



HAL
open science

**Conception des systèmes mécaniques complexes en
comportement dynamique. Contribution à une
démarche physico-fiabiliste à partir d'un système à pile à
combustible pour véhicule électrique à hydrogène**

Sophie Collong

► **To cite this version:**

Sophie Collong. Conception des systèmes mécaniques complexes en comportement dynamique. Contribution à une démarche physico-fiabiliste à partir d'un système à pile à combustible pour véhicule électrique à hydrogène. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2016. Français. NNT : 2016BELF0283 . tel-01417563

HAL Id: tel-01417563

<https://theses.hal.science/tel-01417563>

Submitted on 15 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

Conception des systèmes mécaniques
complexes en comportement dynamique
Contribution à une démarche
physico-fiabiliste à partir d'un système à
pile à combustible pour véhicule électrique
à hydrogène

■ SOPHIE COLLONG

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

N° 2 | 8 | 3

THÈSE présentée par

SOPHIE COLLONG

pour obtenir le

Grade de Docteur de

l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Sciences pour l'ingénieur**

Conception des systèmes mécaniques complexes en
comportement dynamique

Contribution à une démarche physico-fiabiliste à
partir d'un système à pile à combustible pour
véhicule électrique à hydrogène

Soutenue publiquement le 7 avril 2016 devant le Jury composé de :

THIERRY SORIANO	Président	Professeur, Institut supérieur de mécanique de Paris
ARNAUD HUBERT	Rapporteur	Professeur, Université de Technologie de Compiègne
ABEL CHEROUAT	Rapporteur	Professeur, Université de Technologie de Troyes
OLIVIER LOTTIN	Examineur	Professeur, Université de Lorraine
WILLY CHARON	Directeur	Professeur, UTBM
RAED KOUTA	Encadrant	Maître de conférences, UTBM
YANN MEYER	Encadrant	Maître de conférences, HDR, UTBM
FABIENNE PICARD	Encadrant	Maître de conférences, HDR, UTBM

A mon mari et mes enfants,

Remerciements

Les travaux présentés dans ce document sont le fruit de recherches guidées, et approfondies par l'investissement de plusieurs personnes. J'ai pu puiser mes réflexions dans la qualité des échanges pluri-disciplinaires et scientifiques entre les quatre personnes qui ont accompagnés mes recherches. J'ai trouvé, auprès d'elles des directions scientifiques valables et ambitieuses.

En premier lieu, je tiens à témoigner ma reconnaissance au professeur Willy Charon pour le savoir faire avec lequel il a orienté mes recherches ainsi que pour les compétences en termes de réflexion scientifique qu'il m'a enseignées. Je le remercie de la confiance qu'il m'a accordée ainsi que pour son soutien encourageant.

Je remercie Raed Kouta qui a su ouvrir, maintes fois, le champs d'investigation de mes recherches, et compléter mes connaissances scientifiques et compétences techniques au cours de nos nombreuses discussions. Je remercie Fabienne Picard qui m'a fait découvrir les mécanismes de l'approche sociologique d'une problématique. Ses éclairages m'ont permis d'entrevoir de nombreuses synergies entre notre différentes disciplines ; lesquelles pourraient permettre de construire une réponse commune. Enfin je remercie Yann Meyer de la rigueur scientifique avec laquelle il a enrichi mes travaux. Je le remercie également de ses précieux encouragements.

Par ailleurs, j'ai eu la chance, pendant ces quelques années d'être entourée d'une équipe professionnelle et attentive, au sein de laquelle j'ai développer des compétences. Je remercie monsieur Florent Petit, directeur de l'équipe FCellSYS des grandes confiance et liberté qu'il m'a accordées, grâce auxquelles j'ai pu mener à bien ces travaux de recherche. Les possibilités qu'il m'a offertes de pouvoir observer des phénomènes en participant à des projets applicatifs en cours de développement m'ont permises de fonder mes résultats sur des données valables. Je remercie également l'ensemble des personnes de l'équipe qui m'ont soutenue et apporté de nombreux conseil avisés. Je remercie particulièrement Philippe Lesage pour la qualité des données qu'il a pu me transmettre.

Je remercie les personnes, qui ont contribué, par les échanges constructifs à enrichir les travaux. Je tiens à remercier particulièrement, Victoire Guegan et Flore d'Aboville. Je remercie très chaleureusement Marie-Christine Iltehv qui m'a bien souvent encouragée et m'a fourni des coups de main précieux.

Enfin, j'ai la grande chance d'être entourée d'une famille solide et confiante tel un tremplin permettant d'aller plus loin en prenant appuie sur la terre ferme. Je tiens ainsi à remercier mes beaux-parents et mes parents. Pour finir, mon plus grand remerciement est adressé à mon mari qui m'a soutenue au quotidien avec délicatesse et bienveillance et sans qui ces travaux n'auraient pu avoir lieu. D'une patiente sans limite, il a su écouter et comprendre les nombreux doutes qui accompagnent un travail de recherche. Je termine par un clin d'œil à nos enfants, raison joyeuse d'avancer, qui utiliseront peut-être un jour ces systèmes mécaniques complexes !

Introduction

L'impératif croissant, impliquant les usagers et les pouvoirs publics, à réduire les émissions de polluants et la dépendance vis-à-vis des produits pétroliers, fait émerger une nouvelle génération de véhicules électriques. L'autonomie de ces véhicules déterminée par l'énergie électrique embarquée, d'une part et par l'accumulation et le stockage de cette énergie électrique, d'autre part, font partie des nouveaux défis du transport.

Dans ce contexte, l'hydrogène est un vecteur énergétique prometteur et il peut être produit par des sources d'énergie renouvelables, telles que l'éolien ou le solaire. Les systèmes à pile à combustible (SPAC) embarqués dans les véhicules peuvent répondre à ces enjeux d'autonomie des véhicules. En effet, la pile à combustible (PAC) est un convertisseur d'énergie performant. Elle transforme l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en énergie électrique et en chaleur. La PAC n'engendre pas de pollution atmosphérique locale et n'émet pas de gaz à effet de serre à condition qu'elle soit directement alimentée par de l'hydrogène produit « proprement ».

Il existe plusieurs types de PAC, chacun offrant des avantages suivant les applications visées. La PAC à membrane échangeuse de protons (appelée PEMFC) est la plus étudiée pour une application dans les transports terrestres. En effet sa température de fonctionnement faible permet notamment un démarrage à froid rapide. Pour fonctionner, la PAC nécessite un grand nombre d'auxiliaires. Ils constituent ensemble le système à PAC. Un système à PAC (SPAC) est généralement constitué d'une ou plusieurs PAC, d'une alimentation en hydrogène et en air (oxygène) couplées à un circuit d'humidification, d'un circuit de refroidissement et d'un convertisseur électrique. Le tout est géré par un système de contrôle centralisé. Intégré à un véhicule électrique à hydrogène, le SPAC est un système mécanique complexe qui est soumis à un environnement vibratoire contraignant.

Le développement des SPAC, appliqués au secteur automobile, est en cours. En effet, les constructeurs automobiles disposent de prototypes de plus en plus nombreux. Les études réalisées sur ces premiers modèles permettent de concevoir, dès à présent, les premières séries de véhicules équipés de SPAC. Afin d'être en adéquation avec les attentes sociales et économiques des utilisateurs, la durée de vie de ces véhicules, donc celle des SPAC, doit être maîtrisée. Par ailleurs, la conception des systèmes est soumise à des contraintes de plus en plus fortes afin d'augmenter la rentabilité des solutions et d'optimiser la durée de cette phase de développement. Il est indispensable de prioriser les différents choix de solutions qui pourrait être engagées.

La démarche de conception et de réalisation de solutions technologiques qui permet de placer une confiance dans les choix adoptés, est appelé la sûreté de fonctionnement

(SdF). Les systèmes mécaniques complexes, tels que les SPAC, doivent répondre à des objectifs de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité, composantes de la SdF au même titre que les produits dans lesquels ils sont intégrés.

Les véhicules électriques à hydrogène destinés au transport terrestre sont soumis aux contraintes vibro-climatiques du milieu dans lequel ils évoluent et qui influencent leur durée de vie. Les essais vibro-climatiques correspondant à ces contraintes doivent être intégrés dans une démarche alliant la physique et la fiabilité dès les premières phases de conception, afin d'assurer les objectifs de durée de vie fixés.

Cette démarche physico-fiabiliste s'intègre dans l'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes. Elle étant la coupure mécano-fiabiliste proposé par M.Lemaire [Lemaire, 2005] aux systèmes multi-physiques. Elle comprend 4 étapes. Une analyse fiabiliste initiale permet de soulever les modes de défaillance du système étudié. Puis, l'étude physique en modélisation, simulation et vérification expérimentale est développée. Elle permet ensuite d'alimenter l'étude statistique par les résultats de la simulation stochastique et de la modélisation sous forme de variables ou de processus aléatoires. Enfin l'élaboration, la mise au point et la mise en œuvre de méthodes de calculs probabilistes sont réalisables. Les travaux présentés dans ce document apporte une contribution aux trois premières étapes de cette démarche.

Un système mécanique complexe, tels qu'un SPAC intégré à un véhicule électrique à hydrogène, lorsqu'il est soumis à un environnement vibratoire contraignant, subit des sollicitations qui dégradent les composants qui le compose. Les sollicitations réelles d'usage doivent être prises en compte, dès la conception. L'objectif principal de cette thèse est de proposer une méthodologie d'identification, de réalisation, de traitement et d'exploitation des essais vibro-climatiques sur les systèmes en conditions environnementales afin d'apporter une aide aux concepteurs en termes de choix technologiques vis-à-vis de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécaniques complexe.

Ce mémoire développe différents points de ce cheminement selon le découpage présenté en figure 1 et sur la base du SPAC.

Une analyse physique des comportements d'un système soumis à des contraintes suppose l'identification de celles-ci. De plus, la valeur de sa durée de vie doit pouvoir être comparée à un objectif défini. Les SPAC développés par les constructeurs devant être au service du plus grand nombre, nous basons la définition des objectifs sur une étude sociologique de l'utilisation des véhicules à SPAC. Par là, nous intégrons les enjeux technologiques à l'intérieur même de l'étude technique des systèmes. Le **chapitre 1** est dédié à l'allocation des objectifs de sûreté de fonctionnement en terme de durée de vie du SPAC soumis à un environnement vibratoire et climatique défini. Tout d'abord, une étude du contexte d'usage est réalisée. Son but est de contribuer à l'évaluation de la convergence entre les comportements des utilisateurs et les possibilités offertes par la technologie des véhicules électriques équipés de SPAC. Cette convergence passe par l'acceptation par la société de la mobilité permise par cette technologie. Cette première analyse permet de définir les objectifs de durée de vie des systèmes à pile à combustible sous contraintes vibro-climatiques.

Les SPAC étant des systèmes complexes constitués d'une ou plusieurs piles à combustible ainsi que de l'ensemble de leurs auxiliaires, il est plus efficace de séquencer notre

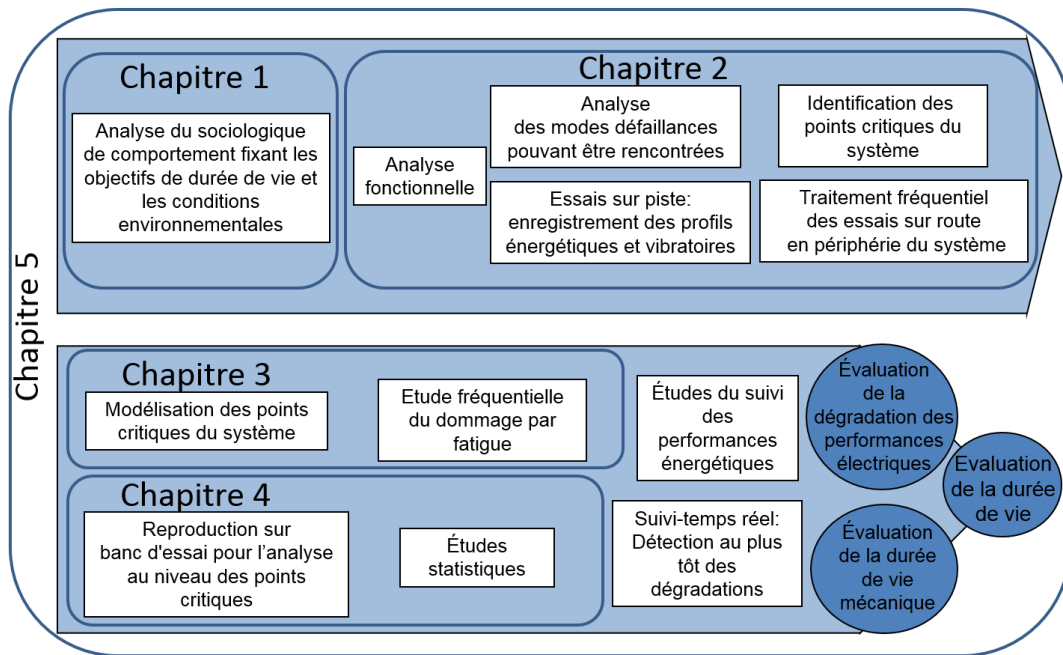


FIGURE 1 – Cheminement pour l'intégration des essais vibro-climatiques dans la démarche physico-fiabiliste

analyse en plusieurs niveaux. Dans notre cas, deux niveaux d'analyse sont nécessaires. Dans le **chapitre 2**, une méthodologie d'analyse d'un système à pile à combustible au niveau global est présentée afin de déterminer les points critiques à étudier au niveau local. Dans la première partie, les outils d'analyse qualitative de sûreté de fonctionnement des systèmes sont développés. Ils ont été mis en œuvre dans le cadre des projets F-City H2 et MOBILHyTEst au sein desquelles FCellSYS¹ est partenaire. Le travail développé étant focalisé sur les contraintes vibratoires et climatiques, dans une seconde partie, des méthodes de caractérisation des contraintes subies par le système au niveau global sont proposées. Ceci permet, en troisième partie, de simuler le comportement du système au niveau global.

Le **chapitre 3** est consacré aux méthodes d'analyse locale d'un des points critiques d'un système à pile à combustible mis en évidence par les techniques proposées dans le chapitre 2. Le comportement dynamique du composant pris comme exemple est évalué en termes de dommage par fatigue. La comparaison des résultats sur différentes géométries permet d'orienter la conception de ce point critique.

Dans le **chapitre 4** le système à PAC, déjà conçu puis fabriqué, est testé sous environnement vibro-climatique. Les buts des campagnes d'essais vibro-climatiques ainsi que les méthodes, moyens et outils mis en place pour les atteindre sont présentés. Une campagne d'essai est réalisée lors du projet F-City H2 dans lequel FCellSYS a conduit les essais vibro-climatiques d'un SPAC conçu et réalisé par la société Michelin. Ce SPAC est

1. FCellSys, évolution de l'Institut FCLAB, est un centre de ressources technologiques porté par l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA) et INÉVA-CNRT

implanté dans le véhicule F-City H2 du constructeur FAM Automobile (premier véhicule à hydrogène immatriculé en France en catégorie L7e (véhicule quadricycle à moteur)). Le traitement statistique des données permet d'analyser l'impact des différentes conditions environnementales et du fonctionnement du système.

Enfin, le **chapitre 5** présente la mise en pratique de l'intégration des essais vibro-climatiques dans la démarche physico-fiabiliste. Un programme d'étude complet liant des différentes méthodes et outils développés est proposé. Il permet de comparer différents objectifs liés à des comportements d'utilisation identifiés dans le chapitre 1. Les interactions entre les différentes disciplines sont mises en évidence.

« *De quoi sert-il de bâtir des châteaux en Espagne
puisque'il nous faut habiter en France ?* »
St. François de Sales (1567-1622)

Table des matières

Introduction	1
1 Le comportement des usagers comme socle des objectifs de sûreté de fonctionnement	9
1.1 Approche sociologique des comportements et usages	12
1.2 Le véhicule électrique à hydrogène : une solution technologique	27
1.3 Déploiement de la Fonction Qualité comme liant entre l'étude sociologique et la solution technique	29
1.4 Allocation des objectifs de sûreté de fonctionnement	31
2 Analyse globale d'un système mécanique complexe à l'exemple d'un SPAC	41
2.1 Étude globale et qualitative de sûreté de fonctionnement	43
2.2 Caractérisation des contraintes vibro-climatiques	57
2.3 Modélisation des comportements dynamiques des systèmes mécaniques complexes	70
3 Analyse locale d'un système mécanique complexe à l'exemple d'un SPAC	93
3.1 Dommages par fatigue d'une pièce mécanique	95
3.2 Modélisation des comportements dynamiques localisés	99
4 Modélisation expérimentale par des essais vibro-climatiques en fonctionnement	121
4.1 Essais vibro-climatiques sur plateforme	123
4.2 Caractérisation du comportement dynamique en un point critique	126
4.3 Étude de l'influence de la température extérieure et du fonctionnement de la pile à combustible	134
5 Mise en pratique de la démarche physico-fiabiliste	163
5.1 Procédures intégrant les essais vibro-climatiques	164
5.2 Mise en place pratique de la démarche	171
5.3 Réponse aux objectifs de sûreté de fonctionnement émanant de la société	172
Conclusion	177

1 Le comportement des usagers comme socle des objectifs de sûreté de fonctionnement

*« Nous estimerions que nos recherches
ne méritent pas une heure de peine
si elles ne devaient avoir
qu'un intérêt spéculatif. »*

Prof. Émile Durkheim (1858-1917)

Sommaire

1.1	Approche sociologique des comportements et usages	12
1.1.1	Les courants de la sociologie	12
1.1.2	Évolution des comportements vis-à-vis de la mobilité	14
1.1.3	Le rôle des comportements individuels dans le développement des nouvelles technologies de la mobilité	15
1.1.4	Diffusion de ces comportements favorisés par le développement d'une nouvelle technologie	16
1.1.5	Etude de cas : la flotte de véhicules libre-service OPTYMO dans le Territoire de Belfort	19
1.1.5.1	Les données et les outils utilisés	19
1.1.5.2	L'évolution des comportements vis-à-vis de l'utilisa- tion d'un véhicule automobile propriétaire	20
	1) Analyse générale et globale	20
	2) Analyse de l'évolution temporelle	21
1.1.5.3	Le choix du type de véhicule basé sur le parcours envisagé	23
1.1.6	La société vis-à-vis de la sécurité	26
1.1.7	Principaux enseignements tirés de l'analyse sociétale	26
1.2	Le véhicule électrique à hydrogène : une solution technologique	27
1.2.1	La Pile à Combustible	27
1.2.2	Le système à pile à combustible	27
1.2.3	L'intégration d'un système à pile à combustible dans un véhicule électrique	28
1.3	Déploiement de la Fonction Qualité comme liant entre l'étude sociologique et la solution technique	29

1.4	Allocation des objectifs de sûreté de fonctionnement	31
1.4.1	Les composantes de la sûreté de fonctionnement	32
1.4.1.1	La fiabilité	32
1.4.1.2	La maintenabilité	33
1.4.1.3	La disponibilité	34
1.4.1.4	La sécurité	34
1.4.1.5	Probabilité et fiabilité	35
1.4.1.6	Description d'une variable aléatoire	36
1.4.2	La durée de vie d'un système mécanique complexe	37
1.4.2.1	Définition d'un système mécanique complexe	37
1.4.2.2	Démarche de prédiction de la durée de vie	38

Dans la pratique générale, les essais de durée de vie d'un produit sont élaborés à partir de profils de missions plus ou moins complexes ou sévérés qui permettent de représenter sur une durée réduite ce que le produit va subir durant toute sa vie. Cette approche n'est pas compatible avec des produits innovants dont les usages ne sont pas encore (bien) connus ou qui sont susceptibles de bouleverser des conditions d'usage connues. La volonté de fonder l'analyse vibratoire des systèmes à piles à combustible (SPAC) par l'intermédiaire d'essais, sur l'étude des comportements et des usagers est principalement guidée par le souci d'adapter la conception et l'intégration de cette technologie dans les véhicules en fonction de l'usage *in fine* qui pourrait en être fait. Une analyse de la durée de vie d'un système soumis à des excitations vibratoires suppose l'identification d'objectifs à prendre en compte dès sa conception. L'évaluation de l'utilisation d'un véhicule à SPAC par la société est le socle de la définition des objectifs à atteindre par le système. Les comportements humains, sont en perpétuelles évolutions. Par ailleurs, comme le présente L. Fouillé au début de sa thèse [Fouillé, 2011] : «*Choisir d'étudier les changements de comportement qui émergent dans le champ des transports et de la mobilité des personnes peut s'expliquer de manière très cartésienne par la demande sociale et politique de préparer la transition énergétique qui résulte de l'appauvrissement des ressources fossiles mais aussi du changement climatique, qui en est une conséquence.*»

Ce chapitre est focalisé sur le premier maillon du cheminement présenté en figure 1. Ainsi, il est proposé une réflexion sur la place d'une approche sociologique de la définition des conditions expérimentales vibro-climatiques d'un système. Dans le cadre d'une nouvelle technologie de véhicule telle que celle proposée par les SPAC, cette étude se penche sur les liens étroits entre l'évolution des comportements et les dynamiques de développement de la technologie du système étudié. Ces domaines de recherches sont extrêmement vastes et l'approfondissement de ces thèmes nécessiteraient de s'y consacrer davantage.

Ensuite la technologie des véhicules à SPAC est présentée dans le but de mettre en évidence l'offre de mobilité qu'elle permet.

La troisième partie de ce chapitre utilise l'outil de Déploiement de la Fonction Qualité (QFD) pour analyser la convergence entre le comportement des usagers et la capacité des véhicules à SPAC à s'y adapter. Les résultats de ces deux premières parties sont présentés comme point d'entrée de la « maison de la qualité ». Cet outil est choisi pour orienter les analyses de sûreté de fonctionnement qui seront développées dans le deuxième chapitre.

La sûreté de fonctionnement se décline en plusieurs composantes dont les principales sont la fiabilité, la disponibilité, la sécurité et la maintenabilité. Différentes analyses s'intègrent dans ces composantes dont l'étude de la durée de vie des systèmes sur laquelle est focalisé le travail proposé. La dernière partie de la chapitre s'appuiera sur les liens mis en place pour allouer les objectifs de durée de vie des SPAC sous contraintes vibro-climatiques.

1.1 Approche sociologique des comportements et usages

L'objectif est ici d'analyser l'évolution de la mobilité au regard des impacts qu'elle peut avoir sur les choix technologiques, mais également l'influence qu'ont les orientations stratégiques, vis-à-vis des nouvelles technologies, sur les mutations des comportements des usagers. Dans le cadre d'une nouvelle technologie de véhicule telle que celle proposée par les systèmes à pile à combustible, cette étude se penche sur les liens étroits entre l'évolution des comportements et les dynamiques de développement. Depuis décembre 2013, une flotte de véhicules en libre-partage est mise à disposition des usagers à Belfort et dans son agglomération. L'étude de ce cas sur une période d'observation de 10 mois permet de compléter la réflexion. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur l'analyse des comportements des utilisateurs de ce service.

1.1.1 Les courants de la sociologie

La recherche sociologique s'appuie sur deux courants fondateurs, portés l'un par Émile Durkheim (1858-1917) qui analyse le fait social (paradigme holistique), et l'autre par Max Weber (1864-1920) qui considère d'avantage l'activité des individus (paradigme atomiste).

L'époque d'E. Durkheim est marquée par l'avènement de la société industrielle et ainsi l'étude de la sociologie devient un moyen privilégié pour comprendre les grands défis de la science. Dans sa préface à l'ouvrage *«De la division du travail social»*, il écrit en 1893 : *«Si nous séparons avec soin les problèmes théoriques des problèmes pratiques, ce n'est pas pour négliger ces derniers : c'est, au contraire, pour nous mettre en état de les mieux résoudre»*. E. Durkheim a, ainsi, introduit le terme d'*anomie* pour désigner une société dans laquelle les normes sociales ne sont plus assez efficaces. Ce recul des valeurs, cette perte de repères, se vérifie souvent lorsque qu'il y a un trop grand écart entre l'idéologie et les valeurs communes, notamment lorsque l'on observe des grands changements dans la société. Pour lui, les comportements des individus sont déterminés par la société. Ils sont ainsi expliqués par des faits exprimés sous formes de données. Il repose son raisonnement sur l'analyse statistique des données.

M. Weber s'est également penché sur le sens et les conséquences de la modernisation et de l'industrialisation. Il ne nie pas le déterminisme imposé par un fait social, mais, selon lui, l'individu réagit par rapport aux autres. Les inter-actions occupent une place plus importante. Il base d'avantage ses interprétations sur les enquêtes qualitatives. Il postule que les phénomènes sociaux résultent des actions individuelles - *«l'individualisme méthodologique»*- sa démarche s'oppose donc à celle de E. Durkheim. Selon M. Weber, il existe un processus de rationalisation selon lequel, l'homme finit par adopter des actions rationnelles qui prennent le pas sur les actions traditionnelles puisque ces dernières ont échoué à donner à l'homme un sens à sa vie. C'est ce qu'on appelle également *«l'intellectualisation du monde»*. Ce processus concerne l'activité sociale globale mais il est particulièrement présent dans les domaines technologiques, scientifiques et économiques.

Pour terminer ce très bref rappel historique des fondateurs de la sociologie

contemporaine nous résumerons deux des grands courants de la sociologie moderne : l'un porté par le français Pierre Bourdieu (1930-2002) et le deuxième par l'américain Erving Goffman (1922-1982).

Pour P. Bourdieu les choix de l'individu sont influencés par le milieu dans lequel il vit. Il s'inscrit, ainsi plutôt dans le courant déterministe. Il décrit les niveaux sociaux par des sphères (économiques, culturelles, politiques, ...). Selon lui, les niveaux les plus élevés donnent les tendances notamment en termes d'acquisition des nouvelles technologies. Il ne nie cependant pas le caractère aléatoire des choix humains.

E. Goffman quant à lui s'est consacré entièrement à l'analyse des interactions, c'est-à-dire des échanges entre au moins deux individus. Un de ses ouvrages célèbres «*La mise en scène de la vie quotidienne*» (publié en 1959) compare les interactions à des scènes théâtrales. E. Goffman y met en exergue les différents décors possibles dans lesquels jouent les acteurs et les différents rôles qui peuvent être joués. Le sociologue montre comment l'individu peut contrôler les impressions d'autrui (son public). L'individu est, selon lui pleinement acteur de l'évolution de ce qui l'entoure.

La sociologie moderne reste marquée par la tension entre l'approche holiste et l'approche individualiste mais cette opposition méthodologique n'empêche pas les sociologues de l'un ou de l'autre courant de s'interroger sur la place de l'individu ou sur l'influence des contraintes sociales.

Une voie intermédiaire de compréhension du progrès - pourtant fort décriée par les scientifiques du XIXème - correspondrait peut-être au positivisme d'Auguste Comte (1798-1857). Ce dernier décrit trois états successifs que traversent chaque individu, chaque science et chaque société : l'état théologique, l'état métaphysique et l'état positif. L'état positif est celui dans lequel l'individu ne recherche plus les causes qu'il ne peut pas expliquer mais s'applique à trouver des lois permettant d'exprimer les phénomènes. En quelque sorte, l'individu au stade adulte devient raisonnable et il peut utiliser les lois qu'il a défini pour dominer la nature et faire progresser son existence. La société arrivée à l'état positif est caractérisée par le progrès. Selon ses propres mots, la philosophie sociologique positive d'A. Comte pourrait se résumer ainsi : «*L'amour pour principe, l'ordre pour base, le progrès pour but*». Ainsi selon lui, la société évolue selon le même schéma que les individus.

Pourrait-on étendre cette réflexion par la suivante : comment l'évolution des comportements individuels et l'évolution des faits sociaux sont-ils liés ? Concentrons cette réflexion sur l'évolution de la mobilité des individus en lien avec le développement de nouvelles technologies de transport tels que le proposent les véhicules à SPAC. Cette réflexion permet ainsi de se poser la question suivante : l'utilisation d'une nouvelle technologie telle que les véhicules à SPAC en matière de mobilité est-elle aléatoire ou bien est-elle déterminée par les choix technologiques des développeurs, les choix commerciaux de la mise sur le marché, les décisions des acteurs stratégiques ? La réponse réside dans cet intervalle. Les trois paragraphes qui suivent ont pour but d'apporter des éléments de compréhension sur ce point.

1.1.2 Évolution des comportements vis-à-vis de la mobilité

Concentrons l'étude sur l'évolution des comportements au domaine de la mobilité qui est par ailleurs très vaste. Ce paragraphe introduit le contexte actuel de la mobilité spatiale automobile (« l'automobilité »). Les références et réflexions présentées ci-dessous, permettent d'abord de décrire la mobilité spatiale par la manière dont elle s'est produite dans le temps. Dans cet esprit, l'ouvrage de C. Gallez et de V. Kaufmann intitulé «*Aux racines de la mobilité en sciences sociales*» [Gallez and Kaufmann, 2009] est bien plus complet que l'introduction de ce vaste thème qui est ici proposée. La suite de la section se focalise sur l'automobilité.

Tout d'abord, rappelons que les premiers concepts de la mobilité ont été introduit en 1927 par le russe-américain P.A. Sorokin qui définit la mobilité comme «*le phénomène de déplacements d'individus dans l'espace social*». Puis la mobilité spatiale va progressivement être séparée de la mobilité sociale. Vient ensuite la science du déplacement qui est introduite avec le développement croissant de l'automobile.

Le développement de la mobilité par l'automobile est un fait social historique. E. Le Breton va même jusqu'à dire que «*la voiture prend son sens premier dans le registre des attributs de la normalité sociale*» [Le Breton, 2005]. Selon lui, la mobilité par l'automobile est une condition nécessaire à l'insertion sociale. Ce fait social a marqué le territoire. Dans les pays industriels, l'espace urbain s'est façonné autour des besoins de la voiture. En effet, selon J.Urry [Urry, 2004], l'usage de l'automobile a permis de rompre le lien entre le domicile et les activités de la population que ce soit le travail ou le loisir.

La mobilité évolue par les changements de comportement de la population. J.-M. Guidez, du Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Certu), observe, pour la première fois depuis 1975, une baisse de l'utilisation de l'automobile sur la base des enquêtes ménages déplacements réalisées en 2006 sur les agglomérations de Lille et Lyon [Guidez et al., 2007].

V. Kaufmann s'intéresse particulièrement à la mobilité en environnement citadin. Il complète la réflexion pour la notion de «*motilité*» qui permet d'évaluer le potentiel des individus à être mobile. «*La motilité peut être définie comme la manière dont un individu ou un groupe fait sien le champ du possible en matière de mobilité et en fait usage. On peut décomposer la motilité en facteurs relatifs aux accessibilités (les conditions auxquelles il est possible d'utiliser l'offre au sens large), aux compétences (que nécessite l'usage de cette offre) et à l'appropriation (l'évaluation des possibilités). Ces trois dimensions font système, elles se co-produisent et ne peuvent être abordées séparément.*» [Bassant et al., 2001].

L. Fouillé étudie également les mutations de la mobilité en automobile essentiellement urbaine [Fouillé, 2011]. Il met en avant que le lien de l'utilisateur à l'automobile dépend essentiellement de la situation de son habitat et de l'agencement de son quartier. Selon lui, même si les politiques urbaines n'évoluent pas aussi vite que les mutations de la mobilité de usagers («*le comportement humain est une matière plus plastique et réactive aux changements que ne le sont ses constructions*»), le comportement de l'individu évolue, inévitablement, vers un attachement moins fort à son propre véhicule automobile.

Ainsi l'idée selon laquelle la mobilité ne requiert pas la propriété du véhicule

tend à se répandre de plus en plus. La mutualisation des biens se développe à grande échelle et de manière très rapide. Comme le commente J. Attali (L'Express 8 juin 2015), la multiplication de l'utilisation, par une collectivité, d'un bien ou d'un service est un phénomène de société de plus en plus répandu.

On peut appliquer ce phénomène à l'automobile. En effet, on assiste actuellement à un déclin de l'acquisition d'un titre de propriété pour une voiture personnelle. D'après M. Flonneau ([Flonneau, 2004] et [Flonneau and Guigueno, 2009]), alors que l'automobile était auparavant «*en majesté*», elle se trouve être «*évitée*». Ce sujet est de plus en plus traité par des journaux tous publics. Ceci est révélateur d'un fait social avéré. L'article publié par Alternatives Economiques intitulé «*Automobile : la fin du rêve*» [Chevallier, 2009] en est un exemple. Dans cet article, M. Chevallier cite Rémy Pothet : «*Les ventes de véhicules neufs stagnent autour de deux millions depuis quinze ans, alors même que le nombre de ménages a fortement augmenté*». L'acheteur de voitures neuves prend lui-même un coup de vieux, en France comme en Allemagne. L'automobile recule dans les préoccupations des générations plus jeunes, comme chez les jeunes japonais [Chevallier, 2009]. La charge affective que l'on attribue à la possession d'un véhicule a nettement diminué depuis la fin du XX^{eme} siècle. Ces évolutions ouvrent la porte à de nouvelles offres de mobilité.

Des sociétés de service répondant aux attentes, aux besoins de mobilité des personnes tendent à se développer [OPECST, 2012]. Il s'agit de services de location de courte ou très courte durée mis en œuvre par les sociétés de location automobile. Elles gèrent des flottes de véhicules en libre-service et en usage partagé. Elles proposent des offres multimodales en partenariat avec les opérateurs de transports collectifs, etc. [Monnet, 2013] L'utilisation des taxis pourrait évoluer par le développement de taxis collectifs et de taxis à la volée [OPECST, 2012]. G. Amar [Amar, 2010] associe la mobilité au concept de création de relations fécondes («*reliance*»). Pour lui, la mobilité des individus passe par les relations qu'ils tissent les uns avec les autres. Ce phénomène est révélé de manière très probante par le développement du service BlaBlaCar. Le succès de ce service, prouve par lui-même que les utilisateurs ne cherchent plus à acquérir un véhicule, mais plutôt à utiliser un moyen de déplacement.

Par ailleurs, l'enquête ENTD de 2008 révèle qu'entre 1994 et 2008 les personnes sont plus mobiles localement, en semaine, mais moins à longue distance [CGDD, 2010]. Ce constat permet d'envisager que le besoin de voiture personnelle pour effectuer de grandes distances serait de moins en moins grand. C'est-à-dire que les véhicules destinés à réaliser de longues distances seraient alors davantage gérés par des gestionnaires de flottes de véhicules.

1.1.3 Le rôle des comportements individuels dans le développement des nouvelles technologies de la mobilité

J.E. Stiglitz dans «*Le triomphe de la cupidité*» montre les limites du néolibéralisme [Stiglitz, 2010]. Il exprime le fait que la population tend à porter des idéaux plus nobles que l'enrichissement et met en lumière de profonds changements des aspirations des individus. Pour lui, ce sont les hommes eux-mêmes qui apportent la morale dans

les systèmes comme dans l'exemple du développement du courant «*alter-mondialisme*». Le terme «*éco-responsable*» fait partie, à présent du langage courant. On peut donc considérer que cette responsabilisation de la population est une des tendances de ces dernières années.

Par ailleurs, d'après B. Lassudrie-Duchêne [Lassudrie-Duchêne, 1971], les consommateurs cherchent à se distinguer les uns des autres. L'acquisition de nouvelles technologies peut permettre de répondre à un besoin de renouvellement de la curiosité et peut combler un appétit de nouveauté dont ils ont le goût.

Ainsi le développement des nouvelles technologies vers les solutions de véhicules propres tels que les véhicules à SPAC serait favorisé par cet appétit des consommateurs à la condition que ce véhicule soit utilisé de manière éco-responsable. En effet, d'une part l'automobile participe à la construction des identités individuelles et collectives [Sheller, 2004]. D'autre part, l'intégration des SPAC dans les véhicules propose au consommateur une technologie innovante lui permettant de se distinguer singulièrement, tout en répondant à des aspirations de niveaux supérieurs rejoignant des préoccupations de développement durable. D'une façon plus générale, une littérature abondante questionnant l'acceptabilité de l'électro-mobilité s'est développée ces dernières années [van Bree, 2010].

On constate par ailleurs, une relance parallèle de la recherche et du développement des projets de véhicules à SPAC. Le rapport de l'OPECST [OPECST, 2012] montre clairement que l'engouement pour les véhicules propres fait nettement resurgir l'intérêt du développement de la technologie des PAC intégrée aux véhicules. Par ailleurs, [Belot and Picard, 2014] ont observé en France une relance depuis le début du *XXI^{ème}* siècle de l'activité autour des véhicules à SPAC.

Ainsi, l'évolution du comportement des individus présente des prédispositions à l'émergence, voire à l'acceptation, de nouvelles solutions de mobilité. Il reste, cependant, crucial d'analyser la manière dont ces évolutions de comportements sont orientées par le développement d'une nouvelle technologie, qui est concrétisé par les acteurs publics et privés.

1.1.4 Diffusion de ces comportements favorisés par le développement d'une nouvelle technologie

Dans le domaine de l'automobilité, V. Kaufmann et J-M. Guidez ont comparé le comportement des usagers dans plusieurs villes de France et de Suisse. Ils ont constaté que l'usage de l'automobile est nettement influencé par le nombre de places de stationnement et l'organisation des offres de transport. Ceci tend à prouver que les habitudes des utilisateurs vis-à-vis de l'usage de leur véhicule évolue en fonction des infrastructures et des politiques urbaines [Kaufman and Guidez, 1998].

Pour autant, selon M. Sheller [Sheller, 2004] la demande d'un moyen de locomotion confortable, agréable et séduisant tel que le proposent les automobiles, reste majeure pour une grande partie de la population. Et les défis proposés par les nouvelles technologies ne peuvent ignorer ces attraits.

L'étude des transitions pour un développement des technologies de niche fait l'ob-

jet de nombreuses recherches. Parmi les diverses orientations, on peut citer la stratégie d'organisation des niches (Strategic niche management : SNM), ou encore les outils d'organisation de la transition (transition management : TM). Elle varie suivant le domaine technologique. Certains auteurs mettent en avant des méthodes dans le cas de technologies totalement divergentes. C'est le cas de S. Shiba [Shiba and Walden, 2006] qui propose un procédé de management par la rupture (en anglais «*Breakthrough management*») pour réussir une transition de déploiement d'une nouvelle activité, tout en s'affranchissant des verrous psychologiques, organisationnels et techniques.

En particulier dans le domaine des véhicules à SPAC, l'embarquement d'hydrogène nécessite la répartition sur un territoire de stations de ravitaillement. La mise en place de telles infrastructures implique un lourd investissement financier. B. Budde [Budde et al., 2012] étudie l'organisation des acteurs de la technologie des véhicules à SPAC en Allemagne. Z. Lin et al. [Lin et al., 2013] analysent les impacts des mesures d'encouragement prises par le ministère américain de l'énergie sur l'acceptation sociétale des véhicules à SPAC.

En France, l'Etat est un acteur majeur du développement des véhicules à SPAC. Il sélectionne et subventionne les projets de recherche et de transfert de technologie qui correspondent aux orientations qu'il souhaite prendre. M. Callon [Callon, 1979], décrit historiquement le rôle que l'Etat a joué dans le développement des véhicules à SPAC et des véhicules électriques sur batteries seules en détaillant de manière claire trois périodes entre 1960 et 1977. Il met en avant la place qu'a joué EDF (Electricité De France) dans ces orientations.

Ces dernières années, les acteurs industriels et territoriaux se sont retrouvés dans le projet européen Hydrogen Infrastructure for Transport (HIT) dont le but est la stimulation du déploiement des stations de ravitaillement en hydrogène. Ce projet regroupe principalement des acteurs allemands, néerlandais, danois et suédois. Il s'inscrit dans le programme européen Trans-European Transport Network (TEN-T) sur l'inter-connexion des transports européens. Les acteurs français ont proposé en 2014 une stratégie de déploiement de la mobilité hydrogène pour les années à venir. Cette stratégie s'intègre dans un maillage européen d'installation de stations de ravitaillement en hydrogène [H2MobilitéFrance, 2015].

Ainsi, l'utilisation d'un véhicule équipé d'un SPAC peut être étudiée comme étant une nouvelle technologie nécessitant par ailleurs le déploiement d'infrastructures sur le territoire. Dans ce cas, les utilisations de ces véhicules seraient davantage déterminées par la constitution d'un fait social créé par les acteurs stratégiques de son développement et de son déploiement.

Cependant, les analyses abordées sous cet angle doivent veiller à ne pas provoquer un déséquilibre entre l'offre et la demande, en offrant plus de véhicules à SPAC que les utilisateurs n'en demanderaient.

Ces évolutions trouvent des répercussions jusque dans les processus même de conception de l'offre de mobilité. Les nombreux travaux sur les transitions pour le développement des nouvelles technologies, se basent très clairement sur des processus de développement co-construits avec les utilisateurs. Depuis plusieurs années les constructeurs automobiles étudient l'évolution des comportements de mobilité et des pratiques de

déplacement [Monnet, 2013].

Dans cette dynamique, un grand nombre d'outils sont utilisés dès la conception des systèmes. Une partie d'entre eux sont regroupés dans le domaine de la conception à l'écoute du marché (CEM [Shiba et al., 1995]). Ils permettent de mettre en évidence les liens entre les attentes de la société et la conception de produit ou de service. Parmi ces outils, N. Kano [Kano et al., 1984] propose, dès 1984, une méthodologie d'analyse originale qui n'oppose pas la satisfaction à l'insatisfaction. Le diagramme portant son nom est souvent utilisé en conception de technologies innovantes.

En conclusion de ces trois sections, même si chacun des points abordés mérite un approfondissement par des recherches spécifiques, plusieurs pistes de réflexion peuvent être tirées de la présentation de ce panorama. Ces réflexions se retrouvent autour de l'hypothèse selon laquelle les choix individuels de mobilité sont aléatoires au sein d'un cadre socialement déterminé, marqué par la tendance à la mutualisation de l'usage des biens et services (pour diverses raisons) et par l'offre de nouvelles solutions technologiques.

La responsabilisation des individus peut avoir pour conséquence le fait social que l'acquisition personnelle d'un véhicule n'est plus un besoin demandé par l'utilisateur. L'utilisation d'un véhicule géré en flottes tendrait donc à se développer. Dans ce cas, on peut supposer que le nombre de kilomètres parcourus dans la journée pour un même véhicule augmenterait considérablement. Il semblerait également que les jeunes générations soient plus attirées par ce type d'utilisation. Les acteurs stratégiques jouent un rôle indéniable sur l'accompagnement des mutations des comportements ; comme le conclut également L. Fouillé [Fouillé, 2011] : «*Les autorités organisatrices des transports deviennent de véritables animateurs de la mobilité et supervisent de plus en plus souvent des plateformes de covoiturage ou des plans de déplacements, elles gèrent des systèmes de vélo en libre service et parfois même d'autopartage*».

Par ailleurs, la tendance de la société à utiliser de manière collective un bien ou un service permet de proposer à l'utilisateur un large choix de véhicules. Ce qui encouragerait l'utilisateur à choisir son véhicule en fonction du parcours qu'il projette d'effectuer, dans la mesure où il recherche l'amélioration de sa qualité de vie et de celle de son entourage.

Cette hypothèse ouvre deux questions de recherche dont les réponses pourraient avoir des conséquences sur les choix de conception des véhicules :

- L'utilisateur recherche-t-il à être propriétaire de son véhicule ?
- L'utilisateur choisi-t-il son véhicule en fonction du type de parcours qu'il envisage d'effectuer ?

C'est deux pistes sont approfondies par l'analyse des données de la mise en libre-service proposée par le service OPTYMO dans Belfort et son agglomération depuis décembre 2013.

1.1.5 Etude de cas : la flotte de véhicules libre-service OPTYMO dans le Territoire de Belfort

Au cours de l'année 2014, le Syndicat Mixte des Transports en Commun du Territoire de Belfort (SMTC90) a mis en service un parc de véhicules en libre-service, dans le cadre d'une politique renouvelée de la mobilité. Il gère, à présent, l'exploitation et la gestion d'une flotte de 82 véhicules. Sur la base de cette expérience, un premier bilan peut être réalisé. L'objectif est de confronter les réflexions présentées précédemment à un cas concret et récent.

1.1.5.1 Les données et les outils utilisés

La population étudiée ici est l'ensemble des habitants de Belfort et de son agglomération ayant un permis de conduire. Au sein de cette population nous étudions un sous-ensemble constitué l'échantillon observé est constitué des 655 personnes qui ont utilisé les véhicules en auto-partage OPTYMO entre décembre 2013 et septembre 2014. Chaque utilisateur est caractérisé par un identifiant, son âge, son sexe ainsi que son type d'abonnement.

L'enquête réalisée ici consiste à observer les utilisateurs de ces véhicules en exploitant les données des missions réalisées sur la période observée. Ainsi l'analyse se veut essentiellement quantitative et basée sur l'analyse statistique des données recueillies. Il serait d'ailleurs intéressant de la compléter par une analyse qualitative basée sur des entretiens auprès des usagers.

Nombre	Type des véhicules	Catégorie
30	Peugeot 207	Citadines
33	Renault Megane	Compactes
19	Peugeot Bipper	Utilitaires

TABLE 1.1 – Répartition de la flotte de véhicules OPTYMO par type et catégorie

Chacun des 82 véhicules est caractérisé par : un identifiant, un nom, ainsi qu'un type. Trois types de véhicule sont déployés correspondant à quatre catégories présentés dans la table 1.1. La mise à disposition des véhicules a été réalisée progressivement entre décembre 2013 et septembre 2014. Les places réservées à cette flotte de véhicules sont principalement implantées sur les communes de Belfort et de Cravanche.

Un total de 8550 missions a été réalisé. Une mission débute à la prise d'un véhicule identifié, par un utilisateur identifié, et jusqu'à son retour. Chaque mission est caractérisée par :

- un identifiant
- un utilisateur
- un véhicule
- la date et l'horaire de la prise
- la date et l'horaire de retour

- la durée d'utilisation
- le nombre de kilomètres parcourus

1.1.5.2 L'évolution des comportements vis-à-vis de l'utilisation d'un véhicule automobile propriétaire

Le but est d'analyser le comportement de la population du Territoire Belfort vis-à-vis du recours à des véhicules, dont ils ne sont pas propriétaires, mais qui sont pris en charge par une gestion de flotte. Il s'agit de comprendre, en mobilisant une analyse statistique descriptive, le comportement de l'individu, et de pouvoir identifier les opportunités et les verrous potentiels relatifs à ce type d'utilisation.

1) Analyse générale et globale :

L'analyse générale et globale des données enregistrées depuis la mise en service des véhicules OPTYMO en libre-service a pour objectif d'identifier les profils d'utilisateurs et leur mobilité ainsi que les types de parcours réalisés.

Afin d'analyser les comportements quotidiens des utilisateurs, seules les missions réalisées sur une même journée ont été prises en compte. Les missions dont la date de prise et la date de retour diffèrent sont exclues de cette analyse ; elles représentent 9,5 % du nombre total des 8550 missions. De même, les missions dont le nombre de kilomètres parcourus est égal à 0 ont été également retirées ; elles représentent 4,5 % du nombre total de missions. Elles correspondent à des phases de tests lors de la mise en place des véhicules.

Les résultats de l'analyse globale sont mis en regard des habitudes de la mobilité des usagers dans les communes de Belfort et de Cravanche. Les données présentées dans la partie droite de la table 1.2 sont issues des cahiers de la mobilité édités par le Syndicat Mixte de l'Aire Urbaine (SMAU). Ils présentent des analyses issues de l'enquête ménages déplacements de l'Aire urbaine réalisée entre 2004 et 2005. Cette enquête respecte la méthodologie nationale du Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU). Cinq cahiers sont actuellement édités. Le nombre moyen d'utilisateurs d'un même véhicule par jour se base sur le nombre moyen de 1,4 véhicule motorisé par ménage sur la France métropolitaine. Ce résultat est présenté par le Commissariat Général au Développement Durable [CGDD, 2010] après l'exploitation des données issues de l'enquête nationale transports et déplacement réalisée en 2008 par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (Insee).

Le nombre moyen d'utilisateurs d'un même véhicule par jour fournit une indication de la « mutualisation » du véhicule. Alors qu'au sein d'un ménage, le véhicule appartenant au ménage, est mutualisé entre les différents membres du ménage ; dans le cas d'un véhicule mis en libre service, un même véhicule est utilisé par différents utilisateurs. En comparant ces deux cas, force est de constater que cet indice de « mutualisation » des véhicules est le même. Ainsi les véhicules du service OPTYMO ne sont pas « sous-utilisés » au regard des véhicules qui appartiennent aux ménages.

Par ailleurs la distance parcourue quotidiennement par un véhicule de la flotte

Analyse effectuée	Résultats issus des données d'utilisation de la flotte de véhicules OPTYMO déc.2013 - sept.2014	Résultats issus des analyses de l'enquête ménages déplacements de l'air urbaine Belfort-Montbéliard [SMAU, 2005]
Nombre moyen d'utilisateur d'un même véhicule /jour	1,36	1,36
Distance moyenne parcourue par un véhicule /jour	60,33 km	12,18 km [CGDD, 2010]
Durée moyenne d'utilisation d'un véhicule /jour	5 h 05 min 49 s <i>Durée d'emprunt</i>	28 min 69 s <i>Le véhicule se déplace</i>
Moyenne de l'âge des utilisateurs	35 ans	45 ans

TABLE 1.2 – Comparaison entre l'analyse globale des missions des véhicules automobiles OPTYMO et les habitudes de mobilité des usagers

mise à disposition par la SMTC90 est 5 fois plus élevée que la moyenne nationale des véhicules. Ainsi les véhicules mis en libre service par la SMTC90 sont sollicités beaucoup plus longtemps. Un nombre d'heures de fonctionnement est atteint dans une période très courte pour rapport à un véhicule appartenant à son utilisateur.

Les durées moyennes d'utilisation des véhicules ne sont malheureusement pas comparables car le résultat, issu des données OPTYMO, inclut le temps d'immobilisation du véhicule à l'intérieur de la mission (entre un aller et un retour d'une destination par exemple), alors que les analyses des enquêtes comptabilisent uniquement la durée pendant laquelle le véhicule est en circulation.

Enfin, l'âge moyen des utilisateurs de service est bien inférieur à l'âge moyen des personnes se déplaçant en automobile sur l'Aire Urbaine (selon l'enquête éditée par le SMAU).

Ainsi, cette première analyse des données, soutient les tendances présentes dans la littérature. L'exemple de la mise à disposition de la flotte de véhicules sur Belfort et son agglomération, confirme que le nombre de kilomètres parcourus quotidiennement par un véhicule géré en flotte est bien supérieur à l'utilisation qui est faite d'un véhicule dont les utilisateurs en sont propriétaires. Quant à l'âge des utilisateurs, cette analyse montre que la jeune génération est bien plus encline à ce type d'utilisation des véhicules automobiles.

Cette analyse globale peut être complétée par l'évolution temporelle des indicateurs présentés sur la période d'observation.

2) Analyse de l'évolution temporelle :

L'analyse de l'évolution temporelle permet de déterminer des tendances d'évolutions de comportements vis-à-vis de l'utilisation des véhicules automobiles en libre-service. La figure 1.1 montre une augmentation constante du nombre de missions effectuées pendant les premiers mois. Ceci révèle la période de mise à disposition progressive de la

flotte des véhicules. On peut observer ensuite l'arrêt de cette augmentation pendant les mois qui correspondent à la période des vacances estivales.

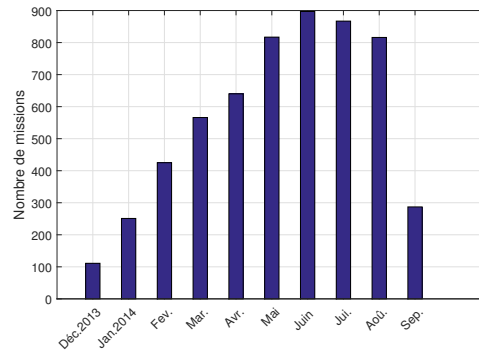


FIGURE 1.1 – Evolution du nombre de missions effectuées par mois par la flotte des véhicules OPTYMO

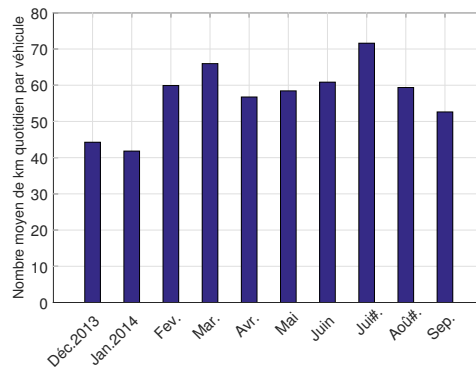


FIGURE 1.2 – Evolution du nombre de kilomètres parcourus en une journée par un véhicule

La figure 1.2 montre que, hormis les mois de décembre 2013 et janvier 2014 qui correspondent aux mois de démarrage de la mise à disposition de ces véhicules en libre service, la moyenne mensuelle du nombre de kilomètres parcourus quotidiennement par véhicule ne présente pas d'évolution notable.

Il en est de même pour l'évolution de l'âge moyen des utilisateurs (figure 1.3). Le début de l'observation correspondant à la mise en service des véhicules, les utilisateurs du mois de décembre sont principalement des personnes choisies par le gestionnaire de flotte pour réaliser les premiers kilomètres. Dans les mois qui suivent, les véhicules sont utilisés en libre accès. Alors, qu'on aurait pu s'attendre à ce que les plus jeunes utilisateurs soient davantage attirés par la nouveauté d'un service, on peut constater que ce n'est pas le cas car la moyenne d'âge est constante sur toute la durée de l'observation.

La période d'observation étudiée n'est cependant pas suffisante pour pouvoir tirer des conclusions plus approfondies sur une évolution temporelle des pratiques. Elle devrait être de plusieurs années.

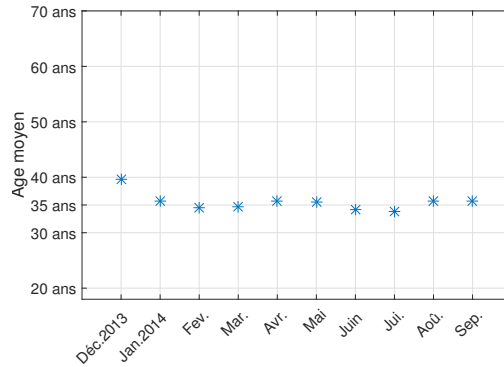


FIGURE 1.3 – Evolution de la moyenne d’âge des utilisateurs de la flotte de véhicules OPTYMO

Ces analyses ont confirmé le besoin et la disposition de la population à l’utilisation de véhicules dont ils ne sont pas propriétaires mais qui sont gérés en flotte.

1.1.5.3 Le choix du type de véhicule basé sur le parcours envisagé

La nature des parcours effectués nous intéressent également afin d’analyser s’il se dessine un ou des types de parcours réalisés généralement par tel ou tel type de véhicule. L’analyse des données du service OPTYMO permet également d’observer le choix des utilisateurs face à une offre de plusieurs types de véhicule. Pour cela les missions des véhicules OPTYMO sur la période observée doivent être classées dans différents profils.

Définitions des profils de mission :

Un « tronçon » est défini comme étant un type de route parcourue sur une distance définie et pendant un temps défini, (exemple : un tronçon de 2 km de pavés belges parcourus en 3 minutes). Une association de tronçons constitue un « profil de mission ». Un profil de mission peut s’exprimer en pourcentage de différents tronçons. Par exemple, un profil de mission peut être caractérisé par 20% de pavés belges, 40% de route standard, 30% de bosses béton et 10% de route standard. Enfin une « ligne de vie » est constituée d’un enchaînement de profils de mission et d’usage à l’arrêt. Une étape d’« usage à l’arrêt » est par exemple une étape de chargement d’un camion ou encore une étape d’arrêt dans un parking.

Cette analyse des données des missions effectuées sur les véhicules OPTYMO ne permet pas d’identifier des lignes de vie préférentielles issues de l’usage des véhicules. Des profils de mission peuvent toutefois être définis selon le critère de la distance parcourue. La répartition des missions est faite selon les critères présentés dans la table 1.3.

La moyenne de vitesse instantanée sur chacune des missions serait également un critère déterminant des différents profils de mission. Cependant cette variable n’est pas calculable par l’exploitation des données disponibles.

La catégorie des véhicules utilitaires ne répond pas à un besoin correspondant à un parcours mais plutôt à une capacité de transport de marchandises. Les missions de ces

Variable	Niveau	Profil de mission supposé
Distance parcourue	<10 km	Citadin
Distance parcourue	de 10 à 100 km	Réseau secondaire
Distance parcourue	>100 km	Autoroutier

TABLE 1.3 – Critères de classification des profils de mission

véhicules ne sont donc pas prises en compte dans l’analyse de la correspondance du choix du véhicule en fonction du parcours envisagé. Elles correspondent à 4,5 % des missions qui sont donc écartées pour cette analyse.

La répartition des missions suivant ces critères est présentée dans la table 1.4.

Profil de mission supposé	Répartition sur l’ensemble des missions
Citadin	21,5 %
Réseau secondaire	65,5 %
Autoroutier	13 %

TABLE 1.4 – Répartition des missions selon les profils de mission

D’après ce choix de niveau du critère du nombre de kilomètres effectués, la répartition des missions laisse une proportion très majoritaire aux parcours sur réseau secondaire. Elle est cohérente avec la taille moyenne de la ville de Belfort. La proportion des missions sur autoroute est relativement élevée. Ce qui s’explique par la proximité de l’autoroute A36 qui permet de relier les différentes agglomérations (Mulhouse, Belfort, Mulhouse, Sochaux-Montbéliard et Besançon).

La répartition des missions suivant la catégorie du véhicule est présentée dans la table 1.5.

Catégorie de véhicule utilisé	Répartition sur l’ensemble des missions
Citadines	55,3 %
Compactes	44,7 %

TABLE 1.5 – Répartition des missions selon les profils de mission

La flotte des véhicules comporte également 20 Peugeot 508 qui peuvent être classées en catégorie routière. Malheureusement, elles n’ont pas été mises en service sur la période étudiée. L’utilisateur n’a donc pas pu choisir ce type de véhicule pour effectuer les parcours de longue distance.

Une fois les missions classées en différents types de parcours, sachant que pour chacune d’elles, le véhicule choisi est connu (1.5), la correspondance peut être établie. Il est considéré dans cette étude que le choix du véhicule est « responsable » si pour une mission de profil citadin, un véhicule de catégorie citadine a été choisi ou si pour une mission de profil réseau secondaire ou autoroutier, un véhicule de catégorie compacte a

été choisi. La table 1.6 présente l'analyse de la correspondance entre le véhicule utilisé et le profil de parcours envisagé. Le pourcentage de mission pour lesquelles ce choix est « responsable » est de 46 %.

Catégorie du véhicule utilisé	Profil de mission supposé	Validité du choix	Résultat
Citadines	Citadin	responsable	
Compactes	Réseau secondaire ou Autoroutier	responsable	
Compactes	Citadin	non-responsable	
Citadines	Réseau secondaire ou Autoroutier	non-responsable	
Pourcentage de choix responsables			46 %

TABLE 1.6 – Choix du véhicule correspondant au parcours envisagé

Ce résultat est faible. Il ne permet donc pas de conclure que l'utilisateur choisit de manière libre le véhicule correspondant au type de parcours qu'il envisage d'effectuer. En effet, soit l'utilisateur n'a pas le libre choix du véhicule (non-choix). C'est-à-dire que ce choix est orienté, en premier lieu, par la situation géographique du véhicule stationné le plus proche de son lieu de départ. Ou bien l'utilisateur n'adopte pas une attitude responsable, c'est-à-dire que son choix se porte d'avantage sur l'aisance et le confort que sur un véhicule adapté à son parcours envisagé. Parmi les 54% autres choix, il est également impossible de conclure sur la part des non choix du véhicule à disposition.

