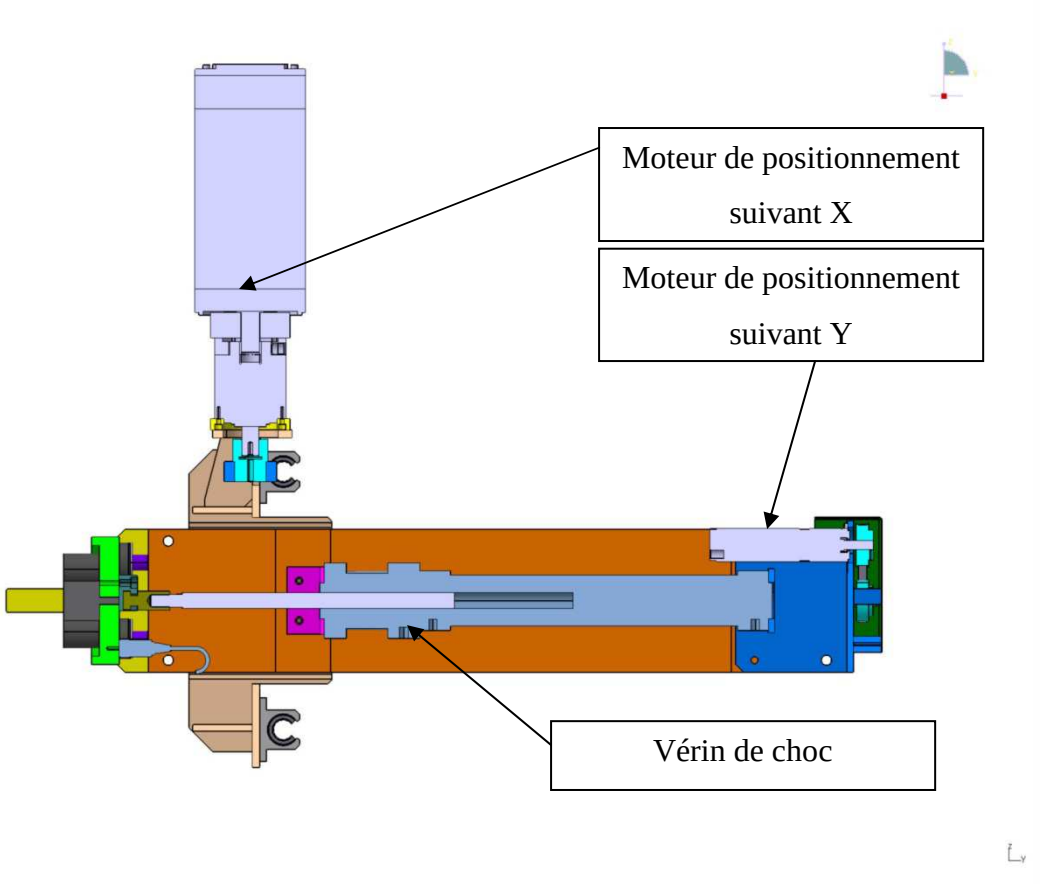


Figure A3-7 : Vérin choc obstacle coupe Y, Z

Le portique assure les déplacements en X et en Z du vérin de choc et d'obstacle.

Les déplacements en X sont assurés par une liaison glissière réalisée grâce à un rail de guidage asservi à une crémaillère pilotée par un moteur électrique.

Les déplacements en Z sont assurés par une liaison glissière réalisée grâce à deux rails de guidage asservie à deux crémaillères pilotées par un moteur électrique. Ce déplacement est équilibré par un système de contrepoids.

Le déplacement en Y est réalisé à l'aide d'une platine de guidage commandée par un moteur pneumatique.

Ce déplacement est piloté par 2 capteurs : un laser donnant l'objectif de position à atteindre et un autre de déplacement donnant la position en temps réel de la table de guidage.

1.5.1. Outil de choc et d'obstacle

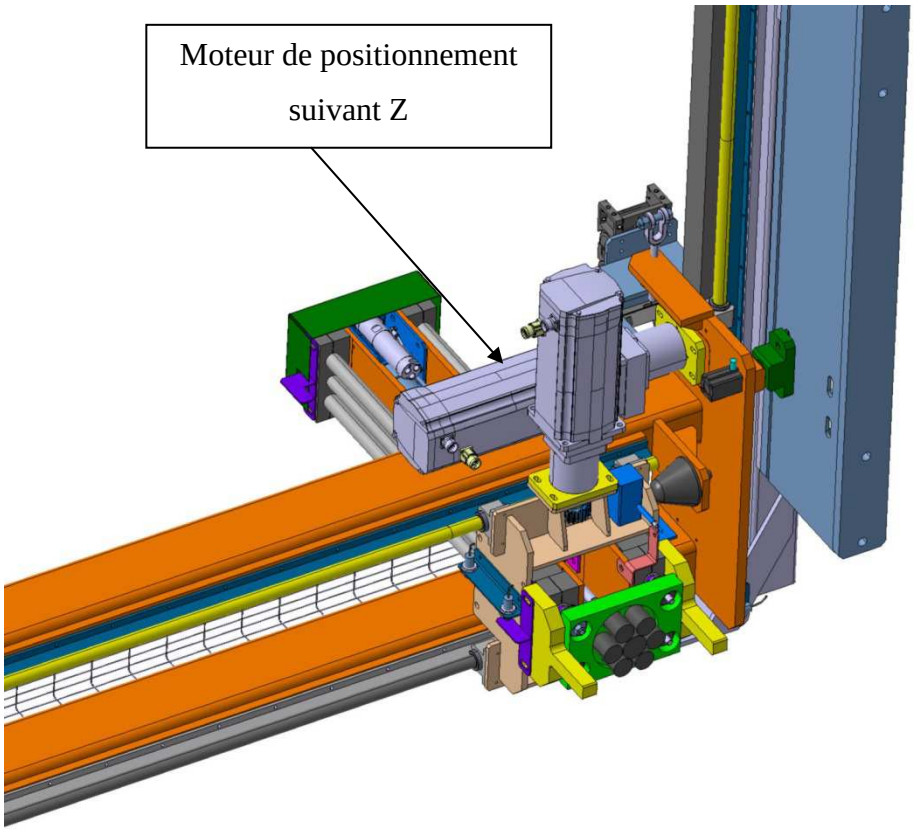


Figure A3-7 : Bras choc obstacle

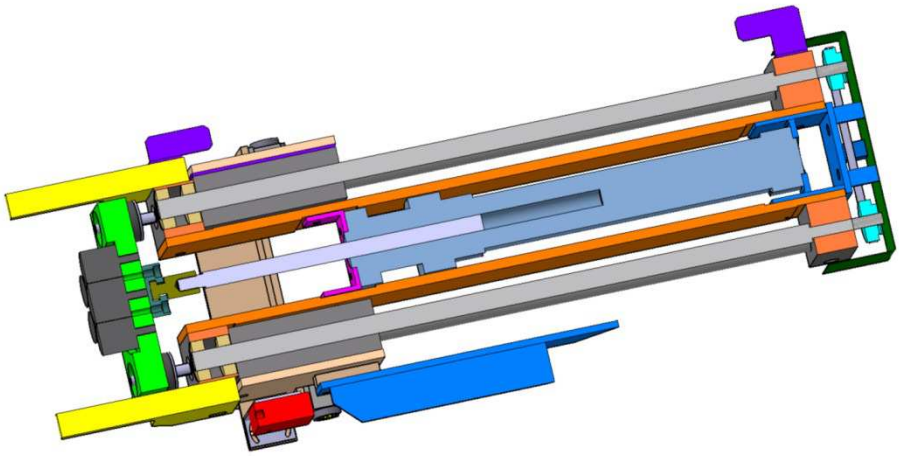


Figure A3-8 Coupe vérin choc obstacle X Y

L'obstacle s'effectue par l'intermédiaire des organes de contact (cf. Figure A3-9 et A3-11). Cet obstacle est défini par une retenue de la porte de 9 sec pendant lequel le vantail effectue une série de poussées variant de 300 kN à 500 kN par paliers de 3 sec

Le choc s'effectue au moyen d'un impacteur constitué de 7 tampons antivibratoires. La pression d'impact est obtenue grâce à un vérin équipé d'un bloqueur de tige et d'un capteur de pression (cf. Figure A3-10 et A3-12).

1.5.2. Position obstacle sur marche

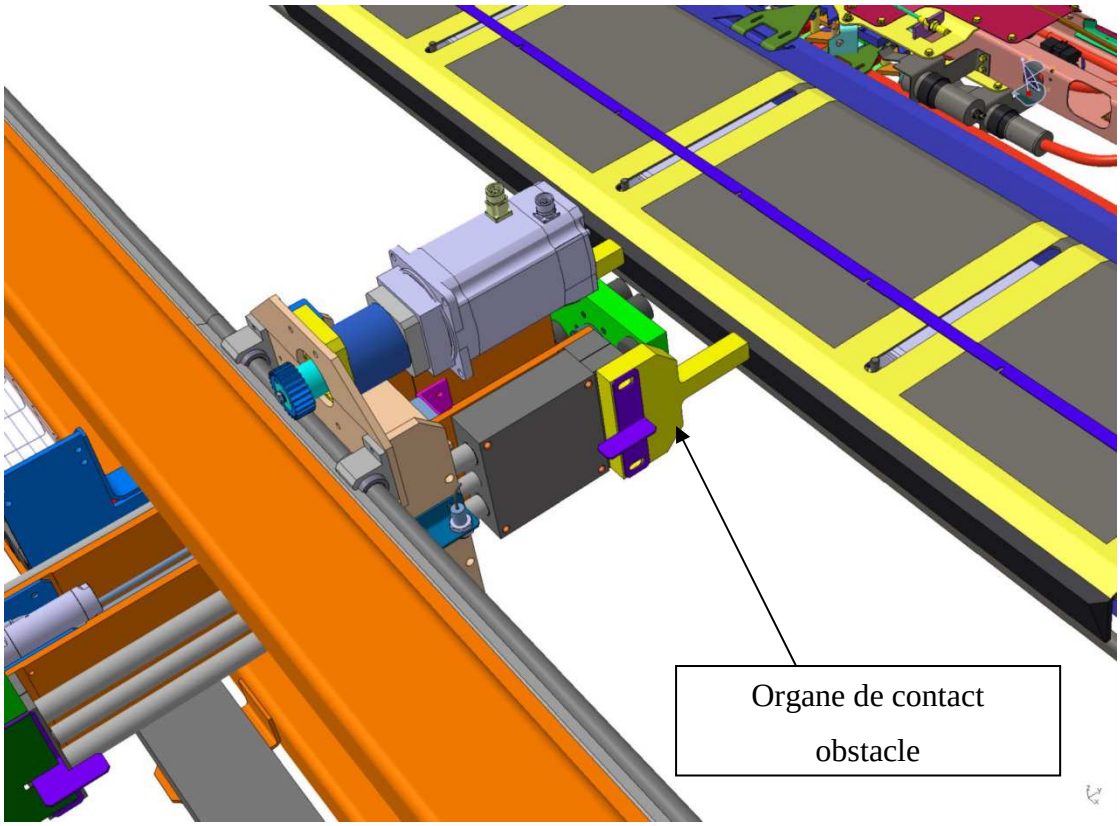


Figure A3-9 : Obstacle sur marche mobile

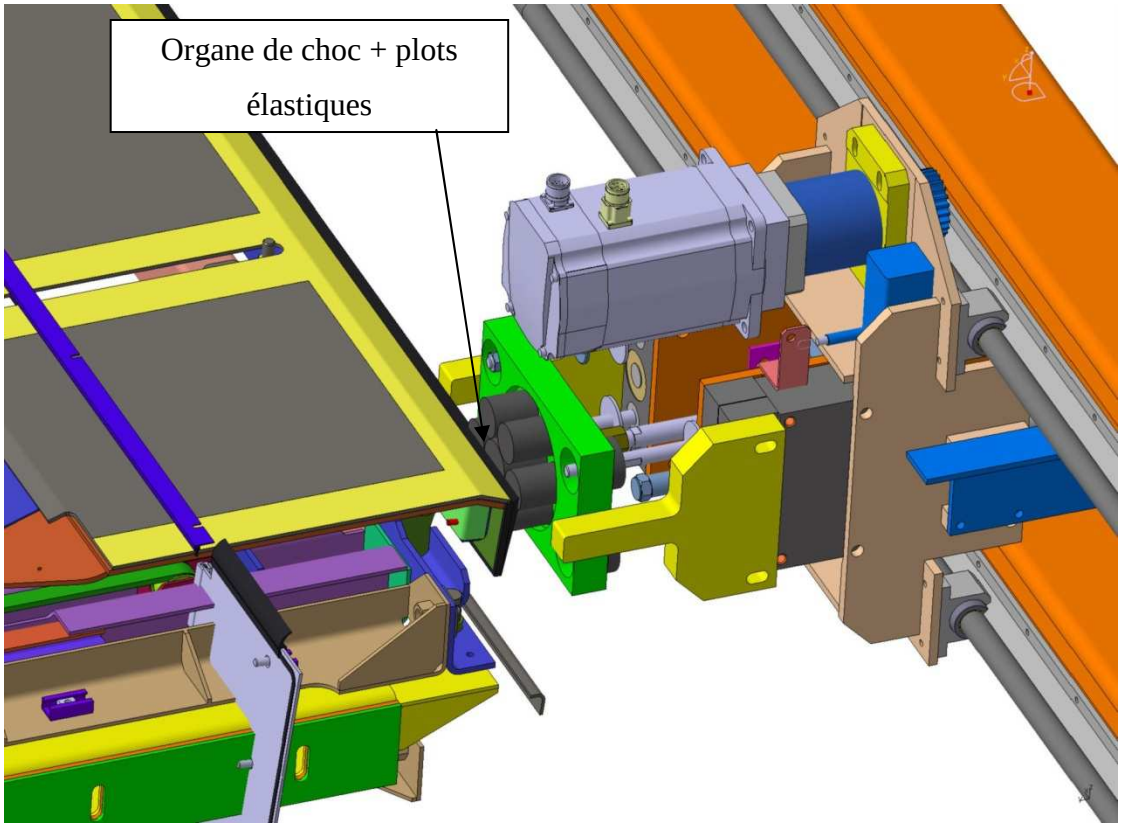


Figure A3-10 : Choc sur marche mobile

1.5.3. Positon obstacle sur porte en fermeture

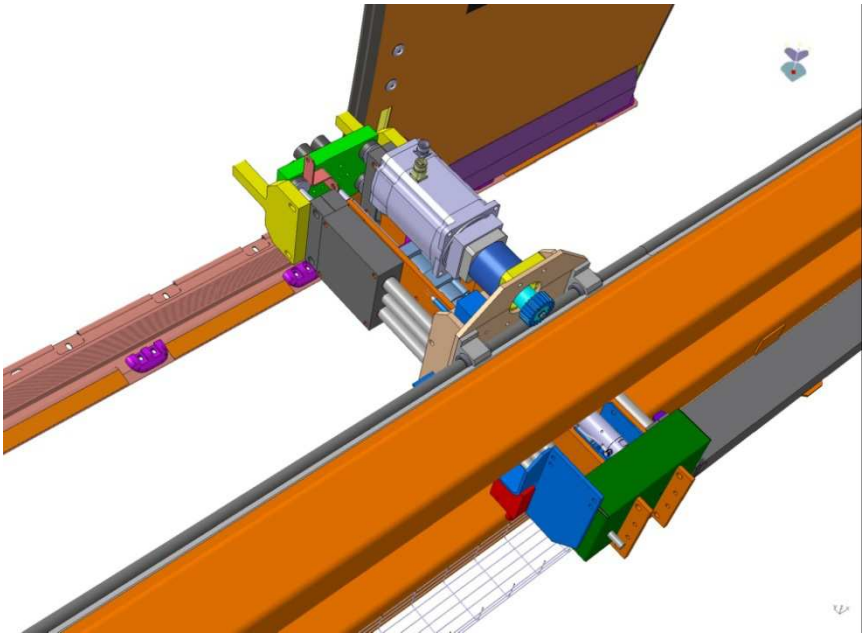


Figure A3-11 : Obstacle sur porte

1.5.4. Position choc sur porte fermée

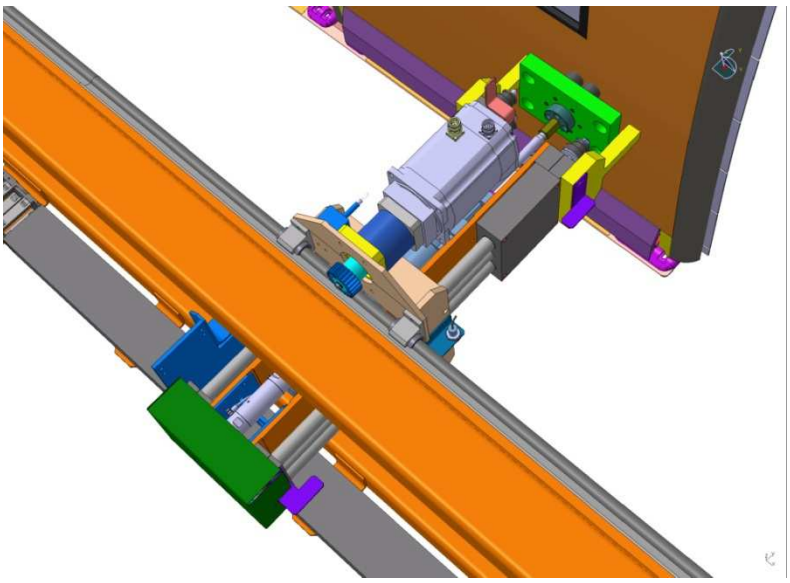


Figure A3-12 : Choc sur porte

1.5.5. Dévers

Le dévers représente les efforts générés par les masses lors de l'inclinaison du train en courbe.

Cette fonction est réalisée par un vérin de positionnement qui commande l'inclinaison du banc lui-même fixé par une liaison pivot sur le bâti.