Détermination de la vitesse moyenne sur les parcours :

Les données présentées ci-dessus ne permettent pas de calculer la vitesse moyenne instantanée lors des missions effectuées. L'analyse se base donc uniquement sur les rapports d'enquêtes nationales.

D'après l'enquête nationale Transport et déplacement (ENTD) de 2008, analysée par la Revue du Commissariat Général au Développement Durable [CGDD, 2010], la vitesse moyenne des déplacements en voiture est de 31 km/h. Il s'agit d'une moyenne sur les déplacements citadins et ruraux sans distinction. C. Gallez et al [Gallez et al., 1997] ont évalué la vitesse en milieu rural profond sur la base de l'enquête transport INSEE-INRETS de 1993-1994, à 38,5 km/h (pour 91% de ces déplacements effectués en voiture). I. Cabanne [Cabanne, 2005] a évalué, dans sa thèse, que la distribution des véhicules, par kilomètre parcourus, est exactement égale entre les autoroutes et les « autres routes » pour les trajets de distances supérieures à 200 km. De façon parallèle à ces analyses, l'observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière a estimé sur 2014 [ONISR, 2013] que la vitesse instantanée moyenne des véhicules automobiles est de 47 km/h en ville, 82 km/h sur réseau secondaire, 101 km/h sur deux fois deux voies et 118 km/h sur autoroute. La différence sur ces deux types d'analyses étant grande, elle ne permet pas caractériser de façon précise la vitesse instantanée moyenne sur chacun des parcours types étudiés.

1.1.6 La société vis-à-vis de la sécurité

L'acceptation par la société d'une technologie nouvelle passe par la confiance de l'utilisateur vis-à-vis de la sécurité du système. Cette confiance accordée est étroitement liée aux risques que l'utilisateur accepte de prendre lorsque qu'il utilise le système. Face à ce soucis des utilisateurs, la cindynique, définie comme étant la « science des dangers » [Kervern, 1995], regroupe un ensemble de recherches pluri-disciplinaires. Ainsi il convient de définir le risque acceptable. Celui-ci fixe un « seuil acceptable » qui caractérise l'objectif de sécurité que doit atteindre le système.

En effet le lien entre la sécurité et le risque, d'après J. LaChance [LaChance et al., 2009] peut être défini par trois paradigmes :

- Le premier considère que la sécurité consiste en une absence de risque inacceptable. Par cette considération, la société accepte qu'il ne puisse exister de sécurité absolue, autrement dit, que le risque zéro n'existe pas. Le risque devient ainsi un indicateur mesurable de sécurité. Ainsi la société établit des niveaux de risque acceptables.

En France le Comité de la Prévention et de la Précaution examine la notion de «*risque acceptable*» en 2011 [CPP, 2011]. Il préconise de définir un «*seuil intolérable*», ou «*inacceptable*». L'utilisation d'outils de gestion et d'évaluation des risques est, quant à elle, nécessaire à la mesure de l'atteinte du seuil défini.

- Le second paradigme précise que les critères de risques correspondent à des termes qui évaluent l'importance du risque. C'est-à-dire que des termes de référence sont établis par la société pour désigner les niveaux de risques acceptables.

- Enfin le troisième paradigme ajoute que les nouvelles technologies doivent satisfaire les mêmes niveaux de risques acceptables. Elles ne doivent pas être moins sécurisées que les technologies déjà existantes.

Comme le précise le CPP, l'évaluation du risque acceptable est adapté au domaine d'application. Concernant le domaine de l'hydrogène, les analyses de l'European Industrial Gas Association (EIGA) [EIGA, 2007], et de l'European Integrated Hydrogen Project (EIHP2) [EIHP2, 2003] proposent les seuils de risques acceptables pour les différentes applications.

L'ADEME a publié en 2015 un document visant à informer la population sur les notions de la sécurité dans le domaine de l'hydrogène utilisé dans le transport [ADEME, 2015].

1.1.7 Principaux enseignements tirés de l'analyse sociétale

Bien que chacun des points abordés mérite un approfondissement par des recherches spécifiques, plusieurs pistes de réflexion peuvent être tirées de la présentation de ce panorama ainsi que de cette étude de cas. Les comportements des usagers vis-à-vis de la mobilité ne sont ni totalement aléatoires, ni totalement déterministes. En effet, le choix des individus reste aléatoire à l'intérieur d'un cadre déterminé par les tendances portées par la mutualisation des biens et des services. La responsabilisation de chacun des individus peut avoir pour conséquence le fait social que l'acquisition personnelle d'un véhicule

n'est plus un besoin demandé par l'utilisateur. L'utilisation d'un véhicule géré en flottes tendrait donc à se développer. Dans ce cas, le nombre de kilomètres parcourus dans la journée pour un même véhicule augmenterait considérablement. Il semblerait également que les jeunes générations soient plus attirées par ce type d'utilisation du véhicule. Les acteurs stratégiques jouent un rôle indéniable dans l'accompagnement des mutations des comportements ; comme le conclut également L. Fouillé [Fouillé, 2011] : «*Les autorités organisatrices des transports deviennent de véritables animateurs de la mobilité et supervisent de plus en plus souvent des plateformes de covoiturage ou des plans de déplacements, elles gèrent des systèmes de vélo en libre service et parfois même d'autopartage*». L'analyse des missions réalisées par les véhicules mis en libre-service par le Syndicat Mixte des Transports en Commun du Territoire de Belfort, montre que la fréquence d'utilisation des véhicules en termes de nombres de kilomètres par jours est cinq fois supérieure pour ce type de gestion. Par ailleurs, cette expérience confirme que les plus jeunes conducteurs sont plus attirés par ce type d'organisation. Enfin, l'utilisation des véhicules est conditionnée par la proximité de leur mise à disposition.

1.2 Le véhicule électrique à hydrogène : une solution technologique

Face aux mutations opérées par la société vis-à-vis de la mobilité, les véhicules à SPAC se présentent comme une solution technologique porteuse. L'objectif de cette présentation est de mettre en évidence l'offre de mobilité permise par la technologie des piles à combustible sous hydrogène. Afin d'analyser l'adéquation de cette solution technologique aux évolutions du comportement des usagers détaillés précédemment, il y est nécessaire de décrire le véhicule à SPAC.

1.2.1 La Pile à Combustible

La technologie PEMFC (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons) est celle utilisée généralement dans les applications de mobilité du fait de sa robustesse liée à l'emploi d'une électrolyte solide, et de son fonctionnement à température modérée (60 à 110 °C). Son principe de fonctionnement est détaillé par J. Larminie [Larminie and Dicks, 2003].

1.2.2 Le système à pile à combustible

Le SPAC est constitué de la PAC et de ses auxiliaires : une alimentation en hydrogène, une alimentation en air couplée à d'éventuels circuits d'humidification, un circuit de refroidissement, un ou des convertisseurs électriques, le tout géré par un système de contrôle électronique et logiciel. Un ou des réservoirs de stockage d'hydrogène permettent d'embarquer la quantité d'hydrogène nécessaire à l'autonomie recherchée. La norme EN 62282 :2-2004 présente les différents organes d'un SPAC.

1.2.3 L'intégration d'un système à pile à combustible dans un véhicule électrique

Le véhicule à SPAC est un véhicule électrique, qui fabrique son électricité à bord grâce à une PAC comme l'illustre la figure 1.4.

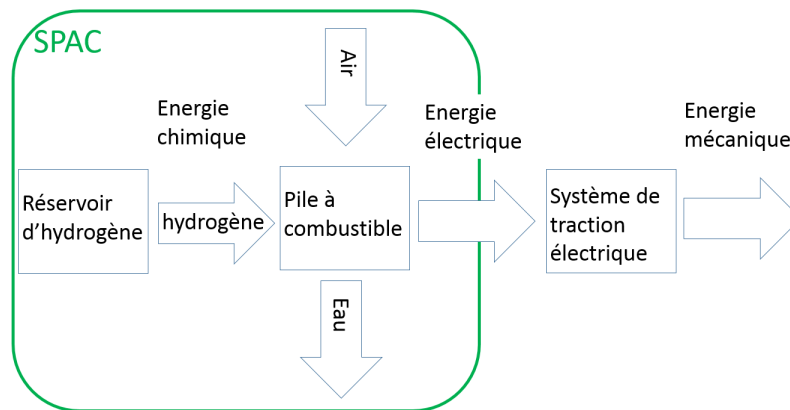


FIGURE 1.4 – Schématisation d'un SPAC utilisé dans un véhicule

Les SPAC implantés dans les véhicules automobiles sont généralement couplés à une batterie pour fournir à la chaîne de traction électrique, la puissance souhaitée par le conducteur.

Deux configurations distinctes sont les plus répandues. La configuration est dite « prolongateur d'autonomie » (en anglais « *Range Extender* ») ou « hybride PAC-batterie ». Dans ce cas, la puissance maximale délivrée par la PAC, pour un véhicule automobile peut varier, selon la catégorie, de 5kW à 20kW. Le SPAC étudié dans ce document est ainsi utilisé. Les tensions générées par la pile à combustible sont plus faibles que dans la deuxième configuration. En effet un système à pile à combustible de puissance plus élevée, peut également être utilisé dans une autre configuration nécessitant une batterie tampon de capacité bien moindre. A chaque instant, la pile à combustible fournit la puissance nécessaire à la chaîne de traction électrique. Cette configuration est nommée « pleine puissance » (en anglais « *Full Power* »). Cette application nécessite que la puissance maximale délivrée par la PAC soit adaptée à la puissance maximale de la chaîne de traction. (Par exemples : 80kW pour un véhicule de type berline, ou encore de l'ordre de 300 kW pour des véhicules de chantiers).

Afin de pouvoir circuler sur la voie publique en Europe, les véhicules à SPAC sont soumis à la réglementation européenne. En plus des règles d'homologation classiques pour les véhicules thermiques, et des règles liées à l'électrification du système de propulsion (Le principal règlement applicable de manière spécifique aux véhicules électriques est le R100), les véhicules à PAC sont soumis à des règlements supplémentaires que sont le règlement EC 79 2009 et sa directive d'application 406 2010. Ces deux règlements spécifiques à l'homologation des véhicules à PAC imposent notamment d'apporter la preuve de la sûreté de fonctionnement du système. Ils imposent également une réception par type des composants les plus sensibles, garantissant leur sécurité par des cycles de

tests. Les composants concernés sont ceux conçus pour l'utilisation d'hydrogène (gazeux) comprimé à une pression de service nominale supérieure à 3,0 MPa. Ces composants sont généralement le réservoir d'hydrogène, et les systèmes d'ouverture et de détente associés, les lignes de remplissage. Les capteurs de présence d'hydrogène sont également soumis à cette réglementation.

Dans le cas d'un véhicule équipé d'un prolongateur d'autonomie, c'est-à-dire monté en parallèle du système batterie existant, une défaillance sur le système PAC ne perturbe pas le fonctionnement normal du véhicule, il continue alors à fonctionner simplement grâce à l'énergie restante de sa batterie électrique déterminant l'autonomie résiduelle du véhicule.

1.3 Déploiement de la Fonction Qualité comme liant entre l'étude sociologique et la solution technique

Les langages du client sont différents de celui du concepteur de systèmes à pile à combustible. La politique de Déploiement de la Fonction Qualité (en anglais : Quality Function Deployment (QDF)), grâce à l'outil de « maison de la qualité » (nommé ainsi par la forme du tableau qui en découle), permet de baser la fabrication du produit sur les caractéristiques des utilisateurs. J.R. Hauser et D. Clausing [Hauser and Clausing, 1988] décrivent de manière précise l'utilisation de cet outil. Le QFD permet de confronter les caractéristiques sociétales et la capacité technique du système.

Caractérisons tout d'abord les attentes des utilisateurs du système. En effet, dans le monde industriel, la satisfaction du client permet d'évaluer la performance du produit et de fixer les objectifs d'amélioration. Différents types d'études telles que les études marketing, les analyses de fuzzy logic [Nepal et al., 2010] ou encore les analyses sociologiques, [Urry, 2004] permettent d'identifier les attentes des utilisateurs sur la base de l'étude sociologique présentée précédemment.

Seule la première face de la maison de la qualité est utilisée en figure 1.5 pour mettre en évidence les caractéristiques de conception d'un SPAC à approfondir en priorité sur la base de l'attente de utilisateur.

La partie « caractéristiques des utilisateurs » répertorie plusieurs études permettant d'évaluer ces attentes. Le système étudié étant destiné à être implanté dans un véhicule routier, les caractéristiques des utilisateurs sont organisées en différents critères ayant chacun leur poids reconnu dans le monde automobile [Nepal et al., 2010].

Un des résultats de cette maison de la qualité est présenté par PCS_k le poids relatifs de chacune des k caractéristiques des SPAC est obtenu par 1.1 :

$$PCS_k = \frac{\sum(R_{ik}.PCU_i)}{\sum(R_{ij}.PCU_i)}.100 \quad (1.1)$$

Afin de faciliter la lecture de la figure, les références utilisées pour l'analyse sont listées dans la table 1.7.

D'après la maison de la qualité présentée, les caractéristiques de conception des SPAC sur lesquelles il apparaît prioritaire de concentrer les efforts sont la sécurité et la

Relations R_{ij}	
Forte	● = 9
Moyenne	○ = 3
Faible	▽ = 1
Aucune	= 0

Correlations $C_{j_1j_2}$	
Positive	+
Negative	-
Aucune	

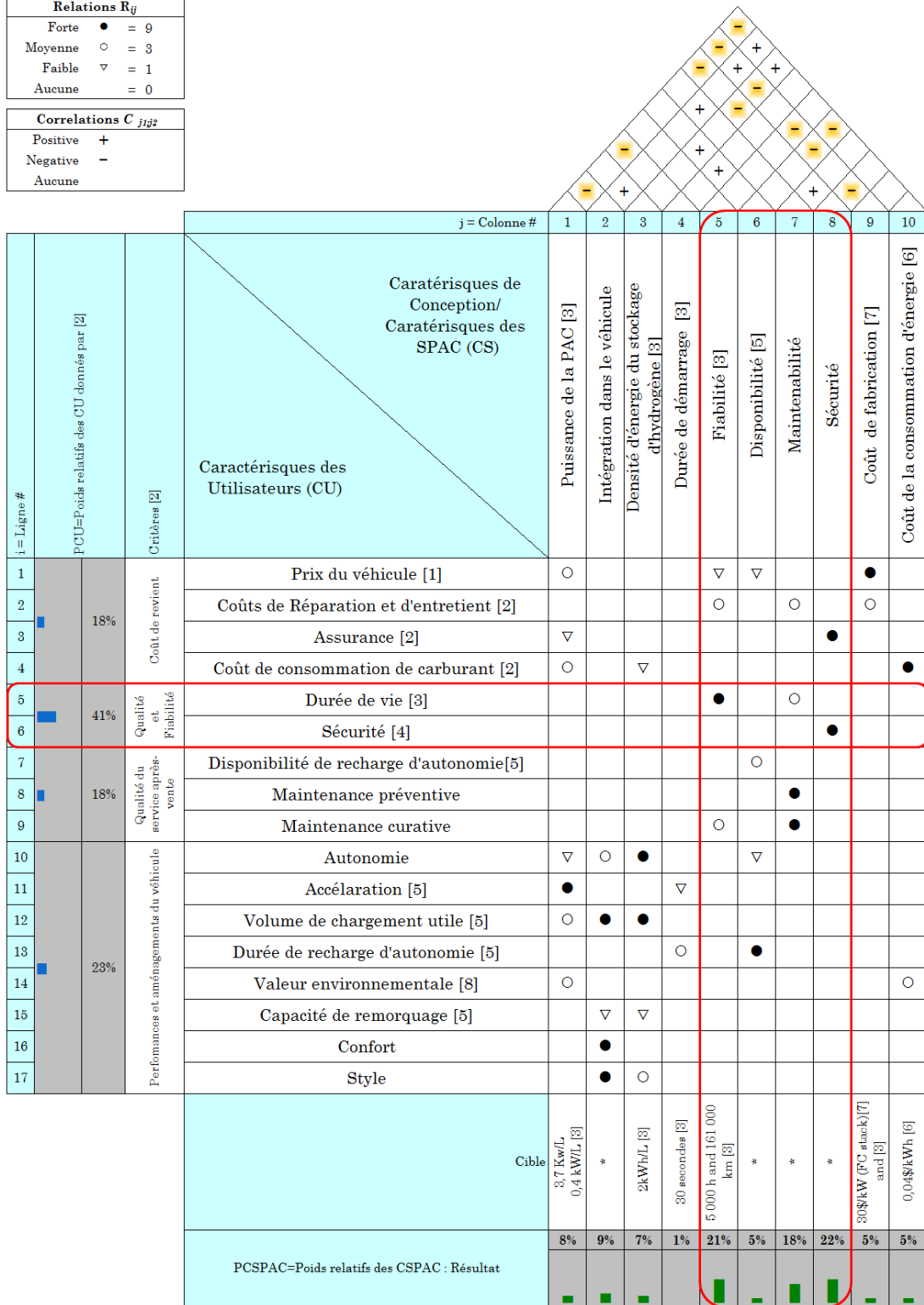


FIGURE 1.5 – Maison de la Qualité d'un SPAC

Références de la figure 1.5	Références de la bibliographie
1	[Klaiber, 1996]
2	[Chougule et al., 2013]
3	[Borroni-Bird, 1996]
4	[Yadav and Goel, 2008]
5	[Greene et al., 2013]
6	[Kamarudin et al., 2006]
7	[Mock and Schmid, 2009]
8	[Urry, 2008]

TABLE 1.7 – Correspondance des références de la figure 1.5

fiabilité. La fiabilité est liée à la durée de vie des SPAC. Or, la durée de vie, dépend de l'utilisation qui est faite du véhicule. Les tendances de cette utilisation ont été décrites ci-dessus comme étant issues de l'évolution du comportement de la population vis à vis de la mobilité. La fréquence d'utilisation varie en terme de nombre de kilomètres parcourus dans une journée par un véhicule selon qu'il appartient à son utilisateur ou à une société de gestion de flotte de véhicules.

Ainsi, le QFD apparaît comme un baromètre de l'état actuel de la réponse qu'apportent aujourd'hui les véhicules à SPAC aux besoins des utilisateurs.

Comme le montre également I. Merle dans sa thèse [Merle, 2010] la fiabilité est intimement liée à la sociologie. Il propose le concept d' «*organisation normalement fiable*» (NRO) en substitution au concept d' «*organisation à haute fiabilité*» (HRO) déjà répandu. L'étude de la correspondance de la conception d'un SPAC vis à vis des résultats de cette analyse encourage donc le concepteur à la définition et à l'atteinte des objectifs de sûreté de fonctionnement.

1.4 Allocation des objectifs de sûreté de fonctionnement

L'Institut pour la Maîtrise des Risques et de la Sûreté de Fonctionnement (IMdR-SdF) reconnaît plusieurs définitions de la sûreté de fonctionnement (SdF) pour décrire «*l'ensemble des moyens qui permettent de se donner et de transmettre une confiance justifiée dans le succès d'un projet*» [Montreux, 2001]. La sûreté de fonctionnement est, selon A. Villemeur [Villemeur, 1988], la «*science des défaillances*». Il propose de la définir par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. La définition de J.-C. Laprie («*la confiance justifiée dans le service délivré*» [Laprie et al., 1995]), place l'utilisateur au cœur des analyses de sûreté de fonctionnement. La SdF considère généralement la combinaison des études de la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et de la sécurité d'un système d'où l'abréviation FMDS (en anglais «*RAMS*» [Rausand and Hoyland, 2004]); cette liste n'étant, selon [Villemeur, 1988], pas exhaustive. A chaque phase du cycle de vie du système étudié, chacune des quatre composantes de la sûreté de fonctionnement va se déployer avec ses

propres méthodes et outils. L'allocation des objectifs de sûreté de fonctionnement consiste à décrire les objectifs de l'étude. Cette étape permet de donner le sens de la conduite des opérations afin de pouvoir comparer le système à cet objectif.

Dans le domaine des PAC, un grand nombre d'études analysent différents aspects de la sûreté de fonctionnement. On peut citer K. Aström [Aström, 2007] et M. Gerbec [Gerbec, 2008] qui ont pour objectif de prolonger la durée de fonctionnement des systèmes à PAC pour l'un, et maîtriser les risques liés à la technologie pour l'autre.

1.4.1 Les composantes de la sûreté de fonctionnement

La fiabilité est l'étude du système au regard de son fonctionnement. La maintenabilité est l'étude du système au regard de sa remise en état. La disponibilité est l'étude du système au regard de sa mise en marche. La sécurité est l'étude du système au regard de ses dangers.

1.4.1.1 La fiabilité

Le néologisme fiabilité a été admis par l'Académie des Sciences avec la définition suivante (1962) : «*Grandeur caractérisant la sécurité de fonctionnement, ou mesure de la probabilité de fonctionnement d'un appareillage selon des normes prescrites*». La définition fut ensuite normalisée comme suit : La fiabilité est la probabilité pour qu'une entité accomplisse une fonction requise dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné. Les études de fiabilité considèrent le système au regard de son fonctionnement. Elles concernent les fonctions qui doivent être réalisées par le système de manière ininterrompue.

L'évaluation de la fiabilité nécessite l'emploi de différents outils et s'appuie sur différentes sources de données selon la phase du cycle de développement du système. 3 catégories sont généralement identifiées :

- L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle est effectuée en phase de conception. J.-C. Ligeron la présente comme une aide à la conception de systèmes mécaniques [Ligeron, 1979].
- La fiabilité expérimentale s'appuie sur les données des phases de fabrication, vérification et validation.
- Enfin, les données de retour sur expérience permettent d'estimer la fiabilité opérationnelle.

Les travaux présentés concernent uniquement la catégorie de la fiabilité prévisionnelle car elle est étudiée en phase de conception du système.

A.G. Mihalache analyse la fiabilité des systèmes mécatroniques du domaine automobile selon chacune de ces 3 catégories. L'exemple d'application qu'il a étudié est un système d'anti-blocage des roues (ABS) [Mihalache, 2007].

La fiabilité des SPAC :

L'amélioration de la fiabilité des PAC fait l'objet de nombreuses recherches. L'objectif de la durée de vie d'un véhicule électrique hydrogène doit être fixé une ana-

lyse sociologique des comportements des conducteurs vis-à-vis de l'utilisation de ce type véhicule, tel qu'il a été développé précédemment. En effet, la gestion d'une flotte de véhicules implique une fréquence d'utilisation très différente du cas où l'utilisateur est propriétaire de son véhicule. Cependant, les études présentées ici, ne permettent pas de définir une durée de vie sur la base des données utilisées. Ainsi, il a été choisi de s'appuyer sur la capacité des PAC en termes de durée de fonctionnement. Concernant les PAC conçues pour l'automobile, l'objectif actuel de durée de vie est de 5000 heures [Borroni-Bird, 1996],[Collier et al., 2006]; au bout desquelles la PAC pourrait éventuellement être remplacée ou reconditionnée en cas de besoin.

1.4.1.2 La maintenabilité

La maintenabilité est la probabilité, pour un système en panne ou non fonctionnel de manière optimale, que la durée de sa remise ou mise à l'état optimal, dans des conditions données, soit inférieure à une durée donnée. Les études menées considèrent le système au regard de sa remise en état. Elles concernent les fonctions de réparation ou de manière plus générale d'actions qui modifient le système et/ou son état.

La maintenance des véhicules à SPAC

- La maintenance préventive :

Le maintien du niveau de sécurité d'un véhicule dépend de la qualité de son entretien. Le carnet d'entretien du véhicule détaille les maintenances nécessaires à effectuer sur le véhicule tout au long de sa durée d'utilisation. Le carnet précise également leur périodicité.

Comme pour tout autre type de véhicule, le concepteur définit précisément le plan de maintenance préventive. Le conducteur est averti par l'ordinateur de bord ou l'outil de diagnostic dès lors que cette maintenance arrive à échéance. L'ensemble des réseaux électriques du véhicule est contrôlé. Le fonctionnement de la PAC et des autres parties spécifiques à l'hydrogène est également suivi selon le même principe.

Par ailleurs, le règlement CE 79/2009 et sa directive d'application 406/2010 imposent un suivi et un renouvellement préventif des composants de l'ensemble du système hydrogène. Ce renouvellement doit se faire après un nombre de remplissages ou un temps d'utilisation déterminé par le fabricant du composant ou par la réglementation. Après vérification, il n'y a pas forcément remplacement de ces composants si ceux-ci ont passé les validations imposées.

- La maintenance curative :

Dès lors que la pile à combustible est arrêtée, il n'y a plus de circulation d'hydrogène dans le système car le réservoir reste fermé. Mais quoi qu'il en soit, toute intervention sur l'ensemble du système pouvant contenir le gaz sous pression ne peut être effectuée que par un technicien disposant obligatoirement d'une habilitation électrique et formé à ce système.

1.4.1.3 La disponibilité

La disponibilité est la probabilité pour qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, à un instant donné. Les études menées considèrent le système au regard de sa mise en marche. Elles concernent les fonctions qui doivent être réalisées par le système à un instant donné.

La disponibilité des SPAC :

Le niveau d'exigences de disponibilité d'un SPAC dépend de son intégration dans le véhicule. Dans le cas d'un véhicule à SPAC « pleine puissance » une défaillance de la mise en marche du SPAC entraîne l'immobilisation du véhicule. Alors que dans le cas d'un SPAC monté en « prolongateur d'autonomie », le véhicule pourra fonctionner sur batterie si le SPAC ne peut être mis en marche. L'autonomie du véhicule est cependant réduite à la capacité de la batterie de puissance.

1.4.1.4 La sécurité

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Les études menées considèrent le système au regard de la sécurité des personnes en contact direct et indirect. Elles concernent des fonctions qui doivent être réalisées en conception et dont la réalisation ne peut être modifiée durant la vie du système. L'étude de la sécurité d'un système rentre dans le cadre de la cydynamique.

La sécurité des SPAC :

De nombreuses études sont consacrées à la sécurité des SPAC au regard des dangers liés à l'utilisation de l'hydrogène [MacIntyre et al., 2007]. En effet, le risque associé à l'hydrogène est une conséquence de ces propriétés d'inflammabilité et grande quantité d'énergie libérée par une explosion [Hord, 1978, Najjar, 2013]. Bien que les recherches soient majoritairement consacrées à la maîtrise de l'hydrogène dans les SPAC, la tension électrique inhérente au fonctionnement d'un moteur électrique est une source de danger d'électrisation, d'électrocution ou d'incendie. Les garanties sécuritaires sur le plan électrique sont strictement les mêmes que celles des véhicules à propulsion électrique à batteries. Le guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène [ADEME, 2015] fournit les grands principes d'intégration des SPAC avec l'objectif de ne pas dégrader la sécurité des véhicules.

Ce document se limite à l'étude de la fiabilité exprimée en termes de durée de vie car, lorsqu'elle concerne des éléments dont la défaillance compromet la sécurité, le niveau de risque acceptable est évalué par les données de fiabilité. Par ailleurs d'après l'analyse par QDF réalisée plus haut, la sécurité et la durée de vie sont les caractéristiques les plus importantes du SPAC aux yeux des utilisateurs.

1.4.1.5 Probabilité et fiabilité

Soit T la variable aléatoire représentant le temps écoulé entre la mise en service d'un système et la première défaillance observée, ou, de manière générale, le premier des événements redoutés. A un instant t , la fiabilité, $R_T(t)$, est la probabilité que le système soit non défaillant pendant l'intervalle de temps 0 à t (1.2). La fiabilité est une fonction de répartition, sa valeur est comprise entre 0 et 1.

Soit une population contenant $N(0)$ pièces en état de fonctionner à l'instant $t = 0$, à l'instant t il y en a $N(t)$ en fonctionnement.

$$R_T(t) = P(t < T) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad (1.2)$$

La probabilité complémentaire à la fiabilité, est la probabilité de défaillance, notée $F_T(t)$ (1.3). En d'autres termes, à l'instant t , il s'agit de la probabilité qu'une défaillance (ou événement redouté) apparaisse pendant l'intervalle de temps de 0 à t .

$$F_T(t) = P(t \geq T) = 1 - R(t) = 1 - \frac{N(t)}{N(0)} \quad (1.3)$$

La fonction $F_T(t)$ est la fonction de répartition de la défaillance. Elle correspond à la probabilité d'apparition d'une défaillance dans l'intervalle de temps 0 à t . $f_T(t)$ désigne, quant à elle, la fonction de densité de probabilité de défaillance donnée par (1.4). La densité de probabilité a pour somme l'unité. Lorsque la fonction de répartition $F_T(t)$ est une fonction en escalier, elle n'admet pas de densité au sens des fonctions, mais au sens des distributions.

$$f_T(t) = \frac{dF_T(t)}{dt} = -\frac{dR_T(t)}{dt} = -\frac{1}{N(0)} \frac{dN(t)}{dt} \quad (1.4)$$

Ces définitions conduisent à celle du **taux de défaillance**, couramment noté λ , qui est une des caractéristiques de la fiabilité. Le taux de défaillance est la proportion de pièces défectueuses que l'on obtient pendant un intervalle de temps dt . En effet, $\lambda(t)dt$ n'est autre que la probabilité pour le système d'être défaillant pendant l'intervalle de temps dt , sachant qu'il n'a pas été défaillant pendant l'intervalle de temps de 0 à t (1.5). Autrement dit,

Soient,

- A l'évènement « défaillance sur $[t; t+dt]$ »
- B l'évènement « non défaillance sur $[0; t]$ »

$$\lambda(t)dt = P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{f_T(t)dt}{R_T(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{f_T(t)}{R_T(t)} = -\frac{dN(t)}{N(t)dt} \quad (1.5)$$

Concernant un SPAC :

Cette étude, comme celle de J. LaChance et al. [LaChance et al., 2009], se base sur une hypothèse de probabilité maximale acceptable d'une explosion fatale issues des analyses de l'European Industrial Gas Association [EIGA, 2007], et de l'European Integrated Hydrogen Project [EIHP2, 2003]. Ils suggèrent que le risque individuel fatal est acceptable s'il est inférieur à $3,5 \cdot 10^{-5}/an$.

1.4.1.6 Description d'une variable aléatoire

Définition d'une variable Il s'agit d'une donnée qui peut varier. Elle peut par exemple dépendre du temps. Il est important de préciser dès à présent qu'un paramètre est une valeur constante, c'est dire qu'elle ne varie pas, pendant l'observation d'un phénomène. Ceci pour éviter toute confusion entre une *variable* et un *paramètre* dans la suite du document.

Une variable aléatoire peut varier de manière aléatoire, c'est à dire qu'elle ne peut être déterminée.

T est une variable aléatoire car la connaissance de ses valeurs avant l'instant t ne permet pas de déduire celle à l'instant t . Pour autant, pour toute application l de T dans le temps, les moments généralisés de T peuvent être définis par :

$$E[l(T)] = \int_0^{+\infty} l(t) f_T(t) dt \quad (1.6)$$

Les fonctions polynomiales d'ordre 1 à 4 sont généralement utilisées pour caractériser une variable aléatoire [Lacoume et al., 1997]. Elles conduisent aux 4 premiers moments ($\mu_{T(r)}$) d'ordre r (allant de 1 à 4) de T pour $l(T) = T^r$:

$$\mu_{T(r)} = E[T^r] \quad (1.7)$$

et les moments centrés :

$$\mu'_{T(r)} = E[(T - \mu_{T(1)})^r] \quad (1.8)$$

Le moment d'ordre 1 est la *moyenne* de T :

$$moyenne = \mu_{T(1)} = E[T] = \int_0^{+\infty} T f_T(t) dt \quad (1.9)$$

Le moment centré d'ordre 2 défini, quant à lui, la *variance* (notée S^2) :

$$variance = S^2 = \mu'_{T(2)} = E[(T - E[T])^2] \quad (1.10)$$

L'écart-type (généralement notée σ) est défini :

$$\sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{E[(T - E[T])^2]} \quad (1.11)$$

Les 4 premiers cumulants ($\kappa_{x(r)}$) sont définis ainsi :

$$\kappa_{x(r)} = Cum[x, x, \dots, x] \quad (1.12)$$

Ils peuvent être, calculés à partir des moments. Pour les ordres 1 à 4,

$$\begin{aligned} \kappa_{T(1)} &= \mu_{T(1)} \\ \kappa_{T(2)} &= \mu'_{T(2)} = \mu_{T(2)} - \mu_{T(1)}^2 \\ \kappa_{T(3)} &= \mu'_{T(3)} = \mu_{T(3)} - 3\mu_{T(1)}\mu_{T(2)} + 2\mu_{T(1)}^3 \\ \kappa_{T(4)} &= \mu_{T(4)} - 4\mu_{T(3)}\mu_{T(1)} - 3\mu_{T(2)}^2 + 12\mu_{T(2)}\mu_{T(1)}^2 - 6\mu_{T(1)}^4 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Après centralisation autour de la moyenne et normalisation sur le cumulants d'ordre 2, la variable aléatoire \hat{T} standardisée est obtenue :

$$\hat{T} = \frac{T - \mu_{T(1)}}{\sqrt{\kappa_{T(2)}}} \quad (1.14)$$

Les cumulants ainsi standardisés de \hat{T} d'ordre 3 et 4, sont définis respectivement l'*asymétrie* (*skewness* en anglais) et l'*aplatissement* (*kurtosis* en grec) :

$$asymetrie = \frac{E[T^3]}{E[T^2]^{3/2}} \quad (1.15)$$

$$aplatissement = \frac{E[T^4]}{E[T^2]^2} - 3 \quad (1.16)$$

1.4.2 La durée de vie d'un système mécanique complexe

La prédiction de la durée de vie d'un système complexe est rendue particulièrement délicate par la multiplicité des points d'initiation de défaillances (telles que les fissures dans les matériaux, ou autres mécanismes de dégradation).

1.4.2.1 Définition d'un système mécanique complexe

Sur la base des plusieurs travaux [Le Moigne, 1999], [Noyes and Pérès, 2007], [Choley, 2006], B. Boudon propose de définir la complexité d'un système par ses caractères : « *multi-physique* », « *multi-phases* », « *multi-échelles* », « *multi-interactions* » et dont ses « *comportements sont difficiles à appréhender* » [Boudon, 2014]. En ce qui concerne uniquement la PAC, la complexité d'un stack de type PEMFC doit être pris en compte pour simuler son comportement mécanique [Charon et al., 2014].

Le SPAC est composé d'éléments dont les comportements sont régis par différents domaines de la physique : chimique, électronique, mécanique, thermodynamique, informatique, etc. . Il donc bien « *multi-physique* ». Dans l'analyse qui suit, seul le comportement

mécanique de ce système sera étudié : d'où le terme de « système mécanique complexe ». Au niveau de la PAC, le caractère « multi-physique » a été largement mis en évidence par T. Akiki([Akiki, 2011]).

Le SPAC fonctionne différemment suivant plusieurs phases au cours de son cycle de vie. Il est ainsi un système « multi-phases ». En ce qui concerne son comportement mécanique, il est soumis à différents profils de sollicitations (véhicule roulant sur route standard, sur route bosselée, en virage, véhicule à l'arrêt alors que le SPAC fonctionne, véhicule roulant alors que le SPAC est à l'arrêt, etc.)

Le SPAC est caractérisé par des lois physiques de différentes échelles : microscopique/ macroscopique. Ce type de système est donc « multi-échelles ».

Par ailleurs, le SPAC est composé de différents éléments qui interagissent les uns avec les autres de manières différentes : que ce soit le contrôle-commande du système avec électrovanne d'ouverture du réservoir, ou le réservoir avec le tuyau d'hydrogène qui achemine celui-ci à la PAC, etc. . C'est pourquoi il est « multi-interactions ». Comme le souligne B. Boudon, cette caractéristique permet de préciser que ce type de système est holistique selon le principe duquel « le tout est plus grand que la somme des parties ».

Enfin, il y a, à l'intérieur d'un SPAC, de nombreuses non-linéarités (notamment au niveau du réservoir ou de la PAC, etc.), des frottements (entre le réservoir et ses fixations, etc.) mais également les jeux mécaniques inhérents à l'intégration de l'ensemble du système à l'intérieur du véhicule. Ceci contribue également au fait que le comportement du SPAC est complexe à appréhender.

1.4.2.2 Démarche de prédiction de la durée de vie

Face à cette complexité, deux approches peuvent être conduites [Leis, 1978],[Lalanne, 1999b] :

La première approche, de type : « boîte noire », prédit les dégradations du système en prenant en compte les sollicitations aux limites extérieures du système et donc à des distances indéfinies des points d'initiation de fissures ou autres dégradations. Plusieurs outils peuvent être utilisés dans ce but tels que les réseaux de neurones [Paclisan, 2013].

La seconde approche, qui est conduite dans cet ouvrage, consiste à localiser, dans un premier temps les points critiques d'initiation préférentiel de dégradations ; pour, dans une deuxième temps, prédire la durée de vie en ces points sur la base des sollicitations.

La première démarche, s'adaptant en temps réel au comportement du système, permet d'alerter sur l'état de dégradation instantané et prédire à courts termes la durée de vie. Cette approche est davantage destinée à analyser le comportement du système en temps réel tout au long de sa durée de fonctionnement.

La seconde, quant à elle, permet une prédiction de la durée de vie du système à long terme à condition de prendre à compte la multiplicité des points critiques. Elle se base sur la conception du système. Cette approche est généralement utilisée lors de la conception du système, soit en validation, soit en aide au dimensionnement sur la base d'objectif de durée de vie. L'étude présentée dans cet ouvrage se positionne dans cette dernière optique.

Conclusion du chapitre 1

Le choix des individus concernant leur automobilité reste aléatoire à l'intérieur d'un cadre déterminé par les tendances de mutualisation des biens. Le développement des véhicules électriques hydrogène équipés de pile à combustible, pourrait ainsi passer par la gestion en flottes de véhicules. De plus, les développements et implantations des nouvelles technologies tendent à ce que les utilisateurs, en tant qu'individus, soient eux-mêmes les acteurs de ces développements. Ces dernières années beaucoup d'efforts sont produits par les acteurs du domaine pour rechercher l'équilibre entre les comportements individuels et le développement des biens et des services. La prise en compte des incertitudes dans l'adéquation des attentes des utilisateurs avec la capacité d'un produit ou d'un service reste à approfondir. Pourtant c'est bien la caractérisation de l'utilisation d'un véhicule qui permet de fixer ses objectifs de sûreté de fonctionnement. En effet, l'étude du cas d'utilisation des véhicules libre-service OPTYMO à Belfort confirme que le nombre de kilomètres à la journée d'un véhicule augmente considérablement. Par ailleurs la gestion par flottes de véhicules permet une organisation de la maintenance préventive plus régulière et organisée. La durée de vie des SPAC peut, par ce suivi, être mieux maîtrisée. Ainsi l'objectif du nombre d'heures de fonctionnement d'une pile à combustible, fixé actuellement à 5000 heures et choisi comme exemple dans la suite du document, devrait être adapté à la caractérisation de l'utilisation basée sur des études d'usage. De plus, les types de parcours effectués par les véhicules sont également dépendants de l'évolution des comportements en adéquation avec le développement de la technologie.

L'enchaînement des différents parties telles que proposées dans ce chapitre montre donc que les études sociologiques doivent être conduites pour fixer les conditions expérimentales vibro-climatiques qui permettront de vérifier les objectifs de durée de vie. Ces premiers résultats permettent de concentrer les études développées dans les chapitres suivants sur les cas des véhicules automobiles gérés en flottes et parcourant différents types de parcours.

Les trois prochains chapitres de ce document se basent sur l'hypothèse de 5000 heures de fonctionnement pour un système à pile à combustible implanté dans un véhicule dont l'utilisation est totalement aléatoire : c'est à dire que les parcours effectués par ce type de véhicule n'est pas conditionné par les acteurs ayant un impact sur la stratégie de développement de cette technologie. Alors que dans le dernier chapitre, une comparaison sera faite avec la conception d'un véhicule destiné à effectuer des parcours préférentiellement routier et autoroutier d'un côté, ou bien citadin, de l'autre. Le chapitre suivant se concentre sur une étude au niveau système global du SPAC pour déterminer les points critiques préférentiels d'initiation de dégradation sous un environnement vibratoire déterminé.

2 Analyse globale d'un système mécanique complexe à l'exemple d'un SPAC

*« Faire simple est plus difficile
que faire compliqué. »
Steve Jobs (1955-2011)*

Sommaire

2.1 Étude globale et qualitative de sûreté de fonctionnement . . .	43
2.1.1 Analyse préliminaire des risques	45
2.1.2 Analyse fonctionnelle d'un système à pile à combustible	45
2.1.2.1 Analyse fonctionnelle externe	46
1) Identification des phases de vie	46
2) L'environnement extérieur du système	47
3) Les fonctions du système	47
2.1.2.2 Analyse fonctionnelle interne	48
2.1.3 Analyse des dysfonctionnements d'un système à pile à combustible	50
2.1.3.1 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC)	50
1) Le bénéfice « projet » de l'AMDEC	51
2) Les objectifs « système » de l'AMDEC produit	51
3) La réalisation d'une AMDEC sur un système à pile à combustible	52
4) La mise en pratique de l'AMDEC « produit »	52
2.1.3.2 Résultats de l'étude AMDEC	53
2.1.3.3 Analyse par arbre de défaillances de l'explosion d'un système à pile à combustible	54
2.1.3.4 Conclusions de l'analyse dysfonctionnelle	56
2.2 Caractérisation des contraintes vibro-climatiques	57
2.2.1 Démarche de personnalisation des essais	57
2.2.2 Évaluation de l'environnement vibratoire	59
2.2.2.1 Recherche des données de l'environnement réel	59
2.2.2.2 Traitement des données vibratoires	60

1)	Les types de signaux	60
2)	Propriétés des signaux	63
3)	La notion de corrélation	64
4)	La transformée de Fourier	66
5)	La formule de Parseval	66
6)	La densité spectrale de puissance	67
7)	Constitution du spectre fréquentiel représentatif des enregistrements	68
2.2.3	Évaluation de l'environnement climatique	69
2.3	Modélisation des comportements dynamiques des systèmes mécaniques complexes	70
2.3.0.1	Les hypothèses de travail	70
2.3.1	Description du système étudié	71
2.3.1.1	Les masses principales	71
2.3.1.2	Le caisson	71
2.3.1.3	Les solides infiniment rigides	72
2.3.1.4	Autres auxiliaires : les masses complémentaires	74
2.3.1.5	Le maillage	74
2.3.2	Caractérisation dynamique propre du système	76
2.3.2.1	Mise en équation	76
2.3.2.2	Résultats de la caractérisation dynamique propre du système	77
2.3.3	Masses modales effectives	77
2.3.3.1	Énergie cinétique relative au mouvement de corps rigides	79
2.3.3.2	Matrice de participation modale	80
2.3.3.3	Analyse de la masse effective	81
1)	Dans la direction x	82
2)	Dans la direction y	82
3)	Dans la direction z	83
2.3.4	L'influence d'une excitation par la base sur le système mécanique	84
2.3.4.1	Introduction de l'amortissement	85
2.3.4.2	Coefficients d'influence dynamique	85
2.3.4.3	Interprétation par la réponse impulsionnelle	86
2.3.4.4	Observations et interprétations	88
1)	Réponses suivant x	88
2)	Réponses suivant y	88
3)	Réponses suivant z	89
2.3.5	Modélisation du tuyau d'hydrogène	89
2.3.6	Prise en compte des sollicitations réelles d'usage	90

Pour tout système complexe comme le SPAC, il est indispensable d'orienter les efforts d'analyse sur les points les plus critiques. Conformément au cheminement proposé en figure 1 de l'introduction, ce chapitre présente les analyses fonctionnelles et dysfonctionnelles du système combinées à l'observation des conditions réelles d'usage dans la préparation des essais expérimentaux. L'ensemble des études présentées dans ce chapitre concernent l'analyse des SPAC au niveau système. Tout d'abord, sur les bases des résultats du chapitre précédent, une étude globale et qualitative de sûreté de fonctionnement est décrite et présentée. Ensuite la deuxième partie montre comment préciser les contraintes vibro-climatiques par caractérisation expérimentale. Enfin, sur cette base, des modélisations simples de systèmes mécaniques sont proposées pour préciser qualitativement voire quantitativement les comportements dynamiques principaux et orienter ainsi le concepteur du système dans ses choix.

2.1 Étude globale et qualitative de sûreté de fonctionnement

Afin de concevoir un système mécanique complexe avec des objectifs de sûreté de fonctionnement (SdF), il est nécessaire d'accompagner la conception par une démarche de SdF. Sur la base des résultats du chapitre 1, les analyses proposées se concentrent sur les composantes de sécurité et de fiabilité de la SdF. Ainsi les outils d'analyse dédiés à la fiabilité prévisionnelles (adaptées à la phase en conception d'un système) doivent être mis en œuvres. Ces outils généralement utilisés sont [Mihalache, 2007] :

L'analyse préliminaire des risques (APR) : Elle permet d'identifier les risques liés à différents scénarios de défaillance du système. Cette analyse est particulièrement nécessaire pour l'intégration d'objectifs de sécurité dans la conception d'un système. Il s'agit d'une analyse qualitative.

L'analyse fonctionnelle externe (AFE) : Elle a pour but d'identifier les fonctions principales et de contraintes attendues liés à l'environnement du système. Elle est indépendante du fonctionnement du système. Elle s'exprime par le cahier des charges fonctionnel. C'est une analyse qualitative.

L'analyse fonctionnelle interne (AFI) : Elle analyse qualitativement la façon dont le système répond aux fonctions identifiées en analyse fonctionnelle externe. Elle s'exprime, sur la base de l'architecture du système, par le cahier des charges technique.

L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC) : Son but est de lister les conséquences de l'ensemble des modes de défaillance du système étudié (dans le cas d'une AMDE), et de les hiérarchiser (dans le cas d'une AMDEC). Cette analyse est qualitative, et « semi-quantitative » dans la mesure où elle évalue la criticité des modes de défaillance.

L'arbre de défaillances (ADD) : Pour un évènement redouté identifié en APR ou en AMDEC, un arbre de défaillances permet d'analyser l'enchaînement des causes pouvant provoquer cet évènement. Il s'agit d'une analyse qualitative qui peut être exploitée quantitativement pour l'estimation de la fiabilité prévisionnelle.

Le réseau de Pétri : La modélisation par réseau de Pétri permet de représenter les différents états fonctionnels et dysfonctionnels d'un système. Elle présente ainsi l'avantage de pouvoir analyser qualitativement mais également estimer quantitativement la fiabilité des systèmes ayant plusieurs états de fonctionnement. Elle n'est pas utilisée dans les travaux présentés car ils se concentrent sur les systèmes mécaniques. Elle est cependant nécessaire dans le cas de systèmes mécatroniques, par exemple, pour l'estimation de la fiabilité comme le développe A.L. Mihalache dans sa thèse. Elle est également utilisée pour l'analyse multi-physique d'un SPAC afin de prendre en compte des différents états de la PAC, comme réalisé par l'étude de C.Wieland [Wieland, 2009].

Ces différents outils doivent être utilisés selon une méthodologie définie telle que celle présentée sur la figure 2.1. Nous proposons de suivre la méthode suivante [Signoret, 1992] et [Noyes and Pérès, 2007] : Tout d'abord, il convient de définir le système à étudier. Il s'agit là d'une définition technique mais aussi environnementale. La seconde étape consiste à analyser le fonctionnement du système dans le but d'étudier les dysfonctionnements potentiels. Puis vient la modélisation du système qui est ici réalisée par une élaboration d'arbres de défaillance.

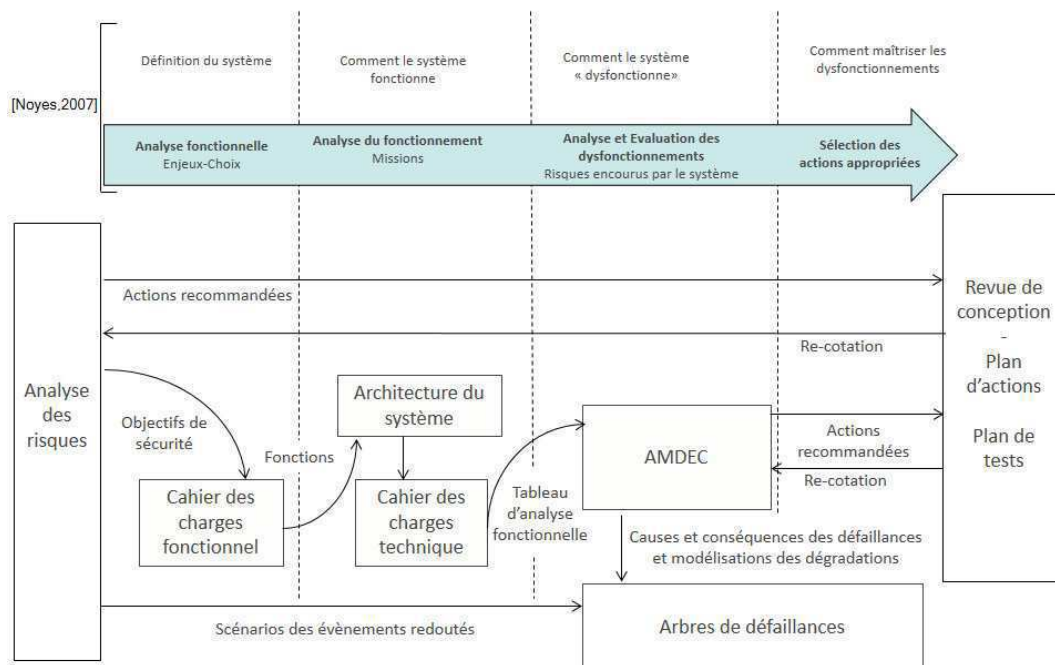


FIGURE 2.1 – Démarche d'analyse qualitative de sûreté de fonctionnement en conception

2.1.1 Analyse préliminaire des risques

Cette démarche débute par l'analyse fonctionnelle du système dans laquelle est intégrée la sécurité fonctionnelle du SPAC. Afin d'assurer une réponse sécuritaire du système, l'identification des dangers potentiels est réalisée avant même le début de l'analyse fonctionnelle.

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) *«est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité»* selon la norme CEI-300-3-9 de 1995. Elle a pour objectif d'identifier les sources et les scénarios présentant un danger pour la personne, et d'évaluer la gravité des conséquences. L'identification des dangers est effectuée grâce à l'expérience et à la connaissance des experts. Par domaine d'application, l'analyse repose sur des listes de situations dangereuses. Une Analyse Préliminaire des Risques inclut généralement une estimation de la probabilité d'occurrence des situations dangereuses et des accidents potentiels ainsi que leurs effets et conséquences, ce qui permet de proposer des mesures pour les supprimer. Ces mesures peuvent se traduire en objectif de sécurité.

Les avantages principaux de cet outil sont d'une part qu'il est économique en terme de temps passé et d'autre part qu'il ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé.

En revanche, l'analyse préliminaire des risques seule, ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes tels que les SPAC. L'intégration des résultats en termes d'objectifs de sécurité, dans le cahier de charges permet d'assurer leur prise en compte dès les premières phases de conception des systèmes hydrogène. Son utilisation seule peut toutefois être jugée suffisante dans les systèmes simples ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approche.

Cette analyse peut être mise à jour à des points clés de l'avancement de la conception. Elle peut être également un support à la rédaction de guides d'utilisation ou d'exploitation.

2.1.2 Analyse fonctionnelle d'un système à pile à combustible

L'analyse fonctionnelle du système est le socle sur lequel repose la conception et la fabrication d'un système correspondant à la définition des besoins, tel que T.R. Douglas le présente en 1977 [Douglas, 1977]. L'analyse fonctionnelle identifie les fonctions à satisfaire par le système. En effet, l'objectif, défini précédemment, n'est atteint que si un ensemble de fonctions est satisfait : relatives au service, à la durée de vie, aux contraintes techniques ainsi qu'aux contraintes environnementales. Plusieurs outils peuvent être utilisés pour cette analyse tels que le SADT (Structured Analysis and Design Technique) [Ross, 1977], la méthode FAST (Functional Analysis System Technique) développée par Charles W. BYTHEWAY en 1965, ou encore l'identification des interactions du système avec l'environnement extérieur (norme EN 12973) formalisé par le « diagramme pieuvre ». Cette dernière méthode est mise en œuvre dans ces travaux car elle convient aux

systèmes multi-physiques tels que les SPAC et qu'elle est largement connue par les acteurs industriels partenaires des projets F-City H2 et MOBILHyTEst. L'interface utilisée pour faciliter ce travail d'analyse fonctionnelle (ainsi que d'analyse dysfonctionnelle) est celle du logiciel « Suite Méthodologique TDC » de la société TDC Software.

2.1.2.1 Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle externe considère le système de manière globale et unitaire, elle étudie les fonctions que le système doit être en mesure d'accomplir vis à vis de son environnement extérieur, indépendamment de la solution technique envisagée pour le système.

1) Identification des phases de vie :

La définition des fonctions est généralement réalisée par phases de vie afin d'assurer l'exhaustivité des fonctions auxquels le système doit répondre depuis la fin de sa fabrication jusqu'à sa destruction. Les différentes phases de vie identifiées pour les SPAC sont répertoriées dans la table 2.1.

- Tests fin de ligne de fabrication
 - Stockage du SPAC
 - Transport du SPAC
 - Installation dans le véhicule
 - Validation du véhicule
 - Transport du véhicule
 - Usage standard
 - Stockage parking
 - Remplissage du réservoir
 - Maintenance (préventive et curative)
 - Fin de vie
-

TABLE 2.1 – Cycle de vie du système PAC

Le travail présenté étudiant la durée de vie des SPAC, la suite des études se concentre sur la phase de vie « Usage standard ». Pendant cette phase de vie, le système PAC peut se trouver dans différentes situations, comme le présente la table 2.2.

Les situations limites ou extrêmes auxquelles le système pourrait être confronté pendant sa vie (tel qu'un accident, un incendie, ...), ne sont pas considérées comme étant des phases de vie. La prise en compte de ces situations est faite lors de la caractérisation précise des fonctions du système par des niveaux de performance propres à chacune d'elles, selon que le domaine environnemental soit normal, limite ou extrême.

Il est cependant important de savoir que ce document considère uniquement l'environnement qui appartient au « domaine normal » pour lequel la fonction considérée du matériel doit être assurée avec les niveaux de performance spécifiés.

- S1 : démarrage et arrêt du véhicule
- S2 : le véhicule se déplace alors que le système PAC est à l'arrêt
- S3 : démarrage et arrêt du système PAC pendant que le véhicule se déplace
- S4 : démarrage et arrêt du système PAC lorsque le véhicule ne se déplace pas
- S5 : fonctionnement du système PAC lorsque le véhicule se déplace

TABLE 2.2 – Ensemble des situations de l'usage standard du système PAC

2) L'environnement extérieur du système :

Tout d'abord, comme précisé par la norme NORMDEF (Normes de défense française) [NORMDEF-0101, 2009] l'environnement extérieur est défini suivant la caractérisation du domaine auquel il appartient. Les performances des fonctions principales du système sont généralement décrites pour chacun des domaines environnementaux que le système peut rencontrer. La NORMDEF en propose trois : le domaine normal, le domaine limite et le domaine extrême. Le domaine considéré dans ce document est le domaine normal. Le comportement du SPAC en cas d'accident avec ou sans incendie, ne sont, par exemple, pas étudiés ici.

Inter-acteurs	Catégorie
-Chaîne de traction du véhicule -Structure mécanique du véhicule -Bus CAN (Controller Area Network) du véhicule -Alimentation 12V du véhicule -Circuit de refroidissement du véhicule	Eléments matériels ou immatériels
-Environnement climatique (Température, Pression, Humidité) -Environnement vibratoire -Environnement électro-magnétique -Composition atmosphérique (concentration d'O ₂ , salinité, poussière...)	Conditions ambiantes
-Conducteur -Passagers	Personnes
-Règlements, normes, exigences du constructeur du véhicule	Normes et prescriptions

TABLE 2.3 – Inter-acteurs d'un système PAC

Sur la base de l'analyse sociologique présentée dans le chapitre 1, il convient d'identifier l'environnement extérieur au système. Cette étape permet de délimiter les contours du système mais également de fixer les conditions environnementales auxquelles le système est contraint. La table 2.3 dresse la liste de ces conditions et plus généralement de l'ensemble des inter-acteurs qui agissent sur le SPAC. Cette étape doit être réalisée avec soin car elle conditionne l'exhaustivité de l'analyse fonctionnelle.

3) Les fonctions du système :

L'analyse fonctionnelle externe permet de définir les fonctions qui relient le système aux inter-acteurs identifiés. La table 2.4 présente la liste des fonctions identifiées

que doit réaliser le SPAC. Cette liste de fonctions n'est pas exhaustive. Elle décrit les fonctions qui correspondent aux relations mises en évidence par l'analyse QFD présentée dans le chapitre 1. Cette liste centre ainsi la poursuite de l'étude sur les fonctions qui ont le plus d'importance aux yeux de l'utilisateur. Les travaux qui suivent considèrent uniquement la fonction de contrainte « Résister aux conditions d'environnement extérieur et intérieur véhicule (FC1) ».

Relations de la maison de la qualité (Chap.1)	Fonctions d'un SPAC	Type de fonction	Caractérisation	
			Indicateur	Niveau
R 111 et R 55	FP 1 Fournir la puissance à la chaîne de traction ou à la batterie	Principale	Puissance délivrée par le SPAC	5 kW
R 68	FS 1 Ne pas générer de risques	Sécurité		
R 55	FC 1 Résister aux conditions d'environnement extérieur et intérieur véhicule	Contrainte	Dégradation des fonctions principales	après 5000 h
R 57	FC 2 Permettre au conducteur d'avoir un SPAC en état de fonctionnement	Contrainte	Durée de remise en service	48 h

TABLE 2.4 – Fonctions d'un système à pile à combustible (liste non exhaustive)

2.1.2.2 Analyse fonctionnelle interne

Cette analyse fonctionnelle externe doit être complétée par l'analyse fonctionnelle interne (ou analyse du fonctionnement). Pour cette analyse, la connaissance du fonctionnement du système est nécessaire. Le fonctionnement du SPAC étudié correspond sensiblement aux fonctionnements classiquement rencontrés comme présenté en figure 2.2. L'analyse fonctionnelle interne étudie comment la solution envisagée permet de répondre aux fonctions identifiées dans l'analyse fonctionnelle externe. Autrement dit, comment chacune des fonctions identifiées précédemment sont assurées par les différents composants du système. Cette analyse est réalisée jusqu'au niveau de détails connu du système. Pour mettre en place l'architecture du système il faut rester ouvert au fait que l'architecture fonctionnelle peut être différente de la disposition physique des composants [Douglas, 1977]. En effet l'analyse est généralement réalisée avant le design définitif du système.

Chacun des sous-systèmes n'intervient pas nécessairement dans la réponse à l'ensemble des fonctions identifiées en analyse fonctionnelle externe. Il est donc inutile de faire l'analyse des modes de défaillances de manière systématique pour l'ensemble des fonctions de chacun des sous-systèmes. Cette analyse fonctionnelle interne trouve donc tout son intérêt pour cibler la poursuite de l'étude du système. Mais par sa force de simplification, elle doit donc être également réalisée avec minutie car, une fois de plus, un oubli à ce niveau là peut cacher une défaillance potentielle dont les effets et les causes ne seraient alors pas pris en compte dans le calcul de l'atteinte de l'objectif.