Ce dévers peut avoir 3 positions 0, +10 et -10 degrés par rapport au plan vertical (X, Z) (cf. Figure A3-13).

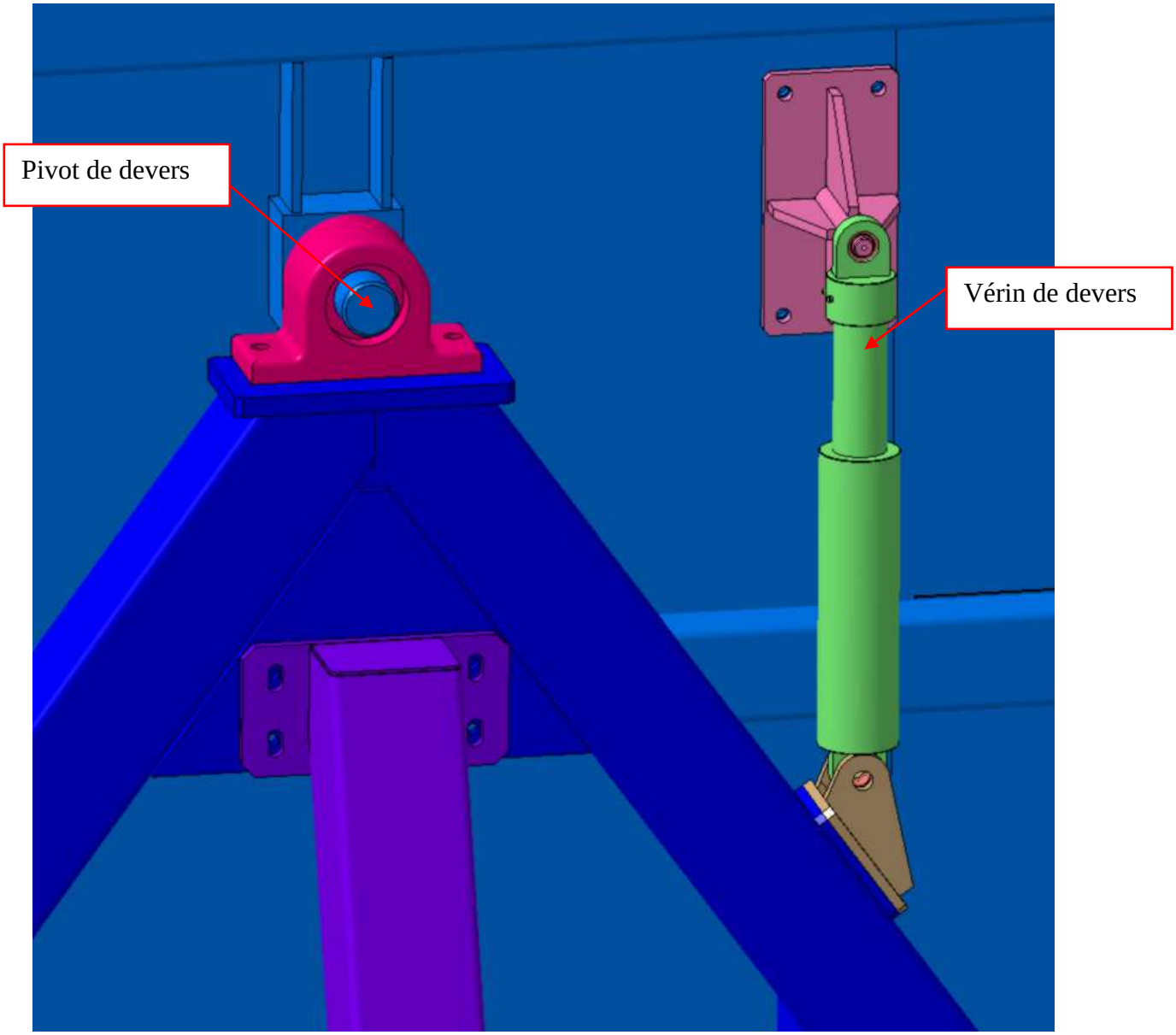


Figure A3-13 : Descriptif du dévers

2. Sollicitations internes

2.1. Sollicitation internes de la porte

2.1.1. Déréglage de patin inférieur

Le patin inférieur de porte est la partie de la porte guidée dans le seuil en translation (cf. Figure A3-14). Un mauvais réglage de cette partie inférieure pourrait bloquer la porte.

Ce déréglage se décompose en 2 parties :

- Déréglage suivant Y (de valeur min à valeur max).
- Déréglage suivant Z (de valeur min a valeur max).

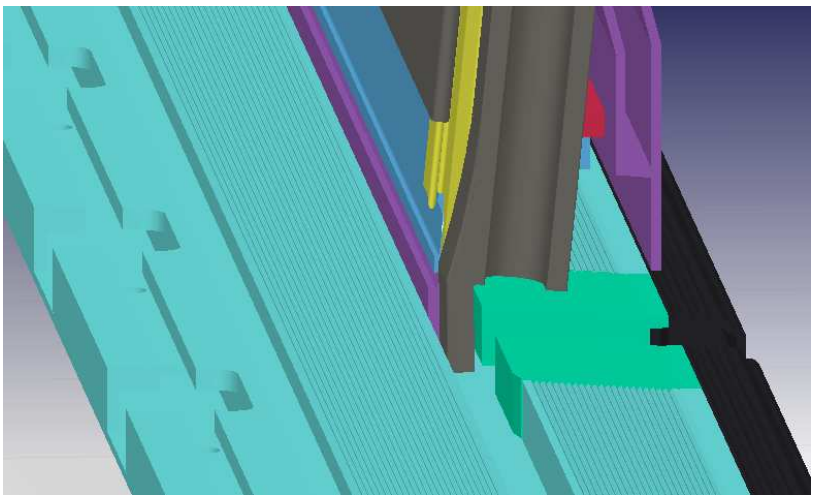


Figure A3-14 : Patin et seuil de la porte

2.1.2. Déréglage de la position des fins de course porte

La porte est munie d'un ensemble de capteurs de fin de course qui permettent de vérifier que la porte est bien fermée (cf. Figure A3-15). Un mauvais positionnement des capteurs de fin de course peut empêcher la porte de fonctionner. Ce déréglage s'effectue suivant X de la valeur min à la valeur max.

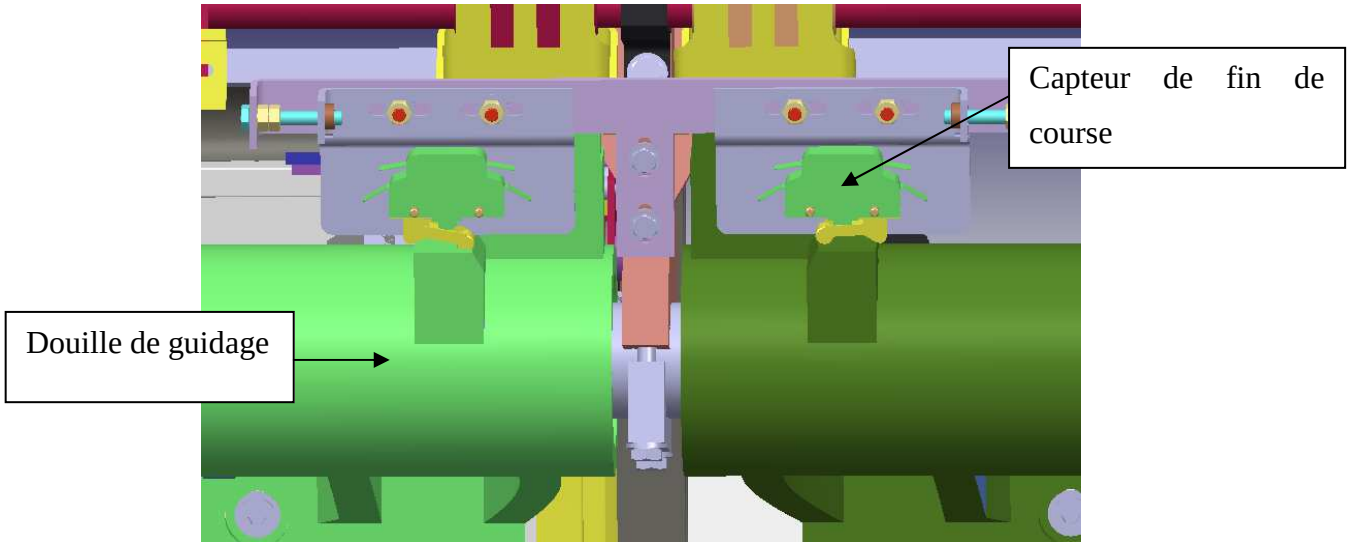


Figure A3-15 : Fins de course porte

2.2. Sollicitations internes de la marche mobile

2.2.1. Déréglage de la tension des courroies

La tension de la courroie est un réglage important de la marche mobile fait en production et susceptible de se dérégler en fonctionnement.

Ce déréglage en tension va de la valeur nominale à la valeur min acceptable.

La Figure A3-16 présente le système poulie-courroies de la marche

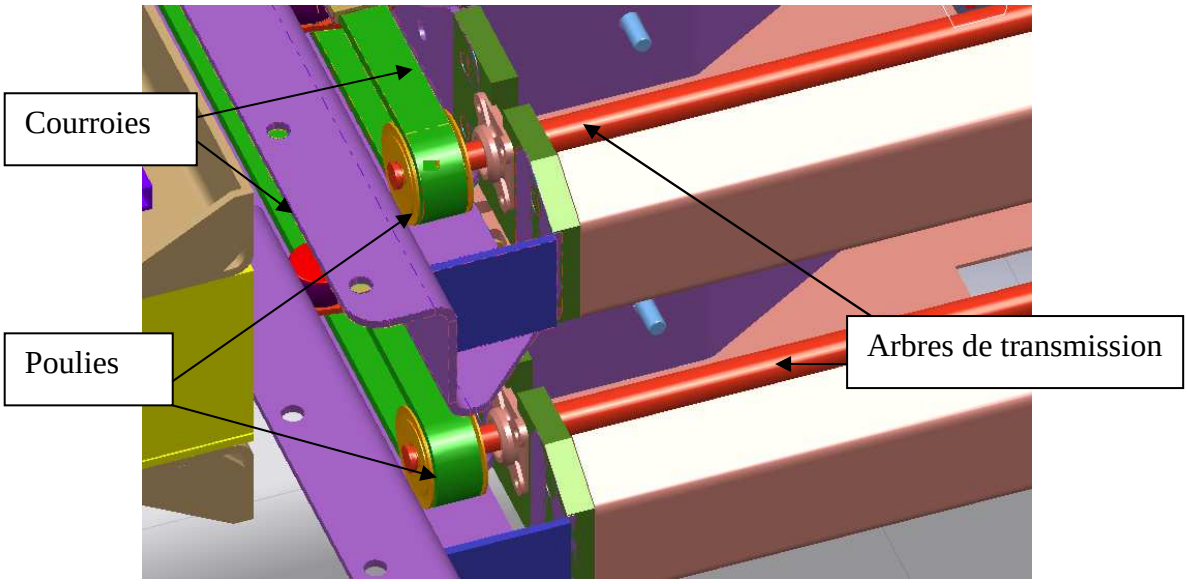


Figure A3-16 : Arbres de transmission, poulies et courroies marche mobile

2.2.2. Déréglage des fins de course

La marche mobile est munie d'un ensemble de capteurs de fin de course qui permettent de vérifier que la marche est bien fermée. Un mauvais positionnement des capteurs de fin de course peut mettre la marche en panne.

Ce déréglage s'effectue suivant Y de la valeur min à la valeur max.

2.3. Sollicitations internes communes

2.3.1. Chauffage moteur

De façon à solliciter les moteurs en condition réelle, ils vont être chauffés grâce à des tapis chauffants (cf. Figure A3-17 et A3-18).