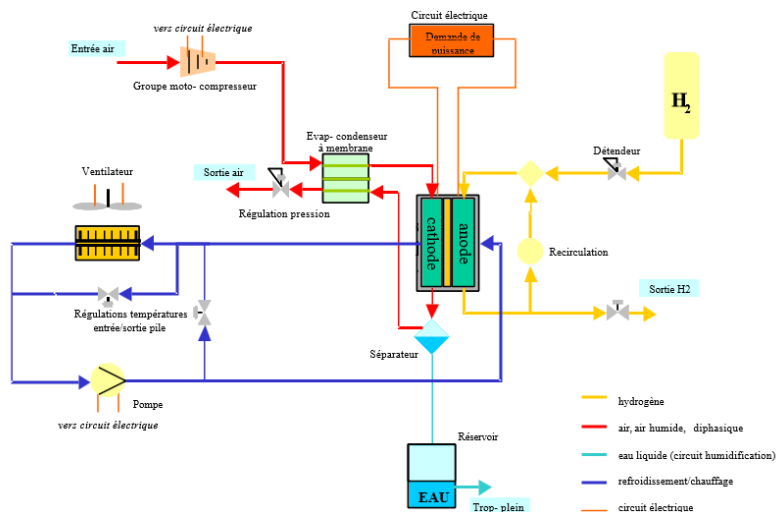


FIGURE 2.2 – Schéma de fonctionnement d'un système PAC [Lachaize, 2004]

Un travail par bloc diagramme fonctionnel est particulièrement pertinent pour détailler les fonctions principales (ou de service). Bien que le cœur des travaux présentés ne soit pas centré sur une fonction principale (mais sur la fonction de contrainte), ce détour permet de présenter le fonctionnement principal d'un système à PAC, mais également de situer les travaux dans une démarche globale de sûreté de fonctionnement. De nombreux travaux traitent de la fiabilité des SPAC [Candusso, 2013] à répondre à la fonction principale « Fournir la puissance à la chaîne de traction ou à la batterie ».

La schématisation de l'analyse du fonctionnement du SPAC répondant à la fonction principale FP1 est présentée en figure 2.3. La table 2.5 dresse la liste des fonctions internes associées à cette figure.

FP1	Fournir la puissance à la chaîne de traction ou à la batterie
FP 1.1	Réguler la fourniture de puissance du bloc de puissance
FP 1.2	Fournir de l'O ₂ à la PAC
FP 1.3	Fournir de l'H ₂ à la PAC
FP 1.4	Refroidir le bloc de puissance
FP 1.5	Libérer l'air sortant de la pile
FP 1.6	Réguler la compression de l'air
FP 1.7	Réguler l'ouverture du réservoir
FP 1.8	Réguler le refroidissement du bloc puissance
FP 1.9	Fournir du courant
FP 1.10	Réaliser la réaction électrochimique

TABLE 2.5 – Liste des fonctions internes liées à la fonction FP1

Concernant la fonction de contrainte FC1 (Résister aux conditions d'environnement extérieur et intérieur véhicule). L'ensemble des composants du SPAC sont concernés car chacun d'eux subit les conditions ambiantes. La caractérisation de l'environnement climatique et vibratoire est détaillée dans la suite de ce chapitre. Un système à PAC mettant en œuvre un grand nombre de sous-systèmes et de composants il est efficace de cibler les études. Pour cela deux types d'analyse se complètent. Une simulation du com-

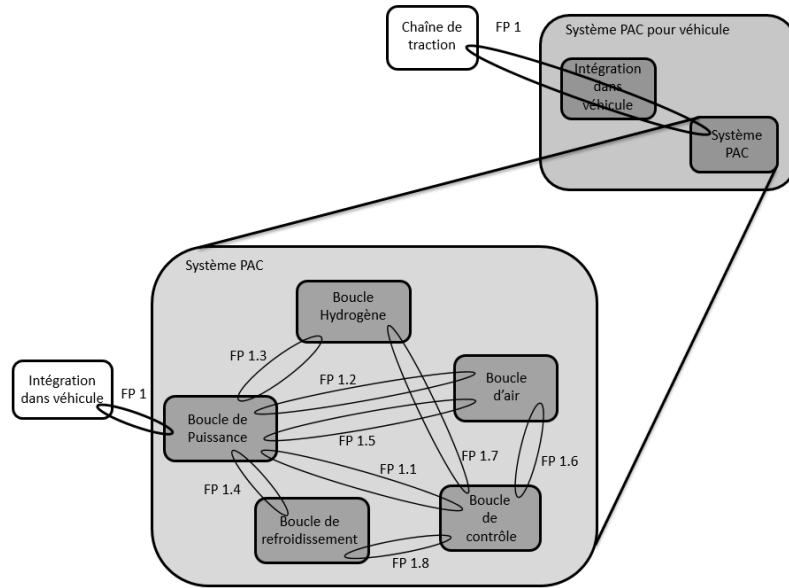


FIGURE 2.3 – Analyse du fonctionnement d’un système PAC répondant à la fonction FP1

portement dynamique du système au niveau global est détaillée en dernière partie de ce chapitre. Une analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité évalue les défaillances sur les sous-systèmes et composants du système et permet de les classer par ordre de criticité.

2.1.3 Analyse des dysfonctionnements d’un système à pile à combustible

Ayant défini et fixé les fonctions auxquelles le système doit répondre et comment il y répond, nous pouvons étudier les sources (causes) d’une cessation d’aptitude du système à remplir une fonction ainsi que les conséquences (effets) que cette cessation d’aptitude pourrait avoir. Deux grandes familles d’analyses sont couramment utilisées. Certaines sont inductives (telle que les analyses HAZOP ou encore les analyses des modes de défaillances (AMDEC) utilisées dans notre étude) et d’autres sont déductives (telle que l’analyse par arbre de défaillance). L’analyse inductive permet d’identifier les effets des défaillances. Dans le cas d’un système présentant différents états de fonctionnement, l’analyse par réseau de Pétri est particulièrement adapté. Elle présente l’avantage de modéliser le fonctionnement et le dysfonctionnement du système. L’analyse déductive, quant à elle, identifie les causes d’un évènement redouté [Veseley and Goldberg, 1981].

2.1.3.1 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC)

Nous proposons de réaliser une analyse de modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités car elle est d’une part largement répandue, elle est normée (NF EN

60812 :2006), rapidement assimilable par les participants. L'AMDEC est une démarche inductive c'est la raison pour laquelle elle nécessite une implication des différents experts en charge de la conception du système.

L'AMDEC identifie et évalue comment le système peut ne pas répondre aux fonctions identifiées dans l'analyse fonctionnelle (mode de défaillance). L'analyse AMDEC liste de manière exhaustive l'ensemble des défaillances du système.

1) Le bénéfice « projet » de l'AMDEC :

Au delà de l'objectif principal d'identifier les points faibles d'un système, un travail d'AMDEC, par le travail de groupe, oblige et contraint les différents experts à avoir le même niveau de connaissance du système et ainsi évite le risque de « sectoriser » le système. Autrement dit le travail d'AMDEC est une occasion pour les différents experts travaillant sur le même système à ne pas se cantonner chacun dans leur domaine d'expertise mais rappelle à chacun les objectifs communs du système pour pouvoir converger ensemble vers une solution réalisant ces objectifs.

2) Les objectifs « système » de l'AMDEC produit :

Il est avant tout nécessaire de préciser différentes orientations d'AMDEC ayant des objectifs différents, parmi lesquelles nous distinguons les suivantes :

L'AMDEC « Projet » vise à analyser les risques d'un projet dans sa globalité. Il s'agit d'un travail permanent tout au long d'un projet.

L'AMDEC « Produit »/« Système » a pour objectifs d'assurer la fiabilité d'un produit/système en améliorant sa conception. Elle est alors réalisée lors de la conception du produit. Il s'agit de l'orientation de l'AMDEC utilisée dans cette étude.

L'AMDEC « Processus » participe à l'assurance de la qualité d'un produit en améliorant les opérations de production de celui-ci. Ce travail est réalisé lors de la phase de développement du produit.

Enfin, l'AMDEC « Moyen », quant à elle, permet d'assurer la disponibilité et la sécurité d'un moyen de production en améliorant la conception, l'exploitation ou la maintenance de celui-ci. Elle est donc réalisée lors de l'industrialisation du produit.

L'AMDEC « Produit » (ou « Système ») qui est réalisée pour cette étude permet d'identifier les faiblesses potentielles du système : modes vraisemblables de défaillance, causes possibles pour chaque mode, effets de chaque défaillance selon la phase de la mission ou du cycle de vie dans laquelle elle se produit. L'AMDEC dit « Système » (ou fonctionnelle) et l'AMDEC dit « Produit » sont souvent distinguées. Il s'agit en réalité d'une différence de niveau d'analyse comme présenté en figure 2.4. Un des risques de l'utilisation de l'outil d'AMDEC est d'être chronophage si elle est réalisée sans respecter l'homogénéité du niveau d'analyse fixé. De plus, la réalisation de l'étude AMDEC niveau par niveau permet de mettre en évidence les liens de cause à effet de défaillances identifiées. Les arbres de défaillance liés à ce système, qui sont développés plus bas, s'appuient sur ces liens. D'autre part, la détermination de la criticité à chaque ligne de l'analyse a pour but de hiérarchiser les défaillances afin de ne considérer que les plus « critiques » pour la poursuite de l'étude.

	Fonction	Élément	Mode de défaillance	Effet	Cause
Niveau 0: système	Fonction du système venant de l'analyse fonctionnelle	Système	Mode de défaillance du système	Effet de cette défaillance	Modes de défaillance niveau -1
<i>Exemple</i>	<i>F1</i>	<i>Système</i>	<i>F1 non satisfaite</i>	<i>Effet 1</i>	<i>Défaillance sous-système X</i>
Niveau -1: sous-système	Fonction du système venant de l'analyse fonctionnelle	Sous-système du niveau -1	Mode de défaillance du sous-système niveau -1 = Cause niveau 0	Mode de défaillance du niveau 0	Modes de défaillance niveau -2
<i>Exemple</i>	<i>F1</i>	<i>Sous-système X</i>	<i>Défaillance sous-système X</i>	<i>F1 non satisfaite</i>	<i>Défaillance sous-système Y</i>
...					
Niveau -n: composant	Fonction du système venant de l'analyse fonctionnelle	Composant du niveau -n	Mode de défaillance du composant niveau -n = Cause niveau -n+1	Mode de défaillance du niveau -n+1	Causes de base de la défaillance du composant

FIGURE 2.4 – Les niveaux d’analyse de l’AMDEC issue de la norme NF EN 60812 2006

3) La réalisation d’une AMDEC sur un système à pile à combustible :

Un SPAC, étant un système complexe comprenant un grand nombre de composants, pour apporter un bénéfice aux concepteurs, l’AMDEC doit être conduite de manière ciblée et organisée. De telles analyses ont été réalisées, au cours de ces quatre dernières années, sur deux SPAC différents conçus par deux équipes distinctes, dans le cadre des projets F-City H2 et MOBILHyTest. L’expérience acquise permet de proposer, un programme de réalisation des AMDEC spécifiquement adapté aux SPAC. Il est conseillé de suivre l’ordre suivant :

Tout d’abord, l’AMDEC « produit » doit être réalisée sur la fonction principale correspondant à la réaction électrochimique de la PAC (FP 1.10, table 2.5). La recherche des effets et des causes de ces défaillances permet de préciser ou d’affiner les caractérisations des autres fonctions du système. En effet, lors d’une analyse fonctionnelle réalisée en phase de conception, la caractérisation de chacune des fonctions qui précise les indicateurs et leur niveaux, est généralement incomplète. L’AMDEC réalisée sur cette fonction soulève de nombreuses questions et oblige les concepteurs à préciser les autres fonctions du système qui y sont liées.

Ensuite l’AMDEC « système » soulève les problèmes d’intégration des SPAC. Elle est réalisée du niveau 0 jusqu’au niveau -n+1 (figure 2.4). C’est-à-dire jusqu’au niveau juste supérieur à celui du composant. Cette analyse permet d’affiner le choix des composants que le concepteur devra sélectionner auprès de ses fournisseurs. Elle apporte donc une aide à la spécification des exigences pour chacun d’eux.

Enfin une AMDEC axée sur les fonctions de sécurité du SPAC permet d’évaluer la pertinence des liens entre les stratégies de régulation et de détection pour la garantie de la conservation du niveau de sécurité déterminé pour le SPAC.

4) La mise en pratique de l’AMDEC « produit » :

La qualité de l’AMDEC dépend d’une part de la connaissance qu’ont les experts

du système mais également de la rigueur avec laquelle elle est conduite. La constance dans les propos et les cotations doivent être le maître mot. Dans cet esprit, le remplissage de la table s'effectue de gauche à droite en respectant un ordre précis afin d'éviter les confusions. Pour chaque fonction, les modes de défaillance sont d'abord listés. Puis pour chacun d'eux, les effets du mode de défaillance sont identifiés et une cotation leur est donnée. Ensuite pour chacun des effets, les causes du mode de défaillance menant à l'effet considéré sont listées et cotées. Enfin pour chaque cause, les moyens permettant de détecter le mode de défaillance sont recherchés et également cotés.

Notons qu'il est possible de poursuivre cette analyse en identifiant les actions préventives à réaliser pour éviter le mode de défaillance ainsi que la planification de leurs mises en œuvre. Cela est utile dans les cas où l'objectif est d'apporter des modifications du système en réponse directe à cette analyse permettant une seconde cotation jusqu'à un niveau acceptable préalablement explicité dans les objectifs.

La cotation évoquée des effets, des causes et des moyens de détection correspond respectivement aux indices de « Sévérité » (S), « Occurrence » (O), « Détection » (D) permettant de calculer l'indice « Criticité » (C) suivant (2.1) à chacune des lignes de l'analyse.

$$Criticite = Severite \times Occurrence \times Detection \quad (2.1)$$

Afin de garantir une cotation constante tout au long de l'analyse, pour chacun des 3 critères, une grille de cotation est fixée avant le début de l'analyse avec l'ensemble des experts. Un chiffre de 1 à 10 est attribué pour chacun d'eux selon une justification définie dans ces grilles.

2.1.3.2 Résultats de l'étude AMDEC

L'analyse AMDEC établit les liens de cause à effet des modes de défaillances identifiés. Ainsi l'AMDEC sert de base d'informations pour la construction des scénarios de défaillance des systèmes. K. Aström et al [Aström, 2007] ont également basé leur travaux d'analyse d'un SPAC sur une AMDEC. Les représentations en arbre de défaillances décrivent l'enchaînement de ces modes de défaillances identifiés en AMDEC et permettent d'estimer quantitativement l'apparition de ces dysfonctionnements. Les dysfonctionnements liés aux conditions vibratoires et climatiques sont des événements redoutés résultant de l'enchaînement de plusieurs modes de défaillances liés à l'architecture fonctionnelle du système.

De plus l'analyse AMDEC hiérarchise ces liens afin de concentrer la poursuite de l'étude sur les plus critiques par rapport à nos objectifs cités en début d'analyse. L'AMDEC réalisée sur le SPAC met en évidence les défaillances de résistance aux vibrations des éléments du SPAC.

2.1.3.3 Analyse par arbre de défaillances de l'explosion d'un système à pile à combustible

Une étude par arbre de défaillances permet de représenter graphiquement les causes d'un évènement redouté [Veseley and Goldberg, 1981] et [Rosyid, 2007] identifié que l'on souhaite maîtriser en priorité. Le soucis principal des utilisateurs vis-à-vis des SPAC est sécuritaire (figure 1.5). D'après l'analyse préliminaire des risques, le risque principal inacceptable est l'explosion du SPAC.

L'arbre de défaillance lié à un risque débute, dans ces premiers niveaux, par la représentation des scénarios identifiés en analyse préliminaire des risques. L'hydrogène, par ses caractéristiques intrinsèques est la principale source ([Hord, 1978] et [Najjar, 2013]). Dans un système à PAC, l'hydrogène est généralement stocké sous forme gazeux. Pour les applications de transport terrestre, la pression maximale à l'intérieur du réservoir embarqué est de 350 bars ou de 700 bars. Afin de modéliser les scénarios d'explosion d'un SPAC, cet évènement redouté peut être décomposé en deux évènements comme le montre les figures 2.5 et 2.6 : d'un côté la rupture du réservoir et d'un autre l'explosion due à une libération anormale d'hydrogène.

Le descriptif détaillé de ces arbres de défaillance ainsi que leurs exploitations quantitatives ne sont pas développés dans ce document mais sont présentés par S.Collong et R.Kouta [Collong and Kouta, 2015].

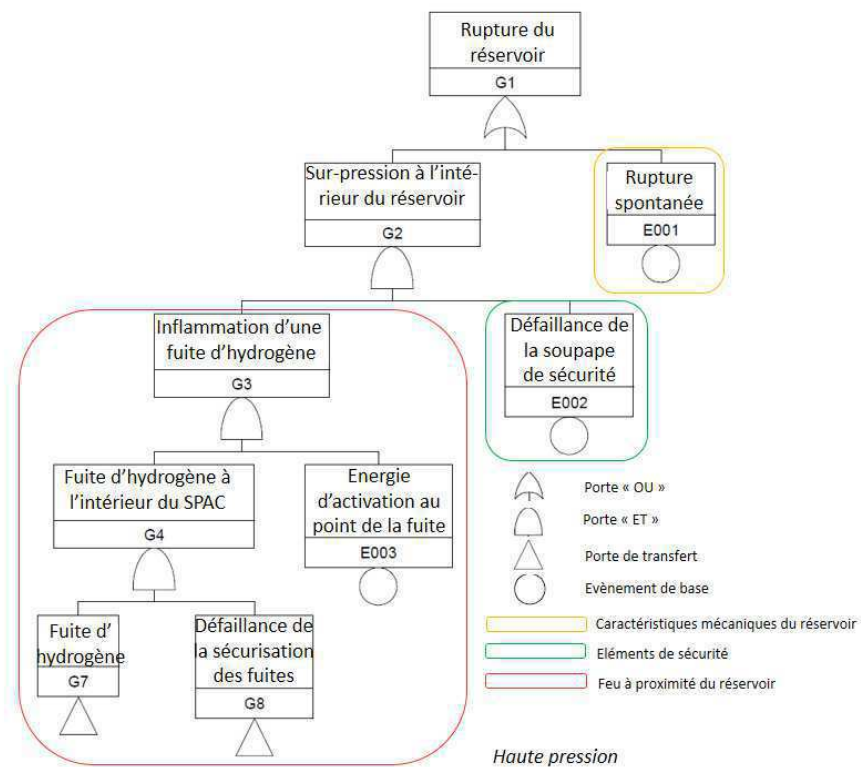


FIGURE 2.5 – Arbre de défaillance de l'évènement redouté « Rupture du réservoir »

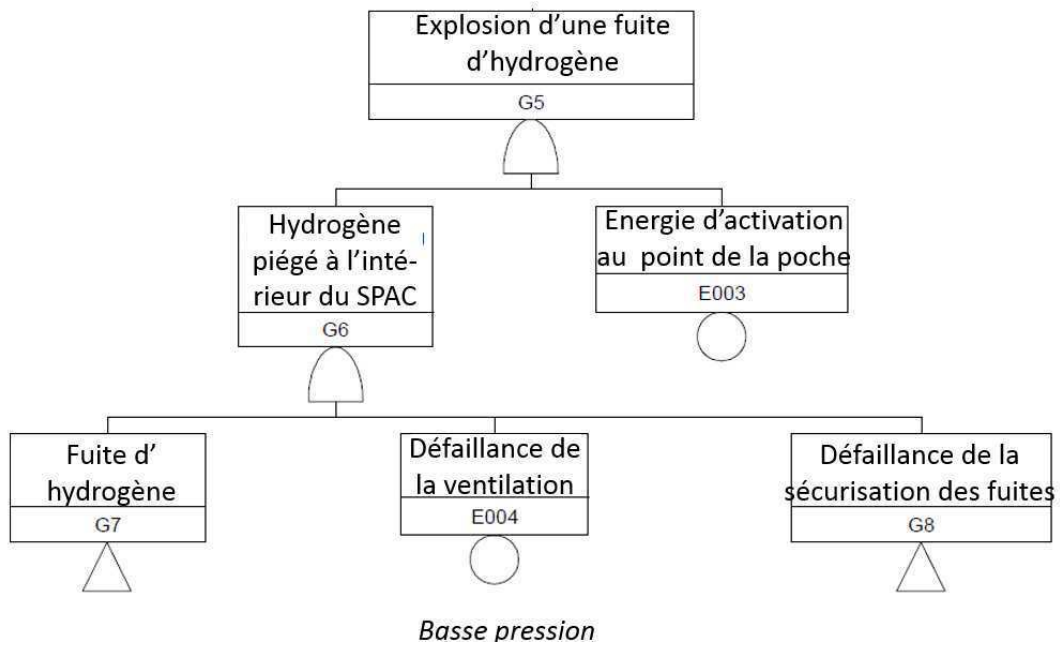


FIGURE 2.6 – Arbre de défaillance de l'évènement redouté « Explosion due à une libération anormale d'hydrogène »

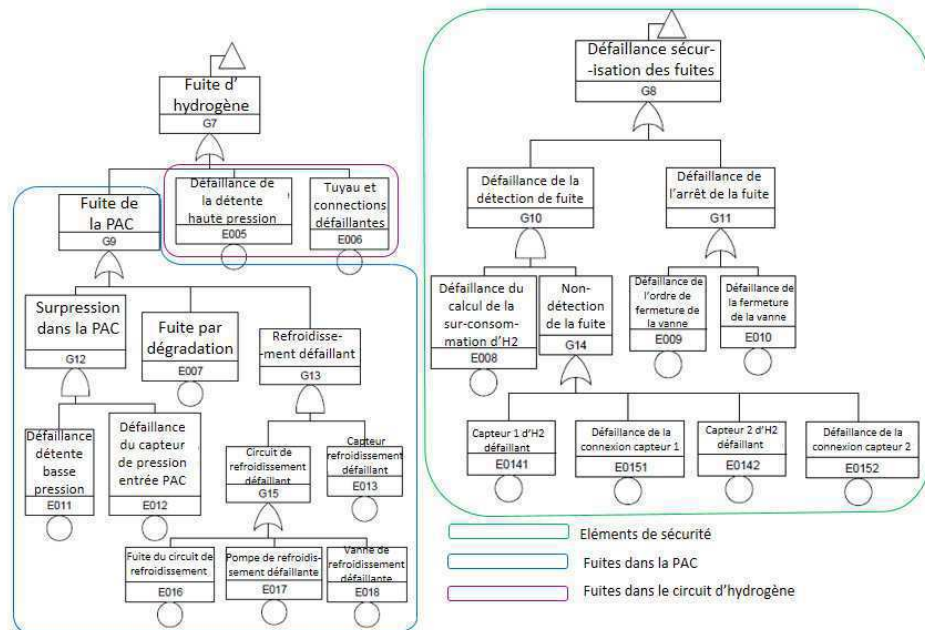


FIGURE 2.7 – Sous arbres de défaillance

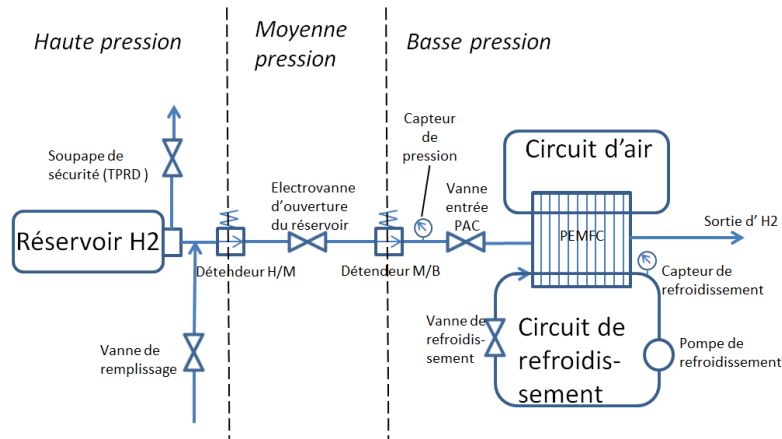


FIGURE 2.8 – Schématisation du circuit d'hydrogène dans un SPAC

La première partie concerne la haute pression du circuit d'hydrogène, l'autre concerne les parties moyenne et basse pressions du circuit, comme le présente la figure 2.8. En effet les quantités d'hydrogène mises en jeu étant très différentes, les énergies libérées lors des explosions, et donc les conséquences ne sont pas de la même échelle [Rodionov et al., 2011]. Cette première analyse permet de concevoir les SPAC en suivant trois principes face à la gestion de l'hydrogène. Tout d'abord, les fuites doivent être évitées. Puis, tout dégagement d'hydrogène est ventilé. Enfin, toute concentration d'hydrogène dépassant un seuil défini doit être détectée.

L'hydrogène est détendu pour être acheminé à une pression inférieure à 20 bars pour être à nouveau détendu à l'entrée de la PAC à une pression d'environ 2 à 5 bars selon la conception. L'hydrogène non consommé par la PAC est évacué par un circuit d'échappement. Une soupape de sécurité mécanique (non commandée) protège le réservoir contre les surpressions et sur-températures. Ces situations de sur-pression et sur-température peuvent survenir dans le cas d'un remplissage trop rapide ou en sur-remplissage, mais également pendant les situations exceptionnelles telles que l'inflammation du véhicule. La figure 2.8 présente le circuit d'hydrogène dans un SPAC.

2.1.3.4 Conclusions de l'analyse dysfonctionnelle

Ces travaux d'analyses fonctionnelle et dysfonctionnelle ont été réalisés dans le cadre d'un premier projet (F-City H2). Elles ont pu être complétées et vérifiées dans le cadre d'un second (MOBILHyTEst). Elles sont ainsi issues de démarches cognitives partagées par deux groupes d'experts.

Ces analyses sont nécessaires pour l'étude de tous système complexe pour mettent en évidence, les composants critiques pour lesquelles une analyse approfondie du comportement dynamiques doit être engagée.

L'analyse des dysfonctionnements du SPAC suivant cette démarche permet de mettre en évidence les composants critiques suivant :

- Fixations du réservoir,
- Tuyau d'hydrogène entre le réservoir et la PAC,
- Capteur de présence d'hydrogène,
- Tête du réservoir.

La rupture de pièces mécaniques peuvent avoir pour causes un défaut de fabrication, ou encore la non résistance aux contraintes vibratoires et climatiques environnantes. Ainsi les analyses de sécurité sont liées aux analyses de fiabilité. Les études de fiabilité permettent d'apporter des réponses aux études de sécurité. L'impact des conditions vibratoires et climatiques sur la durée de vie de ces éléments du système nécessite donc des analyses approfondies.

La caractérisation des sollicitations vibratoires auxquelles sont soumis ces différents composants critiques est donc nécessaire à la fiabilisation de ces points vis à vis de la fonction de contrainte FC1 (Résister aux conditions d'environnement extérieur et intérieur véhicule).

2.2 Caractérisation des contraintes vibro-climatiques

Afin d'étudier le comportement dynamique du système face à son environnement réel, il est nécessaire de caractériser ce dernier. Le travail s'est focalisé sur les conditions vibratoires et climatiques dans lesquelles le SPAC étudié est destiné à fonctionner. Le paragraphe qui suit a pour objectif de définir cet environnement.

2.2.1 Démarche de personnalisation des essais

Depuis les années 80, la notion de personnalisation des essais est prise en compte afin d'élaborer les spécifications d'essais à partir de mesures d'environnement réel. Cette démarche est préconisée dans les normes, notamment les normes MIL-STD 810 G et GAM EG 13, dont les domaines d'applications sont essentiellement militaires. La norme MIL-STD 810 G est publiée par le Ministère de la Défense des Etats-Unis. La norme GAM EG 13 (Guerre Air Mer – Environnement Général -13) est publiée par le ministère de la défense de la République française. Elle développe le principe de personnalisation des essais généraux en environnement des matériels. La norme GAM-EG-13 n'est pas maintenue, au profit de la STANAG 4370. La norme STANAG 4370 (STANdardisation Agreement 4370) est publiée en 1994 par l'OTAN. Son domaine d'application reste encore militaire.

On peut citer également la norme CIN-EG-1 (Commission Interarmées de Normalisation – Environnement Général - 01). Elle est datée de mai 1999 et est définie comme une norme française du ministère de la défense. Cette publication constitue un « guide pour la prise en compte de l'environnemental dans un programme d'armement ». Il s'agit d'une mise à jour de la GAM-EG-13 écrite en 1986, en fonction de la publication plus récente de la STANAG 4370. Cette norme peut être utilisée en tant que document de mise en œuvre du fascicule AECTP 100 de la STANAG 4370 dans le cadre de programmes européens et internationaux.

L'objectif du fascicule AECTP 100 est de guider les spécialistes dans le déroulement d'essais en environnement. La fonction première est de fournir la démarche afin de mettre en application les AECTP suivantes. Ce guide préconise alors une démarche permettant de choisir quels essais sont les plus à même de certifier, avec robustesse, les systèmes à tester. Cela permet de pouvoir justifier la nécessité des essais et de les personnaliser en fonction du profil de vie particulier du matériel. Les étapes de ce management d'essais sont :

- 1) Plan de management général en environnement
- 2) Profil de cycle de vie en environnement
- 3) Critères de conception en environnement
- 4) Spécifications d'essai
- 5) Instruction d'essai
- 6) Essai de qualification
- 7) Rapport d'essai

Le contenu de la CIN-EG-1 n'apporte pas de nouveauté par rapport à la GAM-EG-13 et la STANAG 4370.

Les documents PR NORMDEF 01-01 (2009) et PR ASTE 01-02(2010) appartiennent à une unique norme NORMDEF (Norme de défense) rédigée par la CIN EG (Commission interarmées de normalisation en environnement général) et diffusée par l'ASTE (Association pour le développement des Sciences et Techniques de l' Environnement). Il s'agit de guides d'application de la démarche de personnalisation en environnement, respectivement, mécanique et climatique.

Ces guides expliquent la mise en oeuvre de la démarche de personnalisation en environnement mécanique et climatique. Il vient en appui à l'utilisation de la norme STANAG 4370 qui couvre les publications sur les conditions d'essais en environnement. On retiendra cependant que seule la STANAG a un rayonnement international parmi ces normes. En effet les GAM-EG-13, CIN-EG-1 et NORMDEF sont utilisées par les services français uniquement car elles n'ont pas eu d'acceptation internationale pour l'heure.

La démarche de personnalisation des essais définit 4 étapes :

- Analyse du profil de vie,
- Recherche des données de l'environnement réel,
- Traitement et synthèse de ces données,
- Définition du programme d'essais.

Les trois premiers points sont développés dans ce chapitre. Le dernier point sera présenté dans le chapitre 4. En effet, alors que les conditions réelles d'usage doivent être déterminées pour concevoir le SPAC en les prenant en compte, les essais et leur programmation n'ont de sens qu'une fois que le système est fabriqué.

• **Analyse du profil de vie :**

Comme présenté dans le chapitre 1, un enchaînement de « tronçons » constituent un « profil de mission ». Et plusieurs profils de mission réalisent ensemble une « ligne de vie ». Définissons un « tronçon » comme étant un type de route parcourue sur une distance définie et pendant un temps défini. Un tronçon peut par exemple être 2 km de pavés belges parcourus en 3 minutes. L'analyse du profil de vie est qualitative. Elle répertorie les étapes de la vie du système étudié de manière hiérarchique (ligne de vie, profil de mission,

tronçon). Elle associe, à ces étapes, les agents d'environnement (climatique, mécanique, électromagnétique, ou chimique) qui impactent le système en précisant les durées des différentes situations. Notre étude se limite aux agents d'environnement climatique et mécanique. Ainsi, l'analyse du profil de vie s'appuie sur l'étude du cycle de vie du système réalisée en analyse fonctionnelle (tables 2.1 et 2.2). L'étude menée se cantonne à l'usage standard du SPAC, ainsi les sollicitations liées par exemple à la manutention, au stockage ou au transport du système ne sont pas prises en compte.

Une fois le profil de vie établi, l'étape suivante consiste à rechercher les données de l'environnement réel correspondantes. Les données climatiques et vibratoires étant collectées et traitées de manière différente, l'évaluation de ces données est faite séparément dans cette étude.

2.2.2 Évaluation de l'environnement vibratoire

2.2.2.1 Recherche des données de l'environnement réel

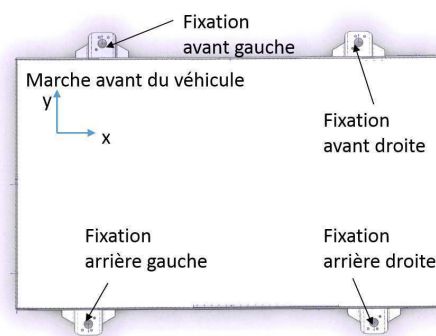
L'environnement vibratoire est constitué notamment par des sollicitations vibratoires agissant localement en un certain nombre de points déterminés du système mécanique. Le mouvement que provoquent ces sollicitations en ces points est caractérisé par l'accélération selon les trois directions d'un repère orthonormé : a_x , a_y , a_z . L'orientation du système dans le repère formé par les trois directions est présenté sur la figure 2.9 :

- x est la direction latérale au véhicule
- y correspond au sens de marche de celui-ci
- z est la direction verticale

Nous caractérisons l'environnement du SPAC étudié par l'intermédiaire du véhicule dans lequel il est implanté. Le SPAC est fixé au châssis du véhicule par quatre liaisons. C'est la connaissance des accélérations en ces quatre points qui permet de décrire l'environnement vibratoire du SPAC. La figure 2.9 montre la position des accéléromètres sur les quatre supports de fixation au châssis du véhicule.



(a) Emplacement du SPAC



(b) 4 accéléromètres sur supports de fixations du SPAC

FIGURE 2.9 – Positionnement des accéléromètres sur le véhicule

Pour coller au plus près de l’environnement vibratoire réel, ces accélérations doivent refléter les sollicitations correspondant au profil de vie déterminé précédemment suite à l’analyse de l’utilisation du véhicule qui sera faite par les individus.

Les vitesses moyennes instantanées varient en fonction de la description du tronçon. Dans le chapitre 1, il a été constaté un écart important entre différents résultats d’estimation de vitesses instantanées moyennes (38,5 km/h en milieu rural profond d’après [Gallez et al., 1997] et 47 km/h en ville, 82 km/h sur réseau secondaire, 101 km/h sur deux fois deux voies et 118 km/h sur autoroute d’après [ONISR, 2013]). Cet écart ne permet pas caractériser de façon précise la vitesse instantanée moyenne sur chacun des parcours types étudiés. Un choix est cependant nécessaire pour réaliser les essais sur piste pour l’enregistrement des sollicitation. Une vitesse de 50 km/h semble raisonnablement appropriée à l’évaluation d’un environnement pour un parcours de type routier et autoroutier, et une vitesse de 20 km/h pour un parcours de type citadin. Une recherche plus approfondie de ces valeurs de vitesses instantanées moyennes serait cependant nécessaire pour affiner ces résultats. La table 2.6 résume les essais effectués.

N°	Description	Vitesse [km/h]
1	Bruit de fond capteurs et mise en route du SPAC	0
2	1 aller retour sur piste bosselée	50
3	Descente route pavée + gravats	20
4	Montée route pavées + plaques métalliques	20
5	Route standard	50
6	Cercle lisse de rayon 42 m	45
7	Cercle bosselé de rayon 46 m	45

TABLE 2.6 – Essais sur piste effectués pour l’enregistrement des sollicitations aux fixations du SPAC

2.2.2.2 Traitement des données vibratoires

Nous débutons notre analyse par la validation des signaux enregistrés sur route à Ladoux afin de sélectionner les données exploitables et susceptibles d’être reproduites sur table vibrante à Belfort. Pour réaliser cette validation, nous étudions chacune des 12 voix d’enregistrements après un traitement des données suivie d’une analyse fréquentielle.

La réponse vibratoire, en Volt, est enregistrée dans le temps. Les capteurs utilisés sont calibrés en V/g permettant de convertir la mesure accélération.

Les données étant enregistrées à une fréquence d’échantillonnage ($f_{\text{échantillonnage}}$) de 4000 Hz pendant une durée (T) d’environ 900 secondes, le nombre de données (n) enregistrées par voie est $f_{\text{échantillonnage}} \times T + 1$ soit l’ordre de 3 600 000.

Nous nous conformons à l’habitude de choisir comme unité d’accélération «g» et non « ms^{-2} » (unité du système international) ($1g = 9,81ms^{-2}$).

1) Les types de signaux :

Les signaux peuvent être *déterministes* ou bien aléatoires. Les signaux vibratoires déterministes sont généralement de type périodique.

Les signaux périodiques :

Les signaux dit déterministes sont connus dans le temps. Ils peuvent être décrits mathématiquement. Un signal $s(t)$ est périodique s'il existe un $T > 0$ tel que :

$$s(t) = s(t + kT) , \forall k \text{ nombre entier} \quad (2.2)$$

T (exprimé en [s]) est la période du signal, et $f = 1/T$ (exprimé en [Hz]), est sa fréquence.

Les signaux aléatoires à moyenne nulle :

Ces signaux sont imprévisibles dans le temps. La valeur de l'amplitude du signal ainsi que sa phase, sont des variables aléatoires du temps. Ce type de signal constitue un *processus aléatoire* (également nommé *processus stochastique*).

Dans ce document, l'environnement vibratoire réel est considéré comme aléatoire. Les vibrations aléatoires subies par le système peuvent être caractérisées en reprenant la description d'une variable aléatoire présentée au chapitre 1.

L'environnement vibratoire est mesuré en terme d'accélération $a_d(t)$ dans une des trois directions $d : a_x(t), a_y(t), a_z(t)$, sur une fenêtre d'observation donnée $[0; D]$.

Par convention, un signal aléatoire est considéré comme un signal à puissance moyenne fini. Sa puissance est calculée, sur l'intervalle T par l'équation :

$$P_T = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |a_d^2(t)| dt \quad (2.3)$$

L'ensemble des signaux aléatoires analysés dans la suite de l'étude sont centrées autour d'une moyenne nulle. Ainsi :

$$\text{moyenne} = \mu_{a_d(1)} = E[a_d] = \int_0^{+\infty} a_d f_{a_d}(t) dt = 0 \quad (2.4)$$

On en déduit sa *variance* (S^2), exprimée en $[g^2]$:

$$\text{variance} = S^2 = \mu'_{a_d(2)} = E[a_d^2] \quad (2.5)$$

Dans le cas d'une variable aléatoire de moyenne nulle, la *variance* caractérise la *puissance* du signal [Lacoume et al., 1997]. Cette notion de puissance sera plus détaillée dans la suite de ce chapitre.

L'écart-type (σ), exprimé en $[g_{RMS}]$ vaut donc :

$$\sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{E[a_d^2]} \quad (2.6)$$

Notons dès à présent que σ définit la « valeur efficace » du signal d'accélération $a_{def} = \sigma = a_{dRMS}$ correspond à la « valeur RMS » (*Root Mean Square*).

La figure 2.10 présente le signal temporel enregistré par un accéléromètre placé sur la fixation avant gauche du SPAC lors du passage sur une piste pavée avec des plaques métalliques intégrées.

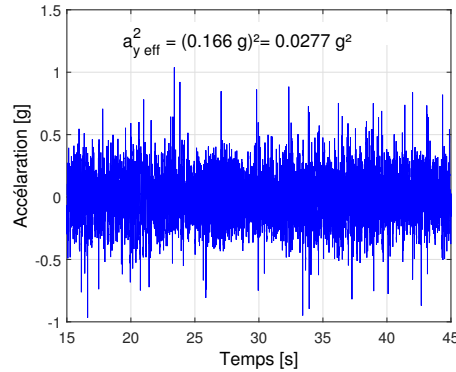


FIGURE 2.10 – Signal enregistré sur la fixation avant gauche dans la direction y du système PAC lors du passage sur une route pavée+plaque métallique

Lorsque la moyenne de la variable est nulle, les expressions des cumulants se simplifient. Ainsi pour les 4 premiers ordres :

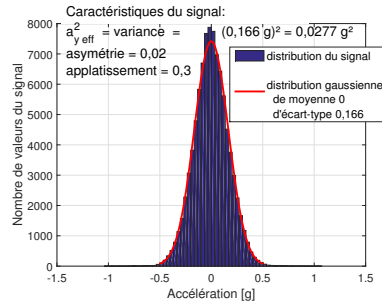
$$\begin{aligned}
 \kappa_{x(1)} &= 0 \\
 \kappa_{x(2)} &= E[a_d^2] \\
 \kappa_{x(3)} &= E[a_d^3] \\
 \kappa_{x(4)} &= E[a_d^4] - 3E[a_d^2]^2
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Cas particulier des signaux aléatoires gaussien :

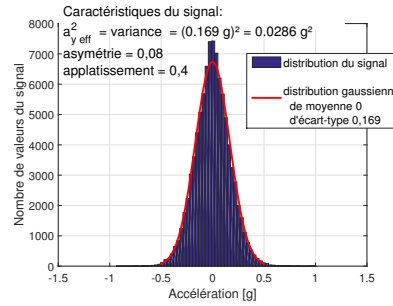
La variable aléatoire a_d suit une loi « gaussienne »(ou loi normale) de moyenne $\mu_{a_d(1)}$ et d'écart-type σ si elle admet une densité de probabilité $f_{a_d}(t)$ définie, pour tout t du signal, par :

$$f_{a_d}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \mu_{a_d(1)}}{\sigma}\right)^2} \tag{2.8}$$

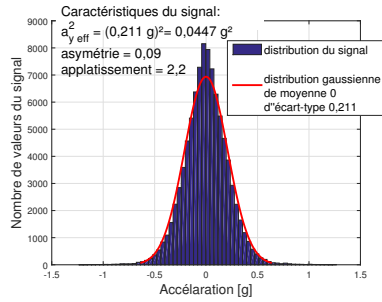
Dans ce cas ,la variable aléatoire a la particularité d'avoir des cumulants d'ordre supérieur à 2 nuls [Lacoume et al., 1997],[Kagan et al., 1973]. En effet la loi gaussienne est symétrique autour de la moyenne et son kurtosis est égale à 3. Les signaux d'accélération étudiés dans l'ensemble de ce document sont considérés comme étant gaussiens. En effet, lorsqu'un signal résulte de l'action indépendante de différents facteurs physiques, il est généralement considéré comme gaussien (théorème central-limite). La figure 2.11 présente les histogrammes de la distribution des signaux aux 4 fixations du SPAC. Ces signaux ont été enregistrés lors du passage du véhicule sur une route pavée avec plaques métalliques pendant une durée de 46 secondes. On constate que les histogrammes suivent, sur chacune des quatre fixations, une distribution gaussienne.



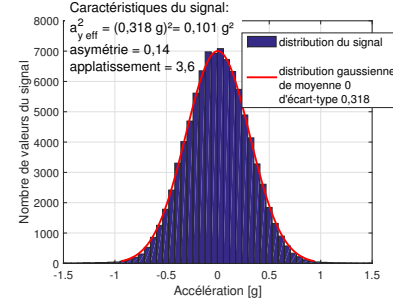
(a) Distribution du signal fixation avant gauche



(b) Distribution du signal fixation avant droite



(c) Distribution du signal fixation arrière gauche



(d) Distribution du signal fixation arrière droite

FIGURE 2.11 – Histogramme de répartition des signaux enregistrés sur les fixations du système PAC lors du passage sur une route pavée avec plaques métalliques

2) Propriétés des signaux :

La stationnarité :

On dit qu'un signal est stationnaire si ses caractéristiques statistiques sont invariantes dans le temps, c'est-à-dire que tous les moments sont indépendants du temps. Un signal est stationnaire à l'ordre n si ses caractéristiques jusqu'à l'ordre n sont invariantes dans le temps. Les signaux aléatoires analysés dans cette étude sont considérés comme stationnaires à l'ordre 2. C'est-à-dire que leur moyenne et leur variance sont indépendantes du temps.

L'ergodisme :

Un signal est ergotique, sur une fenêtre d'observation donnée $[0; D]$, si ses moments temporels sont certains (peuvent être déterminés avec certitude); c'est-à-dire si ses moments statistiques peuvent être estimés par ses moments temporels sur cette fenêtre. Les signaux aléatoires analysés dans cette étude sont considérés comme ergotiques sur les fenêtres d'observation précisées. Cette hypothèse permet d'utiliser les caractérisations statistiques des variables aléatoires pour décrire les processus issus des conditions réelles d'usage. Rappelons que les moments temporels calculés sur une seule réalisation, sur une fenêtre d'observation donnée, d'un processus aléatoire sont considérés identiques aux moments globaux qui seraient calculés sur un ensemble n tendant vers l'infini de réalisations du processus. Cette hypothèse est admise car, dans la pratique, généralement une seule

réalisation est disponible.

Ainsi

$$\mu_{a_d(1)} = E[a_d] = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{D} \int_0^D a_d(t) dt \quad (2.9)$$

et

$$S_{a_d}^2 = \mu'_{a_d(2)} = E[a_d^2] = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{D} \int_0^D a_d^2(t) dt \quad (2.10)$$

Ainsi, d'après (2.3), la puissance du signal sur toute la fenêtre d'observation est égale à sa variance :

$$P_D = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{D} \int_0^D a_d^2(t) dt = S_{a_d}^2 = a_{dRMS}^2 \quad (2.11)$$

3) La notion de corrélation :

La corrélation permet d'analyser la dépendance de signaux connus par leur évolution temporelle. En effet, elle met en relief les points communs des deux signaux. Si deux signaux sont totalement indépendants, leur corrélation est toujours nulle. La corrélation entre deux signaux stationnaires $v(t)$ et $w(t)$ est définie par (2.12) ou encore par (2.13) lorsque les signaux sont ergotiques.

$$R_{vw}(\tau) = E\{[v(t)(w(t + \tau))]\} \quad (2.12)$$

$$R_{vw}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t)w(t + \tau) dt \quad (2.13)$$

On distingue deux sortes de corrélation : la corrélation croisée (2.13) (ou inter-corrélation) qui concerne deux signaux différents et l'auto-corrélation (2.18).

Lien avec la covariance La variance (S^2) d'un signal $w(t)$ étant le moment centré d'ordre 2 ; avec $\mu_{w(1)}$ (moment centré d'ordre 1) la moyenne du signal, la variance est définie par (2.14) :

$$S_{w(t)}^2 = E\{[w(t) - \mu_{w(1)}]^2\} \quad (2.14)$$

La Co-variance est définie par :

$$C_{vw}(\tau) = E\{[v(t) - \mu_{v(1)}][w(t + \tau) - \mu_{w(1)}]\} \quad (2.15)$$

Pour un signal centré sur sa moyenne, on obtient (2.16) :

$$C_{vw}(\tau) = R_{vw}(\tau) \quad (2.16)$$

L'auto-corrélation :

L'auto-corrélation évalue ainsi la variation du signal dans le temps. Pour les signaux aléatoires stationnaires, tel que le signal $a_d(t)$, elle est définie par (2.17).

$$R_{a_d a_d}(\tau) = E\{[a_d(t)(a_d(t + \tau))]\} \quad (2.17)$$

Les signaux étant considérés ergotiques, la fonction d'auto-corrélation est décrite par l'équation (2.18) [Labarrere et al., 1978].

$$R_{a_d a_d}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_0^T a_d(t + \tau) a_d(t) dt \quad (2.18)$$

Ainsi, la puissance du signal sur l'intervalle $[0;T]$ est égale à l'auto-corrélation pour $\tau = 0$:

$$R_{a_d a_d}(0) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_0^T a_d^2(t) dt = P_T \quad (2.19)$$

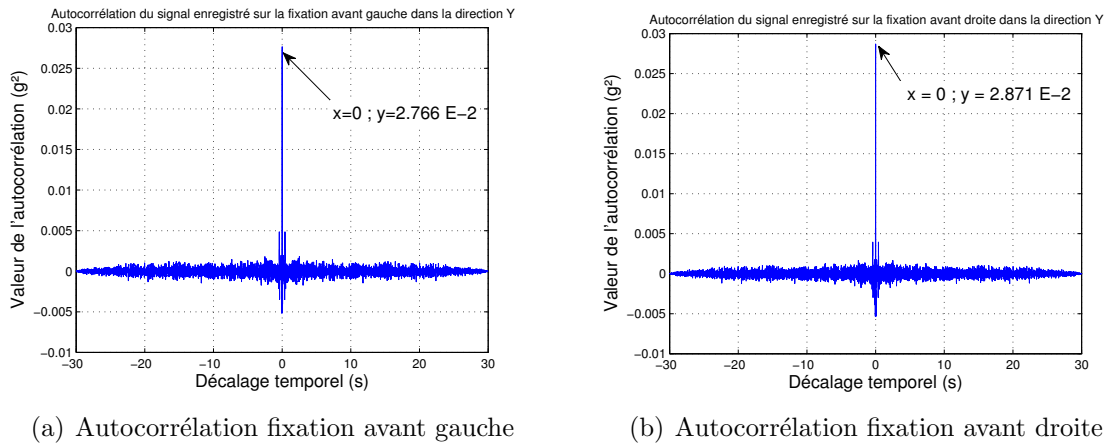


FIGURE 2.12 – Autocorrélations des signaux enregistrés sur les fixations du système PAC lors du passage sur une route pavée+plaques métalliques

Prenons l'exemple des accélérations dans le sens de la marche du véhicule (axe y) sur les fixations, respectivement, avant gauche et avant droite du SPAC mesurées, lors du passage sur une route pavée avec plaques métalliques, et pendant une durée de 30 secondes. La figure 2.12 présente les auto-corrélations de ces deux signaux.

Les maximums des auto-corrélations, lorsque τ est égal à zéro, sont égaux aux carrés des valeurs efficaces des signaux, comme le montre la figure 2.12.

L'inter-corrélation permet de mettre en évidence la correspondance de deux signaux dans le temps. Ainsi, l'inter-corrélation des réponses sur ces deux fixations peut être utilisée dans le but de mesurer les variations de comportement entre deux fixations du système étudié. La figure 2.13 représente l'auto-corrélation du signal enregistré sur la fixation avant gauche à laquelle est soustrait l'inter-corrélation des réponses aux deux fixations. Ceci permet de mettre en évidence que la part de 10% de la réponse avant

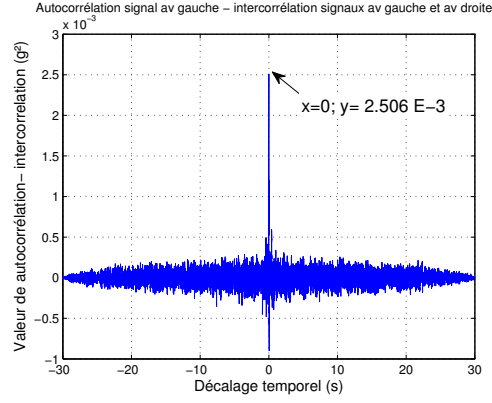


FIGURE 2.13 – Auto-corrélation de la réponse de la fixation avant gauche moins l’inter-corrélation des réponses sur les deux fixations (avant gauche et avant droite)

gauche non corrélée avec la réponse en avant droite. Ce résultat permet de conclure que les réponses de ces deux fixations sont bien corrélées.

4) La transformée de Fourier :

Soit une fonction bornée $f(t)$. Sa transformée de Fourier (TF) est définie par :

$$\Phi_f(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.20)$$

Ainsi, pour le signal d’accélération (en [g]) définie positive sur l’intervalle $[0;T]$ par la fonction $a_d(t)$, cette fonction est bornée et sa TF est définie par :

$$\Phi_{a_d}(j\omega) = \int_0^T a_d(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.21)$$

5) La formule de Parseval :

L’énergie totale W s’exprime dans le domaine fréquentiel par la formule de *Parseval* :

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi_f(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.22)$$

Cette égalité assure la conservation de l’énergie dans les représentations du signal en temps et en fréquence.

Et, en appliquant la formule de *Parseval* sur $[0;D]$ [Labarrere et al., 1978],

$$P_D = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{D} \int_{-\infty}^{+\infty} f_D^2(t)dt = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Phi_{f_D}(j\omega)|^2}{D} d\omega \quad (2.23)$$

Sur la bande de fréquence $[\omega_1, \omega_2]$, la puissance moyenne est la puissance totale de la sortie d'un filtre passe-bande $[\omega_1, \omega_2]$:

$$P_{\omega_1, \omega_2} = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|\Phi_{f_D}(j\omega)|^2}{D} d\omega \quad (2.24)$$

6) La densité spectrale de puissance :

Le traitement fréquentiel de ces signaux permet de répartir la puissance $[g^2]$ selon la fréquence $[Hz]$ (*Power Spectral Density matrix* souvent notée PSD).

Pour un signal f de puissance fini ($P_f = R_{ff}(0)$), la densité spectrale de puissance (DSP, en anglais : *Power Spectral Density matrix*(PSD)) est définie, d'après le théorème de *Winer-Kintchine*, par la transformée de *Fourier* de la fonction d'auto-corrélation [Labarrere et al., 1978] :

$$\Phi_f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_{ff}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.25)$$

Inversement,

$$\mathbf{R}_{ff}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{ff}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.26)$$

Elle peut également être déterminée par d'autres méthodes [Lalanne, 1999a] :

- En déterminant la moyenne des carrés des modules de la TF de plusieurs échantillons (*blocs*) du signal, divisée par sa longueur.
- Par le carré de la valeur efficace de la réponse d'un filtre rectangulaire, divisé par la largeur du filtre.

Ainsi, pour une accélération enregistrée, dans la direction d pendant une durée D ,

$$\Phi_{a_d}(\omega) = \int_0^D \mathbf{R}_{a_d a_d}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.27)$$

avec

$$R_{a_d a_d}(\tau) = \frac{1}{D} \int_0^{D-\tau} a_d(t) a_d(t + \tau) dt \quad (2.28)$$

Par ailleurs, la puissance d'un signal discret est la somme, par bandes de fréquences, des amplitudes de la DSP (a_{DSP}) multipliées par la fenêtre de fréquences (2.29), en admettant que sur la bande de fréquence Δf_i , l'amplitude de la densité spectrale de puissance est constante :

$$P_D = \sum_{i=1}^N a_{DSP_i} \Delta f_i \quad (2.29)$$

Avec N le nombre de points de la densité spectrale de puissance.

7) Constitution du spectre fréquentiel représentatif des enregistrements :

A présent nous savons que chacune des 4 fixations est soumise à un même spectre vibratoire. Nous souhaitons maintenant le définir de manière précise sur la base des enregistrements réalisés afin que le spectre retenu représentatif.

Le but est de reproduire sur plateforme vibro-climatique les enregistrements réalisés sur différentes pistes de revêtements différents dans un même et unique spectre des fréquences. C'est ainsi que l'ensemble des sollicitations rencontrées sur piste vont pouvoir être représentées.

De plus, l'enregistrement est réalisé selon les 3 directions de l'espace x , y et z . La plateforme vibratoire ne pouvant réaliser des sollicitations que dans une seule direction à la fois, la création du spectre représentatif se fait dans chacune des directions.

La principale difficulté rencontrée lors de la personnalisation des essais à partir d'un profil de vie identifié est de déterminer la DSP représentative de l'ensemble des enregistrements pour différents types de route. Il existe deux façons classiques de faire :

- Par la détermination de l'enveloppe des DSP correspondantes aux différents enregistrements,
- Par l'endommagement total de chacun de ces signaux vibratoires.

Chacune de ces deux méthodes présente des avantages et des inconvénients qui sont présentés dans la norme NORMDEF [NORMDEF-0101, 2009]. La seconde méthode est largement développée par C. Lalanne [Lalanne, 1999c]. Bien que moins précise et moins reproductible que la méthode de l'endommagement, la méthode de l'enveloppe des DSP a été choisie dans cette étude pour sa facilité de mise en œuvre. Le critère de précision n'est pas primordial à cet endroit de l'étude. En effet, cette étude vise à accompagner la conception d'un système. Ainsi la création de cette DSP représentative des conditions réelles d'usage n'est pas déterminée pour la création des spécifications d'essais de validation (pour lesquelles la seconde méthode est plus adaptée). Pour ces mêmes raisons, la reproductibilité n'est pas non plus un critère recherché.

La méthodologie utilisée est la suivante :

- Pour chacun des n essais correspondant aux tronçons (table 2.6), à chaque valeur de fréquence, le maximum des amplitudes des densités spectrales de puissance (des signaux enregistrés aux fixations) est retenu.
- Les n courbes des maximums d'amplitude de densité spectrale de puissance sont superposées en fonction de la fréquence.
- L'enveloppe de ces n courbes est dessinée en relevant une vingtaine de points (dans la plage de fréquences des sollicitations du transport routier ([NORMDEF-0101, 2009])).

La figure 2.14 présente les DSP représentatives de l'ensemble des sollicitations réelles aux fixations du SPAC. Les sollicitations dont la fréquence est inférieure à 6 Hz ne sont pas exploitées car les capteurs utilisés ne sont pas calibrés pour ces fréquences inférieures. Par ailleurs, les sollicitations de fréquences supérieures à 200 Hz ne sont pas non plus représentées car les amplitudes de la DPS sont inférieures à $1.10^{-5}[g^2/Hz]$. Le domaine fréquentiel [6-200] Hz représente plus de 80% de la puissance totale moyenne du signal enregistré par les capteurs dans leur plage de fonctionnement. Remarquons que ce résultat est cohérent avec les préconisations de la norme ISO 13355-2015 qui considère un domaine fréquentiel de 10 à 200 Hz pour les sollicitations d'un transport routier.

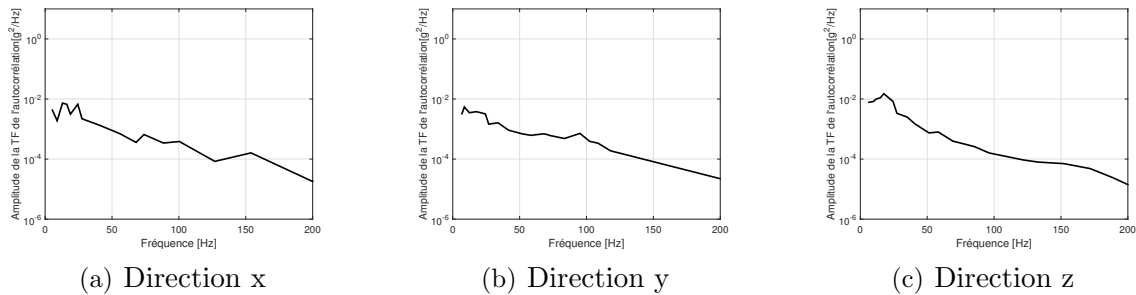


FIGURE 2.14 – Enveloppe des DSP correspondant aux sollicitations des fixations du SPAC lors des enregistrements réalisés sur les différents tronçons

2.2.3 Évaluation de l'environnement climatique

L'évaluation repose, dans ce travail sur les préconisations normatives en fonction de la situation géographique. Les conditions climatiques prises en compte dans ce document sont uniquement les températures moyennes de l'environnement extérieur dans lequel évolue le véhicule où est intégré le SPAC.

Bien qu'elle ne soit pas maintenue, la norme GAM-EG-13 fournit une base d'informations sur les conditions climatiques. Cette norme identifie plusieurs zones géographiques. Celle correspondant à l'application étudiée est la zone 7. La norme propose, pour cette zone :

- Moyenne annuelle des températures maximales : entre $+10^{\circ}\text{C}$ et $+39^{\circ}\text{C}$
- Moyenne annuelle des températures minimales : entre -20°C et -5°C

La norme STANAG 4370, qui la reprend, (STANdardisation Agreement 4370) est publiée en 1994 par l'OTAN. Son domaine d'application reste encore militaire.