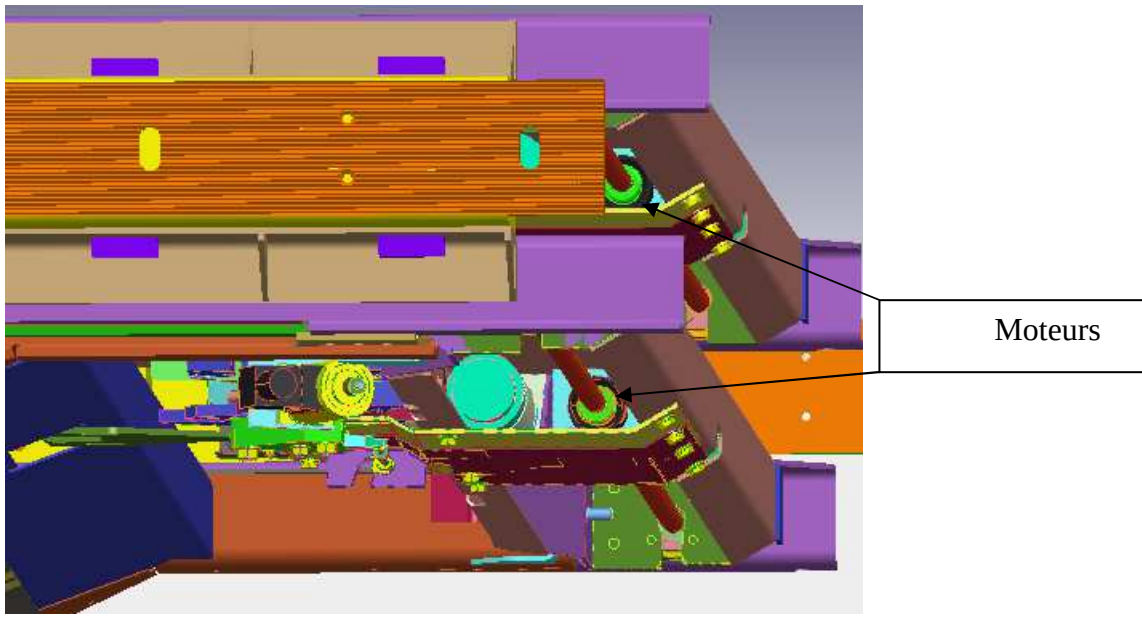


Figure A3-17 : Moteurs marche mobile

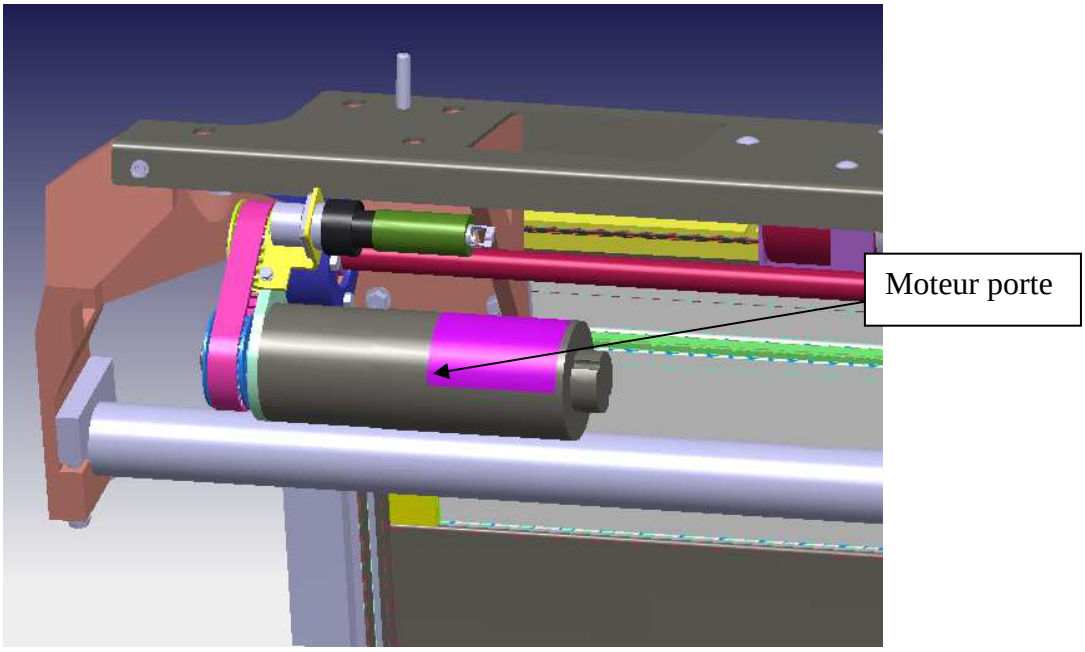


Figure A3-18 : Moteur porte

Les moteurs sont chauffés à des températures de 70° par des buses de chauffage.

3. Sollicitations environnementales

Définition : Une sollicitation environnementale est une contrainte subie par le système provenant de paramètres extérieurs au matériel roulant.

3.1. Nettoyage intérieur

Le nettoyage intérieur peut provoquer des dérèglements sensibles du système dus à la forte pression de lavage et à la « non neutralité » de la solution lessivielle.

3.2. Poussière

La poussière est un mélange basé sur l'analyse granulométrique des encrassements récupérés sur les marches mobiles d'un autre matériel roulant circulant en France susceptible de créer des gènes mécaniques (dans les marches mobiles en particulier)

3.3. Pluie

La pluie est simulée par système de buses pulvérisatrices d'eau avec un débit de 84 l/min.

Annexe 4 : Plans d'expériences

Plan d'expérience 1 :

Le Tableau suivant présente les différents essais réalisés pendant le plan d'expérience 1 sur la porte.

Ordre des essais	Charge Voyageurs	Dévers	Poussée Voyageurs	Obstacle	Choc
1	0 Pers / m²	+ 7°	0 kPa	1 / 10 cycles	7 kN (1 / 20 cycles)
2	0 Pers / m²	-7 °	13 kPa	1 / 10 cycles	7 kN (1 / 20 cycles)
3	0 Pers / m²	0°	13 kPa	1 / 10 cycles	7 kN (1 / 20 cycles)
4	10 Pers / m²	+ 7°	13 kPa	1 / 10 cycles	7 kN (1 / 20 cycles)
5	10 Pers / m²	-7 °	0 kPa	1 / 10 cycles	7 kN (1 / 20 cycles)
6	10 Pers / m²	0°	0 kPa	1 / 10 cycles	7 kN (1 / 20 cycles)
7	10 Pers / m²	+ 7°	0 kPa	sans	7 kN (1 / 20 cycles)
8	0 Pers / m²	-7 °	0 kPa	sans	7 kN (1 / 20 cycles)
9	0 Pers / m²	0°	0 kPa	sans	7 kN (1 / 20 cycles)
10	0 Pers / m²	+ 7°	13 kPa	sans	7 kN (1 / 20 cycles)
11	10 Pers / m²	-7 °	13 kPa	sans	7 kN (1 / 20 cycles)
12	10 Pers / m²	0°	13 kPa	sans	7 kN (1 / 20 cycles)
13	5 Pers / m²	0°	6,5 kPa	1 / 10 cycles	4 kN (1 / 20 cycles)
14	5 Pers / m²	-7 °	6,5 kPa	1 / 10 cycles	4 kN (1 / 20 cycles)
15	5 Pers / m²	-7 °	6,5 kPa	sans	4 kN (1 / 20 cycles)
16	5 Pers / m²	0°	6,5 kPa	sans	4 kN (1 / 20 cycles)
17	5 Pers / m²	+ 7°	6,5 kPa	sans	4 kN (1 / 20 cycles)
18	0 Pers / m²	+ 7°	13 kPa	1 / 10 cycles	sans
19	0 Pers / m²	-7 °	0 kPa	1 / 10 cycles	sans
20	0 Pers / m²	0°	0 kPa	1 / 10 cycles	sans
21	10 Pers / m²	+ 7°	0 kPa	1 / 10 cycles	sans
22	10 Pers / m²	-7 °	13 kPa	1 / 10 cycles	sans
23	10 Pers / m²	0°	13 kPa	1 / 10 cycles	sans
24	10 Pers / m²	+ 7°	13 kPa	sans	sans
25	0 Pers / m²	-7 °	13 kPa	sans	sans
26	0 Pers / m²	0°	13 kPa	sans	sans
27	0 Pers / m²	+ 7°	0 kPa	sans	sans
28	10 Pers / m²	-7 °	0 kPa	sans	sans
29	10 Pers / m²	0°	0 kPa	sans	sans

Plan d'expérience 2 :

Le Tableau suivant présente les différents essais réalisés pendant le plan d'expérience 3 sur la porte, la marche mobile et le comble lacune.

	Sollicitation commune						
ordre des essais	**Charge voyageur**	**Dévers**	**Obstacle (Porte+PMR)**	**Pluie**	**Nettoyage**	**Poussière**	**Chauffage moteur**
1	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	sans	T° ambiante
2	5 Pers / m²	0°	sans	sans	sans	sans	T° ambiante
3	5 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	sans	sans	T° ambiante
4	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	sans	T° ambiante
5	10 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	sans	T° ambiante
6	10 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	sans	sans	T° ambiante
7	0 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	sans	sans	T° ambiante
8	0 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	sans	sans	T° ambiante
9	5 Pers / m²	0°	sans	sans	sans	sans	70°
10	10 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	sans	sans	70°
11	0 Pers / m²	0°	sans	sans	sans	sans	70°
12	10 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	sans	70°
13	5 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	sans	sans	70°
14	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	sans	70°
15	0 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	sans	sans	70°
16	5 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	sans	sans	70°
17	0 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	sans	sans	70°
18	10 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	sans	sans	70°
19	0 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	sans	70°
20	0 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	sans	70°
21	0 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	sans	sans	T° ambiante
22	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	sans	sans	T° ambiante
23	5 Pers / m²	0°	sans	avec	sans	sans	T° ambiante
24	5 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	sans	T° ambiante
25	5 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	sans	sans	T° ambiante
26	10 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	sans	sans	T° ambiante
27	10 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	sans	sans	T° ambiante
28	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	sans	sans	70°
29	0 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	avec	sans	sans	70°
30	0 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	sans	70°
31	10 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	sans	70°
32	5 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	avec	sans	70°
33	10 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	avec	sans	70°
34	10 Pers / m²	0°	sans	sans	avec	sans	70°
35	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	avec	sans	70°
36	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	sans	T° ambiante
37	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	sans	T° ambiante
38	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	avec	sans	T° ambiante
39	0 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	avec	sans	T° ambiante
40	0 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	avec	sans	T° ambiante
41	0 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	avec	sans	T° ambiante
42	10 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	avec	sans	T° ambiante

43	10 Pers / m²	0°	sans	sans	avec	sans	T° ambiante
44	5 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	avec	avec	sans	T° ambiante
45	5 Pers / m²	0°	sans	avec	avec	sans	T° ambiante
46	5 Pers / m²	-7 °	sans	avec	avec	sans	T° ambiante
47	0 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	avec	sans	T° ambiante
48	5 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	avec	sans	T° ambiante
49	5 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	avec	sans	70°
50	0 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	avec	sans	70°
51	10 Pers / m²	-7 °	sans	avec	avec	sans	70°
52	5 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	avec	sans	70°
53	5 Pers / m²	0°	sans	avec	avec	sans	70°
54	0 Pers / m²	-7 °	sans	avec	avec	sans	T° ambiante
55	0 Pers / m²	0°	sans	sans	sans	avec	T° ambiante
56	5 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	sans	avec	T° ambiante
57	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	sans	avec	T° ambiante
58	10 Pers / m²	0°	sans	sans	sans	avec	T° ambiante
59	10 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	sans	avec	T° ambiante
60	0 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	sans	avec	T° ambiante
61	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	avec	T° ambiante
62	10 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	avec	70°
63	0 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	sans	avec	70°
64	0 Pers / m²	-7 °	sans	sans	sans	avec	70°
65	5 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	sans	avec	70°
66	0 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	sans	avec	70°
67	10 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	sans	avec	70°
68	5 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	sans	avec	70°
69	0 Pers / m²	0°	sans	avec	sans	avec	70°
70	0 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	avec	sans	avec	70°
71	10 Pers / m²	0°	sans	avec	sans	avec	70°
72	5 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	sans	avec	70°
73	5 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	avec	T° ambiante
74	5 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	sans	avec	T° ambiante
75	5 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	sans	avec	T° ambiante
76	0 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	avec	T° ambiante
77	0 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	avec	sans	avec	T° ambiante
78	10 Pers / m²	0°	sans	avec	sans	avec	T° ambiante
79	10 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	avec	T° ambiante
80	10 Pers / m²	-7 °	sans	avec	sans	avec	70°
81	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	avec	avec	70°
82	10 Pers / m²	0°	sans	sans	avec	avec	T° ambiante
83	0 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	avec	T° ambiante
84	5 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	avec	T° ambiante
85	5 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	sans	avec	avec	T° ambiante
86	0 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	avec	avec	T° ambiante
87	0 Pers / m²	-7 °	sans	sans	avec	avec	T° ambiante
88	0 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	avec	avec	T° ambiante
89	0 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	avec	avec	T° ambiante
90	5 Pers / m²	0°	sans	sans	avec	avec	T° ambiante
91	5 Pers / m²	+ 7°	sans	sans	avec	avec	70°
92	5 Pers / m²	+ 7°	1 / 10 cycles	sans	avec	avec	70°
93	0 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	sans	avec	avec	70°
94	0 Pers / m²	-7 °	sans	avec	avec	avec	70°

95	0 Pers / m²	0°	sans	avec	avec	avec	70°
96	10 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	avec	avec	avec	70°
97	10 Pers / m²	-7 °	sans	avec	avec	avec	70°
98	10 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	avec	avec	70°
99	10 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	avec	avec	T° ambiante
100	5 Pers / m²	-7 °	sans	avec	avec	avec	T° ambiante
101	5 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	avec	avec	avec	T° ambiante
102	0 Pers / m²	0°	sans	avec	avec	avec	T° ambiante
103	5 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	avec	avec	T° ambiante
104	0 Pers / m²	-7 °	1 / 10 cycles	avec	avec	avec	T° ambiante
105	10 Pers / m²	+ 7°	sans	avec	avec	avec	T° ambiante
106	10 Pers / m²	0°	1 / 10 cycles	avec	avec	avec	T° ambiante