Le fascicule AECTP 300 (Essais en environnement climatique), de la norme STANAG 4370, décrit précisément les différents environnements climatiques et donne les informations nécessaires à la mise en place des essais climatiques (température, chocs thermiques, radiations solaires, faible pression, ...). Les méthodes d'essais incluses sont celles admises au niveau international. Ce fascicule reprend essentiellement les spécifications déjà décrites dans la GAM-EG-13.

Le document de la NORMDEF destiné à la prise en compte de l'environnement climatique est le guide PR ASTE 01-02 : « Guide d'application de la démarche de personnalisation en environnement climatique ». Il a été publié en décembre 2010.

2.3 Modélisation des comportements dynamiques des systèmes mécaniques complexes

A présent, l'environnement vibratoire et climatique du système étudié est défini. C'est-à-dire que les conditions d'excitations sont déterminées aux points d'ancrages de celui-ci. L'analyse du comportement dynamique du système excité de la sorte est l'enjeu de cette partie. Le but est de cibler les points d'observation judicieux à examiner lors de la reproduction sur banc des conditions réelles mises en évidence précédemment. La modélisation « globale » du système permet d'une part de caractériser le système et d'autre part de prévoir la réponse de celui-ci lorsqu'il est soumis aux conditions réelles établies. En phase de conception, l'intégration des différents éléments du système n'est pas figée. L'intérêt d'une telle étude est d'apporter une aide à l'intégration définitive du système. Ce qui est recherché à présent est donc le comportement relatif des masses principales du système les unes par rapport aux autres.

2.3.0.1 Les hypothèses de travail

Les hypothèses prises pour le calcul sont les suivantes :

Hypothèse 1 : Le domaine de travail des matériaux des éléments du système est supposé élastique linéaire. C'est-à-dire que les contraintes sont des fonctions linéaires des déformations. Les structures des éléments du système se comportent de manière linéaire. Le principe de superposition et le principe de réciprocité de Maxwell sont ainsi applicables.

Hypothèse 2 : Les déplacements engendrés par les sollicitations sont petits par rapport à la dimension spatiale du système. Le système est étudié en Hypothèse des Petites Perturbations (H.P.P.)

Hypothèse 3 : Le système est composé d'éléments dont les structures sont supposées non amorties. Sous cette hypothèse les déplacements, donc les déformations et les contraintes qui sont calculés sont plus importants que si le système est amorti de la même manière que dans les conditions réelles d'usage. Les résultats obtenus sont plus sécuritaires que lorsque l'amortissement est pris en compte.

Pour une structure linéaire, les relations excitations-réponses sont guidées par les équations de la dynamique des structures :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.30)$$

avec

\mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} : matrices de masse, d'amortissement et de raideur

\ddot{q}, \dot{q}, q : vecteurs d'accélération, de vitesse et de déplacement
 f : vecteur des forces extérieures et excitations appliquées au système

Dans le cas d'une structure non amortie (hypothèse 3) l'équation (2.30) devient :

$$\mathbf{M}\ddot{q}(t) + \mathbf{K}q(t) = f(t) \quad (2.31)$$

2.3.1 Description du système étudié

Les comportements dynamiques des systèmes complexes du SPAC sont recherchés. Il convient de décrire le SPAC dans cet objectif. La description se concentre, ainsi, sur la définition des masses principales des éléments qui le composent, de leur coordonnées relatives ainsi que des interfaces qui les relient.

2.3.1.1 Les masses principales

Le SPAC, pour assurer ses fonctions principales (telles que décrites au paragraphe 2.1.2.2), est composé de plusieurs éléments (sous-systèmes ou composants). Les éléments dont la masse est significative par rapport à la masse totale (m_{sys}) du SPAC (supérieure à 10 % de m_{sys} , hormis le compresseur d'air) sont présentées dans la table 2.7. Ces masses sont dites « masses principales » dans cette étude. Ainsi, alors que le système est décomposé en sous-ensembles fonctionnels (Analyse fonctionnelle (§ 2.1.2.2, page 48), il est ici décomposé en sous-ensembles « massiques » pour une analyse de comportements dynamiques des structures mécaniques.

Élément du système	Masse (kg)	Source de l'information
Réservoir d'hydrogène	$m_r = 25$	Concepteur
PAC	$m_p = 16$	Concepteur
Batterie	$m_b = 25$	Concepteur
Compresseur	$m_c = 9$	Concepteur
Caisson	$m_a = 25$	Hypothèses de construction
Autres auxiliaires du système	$m_{aux} = 4 \times 5 = 20$	Hypothèses et déduction
Système complet	$m_{sys} = 120$	Concepteur

TABLE 2.7 – Les masses principales du système

2.3.1.2 Le caisson

Le SPAC étudié est entièrement intégré à l'intérieur d'un caisson en aluminium d'une épaisseur de 2 mm. Les propriétés de l'aluminium utilisé sont données table 2.10. Il est fixé rigidement au châssis du véhicule en 4 points. Le profil d'excitation de ces 4 fixations a pu être caractérisé comme présenté dans la section 2.2. L'origine du repère utilisé pour la description du système est un des 8 coins de cette boîte comme présenté

sur la figure 2.15.

Elle a pour dimension selon des 3 axes du repère (en mètre) :

$$\begin{cases} L = 1,17 & \text{selon } x \\ l = 0,68 & \text{selon } y \\ h = 0,25 & \text{selon } z \end{cases}$$

Le fond de ce caisson est renforcé par 3 traverses. La masse de ce caisson ainsi décrit est m_a (table 2.7).

2.3.1.3 Les solides infiniment rigides

L'analyse ne cherche pas à ce stade à décrire le comportement interne des différents éléments du système. C'est la raison pour laquelle ces éléments sont représentés par des solides infiniment rigides.

Un solide infiniment rigide est repéré par les coordonnées de son centre de gravité (CdG), sa masse et ses inerties autour de son CdG. Ce CdG est relié rigidement aux points de fixation du solide.

Les liaisons rigides font que certaines variables ne sont plus des degrés de liberté. Le vecteur des degrés de liberté restant \underline{q} est lié au vecteur q par la relation (2.32).

$$q = \mathbf{T}\underline{q} \text{ où } \mathbf{T} \text{ est un tableau rectangulaire.} \quad (2.32)$$

Les quatre sous ensembles « massiques » identifiés (que sont le réservoir d'hydrogène, la PAC, la batterie et le compresseur) sont représentés en solides rigides. Les tables 2.8 et 2.9 permettent de les décrire dans le repère lié au caisson dans lequel ils sont implantés. Chacune des masses de ces quatre sous-ensembles est concentrée en son CdG, à laquelle est également donnée une inertie comme décrit dans les tables 2.8 et 2.9.

Élément du système	Coordonnées du CdG	Forme de l'élément	Dimensions (m)
Réservoir d'hydrogène	$\begin{cases} x = 0,57 \\ y = 0,53 \\ z = 0,16 \end{cases}$	Cylindre creux	$\begin{cases} L = 0,91 & \text{selon } x \\ r = 0,14 & \text{selon } y \text{ et } z \\ e = 0,02 & \text{épaisseur} \end{cases}$
PAC	$\begin{cases} x = 1,08 \\ y = 0,27 \\ z = 0,18 \end{cases}$	Parallélépipède rectangle	$\begin{cases} L = 0,10 & \text{selon } x \\ l = 0,17 & \text{selon } y \\ h = 0,17 & \text{selon } z \end{cases}$
Batterie	$\begin{cases} x = 0,30 \\ y = 0,26 \\ z = 0,17 \end{cases}$	Parallélépipède rectangle	$\begin{cases} L = 0,37 & \text{selon } x \\ l = 0,19 & \text{selon } y \\ h = 0,19 & \text{selon } z \end{cases}$
Compresseur	$\begin{cases} x = 0,67 \\ y = 0,28 \\ z = 0,16 \end{cases}$	Cylindre creux	$\begin{cases} L = 0,12 & \text{selon } x \\ r = 0,10 & \text{selon } y \text{ et } z \\ e = 0,01 & \text{épaisseur} \end{cases}$

TABLE 2.8 – Description des solides rigides

Les points de fixations des solides :

A présent, il ne reste plus qu'à fixer les différents CdG des solides au caisson.

- La PAC :

Forme de l'élément	Moment d'inertie		
Cylindre creux	$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \frac{m}{2} \cdot (r^2 + (r - e)^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m}{4} \cdot (r^2 + (r - e)^2) + \frac{m}{24} L^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{4} \cdot (r^2 + (r - e)^2) + \frac{m}{24} L^2 \end{bmatrix}$		
Parallélépipède	$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \frac{m}{12} \cdot (l^2 + h^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m}{12} \cdot (L^2 + h^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{12} \cdot (L^2 + l^2) \end{bmatrix}$		

TABLE 2.9 – Moments d'inertie

Le CdG de la PAC est relié rigidement au caisson par 6 points de fixation : 4 points sur la paroi du plan $x = 1,17$ m du caisson, et 2 points sur le fond du caisson.

- La batterie :

Le CdG de la batterie est relié rigidement au fond du caisson (dans le plan $z = 0$) aux 4 points d'extrémité du rectangle formé par la projection du parallélépipède dans ce plan.

- Le compresseur :

Le CdG du compresseur est également relié rigidement au fond du caisson aux 4 points d'extrémité du cylindre le représentant.

- Le réservoir :

Afin de prendre en compte les phénomènes de roulis, tangage et lacet du réservoir autour des 3 axes (respectivement x , y et z), le solide représenté en son CdG n'est pas relié directement au caisson de manière rigide, mais par l'intermédiaire de 4 poutres encastées d'un côté du caisson et de l'autre au point de fixation du solide infiniment rigide représentant le corps du réservoir. Ces 4 poutres représentent les sangles du réservoir ayant effectivement pour rôle de fixer le réservoir, comme présenté sur la figure 2.15. Le matériau utilisé pour ces sangles est l'inox 316L (table 2.10).

Ces poutres ont pour dimensions :

$$\begin{cases} L = 0,03 & \text{selon } x \\ l = 0,002 & \text{selon } y \\ h = 0,16 & \text{selon } z \end{cases}$$

Le solide infiniment rigide représentant le réservoir à proprement parlé est décrit par une plaque horizontale d'épaisseur 3 cm. La rigidité est assurée par la simulation d'un matériau dont le module d'Young est de l'ordre de 1.10^{15} Pa (table 2.10).

Nom du matériau	Module d'Young (Pa)	Coefficient de Poisson	Masse volumique ($kg.m^3$)
Aluminium	68.10^9	0,36	2700
Inox 316L	193.10^9	0,25	8000

TABLE 2.10 – Propriétés des matériaux utilisées pour les modélisations

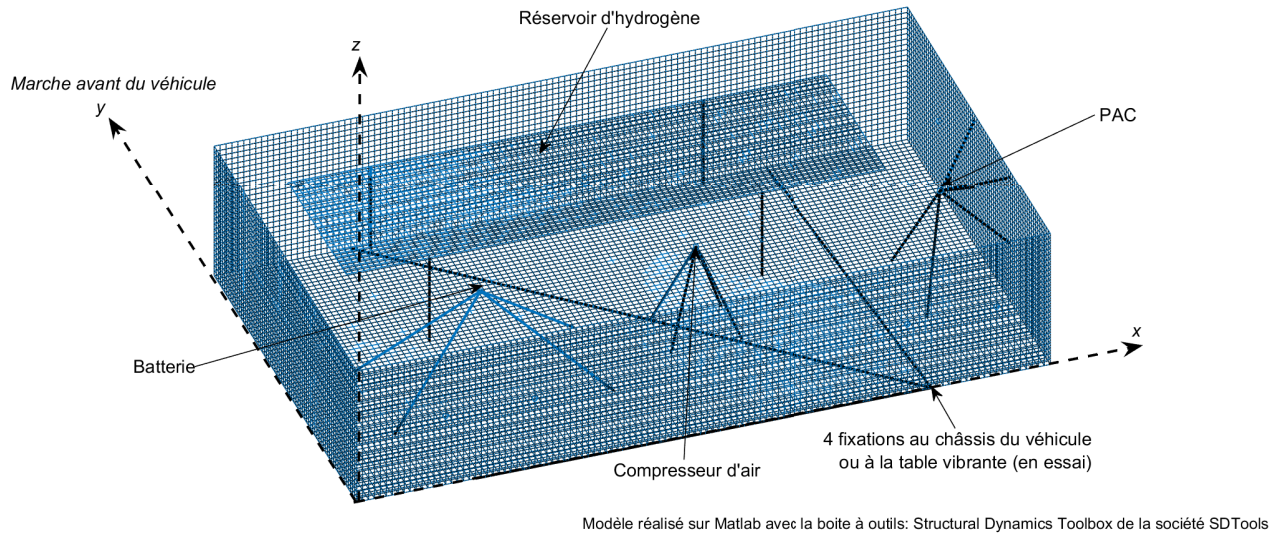


FIGURE 2.15 – Modèle géométrique du SPAC

2.3.1.4 Autres auxiliaires : les masses complémentaires

Des masses complémentaires sont intégrées à différents points du modèle géométrique afin de représenter les autres auxiliaires nécessaires au fonctionnement du SPAC. Ils correspondent notamment au convertisseur de courant à la sortie de la PAC (DCDC), au calculateur de la PAC (*Fuel Cell Control Unit* (FCCU)), au système de contrôle de la batterie (*Battery Management System* (BMS)), aux détecteurs de présence d'hydrogène, aux différents autres systèmes d'acquisition et de contrôle, à l'humidificateur d'air, aux différents filtres, aux câblages électriques (hautes et basses tension), fluidiques et de commande.

Le choix de ces différents auxiliaires, n'étant pas nécessairement connu. Leurs emplacements géométriques, ainsi que leurs éléments de fixation ne peuvent être décrits. Par ailleurs, les masses individuelles de éléments sont faibles au regard de la masse totale du système. Pour ces raisons, l'ensemble de ces éléments est regroupé en quatre masses ponctuelles de 5 kg chacune (m_{aux} (table 2.7)). Elles sont supposées être fixées sur les parois du caisson. Elles sont réparties comme présenté sur la figure 2.16.

2.3.1.5 Le maillage

L'écart entre la réalité et la simulation par un modèle géométrique dépend, en bonne partie, du choix de la taille du maillage. Plus fin est le maillage, moins il contribue aux écarts entre la réalité et la simulation, mais plus le temps de calcul augmente.

Les éléments du système modélisés par des plaques (à savoir les cotés et fond de la boîte ainsi que le corps du réservoir d'hydrogène) sont maillés avec des éléments à 2 dimensions de type quadrangle carré de 1 cm de côté. Les poutres modélisant les sangles du réservoir d'hydrogène sont maillées avec des éléments à 1 dimension de 1 cm. Les

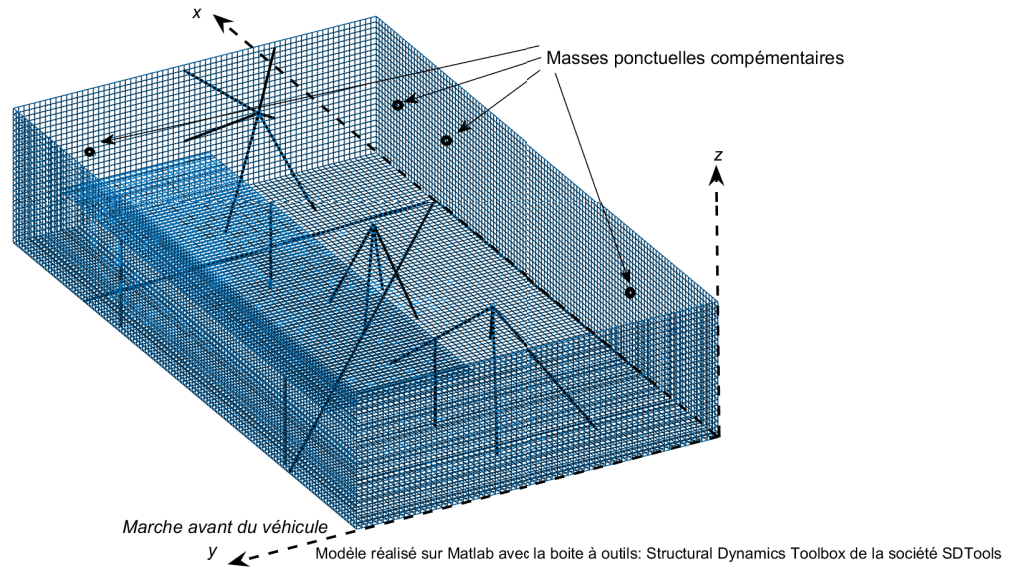


FIGURE 2.16 – Répartition des masses ponctuelles complémentaires dans le modèle géométrique du SPAC

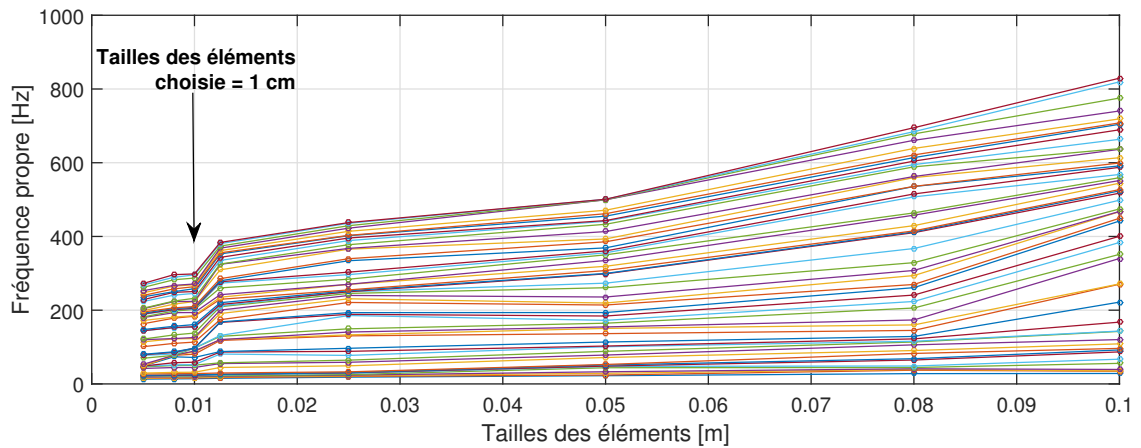


FIGURE 2.17 – Comparaison de fréquences propres du système modélisé en fonction de la tailles des éléments de discrétisation

figures 2.15 et 2.16 sont des images du modèle géométrique ainsi créé.

D'après la comparaison des valeurs des 50 premières fréquences propres du modèle du SPAC en fonction de la taille des éléments de discrétisation du modèle (fig.2.17), les résultats du modèle se stabilisent à partir d'une taille d'élément de 1 cm. Ainsi cette taille de discrétisation est le compromis choisis pour l'étude. Par ailleurs, avec le matériel disponible pour l'étude, le temps de calcul est de 120 secondes.

2.3.2 Caractérisation dynamique propre du système

Un système dynamique a des caractéristiques propres qui sont indépendantes des sollicitations extérieures. Les modes de déformations propres au système font partie de ces caractéristiques. A chaque mode est associée une fréquence qui lui est propre et qui est typique de la fréquence à laquelle le mode pourra vibrer lorsque le système mécanique sera soumis à des forces extérieures dynamiques.

2.3.2.1 Mise en équation

Mathématiquement, ces caractéristiques propres sont déterminées en calculant les solutions particulières de l'équation (2.31), c'est-à-dire sans second membre. Les solutions sont décrites dans le plan complexe sauf si les amortissements sont faibles, ce que nous avons supposé (hypothèse 3). Ces caractéristiques propres sont donc des solutions particulières de l'équation (2.31), c'est-à-dire sans second membre :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = 0 \quad (2.33)$$

En tenant compte des liaisons rigides du système (2.32), et après multiplication par \mathbf{T}^T , de l'équation (2.33) on obtient :

$$\mathbf{T}^T \mathbf{M} \mathbf{T} \ddot{\underline{\mathbf{q}}}(t) + \mathbf{T}^T \mathbf{K} \mathbf{T} \underline{\mathbf{q}}(t) = 0, \text{ soit : } \underline{\mathbf{M}} \ddot{\underline{\mathbf{q}}}(t) + \underline{\mathbf{K}} \underline{\mathbf{q}}(t) = 0 \quad (2.34)$$

La solution de cette équation fait intervenir la séparation de variables (2.35) équivalente à une oscillation harmonique et qui, introduite dans (2.34) conduit à l'équation aux caractéristiques propres (2.36) dont la solution fournit les vecteurs propres $\Phi_{(r)}$ et les valeurs propres correspondantes ω_r .

$$\underline{\mathbf{q}}(t) = \phi \sin(\omega t) \quad (2.35)$$

où

ϕ : vecteur propre est un vecteur de déformation correspondant au mode de vibration

ω : valeur propre correspondant à la pulsation

Mathématiquement, l'équation (2.36) a n_q solutions, n_q étant le nombre de degrés de liberté du système, soit la dimension de $\underline{\mathbf{q}}$. ω_r et $\phi_{(r)}$ correspondent respectivement à la pulsation propre et au mode propre r ; r variant de 1 à n_q .

$$[\underline{\mathbf{K}} - \omega^2 \underline{\mathbf{M}}] \phi = 0 \quad (2.36)$$

L'intérêt de ce changement de variables est de réduire la résolution de l'équation aux n premières solutions avec $n \ll n_q$. L'erreur de cette troncature est généralement

négligeable lorsque la fréquence propre du mode n est au moins 1,5 fois supérieure à la limite haute de la gamme de fréquences des sollicitations (forces) extérieures. Il est par ailleurs possible de limiter cette erreur par l'ajout d'un terme correctif tenant compte des modes propres tronqués [Géradin and Rixen, 1996]. Dans un soucis de simplicité, ce terme n'est cependant pas pris en compte dans notre étude. L'analyse des masses modales effectives présentées dans la section suivante 2.3.3 (page 77) fournit un indicateur supplémentaire au physicien pour effectuer cette troncature.

La solution générale de l'équation (2.34) est :

$$\underline{q}(t) = \sum_{i=1}^n \phi_{(i)} \eta_i(t) , \text{ en écriture matricielle : } \underline{q}(t) = \Phi^T \eta(t) \quad (2.37)$$

avec

$$\Phi^T = [\phi_{(1)} \dots \phi_{(n)}]$$

Les amplitudes modales $\eta_i(t)$ varient avec le temps et dépendent des conditions initiales et des forces extérieures.

Par ailleurs, dans leurs calculs, les modes propres sont orthogonaux et sont normalisés. C'est-à-dire :

$$\Phi^T \underline{\mathbf{M}} \Phi = \mathbf{I} , \text{ et } \Phi^T \underline{\mathbf{K}} \Phi = \Omega^2 \quad (2.38)$$

avec

$$\Omega : \text{matrice diagonale formée des pulsations propres} = \begin{bmatrix} \omega_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \omega_n \end{bmatrix}$$

2.3.2.2 Résultats de la caractérisation dynamique propre du système

La gamme de fréquences des sollicitations extérieures, auxquelles est soumis le SPAC intégré dans un véhicule, varie de 0 à 200 Hz (d'après la caractérisation des contraintes vibratoires réalisée au paragraphe 2.2). En élargissant légèrement le domaine, les cinquante premiers modes sont retenues ($n = 50$).

Une analyse qualitative de ces formes propres permet une première appropriation du comportement dynamique du système. Elle fournit au physicien des informations qualitatives lui permettant d'orienter l'approfondissement des analyses.

2.3.3 Masses modales effectives

Après une première analyse visuelle des formes propres du système, le physicien a une connaissance spatiale du comportement dynamique. Cependant, il ne connaît pas l'importance des modes les uns par rapport aux autres. Afin de compléter son jugement pour une sélection modale plus précise à effectuer pour approfondir ses investigations,

la connaissance des masses mises en mouvement dans les différents modes propres du système est nécessaire.

Le SPAC est solidaire du « châssis du véhicule », ou de la « table vibrante » lors des essais vibratoires, qui sont nommés « base » dans la suite de l'étude. Le SPAC est donc soumis à des excitations en provenance de la base. D'après l'évaluation de l'environnement vibratoire (section 2.2.2), les sollicitations vibratoires enregistrées sur les 4 fixations du SPAC à la base étant similaires, la liaison entre chacune d'elles est considérée comme rigide dans la suite de l'étude.

Les matrices de masse et raideur du SPAC, caractérisées précédemment, peuvent être décomposées ainsi :

$$\underline{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix}, \text{ et } \underline{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

avec

$\mathbf{M}_b[n_b, n_b]$ et $\mathbf{K}_b[n_b, n_b]$: les matrices de masse et raideur liées à la base
 $\mathbf{M}_s[n_s, n_s]$ et $\mathbf{K}_s[n_s, n_s]$: les matrices de masse et raideur
sans liaisons à la base
 $\mathbf{M}_c[n_b, n_s]$ et $\mathbf{K}_c[n_b, n_s]$: les matrices de couplage
 n_b : nombre de degrés de liberté (ddl) de la base = 6 :
3 translations et 3 rotations
 n_s : nombre de ddl susceptibles d'évoluer librement.

Le mouvement du système mécanique sans amortissement peut être décrit dans le repère relatif à la base par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w}_b \\ \ddot{q}_s + \ddot{q}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_b \\ q_s + q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

avec

$w_b[n_b]$: vecteur des déplacements généralisés du système liés à la base
 $q_0[n_s]$: mouvement de corps rigide des autres déplacements généralisés
 $q_s[n_s]$: vecteur des autres déplacements généralisés dans le repère relatif
lié aux mouvements de la base.

Le mouvement de corps rigide des déplacements généralisés non liés au bâti, dépend du mouvement imposé au bâti, par l'intermédiaire d'une matrice Q (2.41) typique de la géométrie du système mécanique étudié et qui sera particularisée plus loin. Elle tient compte de conditions aux limites.

$$q_0(t) = \mathbf{Q}w_b(t), \text{ dans le repère absolu } \underline{q}(t) = q_s(t) + \mathbf{Q}w_b(t) \quad (2.41)$$

Dans la décomposition de (2.40),

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w}_b \\ \ddot{q}_s + \ddot{q}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_b \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\text{le terme } \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_b \\ q_0 \end{bmatrix} = 0 \text{ et donc } q_0 = -\mathbf{K}_s^{-1} \mathbf{K}_c^T w_b \quad (2.43)$$

Ainsi, en reprenant (2.41)

$$\mathbf{Q} = -\mathbf{K}_s^{-1} \mathbf{K}_c^T \quad (2.44)$$

De (2.42), il reste :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w}_b \\ \ddot{q}_s + \ddot{q}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

En tenant compte de (2.41), la deuxième ligne de cette relation matricielle permet de calculer q_s :

$$\mathbf{M}_s \ddot{q}_s + \mathbf{K}_s q_s = -(\mathbf{M}_s \mathbf{Q} + \mathbf{M}_c^T) \ddot{w}_b \quad (2.46)$$

Après la transformation modale (2.37) et d'après les propriétés d'orthogonalité et de normalisation des modes propres (2.38), les équations modales dans les axes relatifs s'écrivent :

$$\ddot{\eta}_s(t) + \Omega^2 \eta_s(t) = -\Phi^T (\mathbf{M}_s \mathbf{Q} + \mathbf{M}_c^T) \ddot{w}_b \quad (2.47)$$

2.3.3.1 Énergie cinétique relative au mouvement de corps rigides

Considérons le système comme rigide, c'est-à-dire avec le seul déplacement q_0 donné par (2.41). Le mode rigide associé au système complètement libre s'écrit :

$$u = \begin{bmatrix} w_b \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} w_b \quad (2.48)$$

L'énergie cinétique relative au mouvement de corps rigide peut s'écrire :

$$T = \frac{1}{2} \dot{u}^T \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \dot{u} = \frac{1}{2} \dot{w}_b^T [\mathbf{I} \quad \mathbf{Q}^T] \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \dot{w}_b \quad (2.49)$$

$$\text{En posant } \mathbf{M}_s^* = [\mathbf{I} \quad \mathbf{Q}^T] \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_b + \mathbf{Q}^T \mathbf{M}_c^T + \mathbf{M}_c \mathbf{Q} + \mathbf{Q}^T \mathbf{M}_s \mathbf{Q} \quad (2.50)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{w}_b^T \mathbf{M}_s^* \dot{w}_b \quad (2.51)$$

La matrice \mathbf{M}_s^* apparaît donc comme l'inertie du système vue de la base lorsque le système est rigide.

Supposons maintenant le système soumis à une accélération unitaire de translation dans une seule direction i . Alors il faut construire le vecteur \ddot{w}_b correspondant à cette accélération. Par exemple, pour une translation :

$$\ddot{w}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \leftarrow \text{ddl de direction } i = e_i \quad (2.52)$$

Si l'amplitude du mouvement est ξ_i , alors l'énergie cinétique relative à ce mode s'exprime par :

$$T_i = \frac{1}{2} e_i^T \mathbf{M}_s^* e_i \xi_i^2 = \frac{1}{2} m_T \xi_i^2 \quad (2.53)$$

où le scalaire m_T est la masse du corps rigide en translation.

L'équation du mouvement correspondante est :

$$m_T \ddot{\xi}_i = f_i \quad (2.54)$$

Donc pour un mode de corps, si une force est appliquée dans la direction i et que l'accélération est mesurée, il faut retrouver la masse totale du système : c'est l'interprétation physique de m_T . Cette masse doit être naturellement la même dans les trois directions de translation. Pour les degrés de liberté de rotation, on retrouve l'inertie vue de l'encastrement autour de l'axe considéré. Les inerties dépendent naturellement de i . On spécifie donc I_i .

La masse associée aux degrés de liberté de translation de la base s'écrira par analogie m_{bi} et correspond à :

$$m_{bi} = e_i^T \mathbf{M}_b e_i \quad (2.55)$$

Il en résulte que la masse relative au système mécanique étudié et qui peut vibrer vaut :

$$m_{ei} = m_T - m_{bi} \quad (2.56)$$

2.3.3.2 Matrice de participation modale

Il s'agit à présent de mettre en évidence la participation de chaque mode dans la masse globale de la partie élastique de la structure. Cette décomposition modale passe par l'utilisation de la matrice de participation modale.

En reprenant l'équation (2.47) :

$$\ddot{\eta}_s(t) + \Omega^2 \eta_s(t) = \Gamma \ddot{w}_b \quad (2.57)$$

Avec Γ la matrice de participation modale définie ainsi :

$$\Gamma[n_s, n_b] = -\Phi^T(\mathbf{M}_s\mathbf{Q} + \mathbf{M}_c^T) \quad (2.58)$$

$$\text{On peut montrer que : } \Gamma^T\Gamma \approx \mathbf{M}_s^* - \mathbf{M}_b \quad (2.59)$$

Soit le scalaire désigné par $\Gamma_j e_i$ associé au mode j allant de 1 à n_s , car la base de vecteurs propres élastiques est complète dans cette démonstration théorique.

$$\Gamma_j e_i = -\Phi_j^T(\mathbf{M}_s\mathbf{Q} + \mathbf{M}_c^T)e_i \quad (2.60)$$

$$\text{or } e_i^T \Gamma^T \Gamma e_i = \sum_{j=1}^{n_s} (\Gamma_j e_i)^2 \quad (2.61)$$

Par ailleurs, la somme des contributions de chaque mode à la matrice $e_i^T \Gamma^T \Gamma e_i$ est égale à la masse de la partie élastique de la structure (2.62).

$$m_T - m_{bi} = \sum_{j=1}^{n_s} (m_T - m_{bi})_j \quad (2.62)$$

$$\text{Ainsi, } (m_T - m_{bi})_j = (\Gamma_j e_i)^2 \quad (2.63)$$

$(\Gamma_j e_i)^2$ est appelée la masse effective du mode élastique j .

2.3.3.3 Analyse de la masse effective

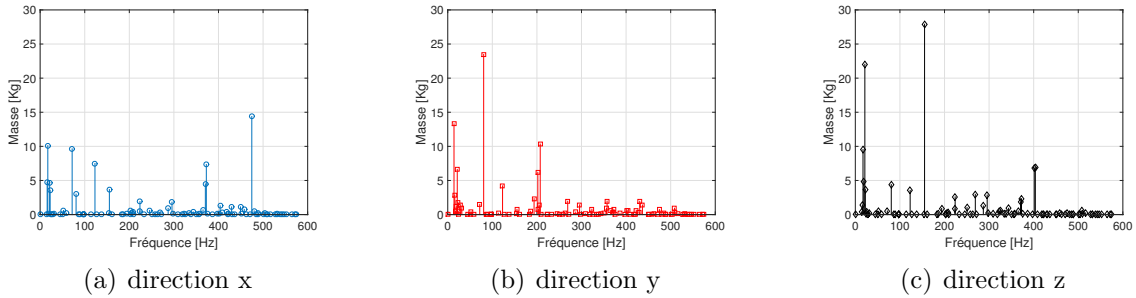


FIGURE 2.18 – Masses effectives des modes propres élastiques du SPAC

La figure 2.18 présente la masse effective mise en mouvement des 100 premiers modes propres du système lors de l'accélération unitaire dans chacune des directions de translation. La figure 2.19 représente le pourcentage cumulé de ces masses effectives.

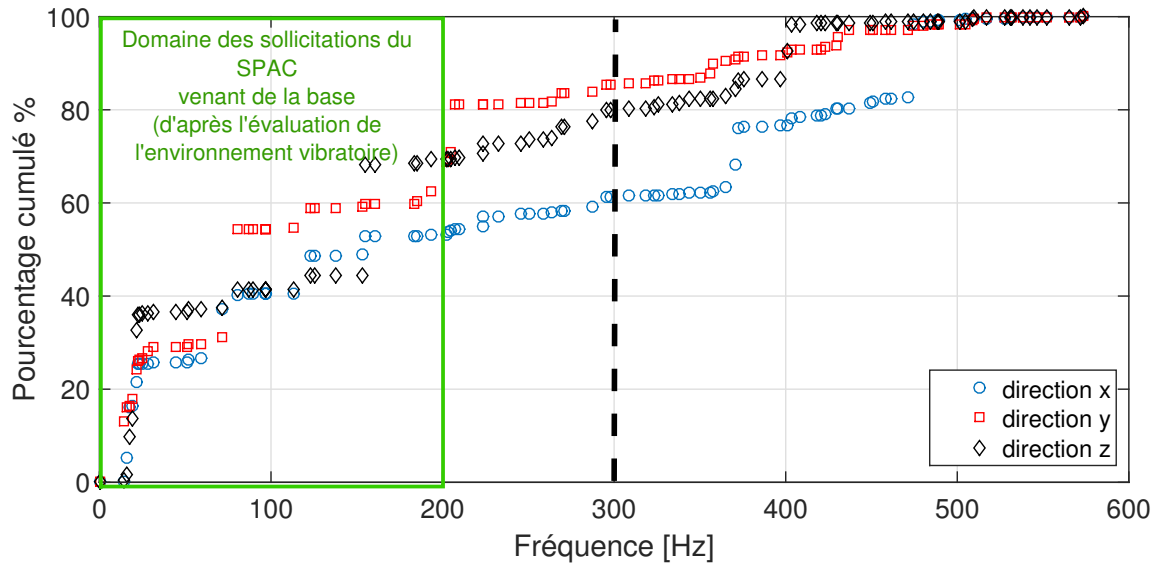


FIGURE 2.19 – Pourcentage cumulé des masses effectives des modes propres élastiques du SPAC

1) Dans la direction x , la masse effective est supérieure à 10 kg à 2 fréquences propres :

- 17 Hz : correspondant au mode propre spécifique à la PAC, comme présenté par la forme propre de la figure 2.20 b),
- 475 Hz : à cette fréquence, seules les parois du caisson sont mises en mouvement (2.20 f)).

2) Dans la direction y , la masse effective est supérieure à 10 kg à 3 fréquences propres :

- 14 Hz : d'après la figure 2.20 a), cette fréquence correspond au mode propre qui met en mouvement la paroi arrière du caisson (celle qui est dans le plan $y = 0$).

Ceci s'explique par le fait que 3 masses complémentaires ont été rajoutées au modèle et réparties sur cette même paroi. La masse totale de ces 3 entités est de 15 kg. Elles correspondent à des auxiliaires du SPAC décrits en page 74. En effet, dès lors que ces masses complémentaires sont supprimées du modèle, le deuxième mode propre n'apparaît plus à cette fréquence de 14 Hz.

- 81 Hz : concernant principalement le réservoir d'hydrogène d'après la figure 2.20 d),
- 207 Hz : correspondant au mode propre 39 impactant la PAC d'après la figure 2.20 f).

3) Dans la direction z , 2 fréquences propres se distinguent nettement :

- 21 Hz : correspondant, d'après la figure 2.20 c), à la forme propre de « pompage » de la plaque du fond du caisson,
- 155 Hz : mettant en mouvement, d'après la figure 2.20 e), la PAC principalement.

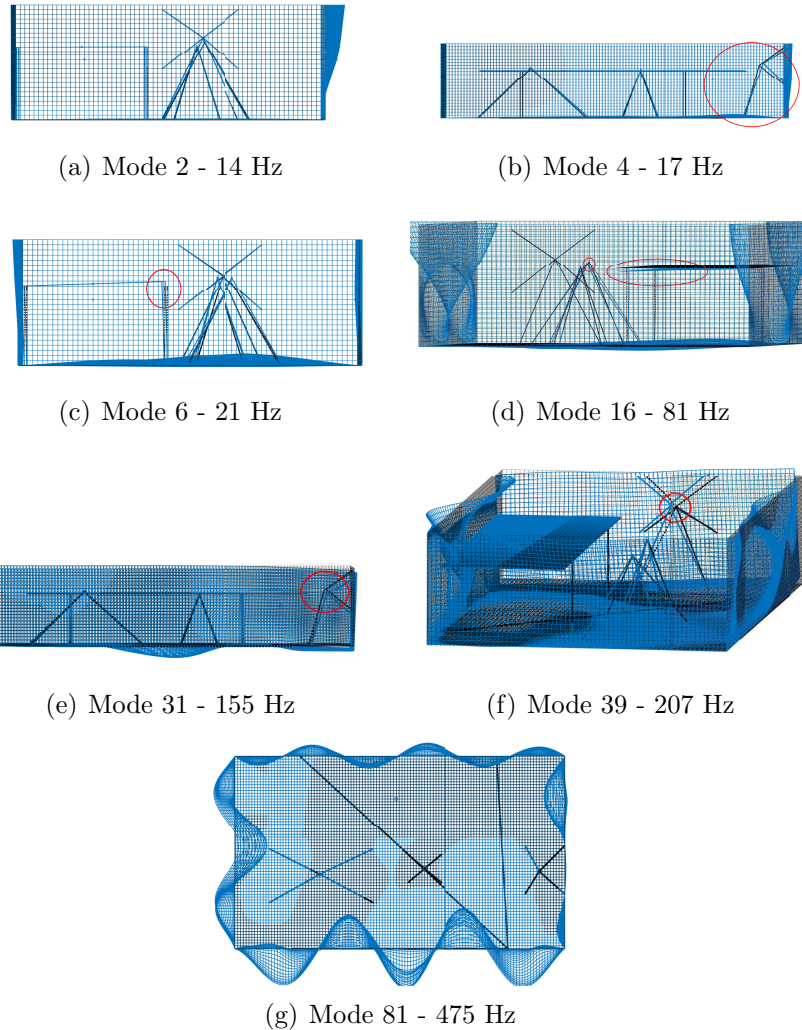


FIGURE 2.20 – Formes propres du SPAC correspondantes aux modes propres de masses effectives les plus élevées

Par ailleurs, le domaine de sollicitations (6 à 300 Hz) retenues selon l'évaluation de l'environnement vibratoire auquel est soumis le SPAC, concerne près de 70% de la masse effective dans la direction z et plus de 50% de cette masse dans la direction y .

Ainsi, d'après les analyses de formes propres et de la masse effective des modes propres du SPAC, les fréquences propres qui attireront particulièrement l'attention du physicien ainsi que les éléments sur lesquels il est judicieux d'approfondir les études sont identifiés.

Il est important de préciser que l'analyse des masses mises en mouvement dans chacun des modes propres du système ne doit pas être le seul critère à prendre en compte pour orienter la poursuite des analyses. En effet, une excitation dont la fréquence correspond à la fréquence propre d'un élément ayant une faible masse pourra produire des effets destructeurs bien que la masse mise en mouvement ne soit pas élevée au regard du système complet.

2.3.4 L'influence d'une excitation par la base sur le système mécanique

Après avoir caractérisé le comportement dynamique du SPAC par une analyse modale (système non excité et conservatif), les points du système jugé « critiques » par le physicien après cette caractérisation, vont pouvoir être observés de manière plus particulière.

La détermination de l'influence dynamique de l'excitation du système par la base en ces points constitue le but de ce paragraphe.

Lors des essais vibratoires, le SPAC est testé sur une table vibrante. Les excitations sont donc des accélérations dans une des directions : a_x, a_y, a_z . La base est à présent une « table vibrante ». Son mouvement est imposé et son accélération est connue.

En tenant compte de l'amortissement, l'équation du mouvement du SPAC est donnée par :

$$\underline{\mathbf{M}}\ddot{\underline{q}}_s + \underline{\mathbf{C}}\dot{\underline{q}}_s + \underline{\mathbf{K}}\underline{q}_s = -\underline{\mathbf{M}}\ddot{\underline{q}}_0 \quad (2.64)$$

L'accélération de corps rigide $\ddot{\underline{q}}_0$ s'exprime en fonction de l'accélération imposée par la base dans les 3 directions par :

$$\ddot{\underline{q}}_0 = \mathbf{B} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

\mathbf{B} est une matrice de 3 colonnes. Comme l'excitation est relative à la base, les directions d'excitation sont exclusives et on écrira :

$$\ddot{\underline{q}}_0 = \mathbf{B}_{(d)}a_d \quad (2.66)$$

où d vaut 1, 2 ou 3 suivant que la direction d'excitation de la base. D'après (2.43), (2.44) et (2.52),

$$\mathbf{B}_{(d)} = \mathbf{Q}e_d \quad (2.67)$$

L'équation(2.64) peut donc se réécrire comme :

$$\underline{\mathbf{M}}\ddot{\underline{q}}_s + \underline{\mathbf{C}}\dot{\underline{q}}_s + \underline{\mathbf{K}}\underline{q}_s = -\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d \quad (2.68)$$

2.3.4.1 Introduction de l'amortissement

Pour analyser le comportement dynamique d'un système lorsqu'il est soumis à des sollicitations imposées, il est nécessaire d'introduire également les caractéristiques d'amortissement. L'amortissement mécanique permet de prendre en compte les phénomènes de dissipation d'énergie à l'intérieur des matériaux ainsi qu'entre les différents éléments du système par l'intermédiaire de leur liaisons.

Si l'amortissement du système est considéré comme étant de type RAYLEIGH (2.69),

$$\underline{\mathbf{C}} = \alpha \underline{\mathbf{K}} + \beta \underline{\mathbf{M}} \quad (2.69)$$

dont la propriété d'orthogonalisation donne :

$$\Phi^T \underline{\mathbf{C}} \Phi = 2 \Xi \Omega \quad (2.70)$$

avec

$$\Xi = \frac{1}{2}(\alpha \Omega + \beta \Omega^{-1}) \quad (2.71)$$

En dehors du fait que l'amortissement de type RAYLEIGH peut être manipuler aisément dans la base modale, son interprétation physique permet de prendre en compte un effet non linéaire de l'amortissement suivant Ω . Alors qu'un taux d'amortissement constant sur Ω pourrait être adopté (généralement 5% en conception automobile), l'amortissement de type RAYLEIGH permet de simuler un taux d'amortissement variant en fonction des fréquences propres du système.

2.3.4.2 Coefficients d'influence dynamique

L'influence dynamique d'une excitation a_d appliquée à un point l sur la réponse dynamique au point k correspond au terme a_{kl} d'une matrice \mathbf{A} . Cette matrice, appelée matrice aussi *matrice de transfert*, ou encore, *matrice des fonctions de réponses en fréquence : matrice des FRF*, est déterminée pour une plage de pulsation ω donnée.

$\mathbf{A}(\omega)$ peut-être déterminée de deux manières :

- Soit de manière directe en soumettant le point l à une excitation harmonique d'amplitude unitaire et dont la pulsation ω varie sur la plage déterminée (balayage en fréquence). a_{kl} correspond alors à l'amplitude de l'accélération du point k observé.

- Soit en appliquant une impulsion unitaire au point l à un instant t . Cette impulsion peut être réalisée expérimentalement par un coup de marteau appliqué au point l du système. La transformée de Fourier de la réponse au point k permet d'obtenir le spectre fréquentiel déterminant le coefficient a_{kl} .

D'après les analyses précédentes, les réponses dynamiques aux deux points d'extrémité du tuyau d'hydrogène entre le réservoir et la PAC sont à étudier particulièrement. La simulation numérique de ces deux phénomènes permet de déterminer les coefficients d'influence dynamique entre les fixations du SPAC au véhicule et chacun de ces 2 points.

2.3.4.3 Interprétation par la réponse impulsionnelle

La transformation modale (2.37) et la transformée de LAPLACE permettent de réécrire (2.68) :

$$(\underline{\mathbf{M}}s^2 + \underline{\mathbf{C}}s + \underline{\mathbf{K}})\Phi\eta(s) = -\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d(s) \quad (2.72)$$

après pré-multiplication par Φ^T ,

$$\Phi^T(\underline{\mathbf{M}}s^2 + \underline{\mathbf{C}}s + \underline{\mathbf{K}})\Phi\eta(s) = -\Phi^T\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d(s) \quad (2.73)$$

En appliquant les propriétés d'orthogonalisation à (2.73) :

$$(\underline{\mathbf{I}}s^2 + 2\underline{\Xi}\Omega s + \Omega^2)\eta(s) = -\Phi^T\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d(s) \quad (2.74)$$

ou encore :

$$\eta(s) = -(\underline{\mathbf{I}}s^2 + 2\underline{\Xi}\Omega s + \Omega^2)^{-1}\Phi^T\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d(s) \quad (2.75)$$

Ainsi,

$$q_s(s) = -\Phi(\underline{\mathbf{I}}s^2 + 2\underline{\Xi}\Omega s + \Omega^2)^{-1}\Phi^T\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d(s) \quad (2.76)$$

La sortie \ddot{q}_l est l'accélération dans une direction d'un des points du système (accélération au ddl l) :

$$\ddot{q}_l = \mathbf{D}\ddot{q} \quad (2.77)$$

où la sortie \mathbf{D} est un vecteur ligne fait de 0 sauf 1 en position l .

On peut encore écrire :

$$\ddot{q}_l = \mathbf{D}(\ddot{q}_s + \ddot{q}_0) \text{ ou encore : } \ddot{q}_l = \mathbf{D}[\ddot{q}_s + \mathbf{B}_{(d)}a_d] \quad (2.78)$$

La transformée de Laplace de la sortie \ddot{q}_l donne :

$$\underline{\ddot{q}}_l(s) = \mathbf{D}[s^2q_s(s) + \mathbf{B}_{(d)}a_d(s)] \quad (2.79)$$

Finalement, en utilisant (2.76) :

$$\underline{\ddot{q}}_l(s) = \mathbf{D}[-s^2\Phi(\underline{\mathbf{I}}s^2 + 2\underline{\Xi}\Omega s + \Omega^2)^{-1}\Phi^T\underline{\mathbf{M}} + \mathbf{I}]\mathbf{B}_{(d)}a_d(s) \quad (2.80)$$

Le coefficient d'influence dynamique est la valeur absolue de la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle. C'est-à-dire que $a_d(s) = 1$. Il est donc :

$$\underline{\ddot{q}}_l(s) = \mathbf{D}[-s^2\Phi(\underline{\mathbf{I}}s^2 + 2\underline{\Xi}\Omega s + \Omega^2)^{-1}\Phi^T\underline{\mathbf{M}} + \mathbf{I}]\mathbf{B}_{(d)} \quad (2.81)$$

dont la transformée de Fourier donne :

$$\underline{\ddot{q}}_l(j\omega) = \mathbf{D}[\omega^2\Phi(-\underline{\mathbf{I}}\omega^2 + j2\underline{\Xi}\Omega\omega + \Omega^2)^{-1}\Phi^T\underline{\mathbf{M}} + \mathbf{I}]\mathbf{B}_{(d)} \quad (2.82)$$

ou encore :

$$\underline{\ddot{q}}_l(j\omega) = \omega^2\mathbf{D}\Phi(-\underline{\mathbf{I}}\omega^2 + j2\underline{\Xi}\Omega\omega + \Omega^2)^{-1}\Phi^T\underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)} + \mathbf{D}\mathbf{B}_{(d)} \quad (2.83)$$

Les coefficients d'amortissement de RAYLEIGH :

L'introduction de l'amortissement de RAYLEIGH impose l'identification de coefficients. La figure 2.21 présente le taux d'amortissement déterminé selon l'équation (2.71) pour les coefficients $\alpha = 0,00007$ et $\beta = 6$.

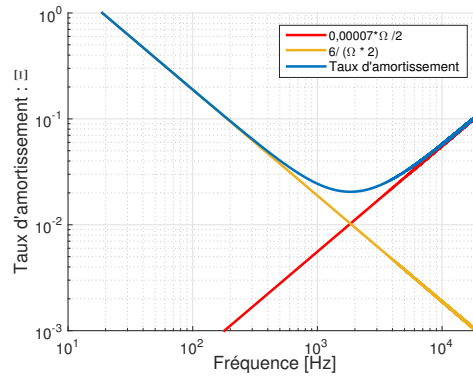
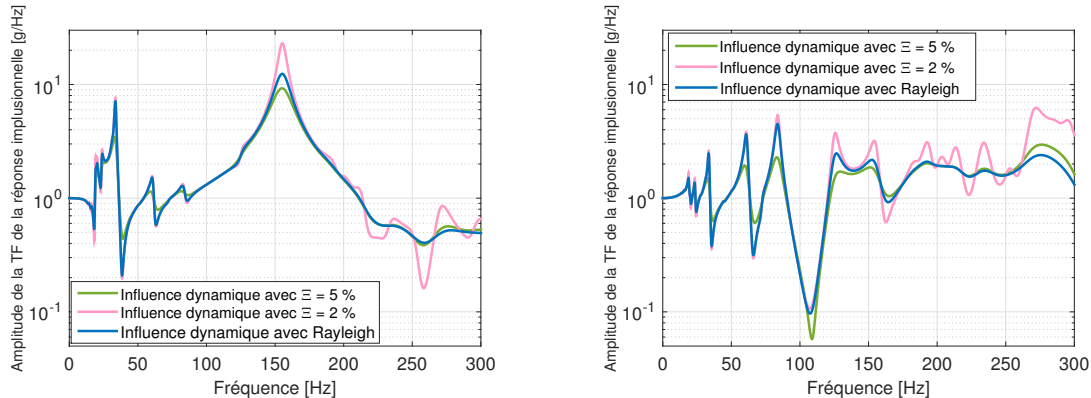


FIGURE 2.21 – Taux d'amortissement de RAYLEIGH

La figure 2.22 présente les coefficients d'influence dynamique d'une excitation aux fixations du SPAC dans la direction z et la réponse dans la même direction de la PAC et de la tête du réservoir. La prise en compte de l'amortissement de RAYLEIGH avec les coefficients présentés plus haut, permet de simuler un taux d'amortissement de 2% pour les fréquences inférieures à 150 Hz et de 5% pour les fréquences supérieures.



(a) Influence dynamique excitation en z réponse sur la PAC en z

(b) Influence dynamique excitation en z réponse à la tête du réservoir en z

FIGURE 2.22 – Prise en compte de l'amortissement de type RAYLEIGH dans l'évaluation du coefficient d'influence dynamique

Si on étend le calcul à l'ensemble des 3 directions d'excitations, la table 2.11 représente les réponses à une impulsion unitaire dans chacune des trois directions à la base du SPAC (aux 4 fixations).

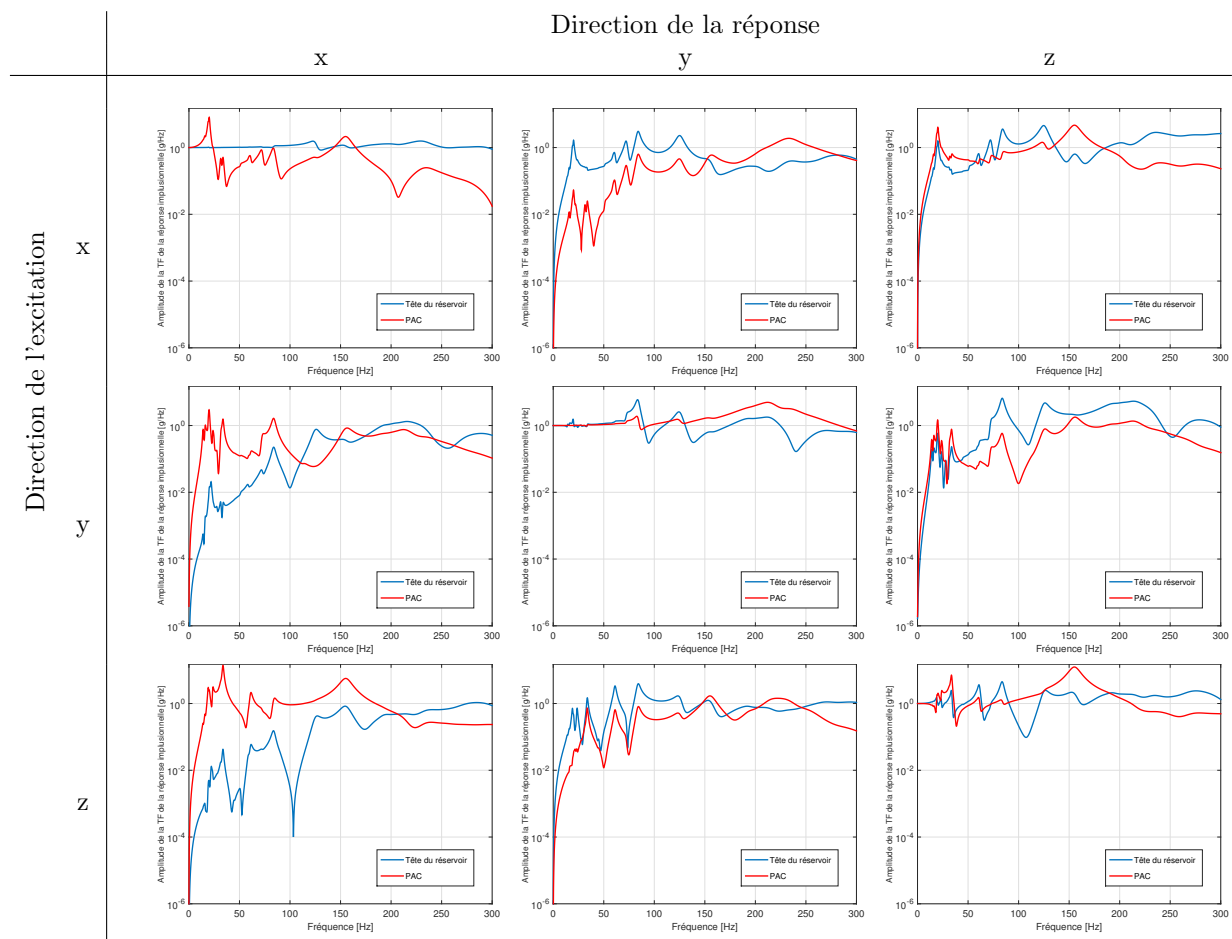


TABLE 2.11 – Comparaison des coefficients d’influence dynamique à la base à la tête du réservoir et au centre de gravité de la PAC

2.3.4.4 Observations et interprétations

1) **Réponses suivant x** L’excitation par la base met en mouvement la PAC dans la direction x (latérale pour rapport au véhicule) avec une amplitude du même ordre de grandeur quelque soit la direction des sollicitations pour les fréquences particulières de 17 Hz et 155 Hz. Ces fréquences correspondent, respectivement, aux modes propres 4 et 31 mis en évidence par la caractérisation dynamique modale du système (section 2.3.2). Cette remarque n’est pas valable pour le réservoir d’hydrogène. Ceci s’explique par le fait que la PAC est fixée sur le coté latéral du caisson.

2) **Réponses suivant y** De même, le réservoir d’hydrogène (et donc spécifiquement sa tête à une de ses extrémités) répond dans la direction y (dans la direction de la marche du véhicule) avec une amplitude du même ordre de grandeur quelque soit la direction des sollicitations par la base su système. Cette observation est valable aux fréquences de 21 Hz, 51 Hz, 81 Hz et 121 Hz. Encore une fois les fréquences propres du mode 6 à 21 Hz et du mode 16 à 81 Hz, mis en évidence lors de la caractérisation dynamique modale du système (sections 2.3.2.2 et 2.3.3.3) correspondent. Ces réponses en fréquence

s'expliquent par un phénomène de « basculement » du réservoir, lié au « pompage » du fond du caisson d'une part et à un roulis du réservoir (rotation autour de l'axe x (axe principal du cylindre du réservoir)) combiné à un léger tangage (autour de l'axe y). Ce tangage est amplifié par un déséquilibre de la masse du réservoir par rapport à ses sangles de fixation car à l'une des extrémités du réservoir est fixé sa « tête » (du côté de la PAC). Cette « tête », comprenant l'électrovanne d'ouverture du réservoir, le détendeur, ainsi que la soupape de sécurité, possède une densité massique plus élevée que le corps du réservoir. Or la répartition des sangles de fixations est centrée par rapport à la géométrie du corps du réservoir et non par rapport au CdG de l'ensemble « réservoir + tête ». Ceci explique le comportement dissymétrique observé.

Par ailleurs, lorsque le système est excité dans la direction y , l'amplitude de la TF de la réponse de la PAC est particulièrement élevée à la fréquence de 207 Hz. Ce qui correspond au mode propre 39 mis en évidence précédemment.

3) Réponses suivant z Les observations sur le comportement du réservoir dans la direction y sont similaires à celles qui peuvent être faites dans la direction z . En effet, l'emplacement des 4 sangles de fixation du réservoir par rapport au fond du caisson induit qu'une déformation au centre de celui-ci génère un déplacement du réservoir dans les directions y et z simultanément. Par ailleurs, la PAC étant fixée à la fois sur le fond du caisson et latéralement sur un côté, le comportement dynamique du CdG de la PAC est similaire dans les directions x et z .

Ainsi, les 2 points, ici observés plus en détail, étant disposés sur des masses principales du système, les modes propres mis en évidence dans l'analyse des masses effectives se retrouvent en grande partie dans cette analyse des coefficients d'influence dynamique. Seuls les modes propres 2 (à 14 Hz) et 81 (à 475 Hz) n'apparaissent pas ici car ils concernent la mise en mouvement d'éléments massiques différents du réservoir d'hydrogène ou de la PAC.

2.3.5 Modélisation du tuyau d'hydrogène

La tête du réservoir d'hydrogène est, en réalité, reliée à la PAC par le tuyau d'hydrogène. Ce tuyau, comme présenté sur la figure 2.23, est modélisé par une poutre droite en Inox 316L.

L'acier inoxydable de nuance 316L (X2CrNiMo17-12-2 ou 1.14404) est le matériau utilisé pour le tuyau d'hydrogène. Il est généralement choisi pour ses bonnes qualités sous atmosphère hydrogène [Mine et al., 2009], [Kanezaki et al., 2008] et [Michler et al., 2015]. Cependant, la forte proportion de Nickel dans sa composition chimique en fait un matériau onéreux pour la production automobile de masse. La recherche de nouveaux alliages garantissant des propriétés similaires est en cours. T. Michler et al. [Michler et al., 2013] étudient par exemple un alliage d'aluminium avec l'acier inoxydable austénitique pour les applications de stockage d'hydrogène dans les véhicules automobiles.