	Porte			
ordre des essais	**Choc**	**patin inférieur**	**Fin de course**	**Poussée voyageurs**
1	sans	1mm	nominal	0 kPa
2	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	nominal	0 kPa
3	sans	5mm	nominal	0 kPa
4	sans	5mm	nominal	0 kPa
5	sans	5mm	(- 2) mm	0 kPa
6	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	5 kPa
7	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
8	sans	1mm	2 mm	5 kPa
9	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
10	sans	1mm	2 mm	0 kPa
11	sans	1mm	(- 2) mm	0 kPa
12	sans	1mm	(- 2) mm	5 kPa
13	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	(- 2) mm	5 kPa
14	sans	5mm	2 mm	5 kPa
15	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	5 kPa
16	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	nominal	0 kPa
17	sans	1mm	nominal	5 kPa
18	sans	5mm	nominal	5 kPa
19	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	5 kPa
20	sans	5mm	(- 2) mm	0 kPa
21	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	(- 2) mm	0 kPa
22	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	0 kPa
23	sans	5mm	nominal	5 kPa
24	sans	1mm	nominal	0 kPa
25	sans	1mm	(- 2) mm	5 kPa
26	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	5 kPa
27	sans	1mm	2 mm	0 kPa
28	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
29	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	0 kPa
30	sans	1mm	2 mm	0 kPa
31	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
32	sans	1mm	2 mm	5 kPa
33	sans	1mm	(- 2) mm	0 kPa
34	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	(- 2) mm	0 kPa
35	sans	5mm	nominal	0 kPa
36	sans	5mm	nominal	0 kPa
37	sans	1mm	nominal	0 kPa
38	sans	1mm	nominal	5 kPa
39	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	5 kPa
40	sans	5mm	(- 2) mm	0 kPa
41	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	0 kPa
42	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	0 kPa
43	sans	5mm	2 mm	5 kPa
44	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	5 kPa
45	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	nominal	0 kPa
46	sans	1mm	nominal	0 kPa

47	sans	1mm	nominal	0 kPa
48	sans	5mm	2 mm	0 kPa
49	sans	5mm	2 mm	0 kPa
50	sans	5mm	2 mm	5 kPa
51	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	(- 2) mm	5 kPa
52	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	5 kPa
53	sans	1mm	nominal	5 kPa
54	sans	5mm	(- 2) mm	5 kPa
55	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	(- 2) mm	5 kPa
56	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	5 kPa
57	sans	5mm	2 mm	5 kPa
58	sans	1mm	nominal	5 kPa
59	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	5 kPa
60	sans	1mm	(- 2) mm	0 kPa
61	sans	1mm	nominal	0 kPa
62	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	0 kPa
63	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
64	sans	5mm	(- 2) mm	5 kPa
65	sans	5mm	(- 2) mm	5 kPa
66	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	0 kPa
67	sans	5mm	2 mm	0 kPa
68	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	0 kPa
69	sans	1mm	2 mm	0 kPa
70	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	5 kPa
71	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	0 kPa
72	sans	1mm	nominal	0 kPa
73	sans	1mm	nominal	0 kPa
74	sans	1mm	(- 2) mm	0 kPa
75	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
76	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	0 kPa
77	sans	5mm	2 mm	0 kPa
78	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	0 kPa
79	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	nominal	5 kPa
80	sans	5mm	(- 2) mm	5 kPa
81	sans	1mm	(- 2) mm	5 kPa
82	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	5 kPa
83	sans	1mm	nominal	5 kPa
84	sans	1mm	nominal	0 kPa
85	sans	1mm	2 mm	0 kPa
86	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	0 kPa
87	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	0 kPa
88	sans	5mm	2 mm	5 kPa
89	sans	5mm	(- 2) mm	5 kPa
90	sans	5mm	nominal	0 kPa
91	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	5 kPa
92	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	(- 2) mm	0 kPa
93	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	nominal	0 kPa
94	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	(- 2) mm	0 kPa
95	sans	5mm	(- 2) mm	5 kPa
96	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	2 mm	5 kPa
97	sans	5mm	2 mm	0 kPa
98	sans	1mm	nominal	5 kPa

99	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	nominal	0 kPa
100	sans	1mm	nominal	0 kPa
101	sans	1mm	2 mm	5 kPa
102	5 kN (1 / 20 cycles)	1mm	2 mm	5 kPa
103	sans	5mm	2 mm	5 kPa
104	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	5 kPa
105	5 kN (1 / 20 cycles)	5mm	nominal	0 kPa
106	sans	5mm	(- 2) mm	0 kPa

	Marche UFR			
ordre des essais	**Charge sur marche**	**Choc**	**Fin de course**	**Tension courroies**
1	0 kg	sans	nominal	8mm
2	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
3	0 kg	sans	nominal	11mm
4	0 kg	sans	nominal	11mm
5	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm
6	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
7	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
8	275 Kg	sans	2 mm	8mm
9	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
10	0 kg	sans	2 mm	8mm
11	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
12	275 Kg	sans	(- 2) mm	8mm
13	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
14	275 Kg	sans	2 mm	11mm
15	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
16	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
17	275 Kg	sans	nominal	8mm
18	275 Kg	sans	nominal	11mm
19	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
20	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm
21	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
22	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
23	275 Kg	sans	nominal	11mm
24	0 kg	sans	nominal	8mm
25	275 Kg	sans	(- 2) mm	8mm
26	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
27	0 kg	sans	2 mm	8mm
28	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
29	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
30	0 kg	sans	2 mm	8mm
31	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
32	275 Kg	sans	2 mm	8mm
33	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
34	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
35	0 kg	sans	nominal	11mm
36	0 kg	sans	nominal	11mm
37	0 kg	sans	nominal	8mm
38	275 Kg	sans	nominal	8mm
39	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
40	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm
41	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
42	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
43	275 Kg	sans	2 mm	11mm
44	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
45	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
46	0 kg	sans	nominal	8mm
47	0 kg	sans	nominal	8mm

48	0 kg	sans	2 mm	11mm
49	0 kg	sans	2 mm	11mm
50	275 Kg	sans	2 mm	11mm
51	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
52	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
53	275 Kg	sans	nominal	8mm
54	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
55	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
56	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
57	275 Kg	sans	2 mm	11mm
58	275 Kg	sans	nominal	8mm
59	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
60	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
61	0 kg	sans	nominal	8mm
62	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
63	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
64	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
65	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
66	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
67	0 kg	sans	2 mm	11mm
68	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
69	0 kg	sans	2 mm	8mm
70	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
71	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
72	0 kg	sans	nominal	8mm
73	0 kg	sans	nominal	8mm
74	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
75	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
76	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
77	0 kg	sans	2 mm	11mm
78	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
79	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
80	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
81	275 Kg	sans	(- 2) mm	8mm
82	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
83	275 Kg	sans	nominal	8mm
84	0 kg	sans	nominal	8mm
85	0 kg	sans	2 mm	8mm
86	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
87	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
88	275 Kg	sans	2 mm	11mm
89	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
90	0 kg	sans	nominal	11mm
91	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
92	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
93	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
94	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
95	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
96	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
97	0 kg	sans	2 mm	11mm
98	275 Kg	sans	nominal	8mm
99	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm

100	0 kg	sans	nominal	8mm
101	275 Kg	sans	2 mm	8mm
102	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
103	275 Kg	sans	2 mm	11mm
104	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
105	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
106	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm

	Marche PMR			
ordre des essais	**Charge sur marche**	**Choc**	**Fin de course**	**Tension courrois**
1	0 kg	sans	nominal	8mm
2	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
3	0 kg	sans	nominal	11mm
4	0 kg	sans	nominal	11mm
5	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm
6	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
7	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
8	275 Kg	sans	2 mm	8mm
9	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
10	0 kg	sans	2 mm	8mm
11	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
12	275 Kg	sans	(- 2) mm	8mm
13	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
14	275 Kg	sans	2 mm	11mm
15	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
16	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
17	275 Kg	sans	nominal	8mm
18	275 Kg	sans	nominal	11mm
19	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
20	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm
21	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
22	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
23	275 Kg	sans	nominal	11mm
24	0 kg	sans	nominal	8mm
25	275 Kg	sans	(- 2) mm	8mm
26	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
27	0 kg	sans	2 mm	8mm
28	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
29	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
30	0 kg	sans	2 mm	8mm
31	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
32	275 Kg	sans	2 mm	8mm
33	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
34	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
35	0 kg	sans	nominal	11mm
36	0 kg	sans	nominal	11mm
37	0 kg	sans	nominal	8mm
38	275 Kg	sans	nominal	8mm
39	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
40	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm
41	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
42	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
43	275 Kg	sans	2 mm	11mm
44	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
45	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
46	0 kg	sans	nominal	8mm