Sur la base des standards ANSI B.36-10 et ANSI B 36-19, la section de la tubulure d'hydrogène a pour dimensions :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{diamètre extérieur} = 9,525 \text{ mm} & \text{soit } 3/8 \text{ inch} \\ \text{épaisseur} = 0,889 \text{ mm} & \text{soit } 0,049 \text{ inch} \end{array} \right.$$

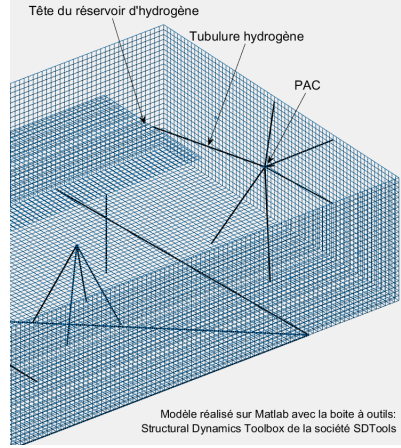


FIGURE 2.23 – Modèle géométrique de la tubulure d’hydrogène dans le SPAC

2.3.6 Prise en compte des sollicitations réelles d’usage

Si, à présent, le SPAC est excité à la base par les accélérations représentatives des sollicitations auxquelles est soumis le SPAC implanté dans un véhicule. C’est-à-dire qu’à présent $a_d(\omega)$ est égale à l’amplitude de la TF des accélérations enregistrées aux fixations du SPAC.

Ces accélérations ont été déterminées par l’étude décrite dans la section 2.2. La figure 2.14 y reproduit la densité spectrale de puissance représentative des sollicitations transmises par le véhicule aux fixations du SPAC dans les conditions réelles d’usage, dans chacune des 3 directions x , y et z . L’amplitude de la TF du signal représentatif des sollicitations réelles d’usage est présentée figure 2.24 pour chacune des 3 directions d’excitation.

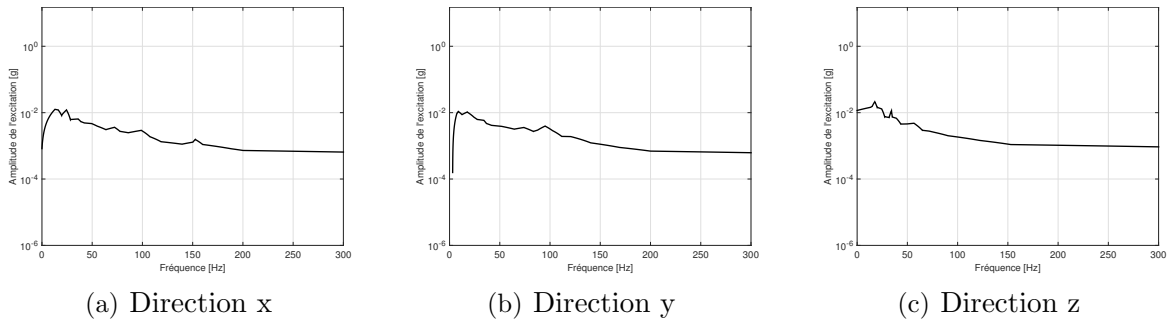


FIGURE 2.24 – Spectre des excitations aux fixations du SPAC correspondant aux sollicitations réelles d’usage

Sur la base de l’analyse des coefficients d’influence dynamique, l’accélération $\ddot{\underline{q}}_{l_{reel}}(\omega)$ au point k , revient à :

$$\ddot{\underline{q}}_{l_{reel}}(\omega) = a_d(\omega)\ddot{\underline{q}}_l(\omega) \quad (2.84)$$

Selon la seconde interprétation, en reprenant l’équation (2.83) :

$$\ddot{\underline{q}}_{l_{reel}}(\omega) = \omega^2 \mathbf{D}\Phi(-\mathbf{I}\omega^2 + j2\Xi\Omega\omega + \Omega^2)^{-1}\Phi^T \underline{\mathbf{M}}\mathbf{B}_{(d)}a_d(\omega) + \mathbf{D}\mathbf{B}_{(d)}a_d(\omega) \quad (2.85)$$

La représentation (table 2.12) de la réponse à ces excitations représentatives des conditions réelles d'usage a été rajoutée à la celle de la réponse impulsionnelle de la figure 2.11.

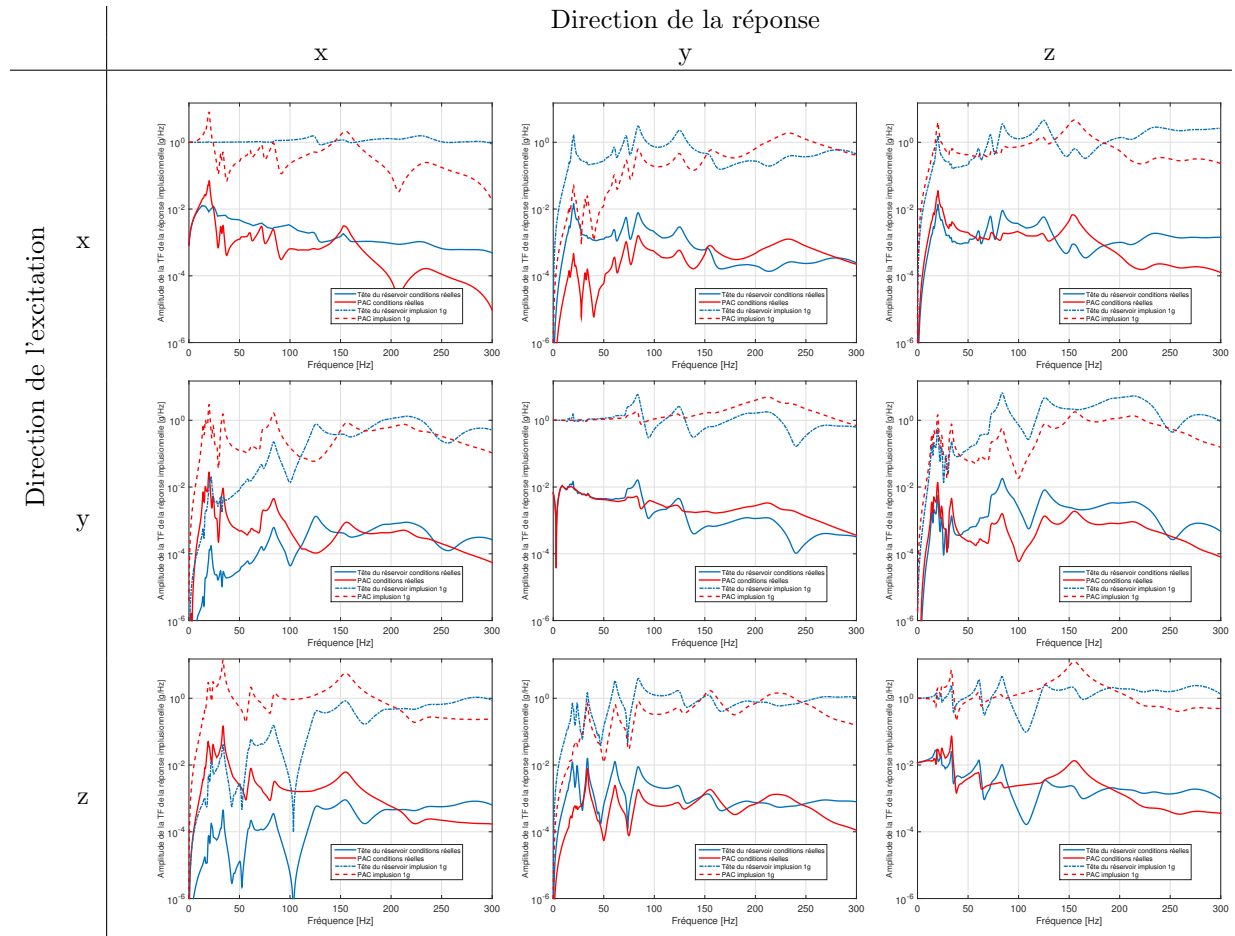


TABLE 2.12 – Comparaison des réponses aux sollicitations des conditions réelles d'usage à la base à la tête du réservoir et au centre de gravité de la PAC

Les réponses sont similaires avec un rapport d'amplitude d'environ 1.10^{-2} à 1.10^{-3} plus faible lorsque les conditions réelles d'usage sont prises en compte. Ce qui correspond au niveau des profils pris en compte (figure 2.24). Ce résultat est sans surprise au regard de l'équation (2.84). Il confirme que si le domaine fréquentiel des amplitudes les plus élevées de l'excitation correspond au domaine des plus grandes amplitudes des coefficients d'influence dynamique, la réponse aux excitations sera amplifiée aux fréquences correspondantes. Or, la caractérisation de l'environnement vibratoire a relevé que le domaine fréquentiel auquel sera soumis le système étudié au cours de sa vie s'étend de 6 à 200 Hz. C'est la raison pour laquelle les systèmes embarqués doivent être conçus de telle manière que le domaine fréquentiel des coefficients d'influence dynamique aux points correspondants aux éléments identifiés comme étant sensibles soit supérieur à 200 Hz. Si les éléments sensibles sont de masses non considérées comme principales, une analyse plus fine doit être poursuivie au voisinage de ces points.

Conclusion du chapitre 2

Les études menées dans ce chapitre ont permis d'identifier les points, du système à pile à combustible étudié, rendus critiques par les sollicitations vibratoires et climatiques auxquelles il sera soumis.

Les analyses qualitatives de sûreté de fonctionnement mettent en évidence les défaillances causées par l'environnement extérieur et qui sont jugées critiques par les experts ayant la connaissance du système. Les analyses fonctionnelles et dysfonctionnelles du système permettent de dresser une liste exhaustive des composants critiques du système nécessitant des études plus approfondies.

En phase de conception, ni la géométrie et ni l'intégration des composants dans le système ne sont pas figées. L'étude du comportement dynamique d'un système mécanique complexe permet de baser sa conception en tenant compte des sollicitations vibratoires qu'il subira durant sa vie. Ces conditions vibratoires au plus proche des fixations d'un composant sont influencées par les sollicitations subies par le système complexe à ses fixations. La caractérisation de l'environnement vibratoire en un point éloigné du composant critique suivi d'une modélisation des « masses principales » du système permettent de déterminer le profil des vibrations que ce composant devra subir.

Ainsi, l'association des analyses qualitatives de sûreté de fonctionnement avec les analyses par modélisation globale, type « masses principales » du comportement dynamique du système permettent de caractériser les sollicitations des composants critiques d'un système mécanique complexe lorsqu'il est soumis aux conditions réelles d'usage.

Parmi les composants critiques du SPAC, le tuyau d'hydrogène est pris comme exemple dans le chapitre suivant. L'analyse du comportement dynamique de ce composant critique sera approfondie par l'évaluation du dommage qu'il subit par l'environnement vibratoires déterminées.

3 Analyse locale d'un système mécanique complexe à l'exemple d'un SPAC

*« Tous les modèles sont faux,
certains sont utiles. »
George Box (1919-2013)*

Sommaire

3.1	Dompage par fatigue d'une pièce mécanique	95
3.1.1	La fatigue des systèmes mécaniques	95
3.1.2	Définition du dompage par fatigue	95
3.1.3	Endommagement d'une structure mécanique	96
3.1.4	Application à l'endommagement de composants tels que le tuyau d'hydrogène	98
3.1.4.1	Détermination de la contrainte limite d'endurance de l'inox 316L	98
3.1.4.2	Caractéristiques du tuyau d'hydrogène	99
3.2	Modélisation des comportements dynamiques localisés	99
3.2.1	Etude d'une géométrie simple	101
3.2.1.1	La géométrie proposée	101
3.2.1.2	Modélisation par une poutre droite	101
3.2.1.3	Évaluation de la contrainte maximale	102
1)	Notion de contrainte équivalente	102
2)	Le critère de Von Mises	103
3)	Discrétisation	103
4)	Détermination de la contrainte équivalente maximale subie par le tuyau d'hydrogène	104
3.2.1.4	Évaluation du dompage par fatigue	106
3.2.2	Optimisation de la géométrie visant à minimiser la contrainte maximale	109
3.2.2.1	Formulation du problème d'optimisation	109
3.2.2.2	Résultats de la contrainte équivalente maximale	111
1)	Forme 1	111
2)	Forme 2	112

3)	Forme 3	115
3.2.2.3	Validation du choix de la géométrie par l'évaluation du dommage par fatigue	117
1)	Minimisation de la fonction objectif	118
2)	Vérification de l'adéquation aux fonctions de contrainte	118
3)	Discussion sur le choix de la géométrie du tuyau d'hydrogène	118

Le chapitre précédent a montré comment déterminer les excitations vibratoires engendrées par les sollicitations d'usage du véhicule et transmises par l'intégration des masses principales d'un système mécanique complexe tel que le SPAC. Il a également permis de mettre en évidence les composants critiques du système. Dans le cas du SPAC étudié, le comportement dynamique du tuyau d'hydrogène reliant le réservoir d'hydrogène à la PAC va être analysé. Ce troisième chapitre étudie les dommages que pourraient causer ces excitations vibratoires à ces composants. Reposant sur l'analyse des contraintes, le dommage dépend de la géométrie du composant étudié. Le choix de cette géométrie est l'enjeu majeur de la phase de conception du système. Le but est d'orienter la conception et l'intégration de tels composants de façon à tenir compte des objectifs de sûreté de fonctionnement dans les conditions environnementales fixées.

3.1 Dommage par fatigue d'une pièce mécanique

3.1.1 La fatigue des systèmes mécaniques

La durée de vie d'un système mécanique de matériau homogène, fonctionnant dans des conditions réelles d'usage, dépend directement de l'état de fatigue du matériau. La fatigue peut être abordée de plusieurs façons.

Un matériau peut être considéré à une échelle macroscopique. Ses propriétés intrinsèques peuvent être représentées par des courbes de fatigue, telle que la courbe dite de « Wöhler ».

Une autre approche de la fatigue consiste à étudier le comportement du matériau face à l'apparition de défauts caractéristiques, tels que les fissures, pouvant conduire à la rupture. Une analyse plus fine n'est pas appropriée au stade de la conception. Elle est cependant pertinente pour valider le système lorsque celui-ci est fabriqué. Elle se base en effet sur des observations microscopiques d'échantillons ayant subi un grand nombre de cycles de sollicitations ainsi que sur une modélisation précise d'une zone du système dont le dessin est alors déjà disponible. Il est donc pertinent de recalibrer ce type de modèle sur la base d'essais réels.

L'analyse fondée sur l'hypothèse d'un matériau homogène considéré à l'échelle macroscopique apparaît comme la plus adaptée pour l'évaluation du dommage. Elle doit être réalisée avant la détermination du dessin définitif des composants « critiques » du système puisque le but d'apporter une aide à la conception de ces composants.

Pour asseoir la démarche, nous rappelons quelques définitions et concepts de base sur la fatigue.

3.1.2 Définition du dommage par fatigue

Concernant les pièces mécaniques, leur durée de vie est définie par le nombre N de cycles de contraintes σ qui conduisent à la rupture. Elle correspond à l'inverse du dommage (D) subi par l'élément étudié :

$$D_{ureedevie} = \frac{1}{D} \quad (3.1)$$

Le dommage par fatigue est un indicateur permettant de mesurer la détérioration d'une pièce mécanique soumise à des contraintes répétées. La rupture de la pièce se produit lorsque $D = 1$. Le dommage global est la somme des dommages élémentaires créés par les différents niveaux de contrainte σ_i :

$$D = \sum_i d_i \quad (3.2)$$

3.1.3 Endommagement d'une structure mécanique

Il existe un grand nombre de lois de cumul d'endommagement. Parmi elles, la loi d'endommagement linéaire de Palmgren-Miner est la plus utilisée, notamment dans le domaine automobile.

$$d_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3.3)$$

où

n_i : nombre de répétitions d'un cycle de sollicitations d'amplitude σ_i
 N_i : nombre de répétitions du cycle nécessaire à la rupture de la pièce mécanique étudiée ($N_i > n_i$) sous des sollicitations d'amplitude σ_i

Pour un matériau donné, le nombre de cycles à la rupture est défini par la courbe de *Wöhler* (figure 3.1). Cette courbe est généralement décomposée en 3 zones :

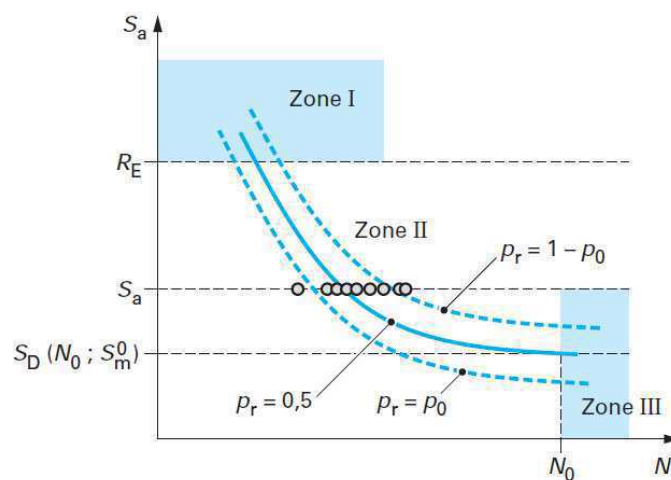


FIGURE 3.1 – Courbes de Wöhler [Kouta and Play, 2007b]

- la zone I correspond à la zone de fatigue *oligocyclique*. Les contraintes sont supérieures à la limite d'élasticité du matériau (R_E). La rupture survient généralement avant 10^5 cycles. Dans cette zone, la loi de Manson-Coffin, généralement utilisée, permet de relier l'amplitude de la déformation plastique ($\Delta\varepsilon_p$) au nombre de cycles à la rupture (N) :

$$\Delta\varepsilon_p N^\alpha = Constante \quad (3.4)$$

Où α et *Constante* sont dépendantes du matériau et de l'environnement.

- la zone II correspond à la zone de *fatigue* ou d'endurance limitée. La rupture est atteinte après un nombre limité de cycles (entre 10^5 et 10^7 cycles). Dans cette partie centrale, plusieurs relations permettent de relier le niveau de contrainte (σ) au nombre de cycles (N). La plus répandue est la relation de Basquin. En accord avec C. Lalanne [Lalanne, 1999b], c'est celle qui sera adoptée dans la suite de l'étude. Lorsque la contrainte moyenne des essais de caractérisation du matériau est nulle ($\sigma_m = 0$), la contrainte appliquée est une contrainte alternée ($\sigma = \sigma_a$), alors la relation de Basquin s'écrit :

$$N_i \sigma_i^b = A^b = Constante \quad (3.5)$$

où

b : paramètre prenant en compte la concentration de contraintes

A : constante liée au matériau

Le paramètre b a une grande influence sur l'estimation de la durée de vie. Lorsque b est petit, la résistance à la fatigue diminue plus rapidement avec l'augmentation du nombre de cycles. Ce paramètre permet de prendre en compte l'influence d'une concentration de contraintes. Il varie généralement entre 4 et 25 [GAM-EG-13, 1992]. *Remarque* : La relation (3.5) est souvent présentée de la manière suivante :

$$\sigma_i = AN^{-\alpha} \text{ où } \alpha = \frac{1}{b} \quad (3.6)$$

- la zone III correspond à la zone de *sécurité* ou d'endurance illimitée. Les contraintes sont les plus faibles. La rupture apparaît après un nombre de cycles supérieurs à la durée de vie envisagée pour la pièce. Généralement une droite asymptotique horizontale peut être tracée ; elle correspond à la limite d'endurance ou de fatigue (S_D). Elle est définie pour une contrainte moyenne nulle ($S_m^0 = 0$) et elle correspond à une durée de vie (N_0). Pour les aciers, $N_0 = 10^7$ [Lalanne, 1999b]. En dessous de cette contrainte limite, il n'y a pas de rupture par fatigue quelque soit le nombre de cycles. La contrainte limite d'endurance (S_D) peut être déterminée par prolongation de la droite de *Basquin*, comme indiqué sur la figure 3.2. D'après (3.5),

$$S_D = AN_0^{-\frac{1}{b}} \quad (3.7)$$

La courbe de Wöhler admet une asymptote horizontale dans la zone III d'endurance illimitée pour les durées de vie supérieures à 10^7 cycles à la rupture pour les chargements inférieurs à la contrainte de limite d'endurance (figure 3.1). La contrainte objectif ($\sigma_{objectif}$) qui ne doit pas être dépassée aux points critiques du système. Elle doit être égale à la contrainte limite d'endurance (S_D) du matériau en ces points.

3.1.4 Application à l'endommagement de composants tels que le tuyau d'hydrogène

Nous appliquons ici ces considérations sur la fatigue à des composants tels que le tuyau alimentant la PAC en hydrogène. Ce tuyau, rappelons le, est en inox 316L.

3.1.4.1 Détermination de la contrainte limite d'endurance de l'inox 316L

De nombreuses études du nombre de cycles à la rupture sous contraintes alternées permettent de déterminer l'exposant b et la constante A de la relation de Basquin, et d'en déduire la limite d'endurance S_D . La table 3.1 présente 4 études visant à déterminer les paramètres de la droite de Basquin. Chacune d'elles est réalisée sur des éprouvettes d'inox 316L. Cependant les résultats diffèrent. L'étude de C. Skipper [Skipper, 2008], réalisée sous environnement hydrogène, permet de déduire une limite d'endurance moins contraignante que les autres. Les résultats de l'étude de Angelova [Angelova et al., 2014] sont un compris entre les différents essais. La limite d'endurance $S_D = 224,7$ [MPa] sera donc utilisée dans la suite de l'étude (figure 3.2).

Conditions d'essais	b	A [MPa]	S_D [MPa]	Sources
Éprouvettes testés entre $1, 15 \cdot 10^5$ et $2, 20 \cdot 10^6$ cycles	4,72	5749,6	188,6	[Puchi-Cabrera et al., 2008]
9 Éprouvettes sous environnement hydrogène testées entre $4 \cdot 10^3$ et $5 \cdot 10^6$ cycles	15,63	1003,9	357,8	[Skipper, 2008]
8 Éprouvettes testées entre $4 \cdot 10^3$ et $5 \cdot 10^5$ cycles	12,34	1044,8	283,2	[Skipper, 2008]
10 Éprouvettes testées entre $1 \cdot 10^4$ et $3 \cdot 10^6$ cycles	9,93	1139,1	224,7	[Angelova et al., 2014]

TABLE 3.1 – Valeurs de b et de A de la littérature pour l'acier inox 316L

De la même manière que l'inox 304L, la limite d'endurance de l'acier inoxydable de type 316L est influencée par de nombreux facteurs. Y. Lehericy [Lehericy, 2007] a mis en évidence qu'elle est directement liée à la taille de la plus longue fissure créée en pré-recyclage. Il a également observé que l'état de surface a un impact sur cette limite d'endurance en comparant un matériau poli avec un matériau meulé.

A titre indicatif, les essais conduits par T. Michler et al. [Michler et al., 2013] sur la durée de vie d'alliage contenant de l'aluminium mettent en évidence une nette diminution de la contrainte limite d'endurance sous hydrogène ($S_D = 64$ MPa).

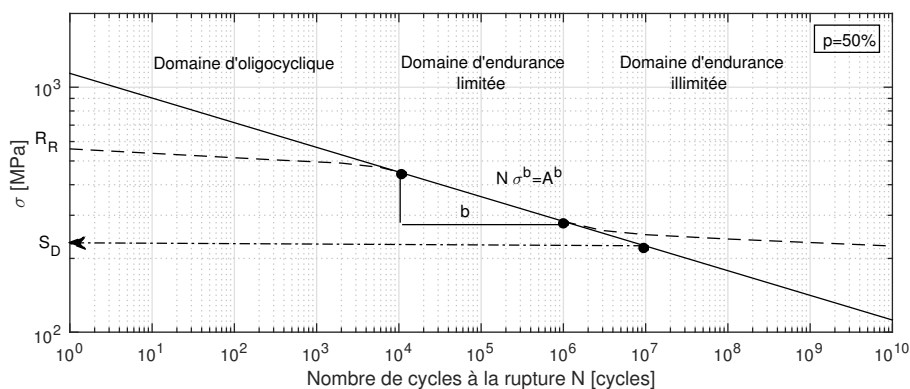


FIGURE 3.2 – Modèle analytique de la courbe de Wöhler pour l'inox 316 L [Angelova et al., 2014]

Dans le domaine automobile, C.M. Sonsino [Hägele and Sonsino, 2011], a évalué que la corrosion par le sel fait très nettement baisser la courbe S-N dans le cas de châssis en aluminium. Bien que la corrosion par le sel n'ait pas le même effet sur l'inox 316L, la prise en compte d'un environnement salin devrait être une perspective d'approfondissement.

3.1.4.2 Caractéristiques du tuyau d'hydrogène

Les caractéristiques du tuyau d'hydrogène connues, à ce stade de la conception, sont les propriétés géométriques de la section, imposées par les standards ANSI B.36-10 et ANSI B 36-19, ainsi que son matériau constitutif l'inox austénitique de type 316L. Le rayon de courbure minimum est généralement imposé par le fabricant du tuyau. Il a été fixé, pour les besoins de l'étude, sur la base de notre expérience.

La table 3.2 présente les caractéristiques du tuyau d'hydrogène étudié.

Ainsi, une analyse succincte du dommage permet de traduire les exigences, issues de l'analyse des risques, ainsi que les fonctions de contraintes, imposées par le cahier des charges, en spécifications techniques du composant critique, ici du tuyau d'hydrogène. En effet, les caractéristiques présentées dans la table 3.2, regroupent les informations nécessaires à la conception du tuyau d'hydrogène.

3.2 Modélisation des comportements dynamiques localisés

Comme introduit ci-dessus, le nombre de cycles à la rupture dépend directement des cycles de contraintes subies dépendant de la géométrie de l'élément étudié. La simulation des excitations appliquées aux extrémités du tuyau d'hydrogène, permet de calculer les contraintes qui en résultent. Le traitement spectral des signaux est souvent associé à la modélisation par éléments finis pour l'évaluation de la durée de vie d'une structure soumise à des chargements multi-axiaux [Marin, 2010]. Le matériau du tuyau d'hydrogène étant

Géométrie		Sources	
Longueur	$L [m]$	libre	
Diamètre extérieur	$d_{ext} [m]$	$9,25 \cdot 10^{-3}$	ANSI B.36-19
Epaisseur	$e [m]$	$0,89 \cdot 10^{-3}$	ANSI B. 36-19
Rayon minimum de courbure	$r_{min} [m]$	$3,00 \cdot 10^{-2}$	
Fixations aux extrémités		Encastrement	
Vecteur aux extrémités	coté réservoir	$[0 -1 0]$	
	coté PAC	$[-1 0 0]$	
Coordonnées des extrémités	coté réservoir $[m]$	$[1,03 0,53 0,16]$	géométrie du chapitre 2
	coté PAC $[m]$	$[1,08 0,27 0,18]$	géométrie du chapitre 2
Matériau			
Type		acier inox 316L	[Kanezaki et al., 2008]
Module d'Young	$E [Pa]$	$193 \cdot 10^9$	matweb
Densité	$\rho [kg/m^3]$	8000	matweb
Coefficient de Poisson	ν	0.25	matweb
Contrainte limite d'élasticité	$R_E [Pa]$	$290 \cdot 10^6$	matweb
Contrainte maximale à la rupture	$R_R [Pa]$	$560 \cdot 10^6$	matweb
Wöhler			
	b	9,93	[Angelova et al., 2014]
Constante de la courbe	$A [Pa]$	$1139,1 \cdot 10^6$	[Angelova et al., 2014]
Contrainte limite d'endurance	$S_D [Pa]$	$224,7 \cdot 10^6$	

TABLE 3.2 – Caractéristiques de l'élément critique étudié: le tuyau d'hydrogène entre le réservoir et la PAC

homogène, l'amplitude maximale des contraintes sur l'ensemble du tuyau est recherchée. Bien que l'état de contrainte soit multi-axial, la contrainte maximale est évaluée par l'utilisation de la contrainte équivalente de Von Mises. Cette méthode est couramment utilisée pour l'estimation du dommage par fatigue dans le cas de sollicitations aléatoires [Sun and Wang, 2001] et [Pitoiset and Preumont, 2000]. Par ailleurs la géométrie et la longueur du tuyau sont libres. Le but de ce paragraphe est la recherche d'un optimum sur la géométrie du tuyau d'hydrogène entre le réservoir et la PAC tout en répondant au cahier des charges à présent caractérisé.

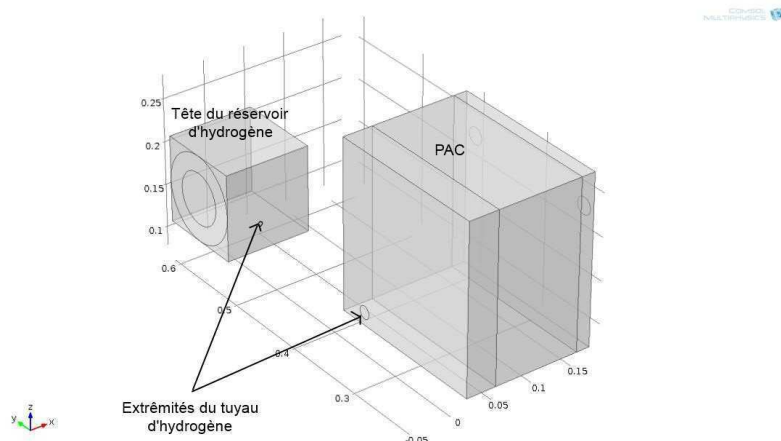


FIGURE 3.3 – Schéma d'implantation du tuyau d'hydrogène

La figure 3.3 présente les points de fixation aux extrémités du tuyau d'hydrogène.

La forme du tuyau, entre ces points, est quant à elle libre.

La première partie de cette étude analyse le comportement du tuyau dont la longueur est la plus courte possible entre les deux points de fixation. Ces points de fixations sont, pour l'exemple étudié dans ce document, considérés comme étant imposés. Puis, le même type d'analyse sera appliqué sur différentes géométries afin d'orienter le choix de la conception permettant de répondre à l'exigence de durée de vie imposée. Le choix de ces différentes formes se base sur des mises œuvrés courantes dans l'industrie. La première forme est la plus rectiligne possible, la seconde propose une multiplication de « coudes » à 90°, et la dernière propose des spires.

3.2.1 Etude d'une géométrie simple

3.2.1.1 La géométrie proposée

Les caractéristiques de la géométrie du tuyau, présentées dans la table 3.2, permettent de dessiner la géométrie pour laquelle la longueur $L = 25,7\text{cm}$ du tuyau est minimale. Le dessin est présenté sur la figure 3.4a). L'origine du repère choisi correspond à l'origine du repère utilisé lors de la modélisation « masses principales » réalisée dans le chapitre 2. La figure 3.4b situe le dessin du tuyau dans le repère.

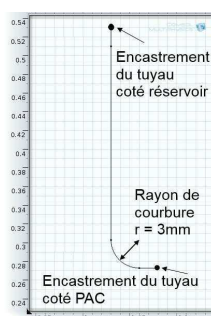


FIGURE 3.4 – Géométrie de la poutre ($L = 25,7\text{ cm}$)

Soit le repère local $R' \{P; \vec{x}', \vec{y}', \vec{z}'\}$ en un point P de la poutre. \vec{x}' est l'axe principal de la poutre. Ainsi lorsque P appartient au segment situé du côté du réservoir sur la figure 3.4, on a $\vec{x}' = \vec{y}$ dans le repère général du SPAC. Lorsque P appartient à la partie située entre le coude et la PAC, on a $\vec{x}' = \vec{x}$.

3.2.1.2 Modélisation par une poutre droite

Le tuyau d'hydrogène est modélisé par une poutre droite. Ce choix est fait sur la base d'un rapport, généralement admis, de la longueur minimale du tuyau sur la section de celui-ci supérieur à 20 (3.8), et bien que le rapport du rayon de courbure de la fibre moyenne sur la section soit inférieur à 5 (3.9).

$$\frac{L}{d_{ext}} = \frac{25,7}{0,925} = 27,7 > 20 \quad (3.8)$$

$$\text{et, } \frac{r_{min}}{d_{ext}} = \frac{3}{0,925} = 3,2 < 5 \quad (3.9)$$

Par ailleurs, la modélisation du tuyau par une poutre implique des hypothèses. En plus de celles déjà posées dans le chapitre 2, d'autres hypothèses viennent s'ajouter :

- Hypothèses de Navier et d'Euler-Bernoulli : Les sections planes restent planes. C'est à dire qu'il n'y a pas de gauchissement : les sections subissent une simple rotation. De plus, elles restent normale à la fibre moyenne déformée. Ces deux hypothèses reviennent à négliger le cisaillement.

- Hypothèse de Saint-Venant : Le point d'observation P est suffisamment éloigné de la région d'application des sollicitations. Cette hypothèse vise à minimiser les effets de bords.

Les hypothèses ci-dessus sont donc vérifiées si :

- la poutre est suffisamment élancée (beaucoup plus longue que large),
- elle ne présente aucune variation brutale de section,
- sa courbure est faible ou nulle,
- le point d'observation est éloigné des points de fixations,
- les déformations restent faibles.

Par ailleurs les encastremets aux deux extrémités sont supposés idéaux ce qui est assez éloigné des conditions réelles.

Enfin la simulation est réalisée sans tenir compte des contraintes internes liées à la pression de l'hydrogène circulant à l'intérieur du tuyau. Les simulation sont faites « à vide ».

Sous ces hypothèses, le tenseur des contraintes en un point P de la poutre est de la forme suivante :

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{x'x'} & \sigma_{x'y'} & \sigma_{x'z'} \\ \sigma_{y'x'} & 0 & 0 \\ \sigma_{z'x'} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

3.2.1.3 Évaluation de la contrainte maximale

1) Notion de contrainte équivalente :

Afin de pouvoir comparer un état de contrainte à la contrainte limite intrinsèque du matériau, il est nécessaire de pouvoir évaluer une matrice de contraintes par une *contrainte de comparaison* ou *contrainte équivalente* (σ_{eq}).

La contrainte équivalente peut être déterminée selon plusieurs critères. Parmi les critères les plus répandus, on peut citer, le critère de Mohr-Coulomb qui se base sur le cercle de Mohr ; le critère de Tresca (ou critère du plus grand cisaillement) considère que la contrainte de cisaillement comme étant la contrainte critique (il s'agit d'un cas particulier

du critère de Mohr dans le cas où les contraintes élastiques de traction et de compression sont égales) : il convient bien pour les matériaux ductiles. Le critère de Von Mises (ou critère du plus grand travail de distorsion) considère, quant à lui, l'énergie nécessaire pour déformer le volume. Le choix du critère de Von Mises a été fait pour la suite de l'étude car d'une part il est bien adapté aux aciers isotropes tels que l'inox 316L et d'autre part pour sa facilité de détermination et son emploi largement répandu. Notons que l'emploi de la contrainte équivalente de Von Mises n'est cependant pas bien adapté lorsque la direction principale du chargement varie dans le temps [Sonsino, 1995].

2) Le critère de Von Mises :

Le critère de Von Mises, déterminant une contrainte équivalente σ_{eqVM} , se base directement sur les termes de la matrice des contraintes. La forme générale de la contrainte équivalente de Von Mises est la suivante :

$$\sigma_{eqVM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{32}^2)} \quad (3.11)$$

3) Discrétisation :

Afin de permettre les calculs de la contrainte de Von Mises de manière localisée, il est nécessaire de discrétiser le modèle géométrique, passant ainsi d'un problème continu à un problème discret.

Comme déjà utilisé dans le chapitre précédent, d'après le théorème de convergence, le résultat obtenu par une géométrie discrétisée se rapproche de la solution du cas continu, à mesure que la taille des éléments de discrétisation diminue.

Domaine de validité du théorèmes de convergence :

Tout d'abord, une hypothèse supplémentaire est posée : l'étude est réalisée dans le domaine de validité des théorèmes de convergence. C'est-à-dire, notamment que, l'ensemble des points de la zone du SPAC étudié ne sont pas des *singularités*.

Une *singularité* est un point au voisinage duquel la contrainte et la déformation tendent vers l'infini à mesure qu'on se rapproche de celui-ci.

Cette hypothèse peut être appliquée si :

- la géométrie ne présente pas d'angle rentrant,
- les propriétés des matériaux de la structure étudiée ne changent pas de manière brutale,
- les chargements sont appliqués sous forme de pression de contact répartie.

Même si dans cette étude, les parties du système analysé sont considérées sans singularité, il est important de signaler qu'en mécanique de la rupture, le *facteur d'intensité des contraintes* est généralement utilisé pour dimensionner une pièce mécanique au voisinage des singularités. En effet une fissure est, à juste titre, une singularité. Alors qu'il n'est pas possible de déterminer la contrainte maximale (tendant vers l'infini) au point de l'amorce de la fissure, le champ des contraintes au voisinage de la singularité est pris en compte. Il s'exprime en $[MPa.m^{\frac{1}{2}}]$. La fissure devient instable (conduisant à une rupture)

lorsque le facteur d'intensité des contraintes dépasse une valeur limite appelée *tenacité*. Il s'agit d'un critère de propagation. La tenacité est une propriété intrinsèque du matériau. L'analyse de la propagation des fissures intervient dans une autre approche de la fatigue qui évalue une vitesse de propagation et une longueur limite des fissures conduisant à la rupture. Comme déjà précisé, cette seconde approche n'est pas celle utilisée dans cette étude.

Choix du niveau de discrétisation :

Plus la taille des éléments diminue, plus le nombre de degrés de liberté du système augmente, allongeant bien évidemment le temps de calcul. Un compromis doit donc être trouvé.

Le choix de la discrétisation de la géométrie en plusieurs éléments doit être réalisé au regard de la qualité des résultats attendus de la simulation. Le résultat attendu ici est la contrainte maximale de Von Mises, c'est donc sur la qualité de sa valeur que le choix de la discrétisation est réalisé.

Afin de choisir judicieusement le nombre d'éléments de discrétisation de la géométrie, un test faisant varier le nombre d'éléments de 7 à 60 permet de constater une chute de la valeur de la contrainte maximale entre 9 et 11 éléments. Après cette chute, la contrainte se stabilise à mesure que le nombre d'éléments augmente. C'est-à-dire que le modèle converge. Ainsi, après cette vérification, une discrétisation en 60 éléments peut être choisie sereinement car ce nombre est bien supérieur au nombre d'éléments critique après la chute de la valeur de la contrainte. Par ailleurs, la géométrie modélisée étant non complexe, le nombre d'éléments reste très faible au regard des capacités du ordinateur utilisé pour ce travail.

4) Détermination de la contrainte équivalente maximale subie par le tuyau d'hydrogène :

Le tuyau d'hydrogène est à présent modélisé, sur le critère géométrique minimisant sa longueur. Si maintenant un chargement est appliqué à chacune de ses extrémités, le calcul de la valeur de la contrainte équivalente à tout point P du modèle discrétisé peut être réalisé. Les valeurs sont comparées sur toute de la longueur du tuyau et le maximum de ces valeurs est retenu.

Le chargement subi par le tuyau d'hydrogène étant un chargement aléatoires, la réponse attendue en tout point P est également aléatoire.

Les excitations vibratoires sont appliquées, dans les 3 directions, aux deux extrémités du tuyau d'hydrogène. Elles ont été déterminées par le calcul des influences dynamiques réalisées au chapitre 2. Enfin la contrainte équivalente maximale sur la longueur du tuyau est évaluée. Le chargement étant décrit par un signal aléatoire représenté par sa transformée de Fourier en fonction de la fréquence (ω) la contrainte équivalente maximale est également fonction de ω . Comme les déformations et les contraintes sont liées par la loi de Hooke et que les déformations sont liées linéairement aux déplacements, on peut écrire :

$$q(\omega) = \mathbf{K}\sigma(\omega) \text{ où } \mathbf{K} \text{ est une matrice constante} \quad (3.12)$$

La table 3.3 présente l'amplitude de la contrainte maximale, du tuyau d'hydrogène, en fonction de la fréquence pour chacune des trois simulations correspondantes aux trois directions d'excitation du SPAC.

Direction de l'excitation	Spectre de la σ_{max}	Focus sur la valeur maximale du spectre	
		fréquence [Hz]	σ_{max} [Pa]
x		20	$4,01 \cdot 10^6$
y		20	$1,37 \cdot 10^6$
z		19	$4,15 \cdot 10^6$

TABLE 3.3 – Evaluation de la contrainte maximale dans le tuyau d'hydrogène

Ces trois spectres fréquentiels ont l'allure générale des profils de réponses aux excitations de la PAC, d'avantage que ceux du réservoir (chapitre 2). Ceci permet de supposer que les contraintes maximales sont localisées vers l'extrémité de la PAC. Mais, cette localisation exacte n'est pas recherchée car ce tuyau est défaillant dès lors qu'il ne réalise plus sa fonction à un point P. En effet, le composant étudié est destiné à être fabriqué d'un même matériau supposé homogène et usiné en un seule pièce sans raccord. Ainsi l'amplitude de la contrainte maximale est donc le principal résultat recherché.

Les niveaux de la contrainte maximale dans le tuyau d'hydrogène sont équivalents lors des excitations dans les directions x et z (respectivement $4,01$ MPa et $4,15$ MPa).

En première interprétation, on peut constater que ces valeurs sont inférieures à la contrainte d'endurance du matériau inox 316L ($S_D = 224,7$ [MPa] (table 3.2)). Ce niveau de contraintes permettrait donc, d'après la courbe de Whöler du matériau (fig.3.2), au tuyau de subir un nombre de cycles, dans ces conditions, tendant vers l'infini avant sa rupture. Cette conclusion est cependant peu précise car elle suppose que cette amplitude de contraintes soient constante dans le temps. Par ailleurs cette conclusion ne prend en compte les contraintes provenant que d'une seule des trois directions des excitations.

Afin d'évaluer, de manière quantifiée, la fatigue du tuyau d'hydrogène dans ces conditions, un calcul du dommage par fatigue est réalisé.

3.2.1.4 Évaluation du dommage par fatigue

Comme déjà introduit précédemment (section 3.1), le dommage est un nombre sans dimension permettant de quantifier l'endurance d'un matériau soumis à des historiques de chargements variés [Kouta and Play, 2007b]. L'hypothèse est faite que la moyenne des contraintes subies par le tuyau d'hydrogène est nulle.

En reprenant la définition du dommage (3.4), son cumul selon la loi de Palmgren-Miner (3.3), ainsi que la relation de Basquin (3.6) permettent d'exprimer un niveau de contrainte en fonction du nombre de cycle à la rupture déterminée par la courbe de Whöler, on a :

$$D = \frac{1}{A^b} \sum_i n_i \sigma_i^b \quad (3.13)$$

Le nombre de cycles n_i correspond au nombre de cycles dont l'amplitude de la contrainte est égale à σ_i . La principale difficulté réside dans l'estimation du nombre de cycles d'une contrainte donnée dans le cas de sollicitations aléatoires.

Deux approches existent : les analyses statistiques et les analyses fréquentielles [Kouta and Play, 2007a]. Les analyses fréquentielles relient les fréquences des sollicitations étudiées à leurs amplitudes. Elles ont l'inconvénient de procéder à plusieurs hypothèses simplificatrices. Les analyses statistiques ont l'inconvénient d'ignorer l'historique des événements. Les analyses statistiques globales modélisent la dispersion naturelle des sollicitations permettant de modéliser les conséquences de ces sollicitations en termes notamment de durée de vie. Les analyses statistiques locales se basent sur les méthodes de comptage des charges aléatoires. Parmi elles, les plus répandues sont la méthode de la « goutte d'eau » (en anglais « rainflow »), la méthode « du réservoir », ou encore la méthode de la matrice de transition (ou matrice de Markov).

Or chaque niveau de contrainte σ_i est, ici, défini pour une fréquence d'excitation f donnée. Le signal temporel de ces excitations n'est, dans le cas présent, pas disponible. L'analyse du dommage de manière fréquentielle est donc utilisée.

Dans le cas d'une excitation aléatoire, la méthode généralement adoptée [Lalanne, 1999b], consiste à considérer chaque pic positif de contrainte σ_i comme étant dommageable pour la structure étudiée. Les maxima négatifs, correspondant à des contraintes de compression ne sont pas pris en compte dans le calcul du dommage. Le

nombre moyen des maxima positifs pendant une durée T de sollicitations est :

$$n_i = n_i^+ T \quad (3.14)$$

où n_i^+ est le nombre moyen de pics par unité de temps.

Soit $q(\sigma)$ la densité de probabilité des pics de contraintes dans le tuyau d'hydrogène.

Le dommage D est égale à [Lalanne, 1999b] :

$$D = \frac{1}{A^b} n_i^+ T \int_0^{+\infty} \sigma^b q(\sigma) d\sigma \quad (3.15)$$

Par ailleurs, en considérant que les sollicitations subies par le tuyau d'hydrogène sont à bande étroite, et en supposant que la réponse est gaussienne, comme décrit par [Lalanne, 1999b], D peut être approximé de la manière suivante :

$$D \simeq \frac{n_0^+ T}{A^b} (\sqrt{2}\sigma_{eff})^b \Gamma(1 + \frac{b}{2}) \quad (3.16)$$

où

T est la durée pendant laquelle le système subira les sollicitations = 5000 h

Γ est la loi Gamma

n_0^+ est le nombre de passages par zero de la sollicitation

Le phénomène est considéré comme étant à bande étroite si le facteur d'irrégularité $r = n_0^+/n_i^+$ est compris entre 0,567 et 1. Comme dans la pratique courante, l'hypothèse est prise ici que $r = 1$ [Lalanne, 1999b].

Le **spectre de dommage par fatigue** (SDF) est la courbe représentant le dommage D ainsi obtenu en fonction de la fréquence. Le spectre de dommage par fatigue est établi en déterminant ainsi le dommage correspondant à chaque valeur de la contrainte équivalente de Von Mises maximale sur le tuyau à chacune des fréquences d'excitations du système ; et ce, dans les trois 3 directions (table 3.4).

Les fréquences pour lesquelles le dommage est le plus élevé correspondent, bien évidemment, à celles dont la contrainte équivalente maximale est également la plus élevée. La localisation de la contrainte maximale relevée le long du tuyau d'hydrogène étant non déterminée, dans le cas le plus défavorable, un seul point P subit l'ensemble de ces contraintes maximales. Ce point doit donc résister au cumul des dommages à chaque fréquences de l'ensemble du domaine.

Par ailleurs, les sollicitations auxquelles est soumis le SPAC par ses fixations au véhicule sont multi-directionnelles. Ainsi l'ensemble des éléments du système subissent les dommages causées par ces excitations multi-directionnelles. Les dommages selon les trois direction se cumulent donc selon la loi de Palmgren-Miner. Les dommages causés par chacune de ces trois simulations d'excitations se cumulent donc.

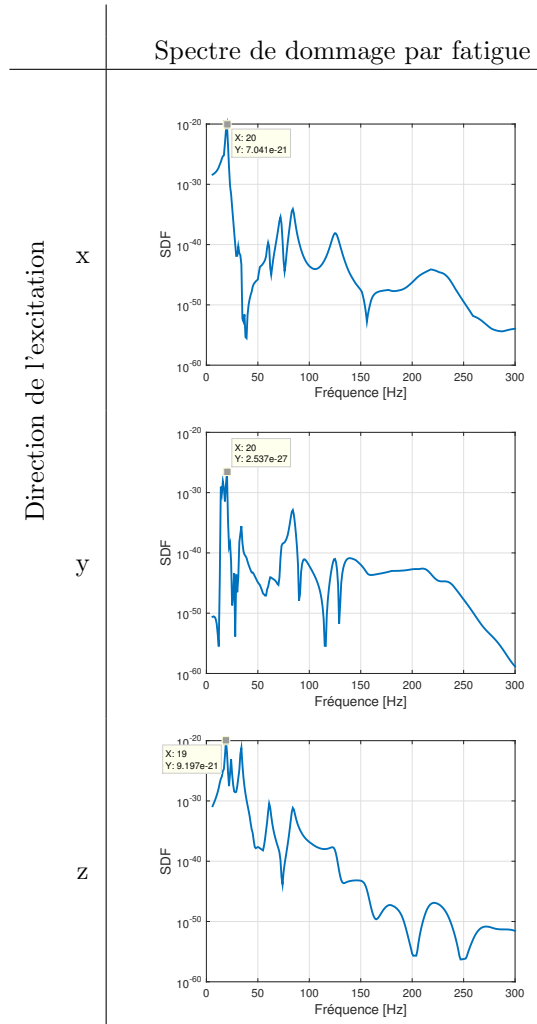


TABLE 3.4 – Spectre de dommage par fatigue dans le tuyau d'hydrogène

Conclusion sur le dommage subi par le tuyau de longueur minimisée :

Le dommage total subi par un point P du tuyau d'hydrogène ainsi dessiné, est donc $D_{tot} \simeq 1,5 \cdot 10^{-12} < 1$ d'après les équations (3.16) et (3.17). Cette valeur étant inférieure à 1, l'objectif de tenue en fatigue à une durée de sollicitation de 5000 heures peut être atteint par le tuyau d'hydrogène ayant cette géométrie.

$$D_{tot} \simeq \sum_{x,y,z} \sum_{f=6}^{300} D(f) \quad (3.17)$$

Les différents enjeux de l'intégration d'un SPAC dans un véhicule électrique déjà conçu nécessitent d'envisager plusieurs géométries et emplacements des composants même les plus critiques. Afin de mesurer l'impact de différentes géométries du tuyau sur le dommage qu'il subit, la comparaison de plusieurs propositions de dessin fournit au concepteur une aide supplémentaire pour proposer sa première conception sur des indicateurs objectifs. La sécurisation des zones sensibles étant toujours recherchée, le dommage est un

indicateur pertinent pour le choix de la géométrie.

3.2.2 Optimisation de la géométrie visant à minimiser la contrainte maximale

L'objectif de cette analyse est la recherche d'une géométrie du tuyau parmi d'autres qui minimise, non pas sa longueur mais, cette fois ci, son dommage peut être réalisée en appliquant la théorie développée précédemment sur différentes géométries.

3.2.2.1 Formulation du problème d'optimisation

Un problème d'optimisation, quel qu'il soit, se formule de manière rigoureuse par :

- Une ou plusieurs fonction(s) objectif(s),
(qu'on cherche généralement à minimiser ou à maximiser)
- Les fonctions de contraintes,
(qui doivent être respectées)
- Le vecteur des variables du problème ainsi que leurs intervalles autorisés.

Dans le cas présent, l'enjeu de cette optimisation est de mettre en évidence, parmi plusieurs géométries de la poutre modélisant le tuyau d'hydrogène, celle dont le dommage subi par les sollicitations vibratoires est le plus faible. La fonction objectif est donc le dommage $D_{tot}(X)$ que l'on cherche à minimiser.

Sur une base d'une durée de sollicitations subies par le SPAC de 5000 h, le dommage doit être inférieur à 1. Ce qui constitue une première fonction de contraintes.

De plus, la position des deux points d'encastrement de la poutre, celui du côté du réservoir et celui du côté de la PAC doivent être respectés. Ces deux points sont en effet fixés et déterminés par la modélisation des masses principales du système réalisée dans le chapitre 2. Le vecteur entre ces deux points constitue donc une seconde fonction de contraintes.

Enfin, plusieurs « formes » de géométrie peuvent être envisagées ainsi que la longueur de différents segments. L'ensemble de ces données qui peuvent évoluer librement sont regroupées dans le vecteur des variables d'entrée. Dans le cas présent, le but n'étant pas une recherche exhaustive de l'ensemble des géométries possibles, simplement trois « formes » sont proposées (fig. 3.5) dont les dommages pourront être comparés. Les valeurs des variables correspondantes à chacune des formes ont été choisies de manière arbitraire tout en veillant à ce que la longueur totale et donc la masse totale de la poutre puisse varier de manière significative.

- La forme 1 (figure 3.5(a)) :

Elle ne comprend qu'un seul coude. La variable de cette forme est la longueur l d'un segment de la poutre suivant la direction de l'axe y . La première des quatre valeurs de l correspond à la longueur la plus courte possible dont le dommage a été évalué précédemment.

Variable l [cm]	Longueur totale de la poutre L [m]	Masse de la poutre [kg]
20,6	0,270	0,033
50,0	0,564	0,069
70,0	0,764	0,093
110,0	1,164	0,142

TABLE 3.5 – Variable de la forme 1

Remarque : Les valeurs de l qui sont supérieures à 20,6 cm ne permettent pas de respecter la fonction de contrainte. En effet, dans ces cas la coordonnée selon y du vecteur liant les deux extrémités de la poutre varie autant que l ; alors que la fonction contrainte fixe ce vecteur. Il a cependant été choisi d'analyser ces itérations afin de présenter au lecteur l'impact que la variation de cette longueur peut avoir sur le dommage subi par la poutre.

- La forme 2 (figure 3.5(b)) :

Elle propose cinq coudes de la poutre à 90° . La variable de cette forme est la longueur l des segments de la poutre suivant la direction de l'axe x . Cette géométrie a été choisie car elle propose un chemin plus compliqué du tuyau tout en restant dans le même plan $(\vec{x}; \vec{y})$.

Variable l [cm]	Longueur totale de la poutre L [m]	Masse de la poutre [Kg]
5,0	0,424	0,052
10,0	0,624	0,076
20,0	1,024	0,125

TABLE 3.6 – Variable de la forme 2

- La forme 3 (figure 3.5(c)) :

Elle se compose d'une géométrie hélicoïdale autour de l'axe y , de pas égal à 2 cm et de rayon de 3 cm. La variable de cette forme est le nombre de spires nb_{spires} d'un segment de la poutre suivant la direction de l'axe y .

Variable nb_{spires}	Longueur totale de la poutre L [m]	Masse de la poutre [Kg]
2	0,610	0,074
5	1,120	0,137
10	1,970	0,240

TABLE 3.7 – Variable de la forme 3

Plusieurs paramètres de conception (constant par définition) sont présentés dans la table de caractérisation du tuyau d'hydrogène (tab. 3.2).

Les variables de sortie du problème :

Parmi les variables de sortie du problème, celles qui présentent un intérêt pour l'analyse des résultats sont :

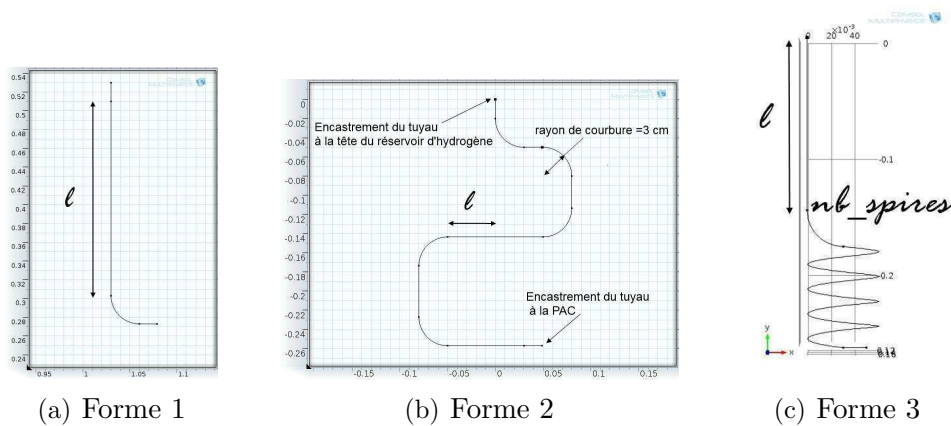


FIGURE 3.5 – 3 dessins étudiés

Formulation	Problème étudié	
Fonction objectif	Minimisation du dommage	$\min(D_{tot}(X))$
Fonctions de contraintes	Vecteur entre les points d'extrémité du tuyau	$\overrightarrow{P_{\text{reservoir}}P_{\text{PAC}}} = [0, 05; -0, 26; 0][m]$
	Dommage inférieur à 1	$D_{tot}(X) < 1$
Vecteur des variables d'entrée	Variables des formes 1,2 et 3	Tables 3.9, 3.10 et 3.11

TABLE 3.8 – Formulation du problème d'optimisation

- La longueur totale du tuyau : L [m]
- L'amplitude de la contrainte équivalente maximale : $\sigma_{max}(f)$

De nombreuses méthodes permettent de résoudre un problème d'optimisation. Le problème d'optimisation présenté ici, est résolu par itération. La méthodologie de la résolution de ce problème simple et rapide est la suivante :

Pour chaque itération,

- Tout d'abord l'amplitude de la contrainte équivalente maximale est calculée en fonction de la fréquence d'excitation.
- La fonction objectif est ensuite évaluée pour chaque variation des variables d'entrée par le calcul du dommage D_{tot} .
- Enfin une simple comparaison des résultats du dommage permet de résoudre le problème d'optimisation par l'identification de la géométrie la moins dommageable.

3.2.2.2 Résultats de la contrainte équivalente maximale

1) Forme 1 :

Bien que la variation de la longueur l ne respecte pas les contraintes de l'optimisation, la présentation des résultats a pour but de mettre évidence la sensibilité de la variation d'une des fonctions de contraintes (à savoir la position relative de point de fixation) sur le résultat du problème d'optimisation.

Pour chacune des trois directions d'excitation, les sollicitations réponses sont ap-

pliquées aux deux extrémités de la poutre.

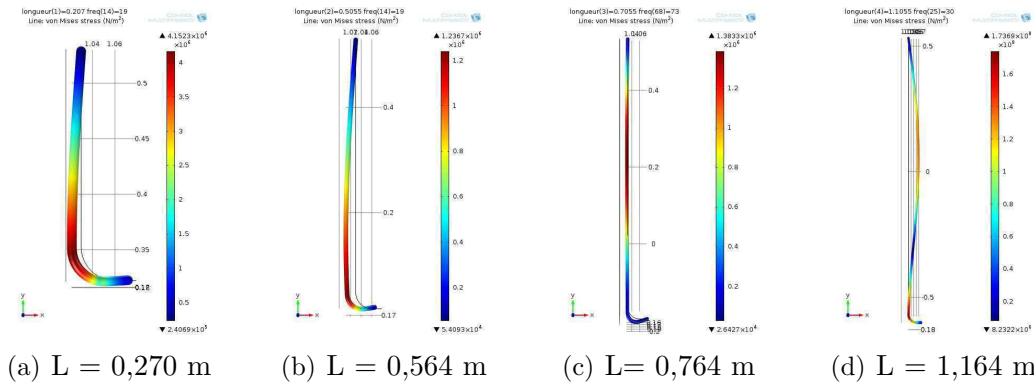


FIGURE 3.6 – Variation de la contrainte maximale sous excitation dans la direction z

La figure 3.6 donne une idée de la localisation de la contrainte maximale le long de la poutre lors des sollicitations du SPAC dans la direction z . Alors que la longueur de l est minimale, la contrainte est maximale dans le « coude » ; elle se déplace vers le milieu du segment rectiligne à mesure que l augmente jusqu'à ce que l soit comprise entre 70 cm et 110 cm : valeur au delà de laquelle la contrainte est maximale de nouveau dans le « coude ».

La table 3.9, présente les niveaux d'amplitude de la contrainte en fonction de la fréquence. Lors des excitations selon z , lorsque l est égale à 20,6 cm, la contrainte est maximale à 19 Hz correspondant à la fréquence de l'amplitude maximale des excitations (comme constaté au paragraphe 4)). Dès lors que l augmente, le premier mode propre de la poutre correspondant à la flexion du segment rectiligne, fait subir à la poutre une contrainte dont l'amplitude augmente avec sa longueur et se déplace vers les basses fréquences progressivement. A la dernière itération, lorsque l est égale à 110 cm, cette fréquence propre, se rapprochant de 19 Hz déjà identifiée (à laquelle des excitations sont maximales), fait subir à la poutre une contrainte maximale la plus élevée. Ces mêmes analyses et interprétations peuvent être faites dans les deux autres directions d'excitation, même si les niveaux d'amplitude sont plus faibles. Les amplitudes des contraintes maximales sont, en effet, plus élevées lorsque le tuyau d'hydrogène est excité dans la direction z .

Ainsi, même si ces différentes longueur de l sont incompatibles avec la configuration du SPAC présentée dans ce document, il est important de constater, pour d'autres conceptions, qu'une géométrie rectiligne de plus simple dessin du tuyau d'hydrogène peut subir des contraintes de niveau inattendu suivant sa longueur.

2) Forme 2 :

Concernant la forme 2, la figure ?? présente les 3 géométries simulées avec la localisation de la contrainte maximale lors des sollicitations du SPAC dans la direction z . Une nouvelle fois, lorsque la longueur de l est minimale, la contrainte est maximale dans le « coude » le plus proche d'un des encastrement ; elle se déplace vers une zone de grand déplacement à mesure que l augmente.

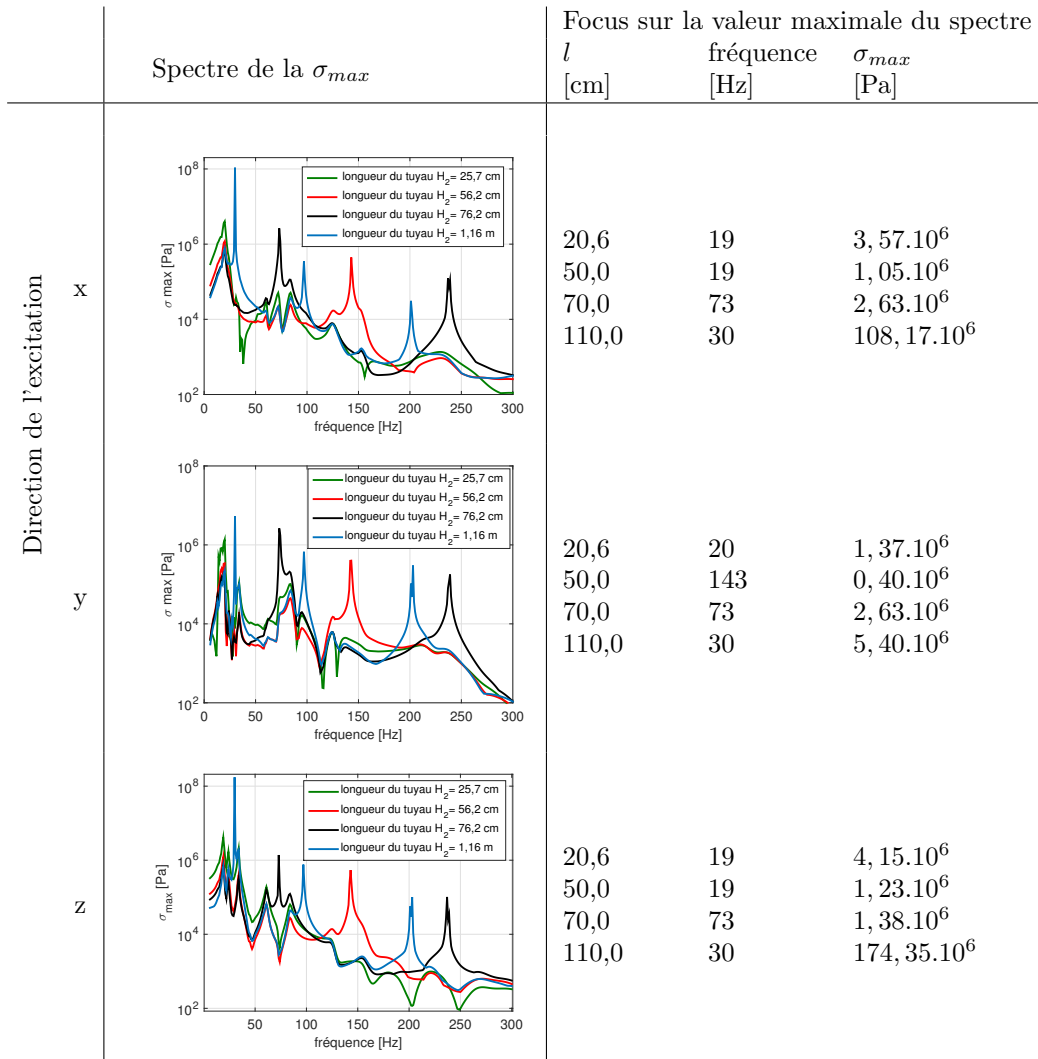


TABLE 3.9 – Comparaison de la contrainte maximale dans la forme 1 suivant la variation de la longueur l

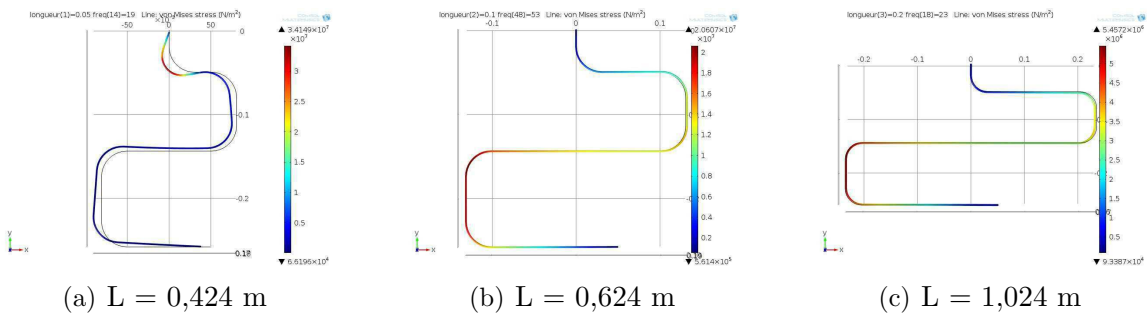


FIGURE 3.7 – 3 dessins étudiés

La table 3.10, présente les niveaux d'amplitude de la contrainte en fonction de la fréquence. Lors des excitations selon z , lorsque l est égale à 5,0 cm, la contrainte est maximale à 19 Hz correspondant à la fréquence de l'amplitude maximale des excitations. Dès lors que l augmente, le premier mode propre de la poutre correspondant au déplacement

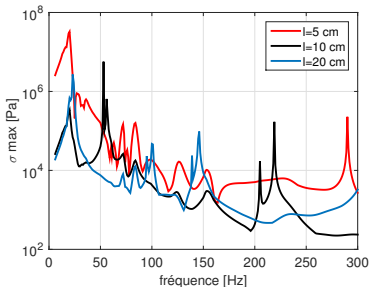
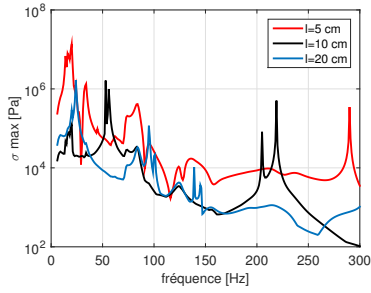
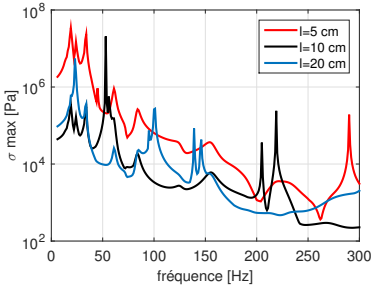
		Spectre de la σ_{max}	Focus sur la valeur maximale du spectre		
			l [cm]	fréquence [Hz]	σ_{max} [Pa]
Direction de l'excitation	x		5,0	20	$32,62 \cdot 10^6$
			10,0	53	$5,69 \cdot 10^6$
			20,0	23	$2,52 \cdot 10^6$
	y		5,0	20	$13,58 \cdot 10^6$
			10,0	53	$1,63 \cdot 10^6$
			20,0	24	$1,67 \cdot 10^6$
	z		5,0	19	$34,29 \cdot 10^6$
			10,0	53	$20,61 \cdot 10^6$
			20,0	23	$5,46 \cdot 10^6$

TABLE 3.10 – Comparaison de la contrainte maximale dans la forme 2 suivant la variation de la longueur l

des zones éloignées des encastremements, fait subir à la poutre une contrainte qui se déplace vers les basses fréquences progressivement. En effet, les fréquences propres diminuent avec l'augmentation de la masse mise en mouvement. Cependant, contrairement à la forme plus rectiligne, l'amplitude des contraintes maximales a tendance à diminuer lorsque la longueur totale de la poutre augmente.

Une nouvelle fois, les mêmes analyses et interprétations peuvent être faites dans les deux autres directions d'excitation, même si les niveaux d'amplitude sont plus faibles. Les amplitudes des contraintes maximales sont, en effet, plus élevées lorsque le tuyau d'hydrogène est excité dans la direction z .

Ainsi, les contraintes restent maximales lorsque les « coudes » sont rapprochés des encastremements, concentrant les contraintes liées aux excitations, qui sont transmises par les liaisons, dans ces zones.

Remarque : Une forme intermédiaire entre la forme 1 et la forme 2 est envisageable

en ne comprenant que 3 « coudes ». Les conclusions sont similaires à celles qui ont pu être faites sur cette forme 2.

3) Forme 3 :

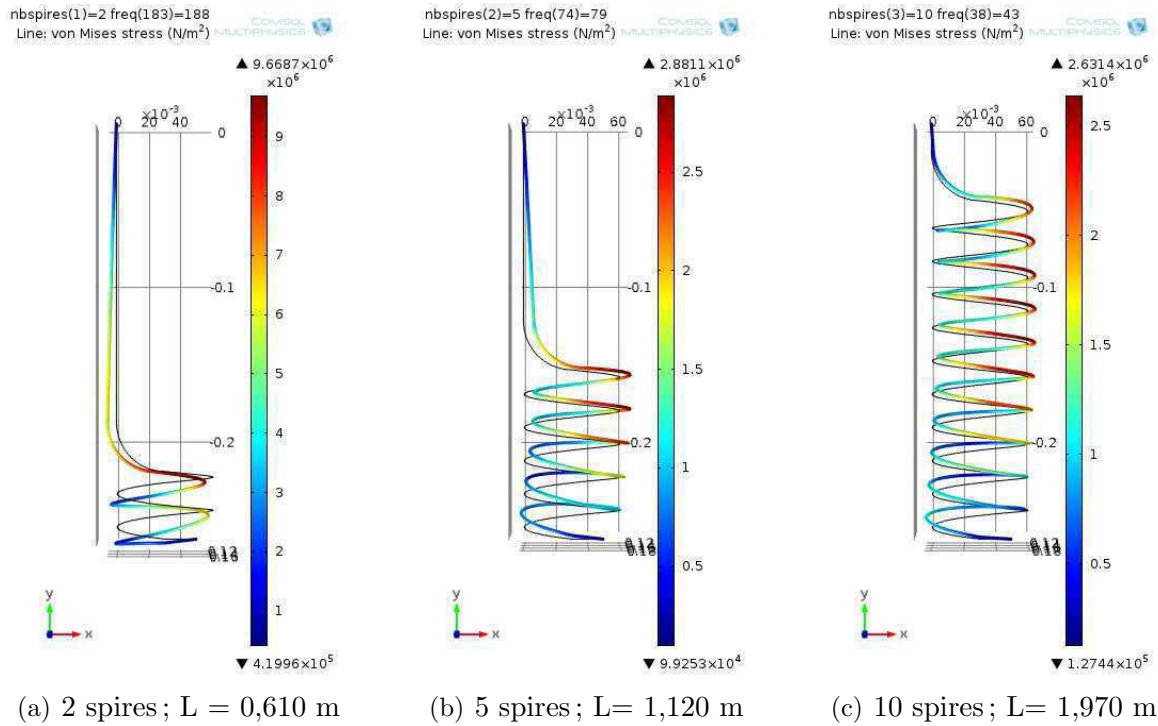


FIGURE 3.8 – 3 dessins étudiés

La figure 3.8 présente la variation de la géométrie par l'accroissement du nombre de spires, ainsi que la localisation de la contrainte maximale lors des sollicitations du SPAC dans la direction z . Quelque soit la longueur de l , la contrainte est maximale dans les spires les plus proches du « coude » à 90° . Elle est cependant répartie sur un plus grand nombre de spires à mesure que ce nombre augmente.

La table 3.11, présente les niveaux d'amplitude de la contrainte en fonction de la fréquence. Lors des excitations selon z , un pic d'amplitude se distingue à une fréquence qui ne correspond pas aux fréquences des excitations les plus appliquées aux extrémités. Contrairement aux deux autres formes étudiées, les modes propres de la poutre suivant une forme hélicoïdale sont prépondérants devant les contraintes engendrées par les excitations aux encastremets ; et ce, même lorsque le nombre de spires est faible. La fréquence de ce pic se déplace vers les basses fréquences à mesure que le nombre de spires augmente, ce qui s'explique par le fait que la masse de la poutre augmente avec le nombre de spires. Mais, l'amplitude des contraintes diminue à mesure que le nombre de spires augmente.

Par ailleurs, contrairement aux deux autres formes étudiées, l'amplitude des contraintes est plus élevée lors des excitations dans la direction y que dans la direction x ; alors que les excitations appliquées aux extrémités sont exactement les mêmes. Ainsi, à amplitude similaire d'excitation, les spires contraignent davantage la structure lorsque les sollicitations sont dans la même direction que l'axe autour duquel les spires

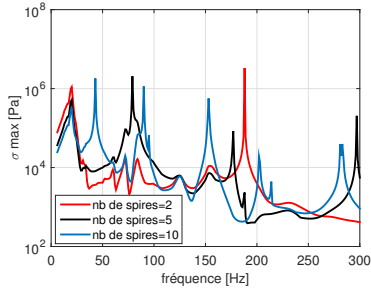
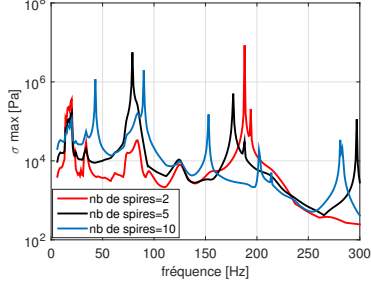
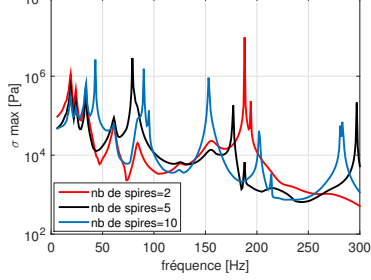
		Spectre de la σ_{max}	Focus sur la valeur maximale du spectre		
			nb_{spires}	fréquence [Hz]	σ_{max} [Pa]
Direction de l'excitation	x		2	188	$3,31 \cdot 10^6$
			5	79	$2,06 \cdot 10^6$
			10	43	$1,81 \cdot 10^6$
	y		2	188	$8,50 \cdot 10^6$
			5	79	$5,61 \cdot 10^6$
			10	90	$2,00 \cdot 10^6$
	z		2	188	$9,68 \cdot 10^6$
			5	79	$2,88 \cdot 10^6$
			10	43	$2,64 \cdot 10^6$

TABLE 3.11 – Comparaison de la contrainte maximale dans la forme 3 suivant la variation du nombre de spires

sont enroulées, que dans une direction transverse.

Enfin, quant à la comparaison des directions d'excitation, une nouvelle fois, les mêmes analyses et interprétations peuvent être faites dans les deux autres directions d'excitation, même si les niveaux d'amplitude sont plus faibles. Les amplitudes des contraintes maximales sont, en effet, plus élevées lorsque le tuyau d'hydrogène est excité dans la direction z .

Ainsi, plus le nombre de spires augmente, moins la contrainte maximale subie par la poutre est élevée. D'après les résultats obtenus, un tuyau d'hydrogène comportant 10 spires permet de diminuer au mieux le niveau de contraintes maximales.

3.2.2.3 Validation du choix de la géométrie par l'évaluation du dommage par fatigue

Afin d'évaluer la fonction objectif en fonction des différentes formes proposées, le calcul de dommage par fatigue présenté précédemment (section 3.2.1.4) est appliqué sur les contraintes équivalentes maximales déterminées à chaque itération.

Géométrie	Valeur des variables	Longueur totale de la poutre [m]	Fonction objectif Dommage (D_{tot})
forme 1	20,6 cm	0,270	$1,5 \cdot 10^{-12}$
	50,0 cm	0,564	$8,5 \cdot 10^{-18}$
	70,0 cm	0,764	$6,1 \cdot 10^{-14}$
	110,0 cm	1,164	$1,54 \cdot 10^4$
forme 2	5,0 cm	0,424	$1,8 \cdot 10^{-3}$
	10,0 cm	0,624	$1,7 \cdot 10^{-5}$
	20,0 m	1,024	$1,4 \cdot 10^{-11}$
forme 3	2 spires	0,610	$4,5 \cdot 10^{-8}$
	5 spires	1,120	$6,1 \cdot 10^{-11}$
	10 spires	1,970	$2,1 \cdot 10^{-14}$

TABLE 3.12 – Dommage subi par la poutre : Valeurs de la fonction objectif

La table 5.1 présente les résultats du dommage D_{tot} subi par la poutre suivant les différentes itérations du problème d'optimisation sur la base des contraintes évaluées précédemment.

Les hypothèses prises pour le calcul du dommage sont les mêmes que celles utilisées en 3.2.1.4 ; à savoir :

- La poutre subit des excitations pendant une durée $T = 5000$ h
- Le signal des excitations est à bande étroite
- Le facteur d'irrégularité du signal des excitations est égale à 1 (cette hypothèse maximise le dommage calculé)
- L'ensemble des dommages subis en un point se cumulent (Hypothèse de Miner)
- Les contraintes maximales peuvent toutes être subies en un même point de la poutre

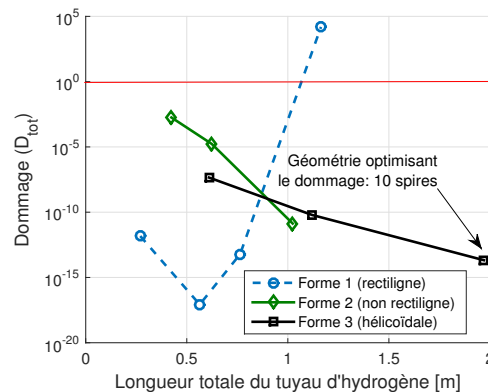


FIGURE 3.9 – Évolution du dommage en fonction des variables de l'optimisation

La figure 3.9 trace le dommage subi en fonction de la longueur totale de la poutre pour les trois formes étudiées.

1) Minimisation de la fonction objectif :

Elle correspond à la configuration géométrique pour laquelle le dommage est minimal.

D'après ces résultats, le dommage est minimum lorsque la géométrie de la poutre est la plus simple et lorsque la longueur du segment rectiligne est comprise entre 32,5 cm et 68,9 cm (pour une longueur totale dans la poutre comprise entre 0,375 m et 0,739 m).

2) Vérification de l'adéquation aux fonctions de contrainte :

La première fonction de contrainte impose de respecter de la probabilité objectif de rupture du tuyau d'hydrogène. Elle est traduite, comme il a été décrit précédemment, par un dommage qui doit être inférieur à 1 ($D_{tot} < 1$). Les résultats présentés écartent, ainsi, la configuration de la poutre rectiligne avec un seul coude imposé par les directions d'encastrement et dont la longueur totale est supérieure à 1,068 m. L'ensemble des autres géométries proposées respecte cette première exigence qui assure un risque acceptable de rupture du tuyau d'hydrogène.

La seconde fonction de contrainte impose des coordonnées fixes des deux points d'encastrement de la poutre. Or la configuration minimisant la fonction objectif, mise en évidence dans le paragraphe précédant ne respecte pas cette fonction de contrainte du problème, à savoir, la position relative des deux points d'encastrement. La solution dont le dommage est juste supérieur correspond à une géométrie de poutre hélicoïdale avec 10 spires. Cette configuration répond à l'ensemble du problème d'optimisation.

3) Discussion sur le choix de la géométrie du tuyau d'hydrogène :

Les résultats de l'optimisation donne la géométrie hélicoïdale avec 10 spires comme minimisant au mieux le critère. Cependant, le dommage augmente rapidement avec la diminution du nombre de spires. En effet si le nombre de spires est inférieur à 8, la géométrie la moins dommageable répondant à l'ensemble des exigences est la géométrie de forme 1 avec la longueur minimale de la poutre ($l = 20,6$ cm pour une longueur totale de poutre de $L = 27$ cm).

Dans le cas d'une conception avec un grand nombre de spires l'effet d'une telle géométrie sur l'écoulement de l'hydrogène à l'intérieur mériterait une analyse approfondie. Par ailleurs, dans une optique d'industrialisation des SPAC, le coût supplémentaire engendré par une géométrie de tuyau d'hydrogène en acier inoxydable 316L par rapport à la géométrie la plus simple (mettant en œuvre moins de matière première), serait certainement à prendre en compte dans le choix de la géométrie optimale.

Conclusion du chapitre 3

En proposant de comparer les dommages subis par différentes géométries, ce chapitre apporte une aide à la conception en la basant sur l'estimation d'un dommage minimum. L'exemple pris pour l'étude est le tuyau d'hydrogène reliant le réservoir à la PAC. Les résultats obtenus orientent le dessin du tuyau vers une géométrie limitant le nombre de « coudes » à 90° à proximité les uns des autres. Par ailleurs, le choix d'une géométrie hélicoïdale peut être faite en veillant à ce que le nombre de spires ne soit pas trop faible.

La démarche proposée dans ce chapitre est une aide à la conception vers le choix d'une géométrie qui est la moins dommageable. Cependant, ce choix est basé sur un modèle du SPAC en cours de conception. Les analyses faites dans ce chapitre et le précédent fournissent des orientations de conception. Elles ne correspondent pas aux excitations réelles que subira un point particulier du SPAC une fois que celui-ci est fabriqué. En effet, les choix définitifs de conception, les incertitudes liées aux contraintes de fabrication, et aux conditions de montage écartent le produit réellement fabriqué du modèle réalisé en pré-conception.

Le chapitre suivant a pour objectif d'intégrer les conditions climatiques de l'environnement du composant critique à l'analyse de son comportement dynamique. La prise en compte des phénomènes multi-physiques est réalisée de manière expérimentale sur un système fonctionnel qui est donc déjà fabriqué.

4 Modélisation expérimentale par des essais vibro-climatiques en fonctionnement

*« La réalité est toujours plus complexe que la théorie qui tente de la décrire. »
Prof. Ernest Juillard 1886-1982*

Sommaire

4.1 Essais vibro-climatiques sur plateforme	123
4.1.1 La plateforme vibratoire utilisée	124
4.1.2 Présentation du point critique étudié	125
4.1.3 La personnalisation des essais	125
4.2 Caractérisation du comportement dynamique en un point critique	126
4.2.1 L'essai de caractérisation du comportement dynamique	126
4.2.2 Analyses fréquentielles	127
4.2.2.1 Les outils de traitement utilisés	127
1) La valeur efficace du signal	127
2) La puissance moyenne du signal	127
3) Densité spectrale de puissance	128
4) Puissance moyenne par intervalle de fréquence	128
5) Analyse du kurtosis comme aide à l'interprétation des phénomènes physiques	128
4.2.2.2 Réponse aux sollicitations transmises par le véhicule aux fixations du SPAC	129
4.2.2.3 Prise en compte du fonctionnement du SPAC	131
4.2.2.4 Réponse aux sollicitations réelles d'usage	132
4.3 Étude de l'influence de la température extérieure et du fonctionnement de la pile à combustible	134
4.3.1 Le plan d'expériences	134
4.3.1.1 Définition du programme d'essais	134
4.3.1.2 Pilotage des facteurs d'entrée du plan d'expériences et des paramètres	135
1) Température et hygrométrie	135

2)	Point de fonctionnement du système	136
3)	Le refroidissement du système	136
4.3.1.3	Les réponses du plan d'expériences	136
1)	Points de mesure des températures des éléments du module	136
2)	Points de mesure des variables de fonctionne- ment du module	137
3)	Points de mesure des réponses aux sollicita- tions vibratoires	137
4.3.2	Analyses statistiques	138
4.3.2.1	Les traitements de données	138
4.3.2.2	Outils statistiques nécessaires aux analyses	139
4.3.3	Analyse qualitative : analyse par composantes principales . . .	141
4.3.3.1	Méthode utilisée	141
4.3.3.2	Résultats de l'analyse	142
4.3.3.3	Interprétation des résultats	147
4.3.4	Analyse du plan d'expériences	148
4.3.4.1	Analyse de l'effet des facteurs	150
4.3.4.2	Analyse de la variance	154
4.3.5	Régression multilinéaire	155
4.3.6	Analyse des effets d'un plan d'expériences sur les coefficients d'une régression multilinéaire	158
4.3.6.1	Analyse de la variance	160
4.3.7	Discussion sur l'analyse statistique de l'influence des conditions environnementales en phase de conception	161

Rappelons qu'un prototype est disponible et que des essais vibratoires sont nécessaires, non pour recalculer les modélisations ayant servi à la conception, mais pour valider la conception de composants critiques. Une première étape sera de constater les excitations réelles que subissent certains points particuliers du système, par exemple aux points de fixation du composant critique étudié. Le chapitre introduit aussi des méthodes générales ou généralisables de conception expérimentales et de traitements des mesures, efficaces pour atteindre cet objectif.

Pour illustrer nos propos de façon pratique, nous considérons comme composant critique le tuyau amenant l'hydrogène à la pile à combustible dans le SPAC déjà présenté. Les résultats montrent que la méthode est généralisable comme étape de conception des systèmes mécaniques complexes en comportement dynamique.

Un système mécanique complexe est soumis à des variations de température mais également aux phénomènes physiques engendrés par son propre fonctionnement. La simulation de l'ensemble de ces phénomènes est difficilement réalisable par la simulation de lois de comportement dans un même modèle multi-physique. La réalisation d'essais expérimentaux faisant varier les conditions réelles d'usage permet d'observer le comportement des composants critiques d'un système face à ces différentes conditions. L'intégration de ces essais en phase de conception a pour objectif de tenir compte des phénomènes multi-physiques des systèmes complexes.

Ce chapitre étudie, par le traitement de données expérimentales, le comportement de cet élément critique face aux conditions environnementales qu'il subit en conditions réelles d'usage. Après une présentation de la mise en place des essais, le traitement des premiers essais permet de caractériser le comportement du tuyau d'hydrogène. Puis la variation de la température extérieure ainsi que du point de fonctionnement du SPAC permet d'étudier leurs influences respectives sur la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène. L'analyse se concentre sur les conditions les plus défavorables de sollicitations vibratoires au point observé. C'est la raison pour laquelle seules les réponses aux sollicitations verticales (dans la direction z) aux fixations du SPAC sont analysées dans ce chapitre.

Les analyses présentées s'appuient sur une campagne d'essais vibro-climatique réalisées par l'équipe FCellSYS sur le module énergie développés par la société Michelin implanté dans le véhicule F-City H2 du constructeur FAM Automobile. Il est d'ores et déjà important de noter que la fabrication de ce module, antérieure aux résultats du chapitre précédent, ne repose pas sur une conception les prenant à compte.

4.1 Essais vibro-climatiques sur plateforme

Une campagne d'essais environnementaux sur un tel type de système implique les moyens humains (compétences techniques), matériels (Table vibrante, enceinte climatique...) et immobilier (bâtiment sécurisé pour l'utilisation de l'hydrogène...), ayant ainsi un fort impact financier. La préparation d'une campagne d'essais doit être réalisée avec soin dans le but d'obtenir des mesures exploitables pour les réponses souhaitées. Comme le rappelle P.-E. Dupuis [Dupuis, 2000], afin d'assurer la qualité des essais vibratoires, une séquence d'essais réserve une grande part à la préparation (environ 80 % du temps pour

0.1% à l'essai proprement parlé, et 19,9% à la phase de post-essais). Les techniques de réalisation d'essais environnementaux, guidées notamment par la norme CEI 60068-2, ne sont pas développées dans ce travail car elles sont largement présentées dans de nombreux ouvrages qui y sont consacrés [Dupuis, 2000],[Lalanne, 1999c].

4.1.1 La plateforme vibratoire utilisée

Aux vues des dimensions extérieures du système à PAC testé (1.17 m x 0.68 m x 0.4 m), ainsi que sa masse (120 kg), l'instrumentation disponible à l'université de Belfort-Montbéliard (table 4.1) permet de contrôler les paramètres du plan d'expériences comme présenté sur la figure 4.1. Une table vibrante est destinée aux tests en environnement vibratoire. Le pilotage de la table vibrante est assuré par le logiciel LMS Test.Lab couplé à un système d'acquisition ZODIAC data system. Le système sollicité est fixé à la table vibratoire en liaisons rigides par les 4 pattes de fixation qui le lient au véhicule dans les conditions réelles d'intégration.

Enceinte climatique	Table vibrante
SERVATHIN	
Tmin = -30°C	Force max en sinus : 35 600N
Tmax = 90°C	Domaine fréquentiel :
	6 à 3000Hz horizontal
	6 à 2000Hz vertical
	Charge utile : 250kg
	Accélération maximale :
	3g entre 6 et 150Hz

TABLE 4.1 – Caractéristiques de la plateforme vibro-climatique

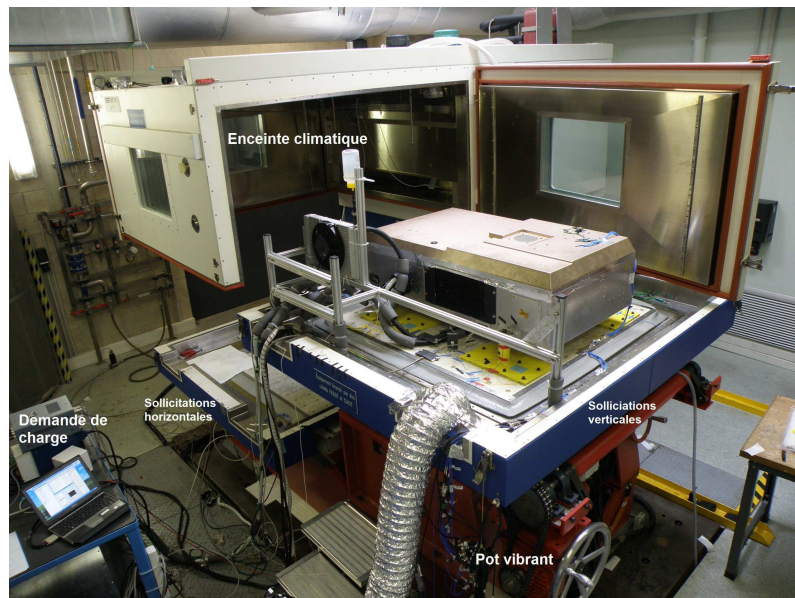


FIGURE 4.1 – Plateforme d'essais vibro-climatiques

4.1.2 Présentation du point critique étudié

Comme largement expliqué dans le chapitre 2, le SPAC étant un système composé d'un grand nombre de composants, les zones plus sensibles, au regard des critères déterminés, sont identifiées.

Poursuivons ici l'exemple identifié dans le chapitre 2 du tuyau d'hydrogène qui est un composant critique vis-à-vis de la sécurité. Il permet de conduire l'hydrogène depuis le réservoir jusqu'à la PAC. Il est usiné dans un matériau de type Inox 316L. La figure 4.2, présente le tuyau d'hydrogène étudié. La photo de la figure 4.2(a) indique l'emplacement de l'accéléromètre permettant d'enregistrer le signal de l'accélération dans les trois directions. Le dessin 4.2(b) schématise le tuyau encastré entre la tête du réservoir d'hydrogène et la PAC.

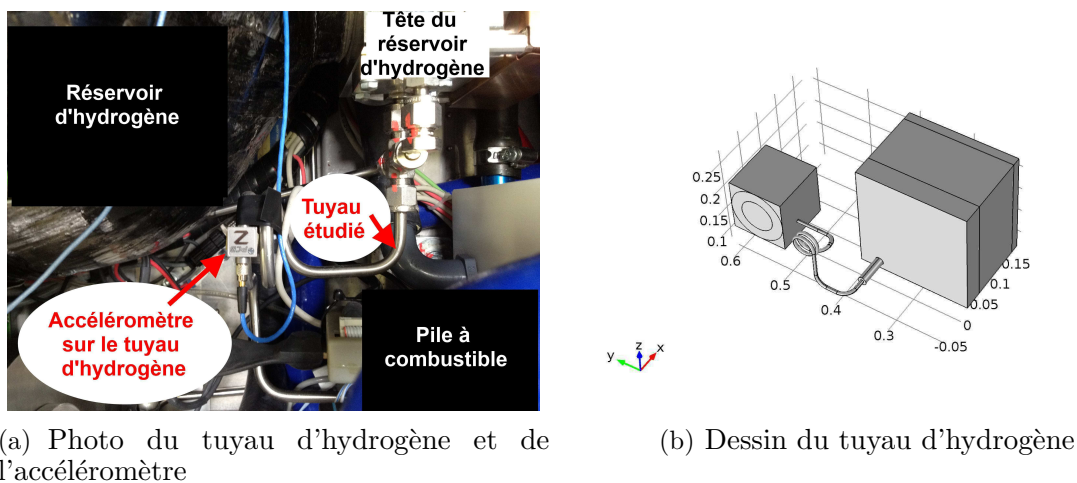


FIGURE 4.2 – Composant critique étudié : le tuyau d'hydrogène

Le tuyau d'hydrogène, ainsi implanté dans le SPAC, lui-même intégré dans un véhicule par l'intermédiaire de 4 fixations sur le châssis, subit des excitations, lorsque le véhicule avance. Ces excitations sont mesurées en un point précis du tuyau par un accéléromètre. Durant les essais, les sollicitations transmises par le véhicule sont reproduites via la plateforme vibratoire. Elles peuvent être personnalisées, c'est-à-dire, adaptées aux conditions réelles d'usage de ce véhicule.

4.1.3 La personnalisation des essais

Les essais environnementaux, dont font partie les essais vibratoires, sont conduits de manière à tenir compte des conditions réelles d'usage. L'élaboration de la campagne d'essais suit une démarche de personnalisation des essais définie en 4 étapes, comme introduit au chapitre 2.

- Analyse du profil de vie,
- Recherche des données de l'environnement réel,
- Traitement et synthèse de ces données,
- Définition du programme d'essais.

Les trois premiers points ont été développés au chapitre 2 et restent évidemment valables pour les études de ce chapitre.

- **Définition du programme d'essais :**

Il s'agit d'élaborer une campagne d'essais vibratoires sous variation climatique et en conditions de fonctionnement du SPAC. Le système étant destiné à fonctionner en hiver comme en été, les différentes températures extérieures doivent être prises en compte. Par ailleurs, suivant le besoin de la chaîne de traction électrique, différentes puissances peuvent être demandées au SPAC.

Une campagne d'essais vibratoires débute généralement par la qualification du système testé. Le but est de caractériser son comportement dynamique. Puis en fonction de l'objectif recherché, les différents essais sont programmés. Dans le cas présent, l'étude de l'influence de différents facteurs peut être faite à partir de la réalisation d'un plan d'expériences.

4.2 Caractérisation du comportement dynamique en un point critique

L'objectif de cette section est de vérifier le comportement dynamique du tuyau d'hydrogène dans les conditions vibratoires réelles d'usage. La température extérieure du système est fixée à 23°C. Cette température correspond à la température ambiante du laboratoire d'essai.

D'après le chapitre 2, la puissance totale élaborée à partir de la DSP représentative des conditions réelles d'usage est plus importante dans la direction z dans les deux autres. Par ailleurs, d'après l'analyse des contraintes maximales de différentes géométries du tuyau d'hydrogène (chapitre 3), ce sont les excitations dans la direction z qui font subir au tuyau la contrainte équivalente la plus élevée. Pour ces deux raisons, seul est présenté, dans la suite de ce document, le comportement du tuyau d'hydrogène face aux sollicitations du SPAC dans la direction z (verticale par rapport au véhicule).

Il est cependant important de noter que l'ensemble des réponses aux excitations dans les 3 directions doit être traité afin de caractériser complètement le comportement.

4.2.1 L'essai de caractérisation du comportement dynamique

Il est constitué généralement de :

1-un essai à bas niveau (afin de ne pas créer d'endommagement et de limiter les effets non-linéaires) :

But : essai de référence constituant la signature fréquentielle.

Type d'essai : sinus balayé.

2-un essai à niveau intermédiaire :

But : essai représentatif du profil de vie que subira le système.

Type d'essai : signal aléatoire.

Cet essai est similaire à une procédure d'essais de qualification des systèmes [Dupuis, 2000].

Pendant l'essai de type sinus balayé, le système est soumis à un balayage sinusoïdal, de vitesse égale à 1 oct./min entre les fréquences 6 à 200 Hz avec une amplitude constante de 0,3 g, pendant une durée de 10 min (aller-retour). Cet essai a pour but de repérer les différentes fréquences propres de vibration du système. La répétition de ce balayage sinusoïdal permet de détecter les éventuelles évolutions de réponses vibratoires.

L'essai de sollicitation aléatoire est représentatif du profil de vie (venant de l'étude réalisée en chapitre 2). Le but de ces essais sur table vibrante est d'observer le comportement vibratoire de composants déterminés du module soumis à des sollicitations similaires à celles enregistrées lors des essais relevés sur piste dans des conditions réelles d'usage (présenté dans le chapitre 2). Ainsi la durée de sollicitations pour chacun des essais n'est pas fixée par un objectif de validation de tenue en fatigue vibratoire. La durée de reproduction des sollicitations choisie correspond à la somme des durées de chacun des essais sur piste : c'est-à-dire 15 min.

4.2.2 Analyses fréquentielles

4.2.2.1 Les outils de traitement utilisés

Les signaux enregistrés par l'accéléromètre fixé sur le tuyau d'hydrogène sont traités en utilisant les outils de calculs présentés au chapitre 2.

Les signaux enregistrés étant supposés stationnaires et ergodiques, les outils statistiques peuvent être utilisés pour analyser l'enregistrement de manière globale sur toute la durée D de l'essai.

1) La valeur efficace du signal :

Lorsque le signal est centré (ce qui est le cas des signaux présentés), le moment d'ordre 1, correspondant à la moyenne, est nul. Le moment centré d'ordre 2 (correspondant au carré de la valeur efficace (ou valeur RMS au carré)) quantifie la variance.

La valeur efficace sur toute la durée d'observation du signal dans la direction d est calculée par son moment d'ordre 2 (car le signal est déjà centré).

$$a_{def} = a_{dRMS} = \sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{E[a_d^2]} = \sqrt{\mu'_{a_d(2)}} \quad (4.1)$$

2) La puissance moyenne du signal :

La puissance moyenne du signal sur sa durée totale d'observation est également déduite de son moment d'ordre 2 :

$$P_{totale} = P_D = \lim_{D \rightarrow +\infty} \frac{1}{D} \int_0^D a_d^2(t) dt = S_{a_d}^2 \quad (4.2)$$

3) Densité spectrale de puissance :

Le spectre de densité de puissance (d'amplitude a_{DSP}) est déterminé par :

$$\Phi_{a_d}(\omega) = \int_0^D \mathbf{R}_{a_d a_d}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.3)$$

avec $R_{a_d a_d}$ l'auto-corrélation du signal :

$$R_{a_d a_d}(\tau) = \frac{1}{D} \int_0^{D-\tau} a_d(t) a_d(t + \tau) dt \quad (4.4)$$

4) Puissance moyenne par intervalle de fréquence :

Par ailleurs, la puissance d'un signal, de façon discrète, est la somme, par bandes de fréquences Δf , des amplitudes de la DSP (a_{DSP}) multipliées par Δf , en admettant que sur la bande de fréquence Δf_i , l'amplitude de la densité spectrale de puissance est constante. Ainsi sur un intervalle de fréquence $[f_1, f_2]$:

$$P_{[f_1, f_2]} = \sum_{i=N_{f_1}}^{N_{f_2}} a_{DSP_i} \Delta f_i \quad (4.5)$$

Avec N_{f_1} le point de la DSP pour lequel la fréquence est égale à f_1 .

5) Analyse du kurtosis comme aide à l'interprétation des phénomènes physiques :

Alors que l'analyse de densité spectrale de puissance est issue des moments d'ordre 2 (variance du signal), l'analyse et l'interprétation des signaux d'accélération peuvent être approfondies par les statistiques d'ordre supérieur comme proposé par Lacoume et Varbie [Lacoume et al., 1997] [Vrabie et al., 2003]. En effet, le kurtosis, étant un indicateur de la distribution d'une variable d'un processus aléatoire, sa valeur peut nettement se distinguer suivant que le phénomène d'origine (dans le cas où celui-ci n'est pas nécessairement gaussien), d'une fréquence donnée, est périodique ou non comme présenté dans la figure 4.3 à titre d'exemple. Le processus aléatoire, synthétisé par [Vrabie et al., 2003], est composé de :

- deux sinus de fréquences respectives 0,07 Hz et 0,18 Hz,
- un sinus de fréquence 0,33 Hz dont le module de l'amplitude varie de manière aléatoire suivant une loi gaussienne centrée autour d'une moyenne nulle,
- un bruit blanc gaussien, filtré par un système résonnant avec une importante fréquence de résonance est égale à 0,24 Hz, et un filtre passe bas.

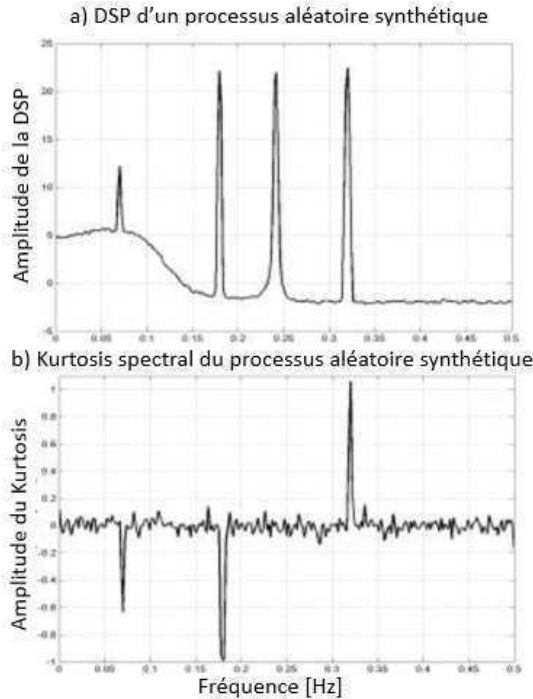


FIGURE 4.3 – Interprétation de la nature du signal par analyse du kurtosis spectral [Vrabie et al., 2003]

Ils ont montré que l'utilisation d'un « kurtosis spectral » peut être un outil complémentaire à la DSP pour apporter des indications supplémentaires à l'identification des phénomènes physiques à l'origine des vibrations, et ainsi ajuster l'interprétation.

4.2.2.2 Réponse aux sollicitations transmises par le véhicule aux fixations du SPAC

Comme introduit dans le chapitre 2, une manière de déterminer l'influence dynamique d'une excitation en un point l sur un autre où est placée l'observation k , est de soumettre le point l à une excitation harmonique d'amplitude unitaire et dont la pulsation varie sur la plage déterminée (balayage en fréquence).

Dans le cas présent, le point l correspond aux 4 fixations du SPAC sur le bâti de la table vibrante, reliées entre elles par des encastremements rigides au bâti. Le point k observé est l'endroit où est fixé l'accéléromètre sur le tuyau d'hydrogène. Un essai d'excitation sinusoïdale en balayage de fréquence est transmise par la table vibrante aux 4 fixations du système. Le niveau d'amplitude des sinusoïdes est constant. Il n'est cependant pas de $1g$ mais de $0,3g$ afin de ne pas endommager le système. La vitesse de balayage est égale à 1 oct./min entre les fréquences 6 à 200 Hz. C'est à dire que la fréquence du signal sinusoïdale varie dans le temps. Elle est égale à 6 Hz au début de l'essai. Elle augmente pendant l'essai jusqu'à 200 Hz, de manière à ce que le temps passé à chaque fréquence soit constant. La vitesse de balayage est relativement lente pour permettre l'établissement du régime permanent pour chaque fréquence.

Ainsi l'amplitude de la réponse du point observé peut être enregistrée pour chaque

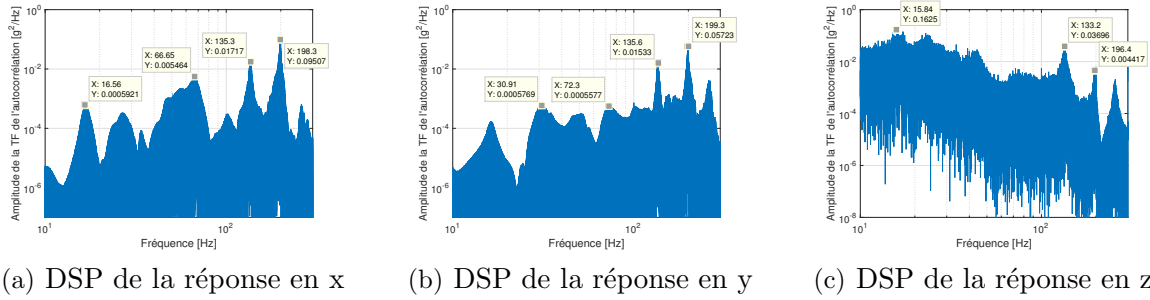


FIGURE 4.4 – Réponses du tuyau d’hydrogène à l’excitation en z aux fixations du SPAC de type sinusoïdale en balayage de fréquence entre 6 et 200 Hz de niveau 0,3 g

fréquence d’excitation. La figure 4.4 présente les réponses dans les 3 directions à une excitation en z .

Valeur globale	Unité	d	SPAC à l’arrêt
Valeur efficace (ou valeur RMS) du signal	[g]	x a_{xeff}	0,48
		y a_{yeff}	0,39
		z a_{zeff}	0,41
Puissance moyenne totale	[g ²]	x $P_{xtotale}$	0,46 (100%)
		y $P_{ytotale}$	0,31 (100%)
		z $P_{ztotale}$	0,33 (100%)
Puissance moyenne entre 0 et 200 Hz	[g ²]	x $P_{x[0-200]}$	0,39 (84,6%)
		y $P_{y[0-200]}$	0,22 (71,7%)
		z $P_{z[0-200]}$	0,32 (97,1%)

TABLE 4.2 – Valeurs globales du signal de réponse du tuyau d’hydrogène, aux excitations verticales du SPAC, de type sinus balayé (niveau 0,3 [g] entre 0 et 200 [Hz])

Les valeurs globales de la réponse sont calculées (table 4.2). La valeur efficace varie suivant la direction de la réponse. En effet, pour une même excitation aux fixations du SPAC, le tuyau d’hydrogène ne répond pas de la même manière dans chacune des trois directions. La puissance moyenne est plus élevée dans la direction x , puis dans la direction z et enfin plus faible dans la direction y . Le fait que la réponse soit d’amplitude plus élevée en x peut être expliquée par plusieurs phénomènes.

D’une part la PAC est fixée au caisson sur son coté latéral et sur le fond mais de manière non centrée sur la plaque du fond du caisson implique des réponses de niveau plus élevé dans la direction x de la PAC aux excitations dans la direction z du SPAC. Le tuyau d’hydrogène subit ces réponses, car il est encastré dans la PAC.

D’autre part, les spires du tuyau d’hydrogène, à l’endroit même où est positionné le capteur, tournent autour de l’axe x , ce qui peut également expliquer des niveaux d’amplitude de réponse plus élevés dans cette direction.

Par ailleurs, la fréquence dont l’amplitude est la plus élevée dans la direction x est légèrement plus faible que 200 Hz. On peut remarquer que le nombre de spires du tuyau testé est de 2. Or dans le chapitre 3, il a été mis, nettement, en évidence que pour un nombre de spires égale à 2, la fréquence dont l’amplitude de la contrainte équivalente

est la plus élevée (188 Hz) peut correspondre avec l'observation sur le tuyau d'hydrogène réel. Cet important pic de fréquence, expliqué par la forme hélicoïdale avec 2 spires, est donc sans surprise aux vues de l'analyse d'optimisation de la géométrie du tuyau réalisée dans le chapitre 3.

Enfin, le pourcentage de la puissance moyenne des réponses dans la plage de fréquence inférieure à 200 Hz étant supérieur à 80% (ou très proche pour la direction y), les fréquences propres du tuyau d'hydrogène sont comprises dans la plage de fréquences des sollicitations réelles d'usage.

4.2.2.3 Prise en compte du fonctionnement du SPAC

En réalité, lorsque le véhicule circule, le SPAC est en fonctionnement. En effet, sa fonction principale est de fournir la puissance demandée par la chaîne de traction. Si le SPAC est à l'arrêt, le véhicule peut circuler jusqu'à épuisement de la batterie. Or, le fonctionnement du SPAC induit d'une part, la mise sous pression (20 bars) de l'hydrogène dans le tuyau d'hydrogène, et d'autre part, la circulation des fluides dans la PAC. Lorsque le SPAC est en fonctionnement, le tuyau d'hydrogène a un comportement dynamique différent que lorsque le système est à l'arrêt.

Un enregistrement des accélérations au point observé du tuyau d'hydrogène est réalisé alors qu'aucune sollicitation n'est appliquée aux fixations du SPAC. L'analyse de ces résultats permet de mettre en évidence les perturbations liées au fonctionnement intrinsèque de la PAC et de ses auxiliaires.

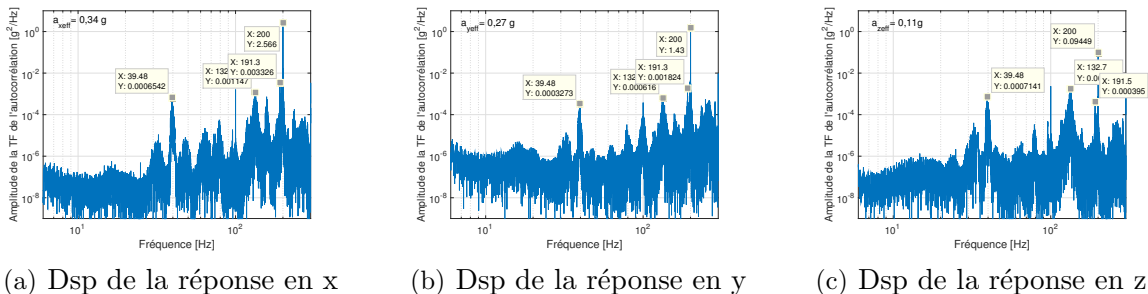


FIGURE 4.5 – DSP du tuyau d'hydrogène lors du fonctionnement de la PAC hors sollicitations aux fixations du SPAC

La figure 4.5 présente les accélérations dans le tuyau d'hydrogène dues au fonctionnement la PAC, lorsque le SPAC n'est pas soumis à des sollicitations vibratoires extérieures. Les valeurs efficaces des signaux sont bien évidemment plus faibles que lorsque le SPAC est sollicité à la base. Cependant le fonctionnement de la PAC excite le tuyau dans la plage de fréquences étudiée (paragraphe précédent). En effet, le tuyau d'hydrogène répond à un niveau non négligeable aux fréquences proches de 200 Hz, mais également autour de 135 Hz comme vu précédemment.

Un pic de DSP supplémentaire est remarquable à la fréquence de 39,5 Hz, d'après la figure 4.6, il est induit par le fonctionnement propre à la PAC.

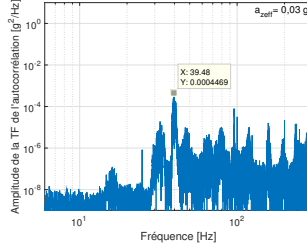


FIGURE 4.6 – DSP du signal enregistré dans la direction z sur la PAC lors de son fonctionnement hors sollicitations aux fixations du SPAC

Si maintenant l'essai de sinus balayé est de nouveau réalisé, mais cette fois-ci pendant le fonctionnement du SPAC, on constate, d'après la comparaison des valeurs globales présentées dans la table 4.3, que le niveau des amplitudes des excitations est supérieur lors de l'essai pendant le fonctionnement du SPAC dans les directions de réponse x et y mais pas dans la direction z . Ce qui signifie que le fonctionnement du SPAC n'influence pas le comportement du tuyau dans la direction z lorsque le SPAC est soumis à des excitations dans cette direction.

Valeur globale	Unité	d	SPAC à l'arrêt	SPAC à pleine puissance (8 kW)
Valeur efficace (ou valeur RMS) du signal	[g]	x a_{xeff}	0,48	0,80
		y a_{yeff}	0,39	0,62
		z a_{zref}	0,41	0,39
Puissance moyenne totale	[g ²]	x $P_{xtotale}$	0,46 (100%)	1,26 (100%)
		y $P_{ytotale}$	0,31 (100%)	0,78 (100%)
		z $P_{ztotale}$	0,33 (100%)	0,31 (100%)
Puissance moyenne entre 0 et 200 Hz	[g ²]	x $P_{x[0-200]}$	0,39 (84,6%)	1,13 (89,9%)
		y $P_{y[0-200]}$	0,22 (71,7%)	0,65 (83,2%)
		z $P_{z[0-200]}$	0,32 (97,1%)	0,24 (76,6%)

TABLE 4.3 – Valeurs globales du signal de réponse du tuyau d'hydrogène, aux excitations verticales du SPAC, de type sinus balayé (niveau 0,3 [g] entre 0 et 200 [Hz])

Ainsi, les essais de sinus balayé, couplés à une analyse des excitations dues au fonctionnement du SPAC hors sollicitations, apportent déjà un grand nombre d'informations sur le comportement du tuyau d'hydrogène.

4.2.2.4 Réponse aux sollicitations réelles d'usage

Enfin, les sollicitations aléatoires réelles d'usage sont appliquées au SPAC afin de finaliser l'analyse. La figure 4.7 représente graphiquement les réponses du tuyau d'hydrogène. La direction d'excitation est suivant z , la température de la chambre climatique de 23°C et le SPAC délivre une puissance de 8 kW en sortie.

Tout d'abord, la table 4.4 montre que la valeur efficace du signal de réponse a , sans surprise, fortement augmenté dans la direction z (direction des excitations) par rapport à l'essai de sinus balayé à bas niveau ; alors que le niveau des réponses dans les

Valeur globale	Unité	d		SPAC à pleine puissance (8 kW)
Valeur efficace (ou valeur RMS) du signal	[g]	x	a_{xeff}	0,85
		y	a_{yeff}	0,70
		z	a_{zeff}	0,88
Puissance moyenne totale	[g ²]	x	$P_{xtotale}$	1,45 (100%)
		y	$P_{ytotale}$	0,97 (100%)
		z	$P_{ztotale}$	1,55 (100%)
Puissance moyenne entre 0 et 200 Hz	[g ²]	x	$P_{x[0-200]}$	1,13 (78,0%)
		y	$P_{y[0-300]}$	0,71 (73,0%)
		z	$P_{z[0-200]}$	1,41 (91,4%)

TABLE 4.4 – Valeurs globales du signal de réponse du tuyau d’hydrogène, aux excitations verticales du SPAC, de type aléatoire représentatif des conditions d’usage (valeur efficace= 0,73[g])

deux autres directions n’a que légèrement augmenté. La puissance moyenne de la réponse dans la direction z est à présent supérieure à celle dans la direction x .

Les réponses les plus élevées sont majoritairement contenues dans la plage de fréquences correspondant à celle des sollicitations.

L’observation des spectres de densité de puissance permet de retrouver les deux pics de fréquences proches de 200 Hz et de 135 Hz, déjà repérés dans la réponse aux sollicitations sinusoïdales sans fonctionnement de la PAC.

Par ailleurs, le tuyau d’hydrogène répond nettement dans la même direction z aux excitations qui sont plus élevées dans les basses fréquences (autour de 15 Hz).

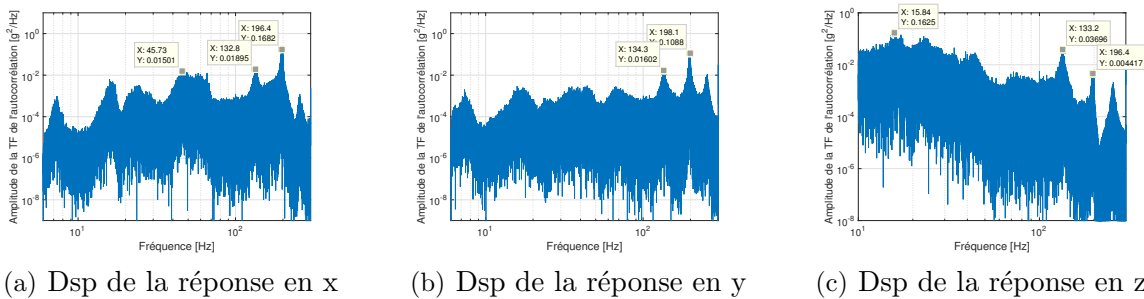


FIGURE 4.7 – Réponses du tuyau d’hydrogène à l’excitation aléatoire en z aux fixations du SPAC représentative des conditions réelles d’usage

Ainsi par 3 essais de courtes durées, de nombreuses informations peuvent être obtenues. Ces premiers essais, sont également primordiaux pour valider les installations expérimentales et les chaînes de commande et d’acquisitions. L’approfondissement de l’analyse des composantes des signaux d’accélération par les statistiques d’ordres supérieurs comme proposé par Lacoume et Varbie [Lacoume et al., 1997] [Vrabie et al., 2003], pourrait apporter des informations complémentaires et ainsi ajuster l’interprétation de ces signaux. Ces essais de caractérisation permettent de concentrer l’analyse de l’influence des paramètres de températures extérieures et de puissance demandée sur le comportement de la zone critique suivie. Toujours dans une logique

d'identification des conditions les plus défavorables à la durée de vie, d'après ces premiers résultats, la réponse dans la direction z est plus dommageable pour le tuyau d'hydrogène. Cette remarque permet de concentrer l'analyse de l'influence de la température extérieure et du point de fonctionnement dans cette direction de réponse.

4.3 Étude de l'influence de la température extérieure et du fonctionnement de la pile à combustible

En plus des sollicitations vibratoires transmises par l'intermédiaire de l'intégration du SPAC dans le véhicule, le SPAC est destiné à fonctionner sous différentes températures extérieures ainsi que selon différentes demandes de puissance de la chaîne de traction électrique. Quelles influences la variation de ces deux facteurs ont-elles sur la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène ? La mise en place, le traitement des données par différents outils statistiques, l'analyse et l'interprétation d'un plan d'expériences sont les enjeux de cette section. La section précédente a permis de caractériser le comportement du tuyau d'hydrogène dans les conditions particulières de température extérieure de 23°C et de demande de puissance de 8 kW. L'analyse de ce seul cas met en évidence qu'il est fastidieux, et non propice aux comparaisons pour une étude d'influence, de se pencher de cette manière sur l'ensemble des cas du plan d'expériences qui va pouvoir être mis en place. Ainsi, bien qu'un dépouillement des essais soit nécessaire, les résultats sont analysés en utilisant les outils statistiques tels que la corrélation appliquée à des méthodes d'analyse par composantes principales (ACP), de régression multilinéaire, et l'analyse d'effets.

4.3.1 Le plan d'expériences

Tout d'abord, un plan d'expériences est mis en place, par l'identification des facteurs, de leur variation, puis par la présentation des réponses (variables du plan d'expériences), ainsi que les paramètres (constantes des essais).