47	0 kg	sans	nominal	8mm
48	0 kg	sans	2 mm	11mm
49	0 kg	sans	2 mm	11mm
50	275 Kg	sans	2 mm	11mm
51	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
52	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
53	275 Kg	sans	nominal	8mm
54	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
55	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
56	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
57	275 Kg	sans	2 mm	11mm
58	275 Kg	sans	nominal	8mm
59	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
60	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
61	0 kg	sans	nominal	8mm
62	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
63	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
64	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
65	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
66	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
67	0 kg	sans	2 mm	11mm
68	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
69	0 kg	sans	2 mm	8mm
70	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
71	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
72	0 kg	sans	nominal	8mm
73	0 kg	sans	nominal	8mm
74	0 kg	sans	(- 2) mm	8mm
75	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
76	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
77	0 kg	sans	2 mm	11mm
78	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
79	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
80	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
81	275 Kg	sans	(- 2) mm	8mm
82	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
83	275 Kg	sans	nominal	8mm
84	0 kg	sans	nominal	8mm
85	0 kg	sans	2 mm	8mm
86	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
87	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
88	275 Kg	sans	2 mm	11mm
89	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
90	0 kg	sans	nominal	11mm
91	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
92	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	11mm
93	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
94	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	(- 2) mm	8mm
95	275 Kg	sans	(- 2) mm	11mm
96	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	11mm
97	0 kg	sans	2 mm	11mm
98	275 Kg	sans	nominal	8mm

99	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	8mm
100	0 kg	sans	nominal	8mm
101	275 Kg	sans	2 mm	8mm
102	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	2 mm	8mm
103	275 Kg	sans	2 mm	11mm
104	275 Kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
105	0 kg	5 kN (1 / 20 cycles)	nominal	11mm
106	0 kg	sans	(- 2) mm	11mm

Plan d'expérience 4 :

Le Tableau suivant présente les différents essais réalisés pendant le plan d'expérience 4 sur la porte, la marche mobile et le comble lacune.

	Sollicitations communes			Sollicitation Porte		Sollicitation UFR		Sollicitation PMR	
ordre des essais	**Devers**	**Poids des voyageurs**	**Choc**	**Poussée des voyageurs**	**Obstacle**	**Tension Courroies**	**Poids des voyageurs UFR**	**Obstacle**	**Poids des voyageurs PMR**
1	-7°	0 P/m²	0 kN	6kPa	0	10 mm	220 kg	0	220 kg
2	7°	10 P/m²	6 kN	0kPa	0	10 mm	0 kg	0	0 kg
3	-7°	10 P/m²	0 kN	0kPa	0	10 mm	0 kg	0	0 kg
4	-7°	0 P/m²	6 kN	0kPa	0	10 mm	0 kg	0	0 kg
5	7°	10 P/m²	0 kN	6kPa	0	10 mm	220 kg	0	220 kg
6	0°	0 P/m²	6 kN	0kPa	0	10 mm	0 kg	0	0 kg
7	0°	10 P/m²	0 kN	0kPa	0	10 mm	0 kg	0	0 kg
8	0°	10 P/m²	6 kN	6kPa	0	10 mm	220 kg	0	220 kg
9	0°	5 P/m²	3 kN	3kPa	0	10 mm	110 kg	0	110 kg
10	7°	5 P/m²	3 kN	3kPa	0	10 mm	110 kg	0	110 kg
11	-7°	10 P/m²	6 kN	6kPa	0	10 mm	220 kg	0	220 kg
12	-7°	5 P/m²	3 kN	3kPa	0	10 mm	110 kg	0	110 kg
13	7°	0 P/m²	6 kN	6kPa	0	10 mm	220 kg	0	220 kg
14	0°	0 P/m²	0 kN	6kPa	0	10 mm	220 kg	0	220 kg
15	7°	0 P/m²	0 kN	0kPa	0	10 mm	0 kg	0	0 kg
16	0°	10 P/m²	6 kN	0kPa	1/10 c	13 mm	0 kg	1/10 c	0 kg
17	0°	0 P/m²	6 kN	6kPa	1/10 c	13 mm	220 kg	1/10 c	220 kg
18	7°	10 P/m²	6 kN	6kPa	1/10 c	13 mm	220 kg	1/10 c	220 kg
19	-7°	0 P/m²	6 kN	6kPa	1/10 c	13 mm	220 kg	1/10 c	220 kg
20	7°	0 P/m²	0 kN	6kPa	1/10 c	13 mm	220 kg	1/10 c	220 kg
21	0°	10 P/m²	0 kN	6kPa	1/10 c	13 mm	220 kg	1/10 c	220 kg
22	7°	0 P/m²	6 kN	0kPa	1/10 c	13 mm	0 kg	1/10 c	0 kg
23	-7°	0 P/m²	0 kN	0kPa	1/10 c	13 mm	0 kg	1/10 c	0 kg
24	-7°	10 P/m²	0 kN	6kPa	1/10 c	13 mm	220 kg	1/10 c	220 kg
25	7°	10 P/m²	0 kN	0kPa	1/10 c	13 mm	0 kg	1/10 c	0 kg
26	0°	0 P/m²	0 kN	0kPa	1/10 c	13 mm	0 kg	1/10 c	0 kg
27	-7°	10 P/m²	6 kN	0kPa	1/10 c	13 mm	0 kg	1/10 c	0 kg
28	-7°	5 P/m²	3 kN	3kPa	1/10 c	13 mm	110 kg	1/10 c	110 kg
29	0°	5 P/m²	3 kN	3kPa	1/10 c	13 mm	110 kg	1/10 c	110 kg

Résumé :

Les grandes entreprises ferroviaires intègrent au niveau du matériel roulant une grande variété de systèmes complexes qui se doivent d'être fiables et ce, dès le démarrage du service commercial. Ce travail de thèse propose une méthodologie expérimentale pour l'amélioration de la robustesse d'un système prédominant, à savoir l'accès voyageurs. L'objectif est d'améliorer sa fiabilité intrinsèque dans un laps de temps raisonnable dans le cadre de projet industriel contraint par le temps. La méthodologie expérimentale proposée s'appuie sur la méthode des essais aggravés et accélérés de fiabilité, et se veut être optimisée grâce à l'utilisation de plans d'expériences D-optimaux.

Après une analyse bibliographique, suivie d'une étude sur l'utilisation des plans d'expériences D-optimaux, ce travail expose les méthodes et moyens expérimentaux mis en place pour utiliser les plans d'expériences dans un contexte industriel. La dernière partie de cette thèse contient les résultats quantitatifs et qualitatifs issus des expérimentations réalisées sur le banc d'essais du système accès voyageurs développé par Bombardier.

Abstract :

The train manufacturer companies handle a large number of complex systems in their trains. These systems must be reliable to ensure reliability of the final product as soon the entry into commercial services. This thesis provides an experimental solution to improve robustness of a predominate system, namely passengers access system. The goal is to improve inherent reliability in a reasonable amount of time to be integrated in a project phase. This experimental method is based on testing aggravated and accelerated method temporally optimized with using of D-optimal design of experiment.

After a literature review, followed by a focus on the definition and use of experimental design D-optimal, this work will present experimental methods and means used to set up the experimental design in an industrial context. The last part of this thesis contains quantitative and qualitative results performed on the passenger's access test bench developed by Bombardier.