4.3.1.1 Définition du programme d'essais

Un essai de sollicitations sous forme de processus aléatoire représentatif du profil de vie constitue une expérience. Le plan d'expériences fait varier deux facteurs (table 4.5). Durant ces essais, le système à PAC est soumis aux contraintes environnementales de température et de sollicitations vibratoires caractérisées lors des essais en conditions réelles d'usage et dont les résultats sont présentés dans le chapitre 2. Ces conditions sont reproduites en laboratoire sur plateforme vibratoire et dans une enceinte climatique. Pendant cette campagne d'essais le système est en fonctionnement. La demande de charge de la chaîne de traction est simulée : faisant ainsi varier le point de fonctionnement de la PAC. Ce qui permet de prendre en compte la dynamique des composants mis en mouvement par le fonctionnement du système (tel que le compresseur d'air). Les réponses du plan d'expériences sont de trois catégories (table 4.6) : Les réponses vibratoires à différents endroits du système, les températures de plusieurs composants ainsi que l'intensité du courant en sortie du système.

Contraintes environnementales	Fonctionnement de la PAC
Température extérieure	Point de fonctionnement
T1=1°C	P1 = 2,5 kW
T2=23°C	P2 = 4 kW
T3=35°C	P3 = 8 kW

TABLE 4.5 – Facteurs du plan d’expériences en fonctionnement du SPAC

Choix des modalités :

Concernant les 3 modalités de température extérieure, le choix est établi sur les bases de la norme GAM-EG-13. Le véhicule dans lequel est intégré le SPAC étudié, est supposé ne circuler qu’à l’intérieur de la zone climatique peu froide (zone 7 identifiée par la norme). Comme précisé dans le chapitre 2, elle correspond à la France (hormis la côte méditerranéenne), la Suisse et les autres pays d’Europe du nord. La norme propose, pour cette zone :

- Moyenne des températures maximales annuelles comprises entre +10°C et +39°C
- Moyenne des températures minimales annuelles comprises entre -20°C et -5°C

Par ailleurs, le SPAC n’étant, au moment des essais, pas encore validé pour un fonctionnement en température extérieure négative, la modalité basse de température est fixée à 1°C. Concernant la modalité haute, la valeur 35°C est retenue comme étant un compromis entre la proposition de la norme et le choix du concepteur ainsi des experts du système. En effet, le système de refroidissement du SPAC monté pour les essais ne permet pas de stabiliser le fonctionnement du SPAC à une température extérieure supérieure à 35°C. La modalité intermédiaire à 23°C correspond à la température ambiante du laboratoire d’essai.

Une humidité constante est maintenue à 35% (plus ou moins 10%) à l’intérieur de l’enceinte climatique.

Ce plan d’expériences ne peut être réduit : le plan factoriel (ou plan complet) doit être réalisé par 9 expériences.

Comportement environnemental		Fonctionnement de la PAC
Réponse vibratoire des composants du système	Températures internes	Intensité du courant aux sorties du système
	[°C]	[A]
Puissance moyenne totale [g^2] DSP [g^2/Hz]	Moyenne de la température	Moyenne de l’intensité de courant

TABLE 4.6 – Réponses du plan d’expériences en fonctionnement du SPAC

Ainsi, le plan d’expériences réalisé suit la table 4.7.

4.3.1.2 Pilotage des facteurs d’entrée du plan d’expériences et des paramètres

1) Température et hygrométrie :

N°essai	T		P	
	Température		Point de fonctionnement	
	(°C)	Effet	(kW)	Effet
1	1	-1	2,5	-1
2	1	-1	4	0
3	1	-1	8	1
4	23	0	2,5	-1
5	23	0	4	0
6	23	0	8	1
7	35	1	2,5	-1
8	35	1	4	0
9	35	1	8	1

TABLE 4.7 – Matrice d’expériences (F) du SPAC en fonctionnement

Le facteur de température est contrôlé par une enceinte climatique (Caractéristiques présentées en table 4.1 et figure 4.1). Le contrôle de la température ambiante de l’enceinte climatique est réalisée par le logiciel : Sirpac 2000. Il gère la régulation de la température et de l’humidité. Il est lié directement à l’enceinte climatique. L’injection d’air sec pour ventiler l’ambiance afin d’éviter l’accumulation d’hydrogène sert également à diminuer l’humidité.

2) Point de fonctionnement du système :

Le point de fonctionnement du système est commandé par une charge placée en aval de la pile à combustible. Elle est pilotée par une chaîne d’acquisition (National Instrument).

3) Le refroidissement du système :

La pile à combustible est refroidie à 90 % par un radiateur air/eau placé à l’extérieur du module. Les 10% restant sont dissipés dans l’ambiance du module.

4.3.1.3 Les réponses du plan d’expériences

1) Points de mesure des températures des éléments du module :

Les capteurs de température (thermocouples), dont les données sont acquises par le système National Instrument / Labview, sont répartis dans le module énergie comme présenté dans le table 4.11.

Nom de la voie	Description de la voie	Type du capteur
$T_{Inairext}$	Entrée d’air dans le module	Thermocouple
$T_{Ambiant}$	Température d’ambiance du module	Thermocouple
T_{Pac}	Température à la surface de la pile	Thermocouple pastille

TABLE 4.8 – Description des voies d’enregistrement des données de température

2) Points de mesure des variables de fonctionnement du module :

Deux sous-systèmes du SPAC fournissent à leur sortie le courant demandé par la chaîne de traction du véhicule. Il s'agit de la batterie de puissance et de la PAC en passant par le convertisseur de courant (DC/DC). Un capteur de courant permet de suivre l'intensité du courant sortant de la PAC. Le débit d'hydrogène entrant dans la PAC est également enregistré. Ces données (4.9) sont mesurées par la chaîne d'acquisition National Instrument.

Nom de la voie	Description de la voie
I_{PAC}	Sortie de la PAC
Deb_{H2}	Débit d'hydrogène entrant dans le SPAC

TABLE 4.9 – Description des voies d'enregistrement des données de fonctionnement de la PAC

3) Points de mesure des réponses aux sollicitations vibratoires :

Les réponses vibratoires à l'intérieur du module sont mesurées par des accéléromètres tri-axiaux. Le choix des points à suivre lors des essais se base sur les résultats des études conduites dans le chapitre 2. L'étude globale et qualitative de sûreté de fonctionnement préconise d'approfondir prioritairement la connaissance du comportement des organes suivant du système :

- Les fixations du réservoir,
- Le réservoir,
- Le tuyau d'hydrogène entre le réservoir et la PAC,
- Les capteurs de présence d'hydrogène,
- La tête du réservoir.

Par ailleurs, les masses principales du système pouvant influencer le comportement dynamique d'autres éléments du système sont :

- Le réservoir,
- La pile à combustible (PAC),
- La batterie,
- Le compresseur d'air.

Les accéléromètres doivent être répartis dans le module énergie de manière à suivre ces préconisations. Pour rappel, l'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des conditions environnementales et du point de fonctionnement de la PAC sur le tuyau d'hydrogène. Par ailleurs, la direction z est celle pour laquelle la réponse en accélération est la plus élevée. L'analyse qui s'en suit concerne donc seulement les données de cette voie d'enregistrement.

Cependant le tuyau d'hydrogène est encastré d'un côté dans la PAC et de l'autre à la tête du réservoir. Il subit les excitations à ces deux extrémités. Ainsi la réponse au point observé sur le tuyau est influencé par les sollicitations qui sont enregistrées sur la PAC et sur le tête du réservoir respectivement fixés au caisson et au réservoir.

La table 4.10 présente l'ensemble des accéléromètres dont les données sont exploitées dans ce document. Chacun des accéléromètres utilisés mesure les accélérations

dans les 3 directions (x , y et z). La tête du réservoir intègre, notamment, la vanne, le détendeur et la soupape de sécurité (TPRD).

N° de la voie	Nom de la voie	Type de capteur
5, 6 et 7	Pile x, y et z	tri-axe
14, 15 et 16	Tête du réservoir x, y et z	tri-axe
67, 68 et 69	Réservoir x, y et z	tri-axe
70, 71 et 72	Tuyau d'hydrogène x, y et z	tri-axe

TABLE 4.10 – Description des voies d'enregistrement des données accélérométriques

4.3.2 Analyses statistiques

Le but de ce paragraphe est de décrire l'organisation des données d'entrée et de sortie pour aider le concepteur à interpréter les phénomènes qui ont eu lieu au cours des expériences et ainsi compléter sa compréhension. En ce sens les analyses statistiques réalisées ci-dessous sont descriptives : elles ont pour objectif de « décrire » les données étudiées. Ces analyses permettent de présenter les données, de les représenter graphiquement et de les résumer par des outils numériques. Parmi les nombreuses possibilités qu'offrent les calculs statistiques, certains d'entre eux ont été choisis à ces fins. Tout d'abord, une représentation graphique par composantes principales va permettre de tirer des conclusions qualitatives sur les liens qu'ont certaines variables entre elles. Le but est d'orienter l'approfondissement des analyses suivantes sur des points mis en évidence par cette première étude. Ensuite, l'analyse de la variance permet d'analyser l'influence des variables du plan d'expériences sur les données de sortie particulières ou des constructions de coefficients de régression multilinéaire des données sélectionnées.

4.3.2.1 Les traitements de données

Le nombre de points de la DSP est égale au nombre de points du signal enregistré, soit, dans notre cas environ 3 600 000. Afin de faciliter l'analyse des différentes DSP liées aux nombreuses voies enregistrées lors des essais, il est nécessaire de réduire le nombre de points tout en gardant l'ensemble de l'information.

Par bande de fréquence de $\Delta f = 1$ Hz de la DSP, l'amplitude de la DSP considérée constante est égale à la moyenne des amplitudes de la DSP (a_{DSP}) sur cette bande de fréquence. (4.6).

$$\hat{a}_{DSP}(\hat{f}) = \frac{\sum_{\Delta f} a_{DSP}}{n} \quad (4.6)$$

avec

a_{DSP} : L'amplitude de la TF de l'auto-corrélation du signal

\hat{a}_{DSP} : L'amplitude de la DSP sur une fenêtre de 1 Hz

Δf : Les bandes de fréquence de 1 Hz

n : Le nombre de points de la Dsp dans la bande de fréquence de Δf

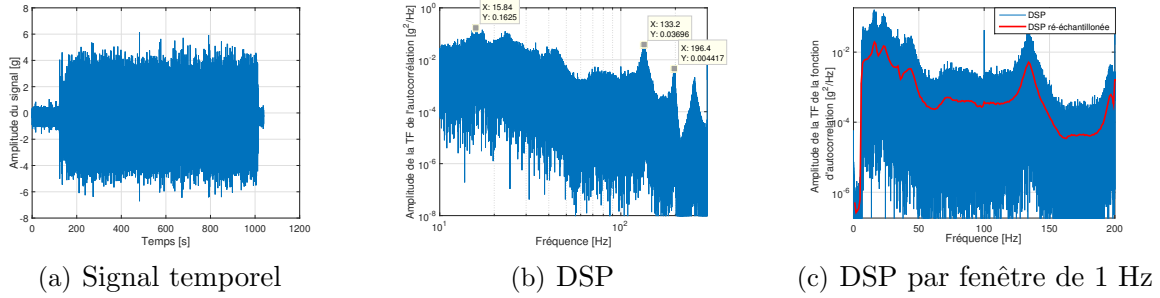


FIGURE 4.8 – Analyse spectrale de l’enregistrement lors de l’essai à 23°C et à pleine puissance de la PAC sur le tuyau d’hydrogène dans la direction z

La figure 4.8 (c) représente, en rouge, l’amplitude de la DSP moyennée sur une fenêtre de 1 Hz. La puissance totale du signal représenté par sa DSP par fenêtre de 1 Hz est évidemment exactement la même que la DSP originelle (avec un fenêtrage bien plus faible).

4.3.2.2 Outils statistiques nécessaires aux analyses

En reprenant les outils de caractérisation des variables aléatoires présentés au chapitre 1, nous avons pour la variable $a_{DSP}(f)$, son moment d’ordre 1 et son moment centré d’ordre 2 :

$$moyenne = \bar{a}_{DSP} = \mu_{a_{DSP}(1)} = E[a_{DSP}] = \int_0^{+\infty} a_{DSP} f_{a_{DSP}}(f) df \quad (4.7)$$

$$var(a_{DSP}) = S^2 = \mu'_{a_{DSP}(2)} = E[(a_{DSP} - E[a_{DSP}])^2] \quad (4.8)$$

Pour les deux variables a_1 et a_2 définies pour un même nombre d’individus n , la co-variance entre ces deux variables est :

$$C(a_1 a_2) = cov(a_1 a_2) = E[(a_1 - E[a_1])(a_2 - E[a_2])] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [a_{1i} - \bar{a}_1][a_{2i} - \bar{a}_2] \quad (4.9)$$

Parmi les nombreuses propriétés de la co-variance, on peut signaler l’inégalité de Cauchy-Schwarz qui dit que le carré de la co-variance entre deux variables est inférieure ou égale au produit de leurs variances respectives.

Si on étend l’analyse de la co-variance entre m variables définies par un même nombre d’individus, le calcul des co-variances deux à deux fourni la **matrice de co-variance** (ou matrice de variance co-variance) de dimension $[m; m]$ qui est symétrique et dont les termes diagonaux sont les variances de chacune des variables.

On définit le coefficient de corrélation linéaire, par le rapport de la co-variance sur le produit des écarts :

$$\rho_{a_1 a_2} = \frac{cov(a_1 a_2)}{\sqrt{var(a_1)var(a_2)}} \quad (4.10)$$

Le coefficient de corrélation linéaire est indépendant des unités de mesure des variables, c'est un indice de liaison « intrinsèque » entre les deux variables. Et on peut montrer, par l'inégalité de Cauchy-Schwarz, que :

$$-1 < \rho_{a_1 a_2} = \frac{cov(a_1 a_2)}{\sqrt{var(a_1)var(a_2)}} < 1 \quad (4.11)$$

Comme introduit dans le chapitre 2, la corrélation permet d'analyser la dépendance de deux variables entre elles. Si les variables sont totalement indépendantes, leur corrélation est toujours nulle. Plus elles sont liées entre elles, plus le coefficient de corrélation s'éloigne de zéro. Lorsque le coefficient de corrélation est négatif, les variables varient entre elles dans le sens opposé, et lorsqu'il est positif, elles varient dans le même sens.

Enfin, si on étend l'analyse de la corrélation entre m variables définies par un même nombre d'individus, le calcul des coefficients de corrélation deux à deux fournit la **matrice de corrélation** de dimension $[m; m]$ ne comportant évidemment que des 1 sur sa diagonale et qui est, également, symétrique.

Lorsque les deux variables sont bien corrélées, il est intéressant d'approfondir ce lien en cherchant par exemple une fonction par laquelle elles peuvent être liées. Dans le cas d'une **régression linéaire** l'enjeu est de déterminer des coefficients α_i tels que :

$$a_1 = \alpha_0 + \alpha_1 a_2 \quad (4.12)$$

On peut utiliser pour cela le critère des *moindres carrés* selon lequel :

$$\alpha_1 = \frac{cov(a_1 a_2)}{var(a_2)} \quad (4.13)$$

La recherche du coefficient selon le critère des moindres carrés, est basée sur la minimisation de la somme des carrés des écarts entre la droite (dans le cas d'une régression linéaire) et les valeurs des données d'origine. Ces écarts constituent les « résidus ».

$$Residu_i = \alpha_{1_i}(a_{2_i}) - \hat{\alpha}_{1_i}(a_{2_i}) \quad (4.14)$$

Ces outils, permettant d'objectiver le lien entre plusieurs variables, vont être utilisés pour les méthodes d'analyse appliquées aux données des essais réalisés sur le tuyau d'hydrogène et son environnement.

4.3.3 Analyse qualitative : analyse par composantes principales

Le type de plan d'expériences, présenté précédemment, génère un très grand nombre de données. Ainsi, un dépouillement systématique de chacune des variables, est chronophage pour le physicien. De plus ce type de dépouillement n'est pas adapté à l'analyse de l'influence des paramètres du plan d'expériences sur les variables.

Ainsi le physicien a besoin d'outils qui regroupent un maximum d'informations tout en lui permettant d'identifier les domaines à approfondir et à objectiver quantitativement. L'analyse par composantes principales (ACP) semble être adaptée à cette attente.

En effet, l'ACP est une méthode descriptive d'analyse multivariée : elle vise à décrire la manière dont un grand nombre de variables sont liées entre elles.

Le principe général de l'ACP est de réduire la dimension d'un ensemble de données lié à un grand nombre de variables interdépendantes, tout en conservant l'ensemble de l'information décrivant la manière dont les données varient entre elles. Ce résultat est obtenu par la définition d'un nouvel ensemble de variables, appelées composantes principales (CP), décorréélées les unes des autres, représentant l'ensemble des variables d'origine. Les CP sont ordonnées de telle sorte que la majeure partie des informations de variation entre les variables d'origine soient présentes dans les premières CP. De plus amples informations sur l'outil ACP sont détaillées par I.T Jolliffe [Jolliffe, 2002].

Par ce changement de variables et cette réduction de variables, l'ACP représente graphiquement de la variation des données d'un plan d'expériences par exemple. Au delà de la représentation graphique, par la réduction des variables, l'ACP permet de compresser les données, en réduisant le nombre de dimensions sans perdre beaucoup d'information. Cette technique est utilisée dans de nombreux domaines notamment en traitement du signal.

Historiquement, l'ACP a été introduit par K. Pearson en 1901, et développé par la suite par H. Hotelling en 1933. Comme de nombreuses méthodes multi-dimensionnelles, elle n'a été largement utilisée qu'à partir de l'avènement de l'aire numérique, mais elle est maintenant bien ancrée dans les analyses statistiques [Jolliffe, 2002].

4.3.3.1 Méthode utilisée

Afin d'analyser graphiquement les liens entre la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène et les différentes valeurs des facteurs de température et de points de fonctionnement, une ACP est utilisée de la manière suivante :

Soit la population (champ de l'étude) contenant l'ensemble des amplitudes des DSP des signaux enregistrés du tuyau d'hydrogène. Les différents essais (variation de la température et du point de fonctionnement) sont les variables indépendantes, et les individus sont les 300 valeurs moyennes des amplitudes des densités spectrales de puissance par bande de fréquence de 1 Hz des réponses vibratoires aux voies entre les fréquences 1 et 300 Hz. Chaque case de la matrice des individus contient la valeur de la DSP à la fréquence correspondante et pour l'essai considéré. Chaque vecteur, correspondant aux variables, est normalisé en retirant la moyenne du vecteur à chacun de ces 300 termes, et en le divisant par l'écart-type. La matrice à traiter \mathbf{M} est donc une matrice de 300

lignes (individus) et de 9 colonnes (n° de l'essai défini par le couple Température - Point de fonctionnement). La matrice de corrélation \mathbf{V} est donc une matrice $9 * 9$.

Les données des 9 essais sont, évidemment, très bien corrélées entre elles car le SPAC est sollicité par un même profil vibratoire. Si les températures extérieures et le fonctionnement de la PAC ne variaient pas d'un essai à l'autre, les éléments de la matrice de corrélation de ces 9 vecteurs seraient tous égaux à 1. Afin de représenter la variation des réponses (provoqués par les 2 facteurs) suivant les essais, on cherche à représenter les données sur des vecteurs qui sont totalement dé-corrélées les unes des autres. C'est l'objectif de l'ACP. Il s'agit en fait d'un changement de variables indépendantes, les nouvelles variables indépendantes étant des combinaisons linéaires des anciennes (les 9 essais).

Pour cela, la matrice de corrélation \mathbf{V} , symétrique et définie positive, est diagonalisée. Les vecteurs propres déterminent ces vecteurs dé-corrélés entre eux. Ils sont classés par valeurs décroissantes de leurs valeurs propres correspondantes. On les appelle « composantes principales » (CP). Ils sont orthogonaux entre eux par construction. Les données peuvent donc être représentées dans ce nouvel espace dont les vecteurs propres (composantes principales) sont les axes.

La somme des valeurs propres des deux premiers vecteurs doit être supérieure à 75 % de la somme de l'ensemble des valeurs propres pour que la représentation dans le plan de ces deux vecteurs soit suffisante à l'analyse des corrélations dans les variables.

La réalisation d'une ACP se résume en 5 étapes [Jolliffe, 2002] :

- 1-Calcul de la **matrice de corrélation** des mesures des variables
- 2-Solution du problème aux valeurs propres qui détermine :
 - les coefficients des combinaisons linéaires définissant les inerties définissant les inerties des CP (vecteurs propres)
 - les variances des CP (valeurs propres)
- 3-Analyse des variances des CP pour vérifier si elles sont statistiquement adaptées à une analyse ACP. La variance totale des deux ou trois premières CP doit être d'au moins 75% pour valider une ACP.
- 4-Projection des individus sur les deux nouveaux axes
- 5-Élaboration du graphique

4.3.3.2 Résultats de l'analyse

L'analyse est dans un premier temps réalisée sur les amplitudes des DSP des signaux enregistrés dans la direction x du tuyau d'hydrogène, au cours des 9 essais du plan d'expériences présenté par la table 4.7 (page 136). La matrice de corrélation de l'ensemble de ces 9 vecteurs correspondant aux variables est la suivante :

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 0,97 & 0,99 & 0,99 & 0,99 & 0,99 & 0,98 & 0,94 & 0,94 \\ 0,97 & 1 & 0,99 & 0,98 & 0,96 & 0,96 & 1,00 & 0,99 & 0,99 \\ 0,99 & 0,99 & 1 & 0,99 & 0,99 & 0,99 & 0,99 & 0,97 & 0,97 \\ 0,99 & 0,98 & 0,99 & 1 & 1,00 & 1,00 & 0,99 & 0,96 & 0,95 \\ 0,99 & 0,96 & 0,99 & 1,00 & 1 & 1,00 & 0,97 & 0,94 & 0,93 \\ 0,99 & 0,96 & 0,99 & 1,00 & 1,00 & 1 & 0,97 & 0,94 & 0,93 \\ 0,98 & 1,00 & 0,99 & 0,99 & 0,97 & 0,97 & 1 & 0,99 & 0,99 \\ 0,94 & 0,99 & 0,97 & 0,96 & 0,94 & 0,94 & 0,99 & 1 & 1,00 \\ 0,94 & 0,99 & 0,97 & 0,95 & 0,93 & 0,93 & 0,99 & 1,00 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

On peut constater que les vecteurs sont très corrélés, car les termes de la matrice sont tous supérieurs à 0,90. Ce qui s'explique par le fait que, au cours des 9 essais, la table vibrante reproduit le même profil vibratoire. Il est donc évident que les réponses vibratoires du tuyau d'hydrogène sont très fortement liées entre elles par ces mêmes sollicitations aux fixations du SPAC. La diagonalisation de cette matrice fournit la matrice U des 9 vecteurs propres rangés colonne par colonne :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0,33 & -0,31 & 0,51 & 0,53 & 0,12 & -0,20 & -0,32 & 0,25 & 0,18 \\ 0,33 & 0,23 & 0,51 & -0,68 & 0,04 & 0,07 & -0,24 & 0,09 & -0,18 \\ 0,34 & -0,07 & 0,21 & 0,15 & -0,73 & -0,01 & 0,40 & -0,23 & -0,27 \\ 0,34 & -0,21 & -0,20 & -0,03 & 0,47 & -0,32 & 0,39 & 0,19 & -0,54 \\ 0,33 & -0,39 & -0,21 & -0,01 & 0,07 & 0,82 & -0,06 & 0,08 & -0,01 \\ 0,33 & -0,38 & -0,44 & -0,34 & -0,25 & -0,42 & -0,30 & -0,11 & 0,31 \\ 0,34 & 0,14 & 0,12 & 0,01 & 0,38 & 0,02 & 0,34 & -0,61 & 0,47 \\ 0,33 & 0,48 & -0,21 & 0,05 & -0,13 & 0,01 & 0,27 & 0,62 & 0,38 \\ 0,33 & 0,51 & -0,31 & 0,33 & 0,03 & 0,01 & -0,49 & -0,27 & -0,34 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Et les valeurs propres correspondantes :

$$Val = \begin{bmatrix} 8,8039 \\ 0,1667 \\ 0,0182 \\ 0,0042 \\ 0,0031 \\ 0,0016 \\ 0,0012 \\ 0,0008 \\ 0,0003 \end{bmatrix} \rightarrow \frac{100 * Val}{\sum Val} = \begin{bmatrix} 97,821 \\ 1,8517 \\ 0,2018 \\ 0,0470 \\ 0,0344 \\ 0,0182 \\ 0,0135 \\ 0,0091 \\ 0,0035 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

La remarque précédente se traduit par le fait que le premier vecteur propre est pratiquement constant. Par ailleurs, ce vecteur, explique près de 98% de la variance des individus lors des différents essais. En effet, le phénomène dont dépend en grande partie les réponses vibratoires, à savoir les sollicitations créées par la table vibrante, ne varie lui-même pas d'un essai à l'autre. Les 8 autres vecteurs propres, sont moins constants. Ce

qui attire ici davantage l'attention, c'est la manière dont est organisé le second vecteur propre.

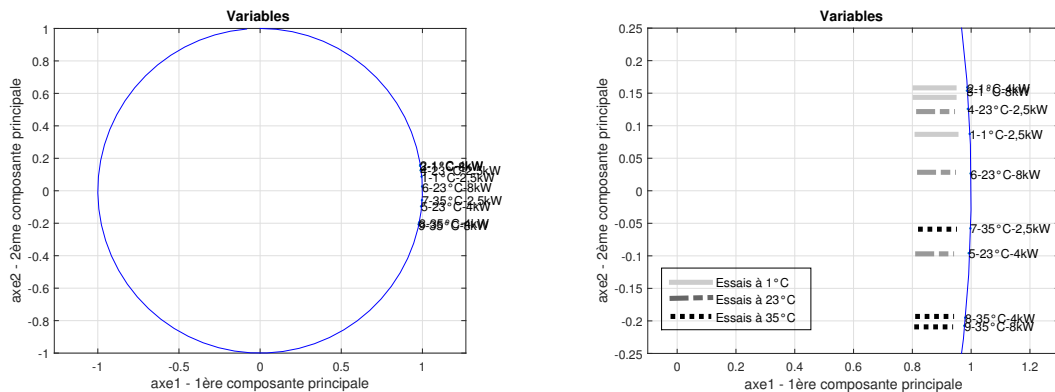
La projection des vecteurs des variables, correspondant à chacun des 9 essais effectués, sur les deux premiers vecteurs propres donne :

$$\text{Variables} = \mathbf{U} \cdot \sqrt{\text{Val}} = \begin{bmatrix} 1,00 & -0,09 \\ 0,99 & -0,16 \\ 0,99 & -0,15 \\ 0,99 & -0,13 \\ 0,99 & 0,10 \\ 1,00 & -0,03 \\ 1,00 & 0,06 \\ 0,98 & 0,20 \\ 0,98 & 0,21 \end{bmatrix} \leftarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Essais - n}^\circ 1 : 1^\circ\text{C} - 2,5\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 2 : 1^\circ\text{C} - 4\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 3 : 1^\circ\text{C} - 8\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 4 : 23^\circ\text{C} - 2,5\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 5 : 23^\circ\text{C} - 4\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 6 : 23^\circ\text{C} - 8\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 7 : 35^\circ\text{C} - 2,5\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 8 : 35^\circ\text{C} - 4\text{kW} \\ \text{Essais - n}^\circ 9 : 35^\circ\text{C} - 8\text{kW} \end{array} \right\} \quad (4.18)$$

Et de manière ordonnée sur le deuxième vecteur :

$$\begin{bmatrix} 0,99 & 0,16 \\ 0,99 & 0,15 \\ 0,99 & 0,13 \\ 1,00 & 0,09 \\ 1,00 & 0,03 \\ 1,00 & -0,06 \\ 0,99 & -0,10 \\ 0,98 & -0,20 \\ 0,98 & -0,21 \end{bmatrix} \leftarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Essais-n}^\circ 2 : 1^\circ\text{C} - 4\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 3 : 1^\circ\text{C} - 8\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 4 : 23^\circ\text{C} - 2,5\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 1 : 1^\circ\text{C} - 2,5\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 6 : 23^\circ\text{C} - 8\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 7 : 35^\circ\text{C} - 2,5\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 5 : 23^\circ\text{C} - 4\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 8 : 35^\circ\text{C} - 4\text{ kW} \\ \text{Essais-n}^\circ 9 : 35^\circ\text{C} - 8\text{ kW} \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

Cette dernière matrice de la projection des variables sur les deux premiers vecteurs propres peut être représentée graphiquement par la figure 4.9.



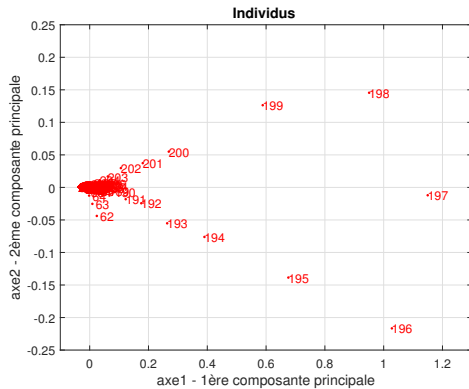
(a) Représentation des variables

(b) Zoom de la représentation des variables

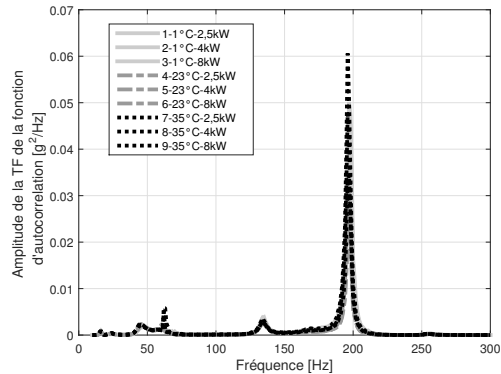
FIGURE 4.9 – Représentation des variables

Cette matrice et sa représentation graphique permettent de constater que les variables, selon le second vecteur propre, sont organisées en fonction de la température extérieure. Ce qui signifie que la température extérieure influence la réponse vibratoire selon x du tuyau d'hydrogène.

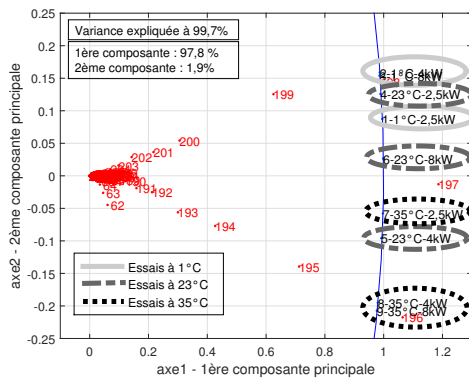
Si maintenant on regarde comment sont répartis les individus sur ces deux premières composantes principales, on constate que les fréquences auxquelles la réponse vibratoire varie le plus sont celles comprises entre 190 et 200 Hz, comme le montre la figure 4.10 a).



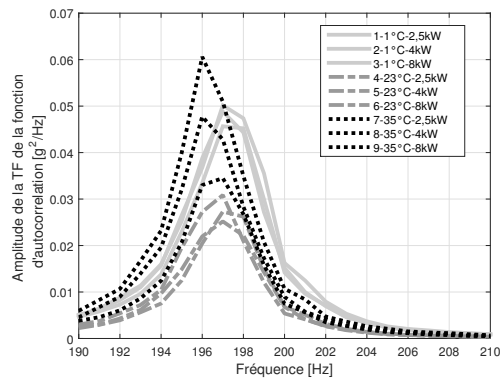
(a) Représentation des individus



(b) DSP des 9 essais



(c) Représentation des individus et variables



(d) Zoom DSP des 9 essais

FIGURE 4.10 – Représentation de la variation de la densité spectrale de puissance de la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène selon x suivant le déroulement du plan d'expériences

D'après la figure 4.10 b), ces fréquences correspondent aux amplitudes les plus élevées de la DSP. De plus, on observe sur la figure 4.10 a), une organisation de ces fréquences. Si, enfin, la répartition des variables est rajoutée sur la même figure (figure 4.10 c)), on remarque que les individus correspondant aux fréquences supérieures à 197 Hz de cette organisation se situent du même côté du second axe (2ème composante principale) que les variables correspondant aux essais à 1°C. De manière similaire, les individus correspondant aux fréquences inférieures à 197 Hz sont du côté négatif de ce second axe, ainsi que les variables correspondant aux essais à 35°C. Ces observations permettent d'affirmer que la température influence la réponse vibratoire. Plus la température augmente, plus le pic d'amplitude est décalé vers les basses fréquences. Cette interprétation est di-

rectement vérifiée par la représentation des différentes DSP, correspond aux 9 essais, à ces fréquences : figure 4.10 d).

L'ACP permet ainsi de visualiser la manière dont les résultats des essais sur la même voie sont organisés. L'avantage de cette analyse est qu'elle conserve la référence des facteurs de l'expérience.

La même méthode est appliquée sur les DSP des réponses vibratoires du tuyau d'hydrogène dans les directions y et z .

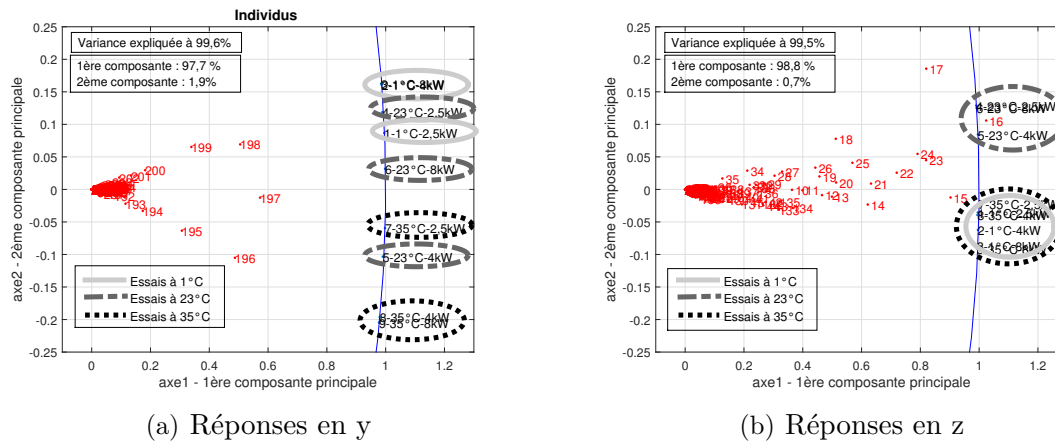


FIGURE 4.11 – ACP de la réponse du tuyau d'hydrogène

Sur la figure 4.11 b), dans la direction z , on retrouve la mise en évidence des fréquences autour de 16 Hz (individu 16) qui a pu être observé lors de l'essai à 23°C et à puissance maximale de la PAC (figure 4.8 page 139). De même dans la direction y (figure 4.11 a)), les fréquences remarquables sont un peu en dessous de 200 Hz, de la même manière que dans la direction x . Ceci correspond également aux observations faites sur la figure 4.7 (page 133).

En s'attardant davantage sur la répartition des individus (en rouge) par rapport aux variables (en noir), dans la direction y (figure 4.11 (a)), les individus correspondant aux fréquences en dessous de 197 Hz sont davantage influencés par les essais dont la température extérieure est plus élevée ; alors que pour les fréquences supérieures, il s'agit des essais à plus basse température. Cette observation est similaire à la précédente dans la direction x .

En ce qui concerne la réponse dans la direction z (figure 4.11 b), le sens d'un décalage éventuel du pic principal de fréquence est moins lisible ; car deux pics de niveaux proches se superposent en réalité sur cette figure : autour de 15 Hz et autour de 23 Hz. Ces deux pics semblent cependant se décaler légèrement vers les hautes fréquences pour les essais à 1°C et à 35°C par rapport aux essais à 23°C. Le tuyau d'hydrogène a, à ces fréquences, un comportement légèrement différent à 23°C des autres températures testées. Ceci s'explique par le fait que les fréquences mises en évidence ici, correspondant aux fréquences auxquelles les sollicitation provenant de la table vibrante sont d'amplitudes les plus élevées. Ainsi, à ces fréquences, la réponse du tuyau d'hydrogène dans la même direction que celle des sollicitations (z) est très difficilement influencée par d'autres phénomènes physique tel que la variation de la température. La variance n'est d'ailleurs

expliquée qu'à 0,7% par la deuxième composante principale (figure 4.11 b).

4.3.3.3 Interprétation des résultats

L'ACP appliquée à une comparaison de DSP, met particulièrement bien en évidence les fréquences pour lesquelles les amplitudes de la DSP sont les plus élevées. En effet, les fréquences auxquelles le niveau de la DSP est le plus élevé apparaissent très clairement.

Ce qu'apporte la représentation de l'ACP par rapport à l'analyse fréquentielle de la figure 4.7, c'est la possibilité de constater que la température extérieure a tendance à décaler certains pics d'amplitude vers les basses fréquences à mesure que la température augmente. En effet l'augmentation de la température de l'environnement extérieur du SPAC produit un « décalage » du spectre vers les basses fréquences. C'est-à-dire que le tuyau d'hydrogène est excité à des fréquences légèrement plus basses lorsque la température augmente. Cette analyse, indique donc le sens de l'influence des paramètres.

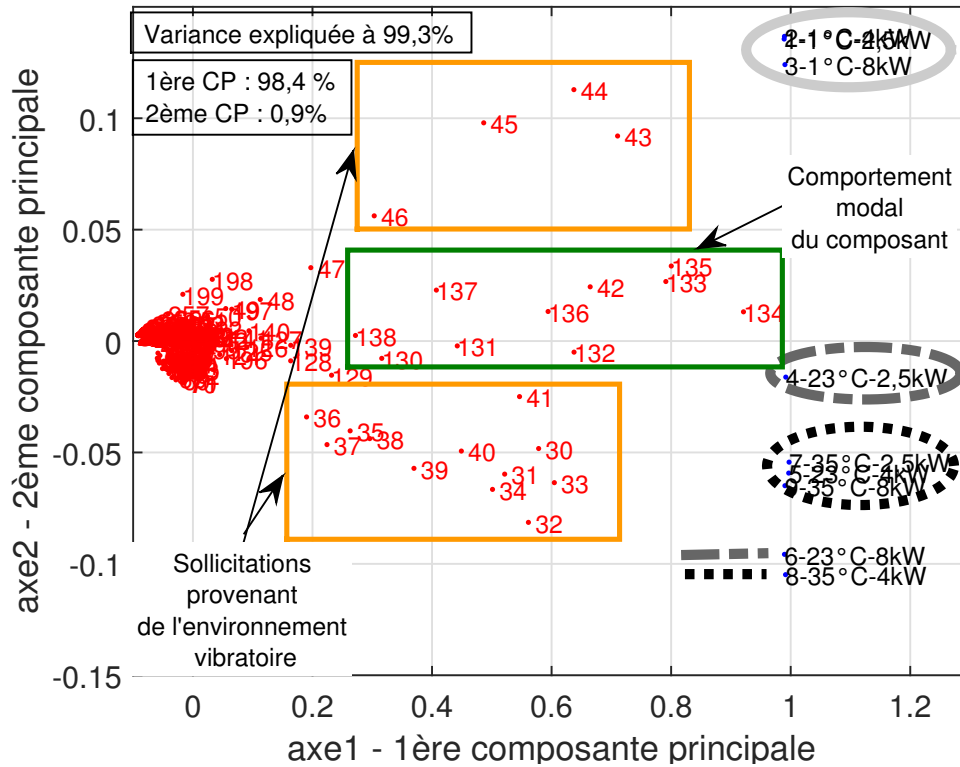
L'inconvénient de cette représentation est que, en dehors du pic d'amplitude principal, les autres évolutions de la DSP sont mal représentées. Il est possible de compléter les observations en occultant les individus de forte influence.

Ainsi, afin d'obtenir d'autres informations, une nouvelle ACP, présentée par la figure 4.12, ne tient pas compte des individus correspondants aux premiers pics (< 30 Hz). Sur la figure 4.12 a), autour de 33 Hz à 43 Hz, les réponses du tuyau d'hydrogène semblent être, une nouvelle fois, influencées par la température extérieure. En effet, plus la température baisse, plus la matière « durcit » la raideur ce qui fait augmenter la fréquence : ce pic de fréquence se décale vers les hautes fréquences. Par ailleurs, à ces fréquences les réponses du tuyau d'hydrogène correspondent aux excitations transmises par les éléments dans lesquels il est encastré : d'un côté la PAC et de l'autre la tête du réservoir comme le montre les figures 4.12 b) et c). Leurs comportements respectifs sont influencés de la même manière par les facteurs de température extérieure et de point de fonctionnement de la PAC.

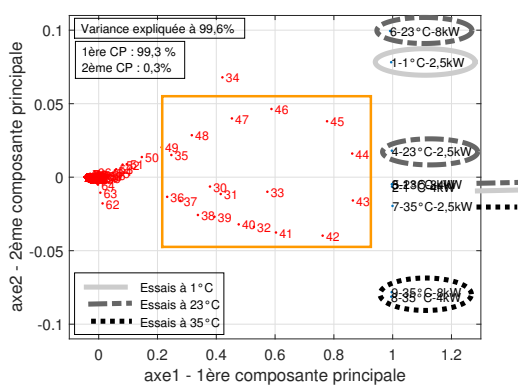
Enfin, le pic de fréquence autour de 135 Hz, est propre au comportement du tuyau d'hydrogène, comme ce qui a pu être mis en évidence dans la section précédente (figure 4.4). Il apparaît cette fois plus clairement. Il semble se décaler légèrement vers les hautes fréquences lorsque la température extérieure baisse.

En conclusion, l'analyse de cet exemple montre que les études par ACP, appliquées aux réponses vibratoires nous renseignent de manière qualitative sur l'allure des DSP mais également sur le sens de l'influence des facteurs d'un plan d'expériences. Une telle représentation, permet de regrouper sur un même graphique les réponses à l'ensemble des essais. Ainsi, la comparaison qualitative entre les résultats d'essais est moins fastidieuse pour le lecteur, lorsque les spectres sont visualisés indépendamment.

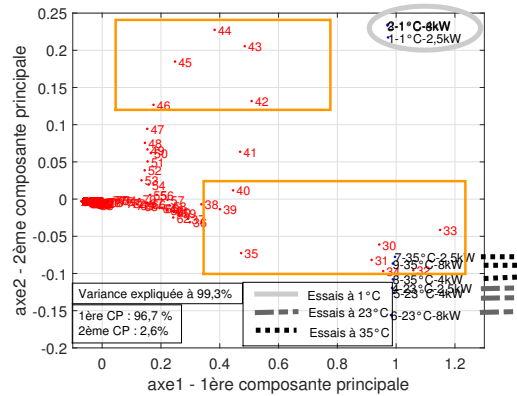
De plus, ce type de représentation permet également de déceler de manière très claire et rapide, d'éventuelles valeurs aberrantes issues de l'acquisition ou du traitement des données d'un grand nombre d'essais. L'ACP peut donc également être utilisée en phase de dépouillement pour valider la qualité des essais et de leur traitement.



(a) Tuyau d'hydrogène



(b) PAC



(c) Tête du réservoir

FIGURE 4.12 – Détail de la répartition des individus lors des réponses (dans la direction z) du tuyau d'hydrogène, de la PAC et de la tête du réservoir

Afin de quantifier l'influence des facteurs du plan d'expériences, l'analyse de leurs effets, et l'analyse de la variance sont réalisés.

4.3.4 Analyse du plan d'expériences

La méthode des plans d'expériences permet de déterminer et d'établir des liens entre deux types de variables : la réponse et les facteurs. Un modèle exprimant la réponse

en fonction des facteurs est donc recherchée. L'ouvrage de W. Tinson [Tinson, 2010] détaille l'élaboration et les analyses des plans d'expériences. Par ailleurs, le vocabulaire utilisé dans l'étude des plans d'expériences est normé (ISO 3534-3, 1998). Dans le domaine des piles à combustible, B. Wahdame [Wahdame, 2007] utilise la méthode des plans d'expérience pour analyser les phénomènes d'une PAC destinée aux applications de transport. Elle montre comment les plans d'expériences contribuent à l'élaboration de modèles comportementaux.

Le plan d'expériences réalisé est un plan factoriel car au moins un essai pour chaque combinaison de facteur est réalisé. Par ce type de plan, il est possible de modéliser la réponse estimée y en fonction des facteurs du plan d'expériences réalisé (4.20).

$$\begin{aligned}
 y = & m + E_{x_1}x_1 + E_{x_2}x_2 + \dots + E_{x_n}x_n \\
 & + \sum_{i,j=1;i \neq j}^n I_{x_i x_j} x_i x_j + \dots \\
 & + \sum_{i,j,k=1;i \neq j \neq k}^n I_{x_i x_j x_k} x_i x_j x_k
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

où :

m est la moyenne des réponses du plan d'expériences

n est le nombre de facteurs du plan d'expériences

E_{x_i} est l'effet du facteur x_i

$I_{x_i x_j}$ est l'effet de l'interaction du facteur x_i avec le facteur x_j

La campagne d'essais réalisée permet d'analyser le plan d'expériences précédemment par la table 4.7 (page 136). D'après (4.20), on a :

$$\begin{aligned}
 y = & \bar{y} + E_T T + E_P P \\
 & + I_{TP} T P
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

où :

\bar{y} est la moyenne des réponses du plan d'expériences

n est le nombre de facteurs du plan d'expériences

E_T est l'effet du facteur T : température

E_P est l'effet du facteur P : point de fonctionnement

I_{TP} est l'effet de l'interaction des facteurs $T P$

Les méthodes d'analyse :

L'objectif de l'analyse statistique est d'identifier les facteurs statistiquement influents sur les réponses observées [Rabier, 2007]. Il existe plusieurs méthodes d'analyse d'un plan d'expériences.

On peut citer la méthode de Daniel. Elle repose sur la création d'un graphique de Daniel [Daniel, 59] permettant de tester la valeur des effets de chacun des facteurs du plan.

La méthode de Lenth, quant à elle, met en œuvre un test statistique sur une pseudo erreur. Elle nécessite une bonne connaissance des phénomènes physiques observés et donc une collaboration avec les experts du domaine. En effet, les facteurs peu influents ne seront pas pris en compte dans cette méthode.

F. Rabier [Rabier, 2007] précise que : «*la méthode de Daniel tout comme celle de Lenth repose sur l'hypothèse qui stipule que 20% seulement des facteurs expliquent 80% de la variation de la réponse. En cas de non respect de cette hypothèse il sera plus hasardeux de différencier les facteurs influents des non influents*».

Une autre méthode, couramment appelée : analyse de la variance (en anglais : «*Analysis of Variance*» ou ANOVA) n'analyse pas la variance des populations étudiées, comme son nom pourrait l'indiquer, mais la variation de leur moyenne d'une expérience à une autre. Cette méthode est choisie pour l'étude présentée car elle est largement répandue, notamment dans le domaine des piles à combustible, que ce soit sur des expériences par essais ou par simulations comme développé par N.Noguer [Noguer, 2015].

4.3.4.1 Analyse de l'effet des facteurs

Calcul des effets des facteurs :

Pour une modalité d'un facteur donné, son effet est déterminé en calculant la somme des carrés des écarts (SCE). Ainsi, pour un facteur f , l'effet de f est donné par :

$$Effet_f = SCE_f = \frac{n}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} [y_i - \bar{y}]^2 \quad (4.22)$$

où :

n est le nombre total d'expériences du plan
 n_f est le nombre de modalités du facteur

La somme des carrés des écarts (SCE_{Tot}) sur l'ensemble du plan est donnée par :

$$SCE_{Tot} = \sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}]^2 \quad (4.23)$$

Lorsque l'on compare les effets des facteurs sur plusieurs variables (n'ayant pas nécessairement la même dimension), le pourcentage des effets est généralement utilisé. Il est donné par le rapport :

$$Effet_f(\%) = 100 * \frac{SCE_f}{SCE_{Tot}} \quad (4.24)$$

Calcul de l'effet résiduel :

La partie résiduelle correspond à l'interaction entre l'ensemble des facteurs du plan. Il se déduit ainsi :

$$Effet_{Res} = SCE_{Tot} - \sum_{f=1}^{nb_{facteurs}} SCE_f \quad (4.25)$$

Diagramme des effets :

Parmi les variables suivies lors des essais, les sorties dont on souhaite analyser les effets des facteurs sont présentées dans la table 4.11.

Nom de la sortie	Description de la sortie
$P_{z_{totale}}$	Puissance moyenne totale du signal d'accélération enregistré dans la direction z sur le tuyau d'hydrogène
$T_{Pac_{moy}}$	Moyenne de la Température à la surface de la PAC
$I_{PAC_{moy}}$	Moyenne du courant à la sortie de la PAC
$Deb_{H_2_{moy}}$	Moyenne du débit d'hydrogène entrant dans la PAC

TABLE 4.11 – Description des variables issues des voies d'enregistrement des données

La figure 4.13 montre que la puissance moyenne de la réponse vibratoire a tendance à augmenter avec la température extérieure.

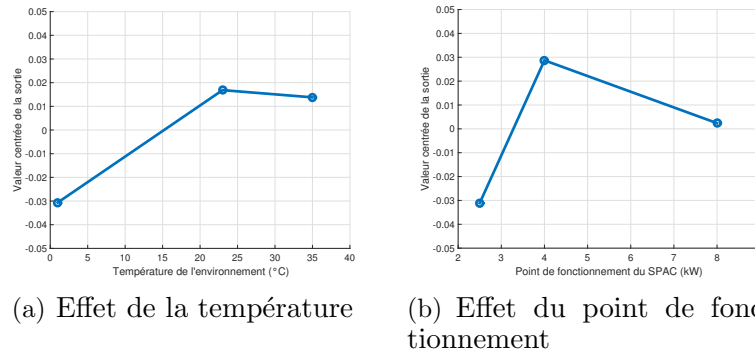
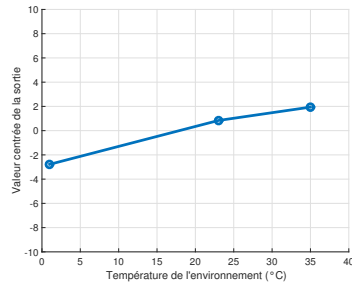
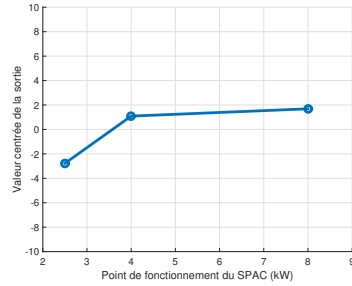


FIGURE 4.13 – Tracé des effets des facteurs du plan sur la puissance moyenne totale du signal d'accélération enregistré dans la direction z sur le tuyau d'hydrogène

Alors que sur la figure 4.14 a), l'augmentation de la température à la surface de la PAC est linéaire et va dans le même sens que l'augmentation de la température extérieure ; l'augmentation du point de fonctionnement du SPAC n'influence de la manière linéaire l'augmentation de la température à la surface de la PAC. La raison principale est que bien que la demande de puissance de la part du véhicule puisse augmenter, la PAC, suivant sa configuration, fonctionne par intermittence en fonction de l'état de charge de la batterie. Par ailleurs, lorsque la température interne de la PAC atteint un certain seuil dépassant la limite haute fixée par le concepteur, la PAC peut être arrêtée temporairement jusqu'à ce que cette température ambiante redescende dans la plage de fonctionnement spécifiée.



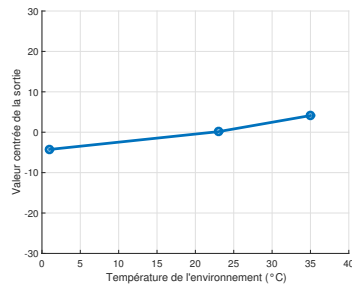
(a) Effet de la température



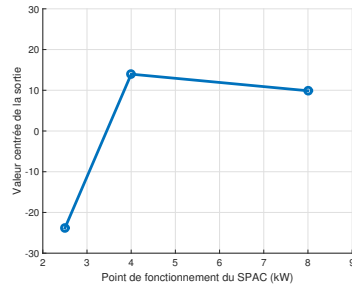
(b) Effet du point de fonctionnement

FIGURE 4.14 – Tracé des effets des facteurs du plan sur la moyenne de la température à la surface de la PAC

Comme expliqué précédemment, la PAC pouvant fonctionner de manière intermittente, et dans la limite d'une plage de température spécifiée, bien que la demande de puissance puisse augmenter, le courant à la sortie de la PAC ne suit pas nécessairement cette augmentation (figure 4.15).



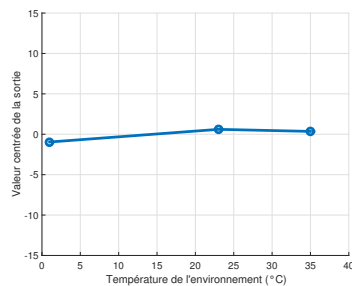
(a) Effet de la température



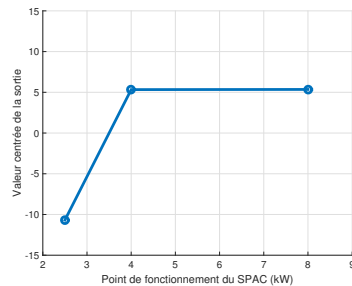
(b) Effet du point de fonctionnement

FIGURE 4.15 – Tracé des effets des facteurs du plan sur la moyenne du courant à la sortie de la PAC

Enfin la comparaison des figures 4.16 et 4.15, montre que le débit d'hydrogène entrant dans la PAC se comporte de la même manière que l'intensité du courant mesurée à la sortie de la PAC au cours du plan d'expériences.



(a) Effet de la température



(b) Effet du point de fonctionnement

FIGURE 4.16 – Tracé des effets des facteurs du plan sur la moyenne du débit d'hydrogène entrant dans la PAC

Pourcentage des effets des facteurs du plan sur les variables issues des données des voies d'enregistrement :

Les effets des facteurs température (T) et point de fonctionnement (P) sur ces variables lors de la réalisation du plan d'expériences, sont déterminés comme décrit précédemment par l'équation (4.24) et sont présentés par la table 4.12.

Facteur	Effets(%)			
	$P_{z_{totale}}$	T_{Pacmoy}	I_{PACmoy}	Deb_{H_2moy}
T	22,84	47,66	3,86	0,79
P	29,05	45,93	94,38	95,48
TP	48,11	6,42	1,76	3,73
Tot	100	100	100	100

TABLE 4.12 – Effets des facteurs sur les variables

Concernant la moyenne totale du signal d'accélération enregistré dans la direction z sur le tuyau d'hydrogène ($P_{z_{totale}}$), l'effet de l'interaction TP sur la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène dans la direction z est très élevé (table 4.12). La raison est, bien évidemment, que la réponse vibratoire d'une structure est influencée majoritairement par les sollicitations vibratoires auxquelles elle est soumise. Bien que ce pourcentage de l'effet des interactions soit élevé, le pourcentage des effets de la température et du point de fonctionnement contribuent malgré tout à, respectivement, 23% et 29% du résultat total. Par ailleurs, contrairement à ce que l'ACP aurait pu laisser comprendre, le point de fonctionnement du SPAC est plus influent que la température extérieure. La raison principale réside dans le fait que le fonctionnement de la PAC induit un dégagement de chaleur. Bien qu'un système de refroidissement à circulation d'eau diminue la diffusion de chaleur dans l'environnement de la PAC, plus la PAC fonctionne à une puissance élevée, plus elle contribue à la montée en température de son environnement. Cette remarque est vérifiable sur l'analyse de la variance de la température moyenne relevée par le capteur placé sur la PAC elle-même. Or, le tuyau d'hydrogène est, justement, à proximité de celle-ci. Notons que le convertisseur de courant (DC/DC), bien que refroidi également, dégage aussi des calories dans son environnement.

Les deux facteurs T et P influencent la température à la surface de la PAC (T_{Pacmoy}), à peu près, dans les mêmes proportions. Comme déjà expliqué, la PAC, dès lors qu'elle produit du courant, dégage simultanément des calories.

La température extérieure n'influence pas beaucoup le courant à la sortie de la PAC (I_{PACmoy}). Par ailleurs, la demande de puissance (point de fonctionnement du SPAC) explique à près de 95% la valeur du courant à la sortie de la PAC. Les conditions extérieures et de sollicitations vibratoires ne semblent pas faire varier le fonctionnement de la PAC de manière significative sur une période de fonctionnement de quelques minutes.

La comparaison des résultats du table 4.12, confirme une nouvelle fois, que le débit d'hydrogène entrant dans la PAC est très étroitement lié à l'intensité du courant mesurée à la sortie de la PAC. Notons simplement que la valeur de l'effet des interactions est proche de 4%.

Afin de comparer les effets des facteurs d'une variable à une autre, les va-

leurs de la table 4.12 sont représentées graphiquement sur la figure 4.17. Le pourcentage de l'effet de l'interaction des facteurs est inférieur à 10% sur les trois variables T_{Pacmoy} , I_{PACmoy} et Deb_{H_2moy} . Ceci correspond aux éléments non maîtrisables lors de la réalisation des expériences (incertitudes de mesures des chaînes de commande et d'acquisition et répétabilité des paramètres observés). Sur ces variables, l'analyse de la variance peut être poursuivie en testant le niveau de reproductibilité de l'effet de chacun des effets. Concernant la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène, le pourcentage de l'interaction des effets ne correspond par uniquement aux incertitudes liés à la réalisation des essais. Une analyse de la variance, sur cette puissance moyenne de réponse vibratoire, n'apporterait pas d'information supplémentaires. L'approfondissement de cette variable sera repris plus tard en élargissant l'observation des voies de mesure au voisinage du tuyau d'hydrogène.

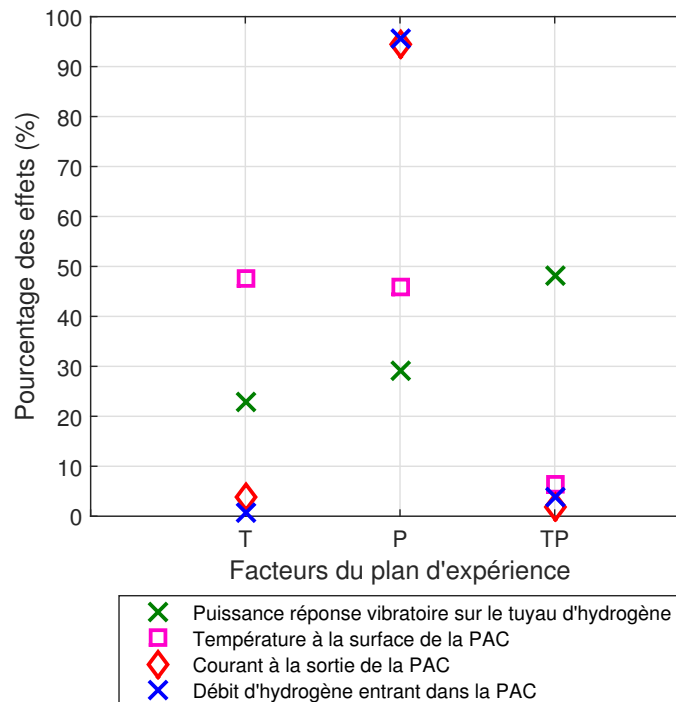


FIGURE 4.17 – Comparaison du pourcentage des effets des facteurs du plan

4.3.4.2 Analyse de la variance

Moyenne de la température à la surface de la PAC :

D'après la table 4.13 les deux facteurs influent à peu près dans les mêmes proportions, la température à la surface de la PAC.

Moyenne du courant à la sortie de la PAC :

Facteur	ddl	Effet(%)	F	Fcrit=F(0.90)	Conclusion
T	2	47,66	7,43	4,32	Influent
P	2	45,93	7,16	4,32	Influent
TP	4	6,42	1		
Tot	8	100			

TABLE 4.13 – Analyse de la variance de la moyenne de la température à la surface de la PAC

Facteur	ddl	Effet(%)	F	Fcrit=F(0.90)	Conclusion
T	2	3,86	2,19	4,32	Non influent
P	2	94,38	53,52	4,32	Influent
TP	4	1,76	1		
Tot	8	100			

TABLE 4.14 – Analyse de la variance de la moyenne du courant à la sortie de la PAC

D'après la table 4.14, la température extérieure n'est pas considérée comme influente sur le courant à la sortie de la PAC.

Moyenne du débit d'hydrogène entrant dans la PAC :

Facteur	ddl	Effet(%)	F	Fcrit=F(0.90)	Conclusion
T	2	0,79	0,21	4,32	Non influent
P	2	95,48	25,61	4,32	Influent
TP	4	3,73	1		
Tot	8	100			

TABLE 4.15 – Analyse de la variance de la moyenne du débit d'hydrogène entrant dans la PAC

D'après l'ensemble des résultats de la table 4.15, les effets les plus influents mis en évidence sont reproductibles à plus de 90%. Ils permettent de prévoir les valeurs de ces variables pour une autre valeur des facteurs.

4.3.5 Régression multilinéaire

L'analyse des effets de ces facteurs sur la puissance moyenne de la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène révèle cependant qu'une grande part des sources de variation de cette réponse, au cours des différents essais effectués, ne peut être expliquée par la variation des conditions des expériences (température, point de fonctionnement). L'analyse des effets sur la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène, l'exploitation de cette variable nécessite un approfondissement. Une grande part d'informations vient de la variation de

l'explication par les deux extrémités du tuyau d'hydrogène (d'un coté la PAC et de l'autre le réservoir).

Ces facteurs influencent-ils davantage les coefficients de la régression multilinéaire exprimant la réponse du tuyau d'hydrogène en fonction des réponses des masses principales du système auxquelles le tuyau d'hydrogène est fixé ? Pour répondre à cette question, déterminons les coefficients de la régression multilinéaire. La régression multilinéaire quantifie les inter-corrélation mises en évidence précédemment.

La régression multilinéaire (RML) permet d'exprimer une variable dépendante en fonction de plusieurs variables explicatives [A. Gelman, 2007] suivant l'équation (4.26) :

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1 \neq j}^n \beta_{ij} x_j x_k + \sum_{i=1}^n \gamma_i x_i^2 \quad (4.26)$$

Avec

y : la variable dépendante
 $\alpha_i, \beta_{ij}, \gamma_i$: les coefficients de la RML
 x_i : les variables explicatives
 n : le nombre de variables explicatives

L'ACP montre que la DSP du tuyau d'hydrogène semble être bien corrélée avec avec les DSP des signaux enregistrés sur la PAC et sur la tête du réservoir. Ainsi, afin d'approfondir l'explication du comportement vibratoire du tuyau d'hydrogène, une régression multilinéaire peut être envisagée. Elle permet d'exprimer les $\hat{u}_{DSP_{tuyau-z}}$ en fonction des amplitudes des DSP des signaux enregistrés à ses extrémités dans les 3 directions au cours des 9 expériences réalisées comme présenté par la figure 4.18 et décrit par l'équation (4.27).

$$\hat{u}_{DSP_{tuyau-z}cal} = \beta_0 + \sum_{v=1}^{n_v} \beta_v \hat{u}_{DSP_v} \quad (4.27)$$

Avec

$\hat{u}_{DSP_{tuyau-z}cal}$: l'amplitude de la DSP calculée par la RML
 v : les voies d'enregistrement des vibratoires aux points du SPAC
dont semble dépendre la réponse du tuyau d'hydrogène.
C'est-à-dire :
Pile - x, Pile - y, Pile - z
Reservoir - x, Reservoir - y, Reservoir - z
 β_v : les coefficients de la RML correspondant à chacune des voies
 \hat{u}_{DSP_v} : les amplitudes des DSP
 n_v : le nombre de voies observées explicatives = 6

La table 4.16 présente les coefficients de la régression multilinéaire des 9 réponses correspondantes aux 9 expériences du plan. Le coefficient R^2 correspond au rapport de la

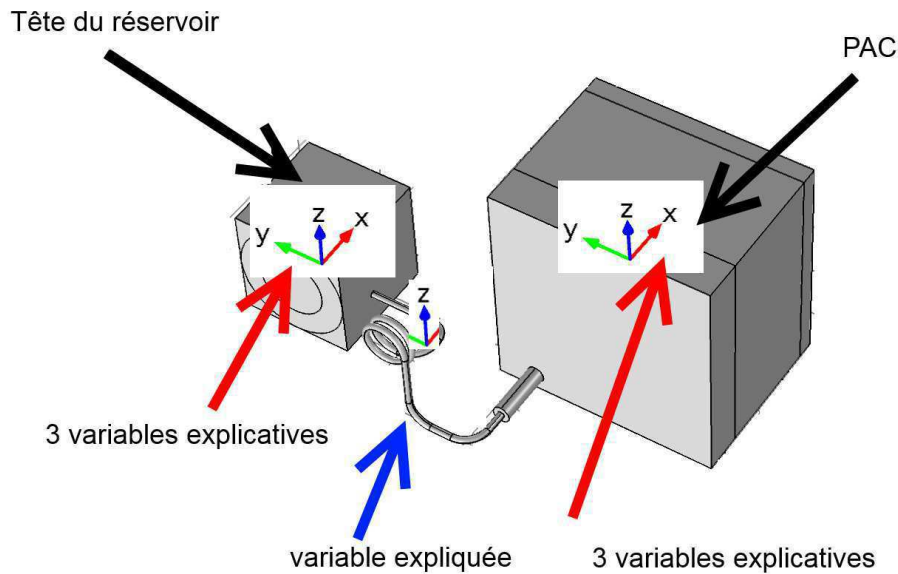


FIGURE 4.18 – Représentation des variables explicatives et de la variable expliquée

Essais N°	R^2	β_0	β_{Pile-x}	β_{Pile-y}	β_{Pile-z}	$\beta_{Reservoir-x}$	$\beta_{Reservoir-y}$	$\beta_{Reservoir-z}$
1	92%	0,0003	-0,29	0,39	0,18	0,10	-3,09	1,08
2	91%	0,0003	-0,13	0,37	0,17	0,10	-2,66	1,17
3	93%	0,0002	-0,29	0,39	0,14	0,12	-2,74	1,16
4	88%	0,0003	-0,30	0,34	0,24	0,08	-2,62	1,06
5	87%	0,0003	-0,54	0,29	0,21	0,09	-1,98	1,22
6	87%	0,0003	-0,35	0,33	0,22	0,08	-2,39	1,02
7	91%	0,0003	-0,52	0,41	0,18	0,10	-2,67	1,13
8	91%	0,0003	-0,02	0,40	0,18	0,07	-2,79	1,29
9	89%	0,0003	-0,01	0,40	0,20	0,06	-2,91	1,73

TABLE 4.16 – Valeur des coefficients de la régression multilinéaire sur la DSP du tuyau d'hydrogène dans la direction z

somme des écarts au carré de $\hat{a}_{DSP_{tuyau-z}cal}$ sur la somme des écarts au carré de $\hat{a}_{DSP_{tuyau-z}}$. Plus R^2 est proche de 1, plus les variables explicatives expliquent une part élevée de la réponse expérimentale. D'après la table 4.16, les 6 variables, correspondant aux amplitudes des DSP enregistrées sur la PAC et sur le réservoir, expliquent de 87 % à 93 %, suivant les expériences, la réponse du tuyau d'hydrogène au point mesuré.

Lorsque sont superposées les valeurs de la DSP de la réponse calculée par RML sur la valeur de la DSP de la réponse enregistrée sur le tuyau d'hydrogène (table 4.17),

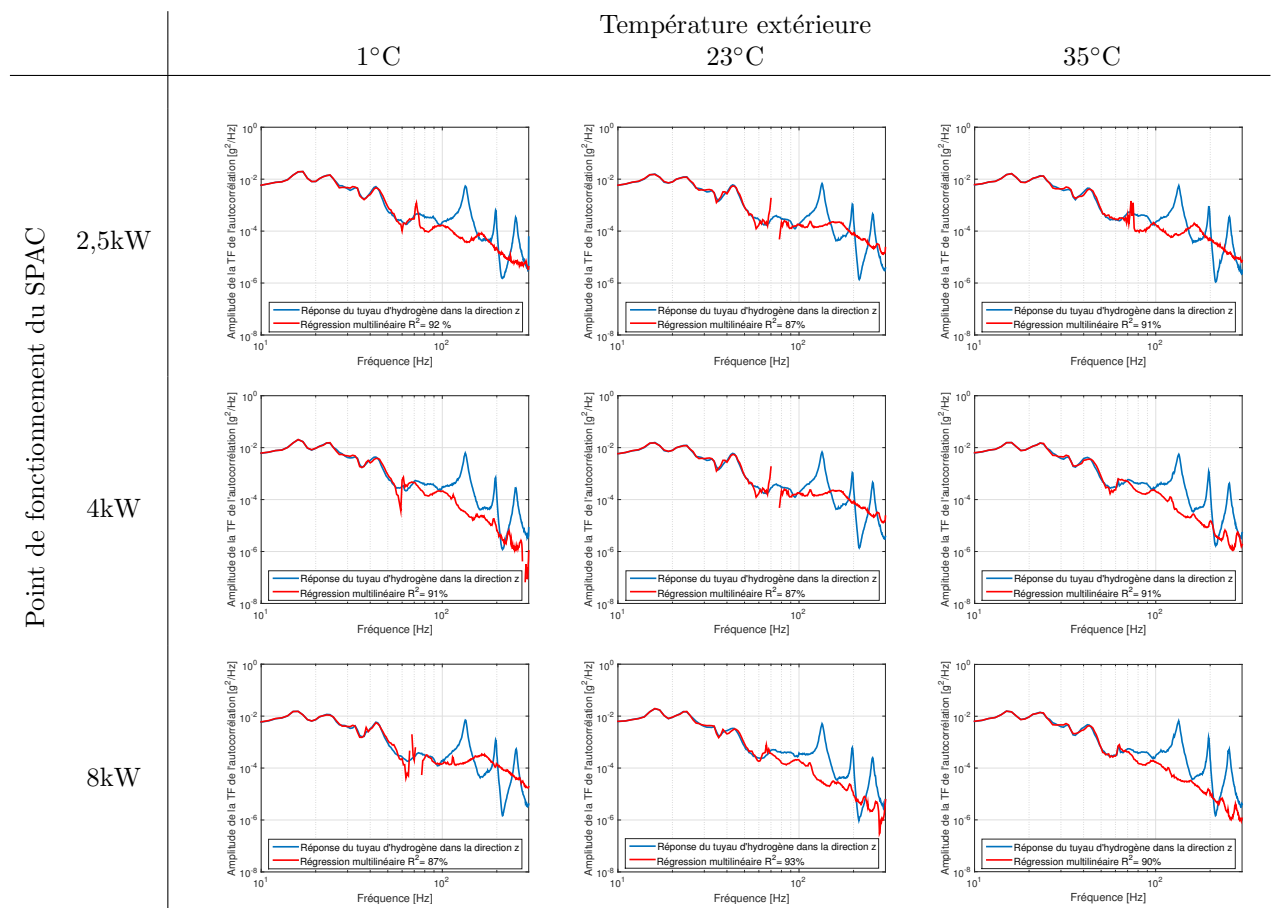


TABLE 4.17 – Régression multilinéaire sur la DSP du tuyau d’hydrogène dans la direction z

on constate que pour les fréquences inférieures à 60 Hz, les vibrations de la PAC et du réservoir expliquent bien celles du tuyau d’hydrogène alors que ce n’est pas le cas des fréquences supérieures à cette limite. La présentation de ces résultats confirme que les pics de fréquences observés entre 100 Hz et 300 Hz sont propres au tuyau d’hydrogène comme montré par l’exploitation d’un essai de caractérisation.

4.3.6 Analyse des effets d’un plan d’expériences sur les coefficients d’une régression multilinéaire

L’objectif de ce paragraphe est d’analyser l’influence des effets de la température et du point de fonctionnement sur les coefficients de la régression multilinéaire présentée ci-dessus.

La méthode réalisée précédemment est reproduite ici sur ces coefficients de RML déterminés pour les 9 expériences du plan. La table 4.18 présente les pourcentages des effets des facteurs.

La figure 4.19 représente graphiquement le pourcentage des effets sur les coefficients correspondants aux 6 voies explicatives.

Facteur	Effets(%)					
	β_{Pile-x}	β_{Pile-y}	β_{Pile-z}	$\beta_{Reservoir-x}$	$\beta_{Reservoir-y}$	$\beta_{Reservoir-z}$
T	25,05	85,58	83,23	59,32	57,90	39,67
P	15,09	9,50	4,25	2,70	19,09	18,75
TP	59,86	4,92	12,53	37,98	23,01	41,58
Tot	100	100	100	100	100	100

TABLE 4.18 – Effets des facteurs sur les variables sur les coefficients de la RML

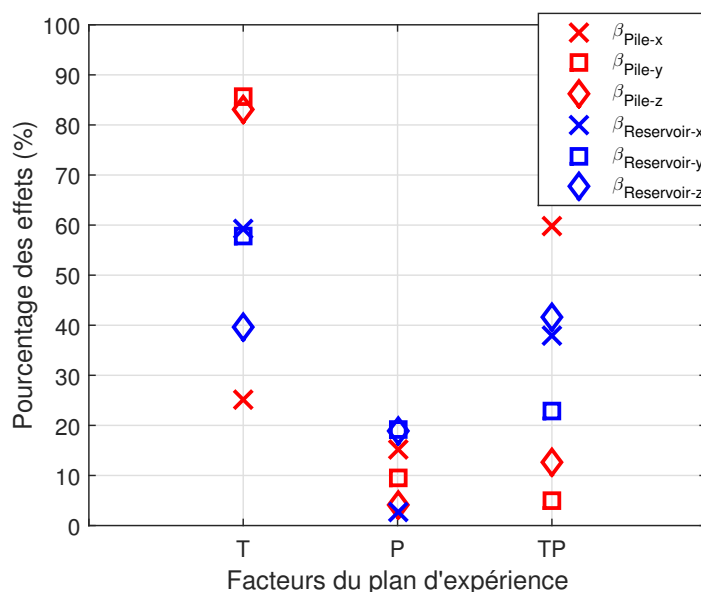


FIGURE 4.19 – Comparaison du pourcentages des effets des facteurs du plan sur les coefficients de la RML

La table des effets ainsi que sa représentation graphique indiquent que ni la température extérieure, ni le point de fonctionnement du SPAC n'ont d'effets suffisamment élevés sur le coefficient correspondant à la participation de la réponse de la PAC dans la direction x , pour envisager une reproductibilité suffisamment pertinente.

Concernant les coefficients de la réponse de la PAC dans les directions y et z , ils sont fortement influencés par la température extérieure. Le pourcentage de l'effet des interactions sont suffisamment bas pour considérer qu'ils correspondent aux incertitudes dues à la mise en place de l'expérience et à l'acquisition des mesures. Une analyse de la variance complétée par un test de Fisher-Snedecor est proposé dans la section suivante.

Quant aux coefficients correspondant aux réponses du réservoir dans les 3 directions, les résultats indiquent que l'effet de l'interaction TP est supérieure à 20%. Cependant, pour le coefficient de la direction y , il est malgré tout inférieur à 2%. Un test de Fisher-Snedecor va donc être proposé avec une hypothèse moins sévère.

Enfin, ces résultats révèlent que l'effet du point de fonctionnement est inférieur à 20% sur l'ensemble des 6 coefficients explicatifs de la RML. Il influence relativement peu

l'explication de la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène par les réponses enregistrées à ces extrémités.

4.3.6.1 Analyse de la variance

Coefficient de la réponse de la PAC dans la direction y : β_{Pile-y} :

Facteur	ddl	Effet(%)	F	Fcrit=F(0.90)	Conclusion
T	2	85,58	17,41	4,32	Influent
P	2	9,50	1,93	4,32	Non influent
TP	4	4,92	1		
Tot	8	100			

TABLE 4.19 – Analyse de la variance du coefficient de la réponse de la PAC dans la direction y

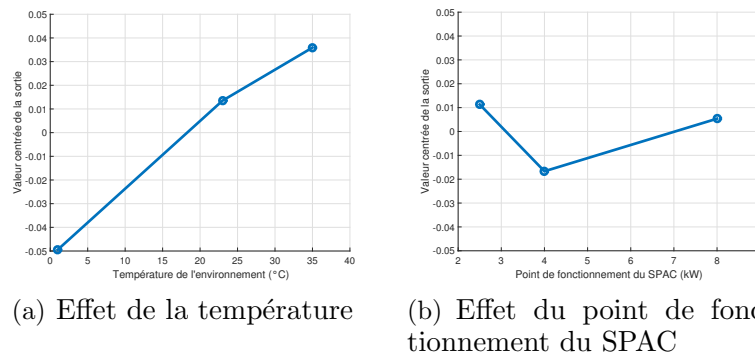


FIGURE 4.20 – Tracé des effets des facteurs du plan sur le coefficient de la réponse de la PAC dans la direction y

D'après le figure 4.20 plus la température extérieure augmente, plus ce coefficient augmente. C'est-à-dire que la réponse du tuyau d'hydrogène dans la direction z suit, de manière croissante, la variation de la réponse de la PAC dans la direction y en fonction de la fréquence, à mesure que la température extérieure augmente.

Coefficient de la réponse de la PAC dans la direction z : β_{Pile-z} :

Facteur	ddl	Effet(%)	F	Fcrit=F(0.90)	Conclusion
T	2	83,23	6,64	4,32	Influent
P	2	4,25	0,34	4,32	Non influent
TP	4	12,53			
Tot	8	100			

TABLE 4.20 – Analyse de la variance du coefficient de la réponse de la PAC dans la direction z

Le comportement du coefficient de la réponse de la PAC dans la direction z est similaire à celui de la réponse de la PAC dans la direction y. La remarque concernant la direction y de la PAC est applicable également à la réponse vibratoire dans la direction z de la PAC (table 4.20).

Coefficient de la réponse du réservoir dans la direction y : $\beta_{Reservoir-y}$:

Facteur	ddl	Effet(%)	F	Fcrit=F(0.80)	Conclusion
T	2	57,90	2,52	2,47	Influent
P	2	19,09	0,83	2,47	Non influent
TP	4	23,01	1		
Tot	8	100			

TABLE 4.21 – Analyse de la variance du coefficient de la réponse du réservoir dans la direction y

D’après un test de Fisher-Snédecor moins sévère (table 4.21), l’effet de la température est reproductible à plus de 80%.

4.3.7 Discussion sur l’analyse statistique de l’influence des conditions environnementales en phase de conception

Les modélisations réalisées dans le chapitre précédent ainsi que l’essai de caractérisation permettent d’orienter et de valider la conception vis-à-vis des sollicitations vibratoires réelles d’usage. Cependant, un système mécanique complexe est également soumis à d’autres conditions environnementales telles que la température mais également les conséquences liées à son propre fonctionnement. La prise en compte de ces conditions environnementales liées au caractère multi-physique de ce type de système est délicat à modéliser. Les modélisations multi-physiques nécessitent généralement de lourds moyens de calcul. Par ailleurs ces modèles sont sensibles à la manière dont ils sont paramétrés [Noguer, 2015]. La réalisation d’essais par plan d’expériences sont une autre voie permettant d’étudier les influences de facteurs d’environnement, telle que la température, et de fonctionnement interne.

En phase de conception, la réalisation d’un plan d’expériences doit permettre d’approfondir la connaissance du comportement mécanique d’un composant jugé critique bien que celui-ci ne soit pas implanté de manière définitive dans le système complexe auquel il est destiné. Les essais mis en œuvres ne sont pas destinés à valider une intégration, comme cela est fait en phase de validation après la fabrication du système.

Ainsi les analyses statistiques du plan d’expériences doivent mettre en évidence l’influence que peut avoir la proximité d’un composant critique à un environnement identifié, notamment de température, sur son comportement mécanique. L’objectif est d’alerter le concepteur si cette influence est jugée non négligeable. Pour cela, le traitement par analyse par composantes principales indique de manière qualitative si un phénomène extérieur influence le comportement du composant étudié, davantage qu’un autre. Dans

le cas présenté, la réponse vibratoire est influencée par la variation de la température extérieure davantage que par le point de fonctionnement du système. Ensuite afin de quantifier les influences, l'analyse des effets des facteurs du plan d'expériences suivie de l'analyse de la variance permettent d'évaluer la représentativité de l'influence mise en évidence.

Cependant le comportement mécanique d'un composant ne peut être expliqué sans la prise en compte du comportement des éléments auxquels il est fixé. C'est-à-dire qu'une grande part d'informations vient de la variation de l'explication par les deux extrémités. L'explication de la réponse en un point du composant critique par les réponses vibratoires des composants auxquelles il est fixé passe par la régression multilinéaire. Les coefficients de cette régression varient d'un essai à l'autre du plan d'expériences. L'analyse des effets des facteurs et l'analyse de la variance du plan d'expériences sur les coefficients de la régression multilinéaire permet ainsi d'évaluer l'influence des conditions environnementales et du fonctionnement interne du système sur le comportement vibratoire du composant critique. Cette méthode ne permet cependant pas d'évaluer les variations du comportement modale du composant. L'analyse de l'influence des facteurs du plan sur le comportement modale est, quant à elle, réalisable sur le composant isolé, c'est-à-dire non intégré au système.

Conclusion du chapitre 4

La validation expérimentale par essais vibro-climatiques est une étape essentielle de la conception des systèmes mécaniques complexes en comportement dynamique. La description fréquentielle est importante mais la présentation des résultats de mesure sous forme de DSP ne peut donner que des informations fragmentaires.

Au contraire, l'exploitation des DSP acquises par des plans d'expériences et traitées par la méthode ACP est riche d'enseignements. Elle montre visuellement les corrélations entre les conditions expérimentales et le comportement vibratoire de composants définis. Elle peut être globale comme elle peut être détaillée. Chaque niveau est susceptible d'apporter ses propres informations. La quantification de ces inter-corrélations se fait par la régression multilinéaire. L'affinage de la conception de composants critiques nécessite l'identification des sollicitations réelles permettant de valider ou non les hypothèses de conception.

Les essais permettent aussi de se rendre compte de l'influence de certains paramètres sur le comportement multi-physique non modélisable du système testé. Une conception expérimentale est nécessaire pour tenir compte des conditions réelles d'usage qui sont multi-physiques. Les essais, par plan d'expériences, sont nécessaires à la modélisation expérimentale multi-physique de ce type de système.

La conception de système mécanique complexes, pour tenir comptes des conditions environnementales multi-physiques, doit suivre une démarche alliant les analyses fiabilistes et les analyses physiques. Le cheminement présenté dans le chapitre suivant permet d'assurer un fonctionnement sûr du système conçu.

5 Mise en pratique de la démarche physico-fiabiliste

« *Ce n'est point dans l'objet que réside le sens des choses,
mais dans la démarche.* »
Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944)

Sommaire

5.1	Procédures intégrant les essais vibro-climatiques	164
5.1.1	Présentation de la démarche physico-fiabiliste	164
5.1.2	Du fait social à l'objectif de fiabilité	165
5.1.3	La caractérisation de l'environnement vibratoire	166
5.1.4	La mise en évidence des points critiques	167
5.1.5	Les essais vibro-climatiques en phase de conception	169
5.1.6	L'exploitation des données d'essais	170
5.2	Mise en place pratique de la démarche	171
5.2.1	Précaution pour la réalisation des essais	172
5.2.2	Essais pour l'analyse de l'endommagement	172
5.3	Réponse aux objectifs de sûreté de fonctionnement émanant de la société	172
5.3.1	Les profils d'excitations	173
1)	Environnement A : Route pavée + plaques métalliques pour véhicules citadins	173
2)	Environnement B : Route standard pour véhicules routiers	174
5.3.2	Impact de l'environnement vibratoire sur le choix de la géométrie par l'évaluation du dommage par fatigue	174

Dans les chapitres précédents les outils et méthodes de plusieurs disciplines ont été utilisés. Plusieurs études ont été réalisées (sociologique, fiabiliste, mécanique, physique, statistique). Ce chapitre, présente comment elles peuvent être ordonnées et interagir dans une même démarche. Pour ce faire, la figure 1, proposée en introduction de ce document, est détaillée en plusieurs procédures. Ensuite sur la base d'un retour sur expérience, les méthodes utilisées pour l'obtention des résultats présentés sont organisées sous forme de conseils pratiques pour l'amélioration de la qualité des résultats. Enfin, la mise en application de cette démarche sur différents profils d'utilisation des véhicules est proposée afin de mettre en évidence les impacts que les études sociologiques peuvent avoir.

5.1 Procédures intégrant les essais vibro-climatiques

Tout d'abord, rappelons une fois de plus, que les essais vibro-climatiques dont il est question dans ce document ne sont pas à visée de qualification d'un SPAC dont la conception serait terminée. Ces essais ont pour objectif d'orienter la conception afin que les choix puissent être pris en s'appuyant sur des résultats objectifs.

5.1.1 Présentation de la démarche physico-fiabiliste

J-P.Signoret [Signoret, 1992] définit la démarche fiabiliste comme étant «*un processus itératif comportant une définition précise du système à étudier et du but de l'étude, l'analyse fonctionnelle du système, l'analyse dysfonctionnelle, une discussion avec les spécialistes et des résultats concrets*».

Une démarche physico-fiabiliste s'inspire du couplage mécano-fiabiliste proposé par M.Lemaire [Lemaire, 2005] (figure 5.1) pour l'étendre à des systèmes multi-physiques.

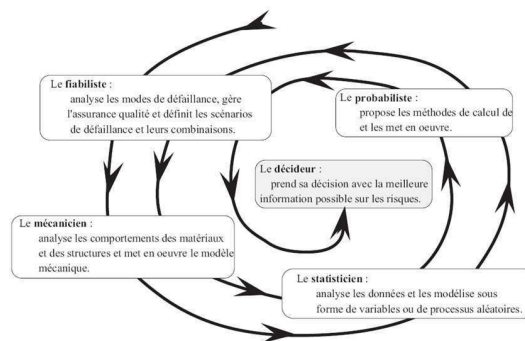


FIGURE 5.1 – Couplage mécano-fiabiliste proposé par M.Lemaire

Une démarche physico-fiabiliste comporte 4 grandes actions successives :

- Une étude fiabiliste initiale portant sur les modes de défaillance,
- Une intervention du physicien en modélisation, simulation et vérification expérimentale,

- Une étude statistique des résultats de la simulation stochastique et modélisation sous forme de variables ou de processus aléatoires,
- L'élaboration, mise au point et mise en œuvre de méthodes de calcul probabilistes.

L'exemple pris dans les chapitres précédents du tuyau d'hydrogène comme point critique d'un système à pile à combustible montre que les différentes disciplines ne sont pas juxtaposées mais inter-agissent tout au long du cheminement. Le déroulement des analyses présenté s'intègre essentiellement dans les trois premières étapes de cette démarche. Le découpage en procédures, comme proposé ci-dessous, est une aide à l'organisation d'une telle démarche appliquée aux systèmes mécaniques complexes tels que les SPAC.

5.1.2 Du fait social à l'objectif de fiabilité

L'endommagement mécanique pour l'estimation de la durée de vie d'un système mécanique complexe est inévitablement lié aux sollicitations qu'il subit en cours de fonctionnement. Dans le cas d'un SPAC implanté dans un véhicule électrique routier, les sollicitations sont issues des imperfections du sol sur lequel il circule et sont transmises par le véhicule aux fixations du système étudié. Le type de sol est imposé par le parcours choisi par le conducteur du véhicule.

Pendant son utilisation, le SPAC subira, *in fine*, les parcours habituels de son conducteur (ou des conducteurs). Un conducteur est un individu d'une population dont le comportement social est étudié.

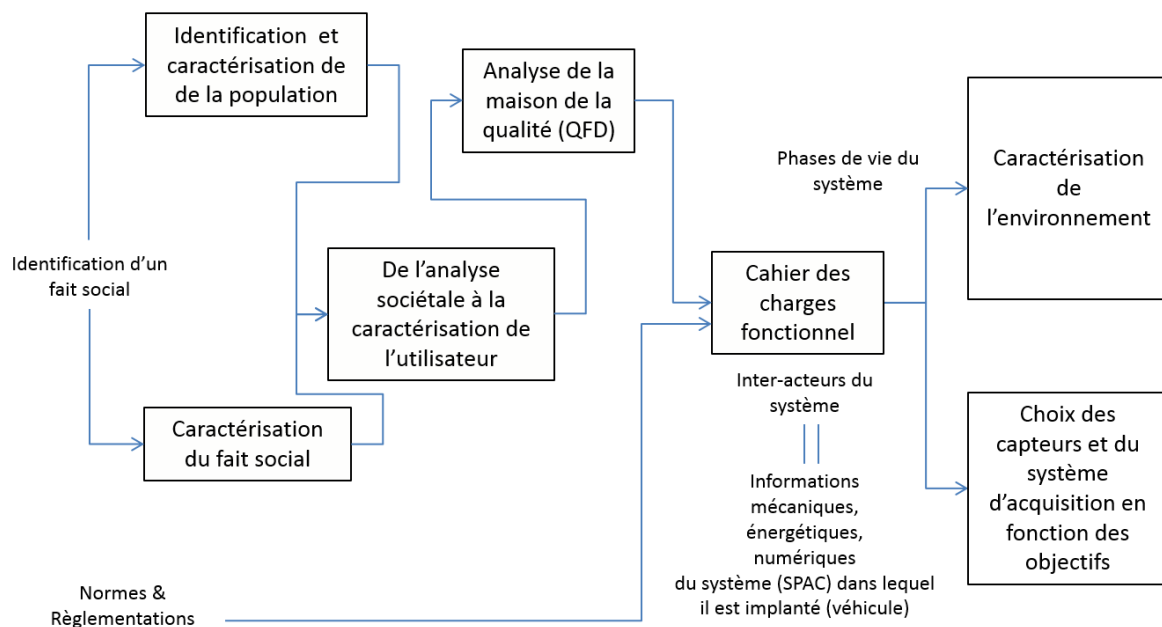


FIGURE 5.2 – Démarche d'analyse de l'objectif de la durée de vie et des conditions environnementales

Le cheminement proposé en figure 5.2 propose une démarche permettant d'ap-

puyer la définition des objectifs de fiabilité d'un SPAC sur l'analyse sociologique des comportements de l'utilisateur final.

L'utilisation de l'outil QFD permet de lier l'analyse du besoin aux fonctions du système étudié en analyse fonctionnelle dont la réalisation principale est le cahier des charges fonctionnel. Les différentes phases de la vie du SPAC sont identifiées et leurs proportions respectives sont évaluées. De cette manière un profil de vie peut être établi. Par ailleurs, l'identification des éléments qui inter-agissent avec le SPAC (inter-acteurs) permet de déterminer les différents points de fixations du système sur le véhicule dans lequel il est destiné à être implanté. Ainsi l'enchaînement de ces différentes analyses permet de préparer les enregistrements des profils vibratoires correspondants aux objectifs à atteindre mais également d'entamer l'identification des points critiques du système au regard des exigences de la population.

5.1.3 La caractérisation de l'environnement vibratoire

Lorsqu'ils sont possibles, les enregistrements de sollicitations aux points de fixation du SPAC doivent être préparés avec soin et méthode (5.3). Si toutefois ces enregistrements ne sont pas réalisables, les normes, citées dans le document, concernant les essais environnementaux, proposent des profils, correspondant aux sollicitations vibratoires subies lors de transports routiers, sous forme de densités spectrales de puissance.

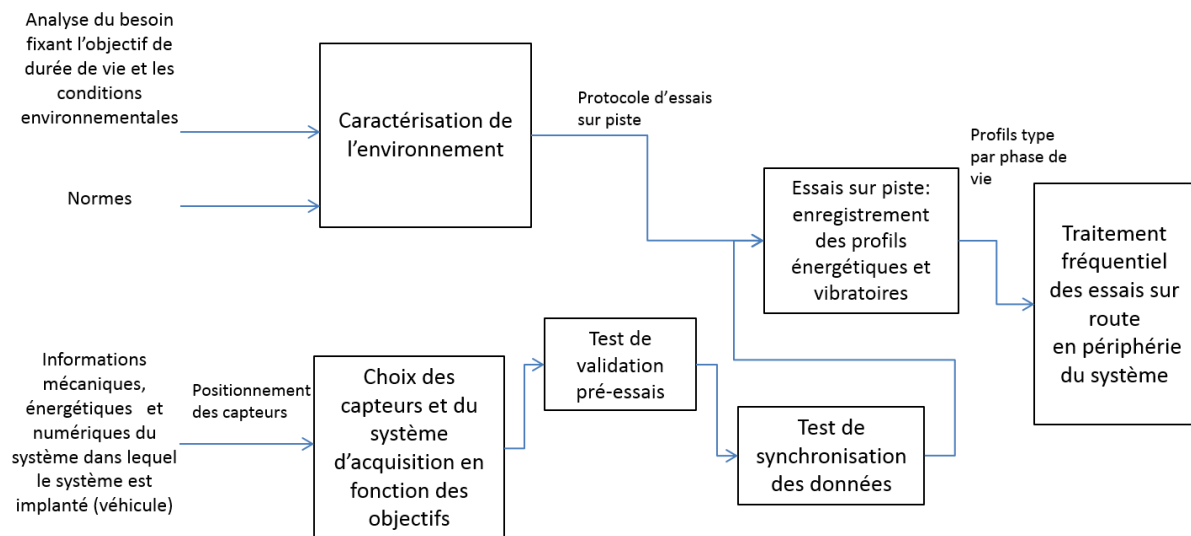


FIGURE 5.3 – Procédure de caractérisation de l'environnement du système

Bien que le temps d'enregistrement des données soit rapide (quelques minutes d'enregistrement vibratoire par type de route sont généralement suffisantes) le niveau de qualité des données enregistrées doit être élevé. Le matériel doit être adapté aux résultats attendus. La plage de fonctionnement des capteurs doit évidemment couvrir le domaine fréquentiel correspondant aux sollicitations. Une attention particulière doit, pour ce type d'étude, être portée aux basses fréquences. Par ailleurs, la fréquence d'acquisition doit

également être adaptée. L'emplacement des capteurs est choisi, sur la base de l'analyse fonctionnelle, au plus proche des points de fixation du système étudié. Une fois l'ensemble du matériel installé, un premier essai doit être traité avant l'acquisition de l'ensemble des données dans le but de valider la précision de l'enregistrement et les amplitudes maximales atteintes. Ce premier essai a également pour but de tester le fonctionnement de l'ensemble de la chaîne d'acquisition.

Par ailleurs l'élaboration du protocole d'essais sur différents types de revêtement doit correspondre aux différents parcours liés aux phases de vie du système identifiés en analyse fonctionnelle. Plus les enregistrements correspondent à l'exhaustivité des usages du véhicule dans sa vie, depuis sa fabrication jusqu'à sa destruction, plus les analyses faites par la suite se rapprochent des conditions réelles d'usage. La vitesse du véhicule, pendant l'enregistrement correspond également à l'usage estimé.

Dans la mesure du possible, un enregistrement synchronisé des données de demandes énergétiques de la chaîne de traction permettra, par la suite de simuler le fonctionnement de la PAC par la demande de puissance correspondante à la vitesse, et donc aux sollicitations.

Quant au traitement des données, il est toujours préférable de réaliser un dépouillement des données juste après chaque enregistrement, avant que la chaîne d'acquisition soit désinstallée, encore une fois, dans le but de valider les données et de procéder à un nouvel enregistrement dans le cas où certaines données seraient inexploitables.

Plusieurs outils peuvent être utilisés pour un dépouillement rapide tel que l'ACP dans la mesure où les programmes sont développés en préparation des essais. En effet, ce type de représentation permet de détecter de manière très claire et rapide, d'éventuelles valeurs atypiques issues de l'acquisition ou du traitement des données d'un grand nombre d'essais, comme présenté par la figure 5.4.

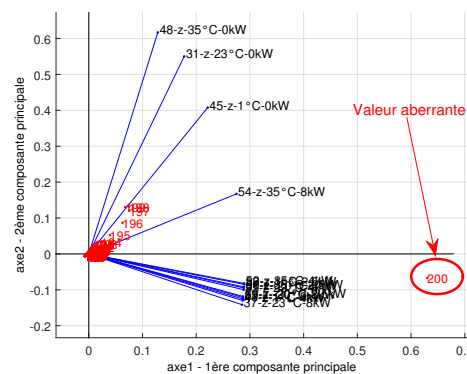


FIGURE 5.4 – Mise en évidence des valeurs atypiques par ACP

5.1.4 La mise en évidence des points critiques

Le but de de cette démarche est de réaliser des études d'analyses fonctionnelles, de modes de défaillances et de leur scénario afin de mettre en évidence les points jugés

critiques du système dont il est nécessaire d'étudier le comportement dynamique (figure 5.5).

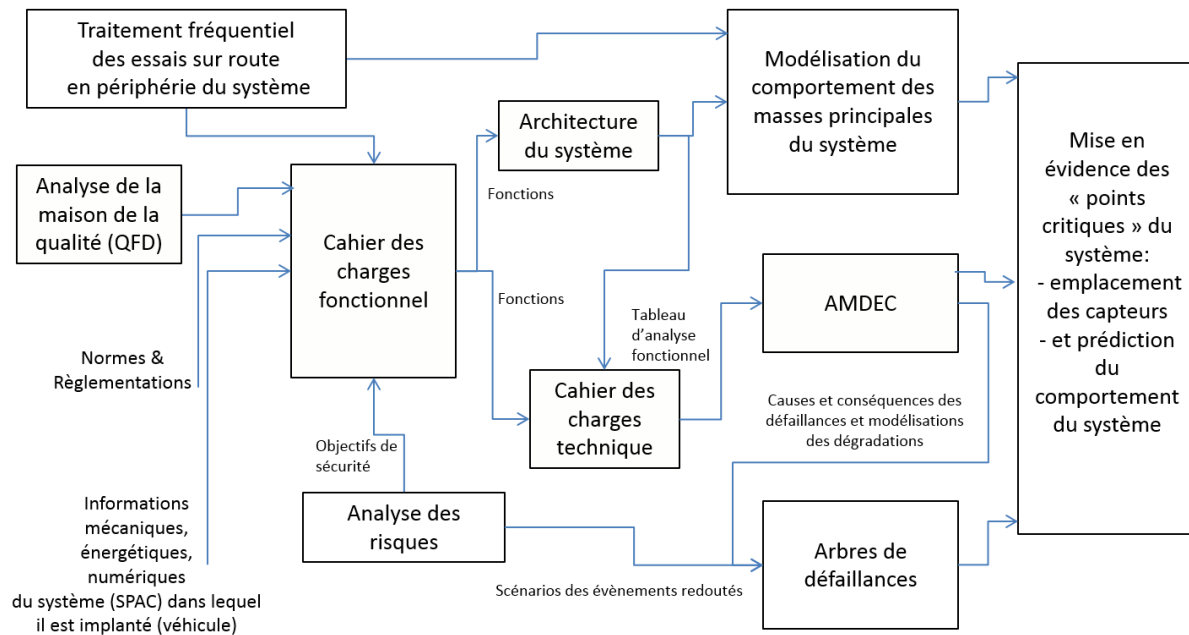


FIGURE 5.5 – Démarche d'analyse du système

Cette démarche doit être réalisée en parallèle de la caractérisation de l'environnement du système présentée plus haut. Car l'identification du profil de vie du système, réalisée au début de l'analyse fonctionnelle externe, est une des bases de la démarche de personnalisation des essais [NORMDEF-0101, 2009]. Certes, les essais visés par cette norme ont pour but de valider un système déjà fabriqué, ce qui n'est pas le cas ici, mais la définition du profil de vie du système reste valable. C'est la raison pour laquelle une telle démarche est conseillée également en conception.

Par ailleurs, l'analyse des sollicitations vibratoires enregistrées aux plus proches des points de fixation du SPAC qui est en cours de conception, permet de caractériser les fonctions de contrainte du système. Un indicateur tel que la puissance moyenne totale (ou valeur efficace au carré ou valeur RMS au carré) peut être utilisé. L'analyse des enregistrements est donc nécessaire à la détermination de son niveau.

L'analyse des scénarios de défaillance, pouvant conduire à un danger ou à un dysfonctionnement du système, passe par l'utilisation d'outils adaptés tels que les arbres de défaillance.

L'enchaînement de ces outils et méthodes assure une démarche de conception itérative. Le processus proposé dans cette étude vise à effectuer un bouclage local avant le premier design afin de limiter le nombre d'itérations. Ce type d'analyse de pré-conception basée sur l'analyse fonctionnelle est d'ailleurs encouragée par la norme IEEE 1220. En effet, la démarche développée s'intègre dans le cheminement présenté en figure 5.6.

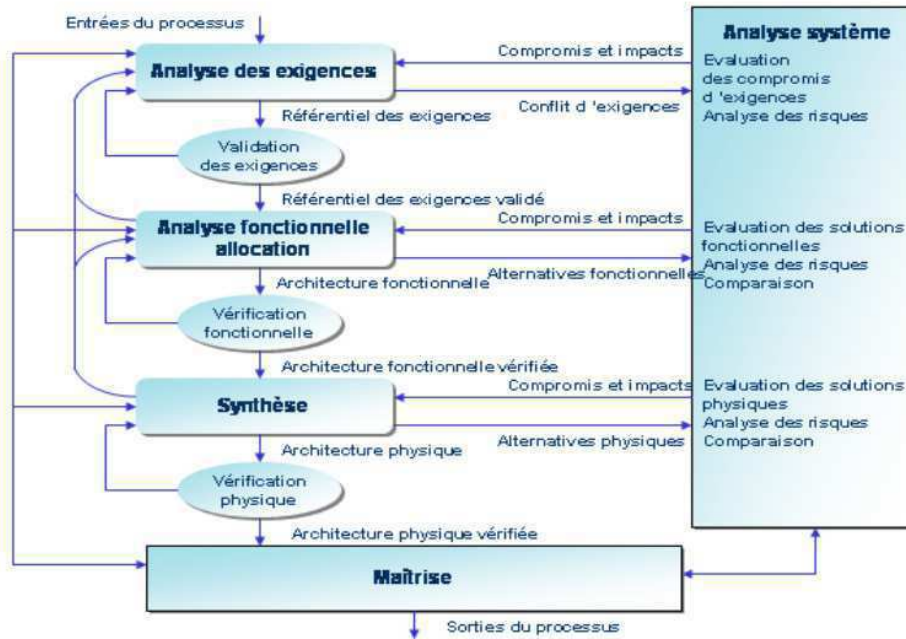


FIGURE 5.6 – Les processus selon la norme IEEE 1220

5.1.5 Les essais vibro-climatiques en phase de conception

Les composants critiques sont à ce stade déterminés. L'analyse doit se concentrer, à partir de là, sur ces composants critiques mis en évidence. Son but est de mettre en œuvre les essais qui permettent de caractériser son comportement, y compris dans les différentes conditions de température et de fonctionnement du SPAC (figure 5.7). La spécification de la campagne d'essais doit être réalisée de manière judicieuse. Cette procédure est consacrée à l'organisation des méthodes et outils pour l'élaboration d'une campagne d'essais multi-physiques.

La démarche nécessite d'apporter, une nouvelle fois, un grand soin à la préparation, par un choix et une validation des capteurs et de l'ensemble de la chaîne d'acquisition. La caractérisation de la plateforme d'essai chargée d'une maquette (en anglais *dummy*), est indispensable. Cette maquette ayant les mêmes masse et inertie que le système, cette caractérisation permet de mettre en évidence les effets mécaniques que génère le système sur la plateforme, afin qu'ils puissent être pris en compte.

Avant d'entamer l'organisation et la réalisation d'un plan d'expériences faisant varier plusieurs facteurs, de nombreuses informations sur le comportement dynamique au point étudié, peuvent être tirées d'un essai isolé en balayage de fréquences puis en sollicitations réelles d'usage. La caractérisation du comportement du point observé ne nécessite pas un grand investissement de moyens techniques ni de ressources humaines. Par ailleurs, ces premiers essais fournissent beaucoup d'informations sur le comportement dynamique du point observé.

Si la poursuite de simulations par un modèle est envisagé (ce qui n'est pas le cas dans les études proposées dans ce document), une étape de correspondance de la réponse

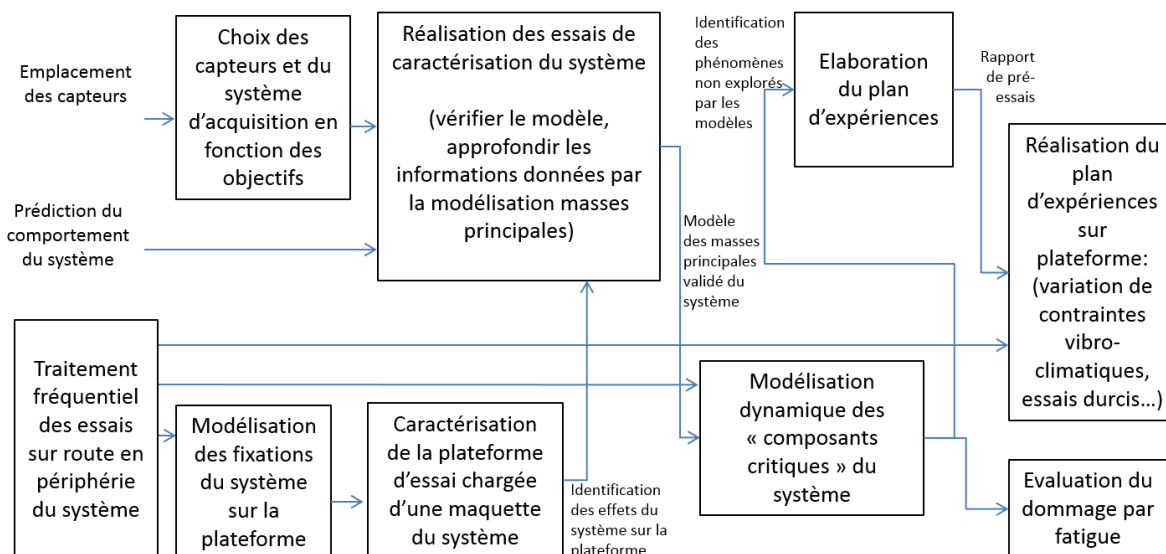


FIGURE 5.7 – Démarche d’élaborations des essais vibro-climatiques

du modèle avec l’expérience peut être réalisée par cet essai. Ce qui est généralement nommé « recalage » du modèle.

Un des principaux intérêts de la démarche proposée est de pouvoir caractériser un élément localisé du SPAC par des essais expérimentaux sur plateforme vibratoire de manière ciblée.

Pour l’exemple du tuyau d’hydrogène, les analyses menées dans ce document permettent de conclure que le point de fonctionnement de la PAC n’influent la réponse vibratoire du tuyau d’hydrogène qu’en terme d’élévation de la température dans son environnement. Par ailleurs la modélisation de différentes géométries montre qu’elle influence beaucoup la valeur de la contrainte maximale. Enfin, la modélisation propose quelques préconisations de géométrie. Des essais vibratoires-climatiques sur un tuyau dont la géométrie s’appuie sur le résultat de la modélisation, permettent de prendre en compte la température de son environnement.

Ainsi la combinaison des essais avec différentes étapes de modélisation permet de limiter l’acquisition de données vibratoires au bénéfice des moyens et du temps de simulations numériques et expérimentales.

5.1.6 L’exploitation des données d’essais

Enfin, après la réalisation de l’ensemble des essais du plan d’expériences et le pré-traitement de l’ensemble des données, la dernière phase consiste à exploiter les résultats.

Une des difficultés d’une telle campagne d’essais sur plan d’expériences est la multiplication des données (d’entrée aussi bien que de sortie). Bien qu’un dépouillement de chacun des essais reste nécessaire, les données peuvent être exploitées à l’aide d’outils

statistiques tels que ceux présentés dans le chapitre précédent.

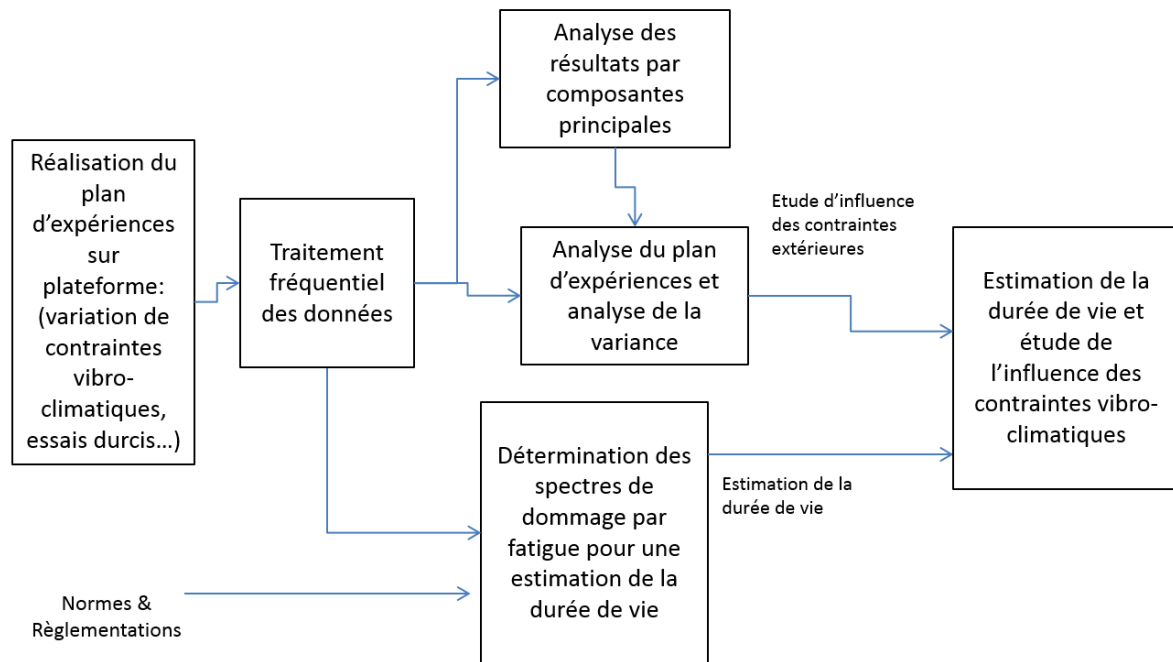


FIGURE 5.8 – Démarche d’analyse des essais vibro-climatiques

Enfin pour une estimation de la durée de vie avant rupture mécanique au point étudié, et sa correspondance avec les exigences attendues et définies au début de la démarche, l’analyse du dommage peut être conduite sur la base des réponses vibratoires (figure 5.8).

F.Marin détaille [Marin, 2010] avec beaucoup de soin une méthodologie générale pour le calcul de l’endommagement subi par une pièce mécanique soumise à un environnement vibratoire de type harmonique ou aléatoire.

Les analyses fréquentielles, et les analyses statistiques des données vibratoires sont complémentaires pour interpréter de manière exhaustive les comportements observés. L’étude de l’influence des conditions de fonctionnement du SPAC et des conditions climatiques permettent de compléter l’analyse du comportement sous conditions réelles d’usage.

5.2 Mise en place pratique de la démarche

Lors de la réalisation d’une telle démarche dans le cadre d’un projet concret, plusieurs difficultés pratiques peuvent être rencontrées :

- La mixité et le choix des outils,
- Les différents formats de données,
- La grande quantité de données.

Elles sont généralement sources de pertes de temps considérables, mais elles génèrent surtout un risque important de confusion entre les données et de dégradation de leur qualité. Face à ces difficultés les travaux réalisés ont été guidés par différents objectifs :

- Minimiser le nombre d'outils logiciels,
(afin d'être accessible au plus grand nombre avec de faibles moyens)
- Homogénéiser les données,
- Rechercher des solutions de traitement et d'analyse rapides et efficaces.

La mise en place d'outils opérationnels d'aide au traitement des données, à leur exploitation et à la présentation des résultats facilite le suivi de la démarche et concentre la réflexion sur l'interprétation des résultats.

5.2.1 Précaution pour la réalisation des essais

Pendant les phases de réalisation des essais, plusieurs questions type, permettent d'améliorer la qualité des enregistrements :

- Le bruit de mesure est-il suffisamment faible pour ne pas perturber la mesure ?
- Le niveau des excitations correspond-il au niveau que l'on souhaite reproduire ?
- Les résonances apparaissent-elles aux fréquences prévisibles ?

5.2.2 Essais pour l'analyse de l'endommagement

Dans le cas où l'objectif de l'étude est de déterminer le dommage total, la prise en compte de l'ensemble des excitations est nécessaire. En effet, chacune des excitations, de niveau si petit soit-il, contribue à l'augmentation du dommage total. Les réponses aux excitations dans les 3 directions doivent donc être traitées afin de caractériser complètement le comportement. Or le matériel d'excitations (la plateforme vibratoire) produit, généralement, les sollicitations que dans une seule direction lors d'un essai. Trois essais sont donc nécessaires, correspondant à chacune des directions. Par ailleurs, le système doit généralement être physiquement déplacé (en rotation) pour qu'il puisse être sollicité dans une autre direction. Ainsi, l'enregistrement des réponses dans chacune des 3 directions nécessite des moyens humains importants.

5.3 Réponse aux objectifs de sûreté de fonctionnement émanant de la société

L'étude présentée dans le premier chapitre permet d'envisager que la société serait encline à d'avantage adapter le choix du véhicule qu'elle utilise en fonction du type de trajet réalisé. En effet, les flottes partagées de véhicules tendent à se multiplier, des véhicules

associés à un type de parcours spécifiés pourraient être conçus de manière adaptée. Ces observations ont un impact direct sur l’environnement vibratoire. En effet, les profils de vie sont alors spécifiques à chacun des types de véhicule. Le but de cette section est d’appliquer les analyses réalisées dans les chapitres 2 et 3 pour comparer l’impact de profils vibratoires spécifiques aux types de véhicules.

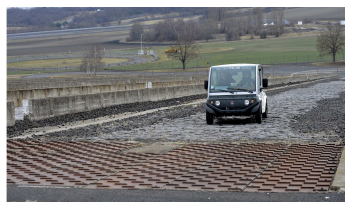
Comme dans l’étude de cas des véhicules OPTYMO, nous proposons de distinguer deux types de parcours, correspondants à deux catégories de véhicules différenciés, comme présenté par la table 5.1.

Type de véhicule	Type de route privilégié	Essai d’enregistrement des sollicitations	Vitesse instantanée moyenne
A Citadin	Route pavée avec plaques + plaques métalliques	Essai n° 4	20 km/h
B Routier	Route standard	Essai n° 5	50 km/h

TABLE 5.1 – Environnement vibratoire correspondant aux types de véhicules

5.3.1 Les profils d’excitations

Les photos de la figure 5.9 présentent les deux environnements comparés. Ces photos ont été prises lors des enregistrements sur piste des sollicitations réelles d’usage.



(a) Environnement A : route pavée + plaques métalliques



(b) Environnement B : route standard

FIGURE 5.9 – Photos des deux environnements comparés lors des enregistrements sur piste réalisés sur le véhicule F-City H2

Le spectre de l’accélération en fréquence subie par le SPAC à ses fixations dans le véhicule dans les trois directions est présenté sur la figure 5.10. Ces profils vibratoires correspondent aux deux environnements vibratoires qui sont comparés.

1) Environnement A : Route pavée + plaques métalliques pour véhicules citadins :

Le profil vibratoire lié à cet environnement correspond à celui appliqué dans le chapitre 2. En effet, l’amplitude du module de l’accélération aux 4 fixations du SPAC, lors de cet enregistrement est la plus élevée quelque soit la fréquence, en comparaison des 6 autres enregistrements réalisés. Par ailleurs le véhicule roulait, lors de cet essai à une vitesse de 20 km/h. Cette vitesse est considérée comme moyenne en environnement citadin.

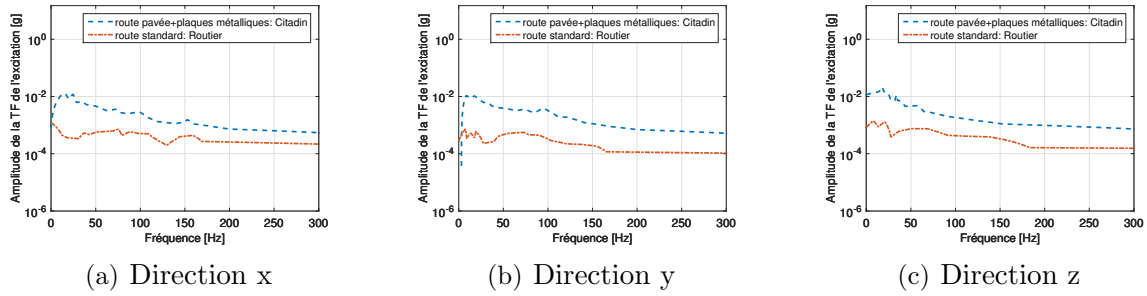


FIGURE 5.10 – Spectres des excitations aux fixations du SPAC correspondant aux sollicitations des deux environnements

2) Environnement B : Route standard pour véhicules routiers :

Le profil vibratoire correspondant à cet environnement se base sur l'enregistrement réalisé sur route standard (figure 5.10). Lors de cet enregistrement, le véhicule roulait, à une vitesse de 50 km/h.

5.3.2 Impact de l'environnement vibratoire sur le choix de la géométrie par l'évaluation du dommage par fatigue

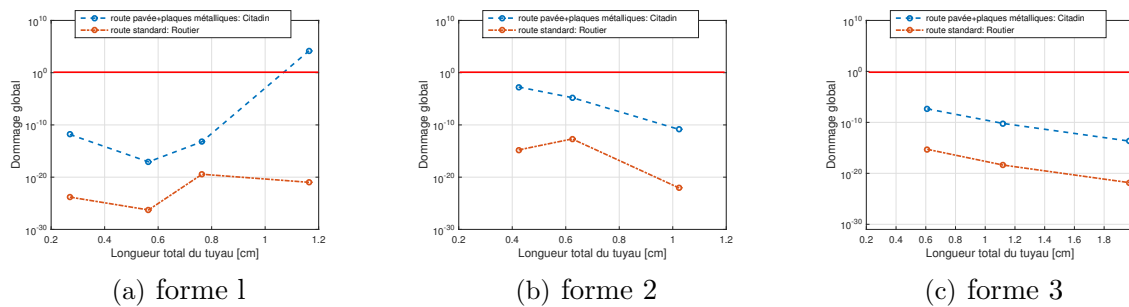


FIGURE 5.11 – Comparaison de l'impact de l'environnement vibratoire sur le dommage global en fonction de la variation de la géométrie

Les méthodes et outils présentés dans le chapitre 3 sont appliqués sur chacun de ces environnements. La figure 5.11 permet de comparer les dommages causés au bout d'une durée de vie de 5000 h de fonctionnement. Dans le cas d'un environnement très accidenté, la géométrie du tuyau d'hydrogène doit être conçue avec justesse. Alors que pour un véhicule destiné à effectuer des parcours majoritairement sur route standard, cette estimation du dommage permet plus de flexibilité dans la géométrie.

Cet exemple montre que le type de parcours effectué peut avoir un fort impact sur la fatigue mécanique du tuyau reliant le réservoir d'hydrogène à la pile à combustible. Ce type d'analyses devrait également être poursuivi prioritairement sur les autres éléments jugés critiques du système à pile à combustible.

Cette flexibilité est une piste de diminution des coûts de conception et de fabrication de ce type de système tout en garantissant le même niveau de sécurité. D'après les réflexions abordées dans le chapitre 1, le comportement du conducteur de véhicule, en

tant qu'individu reste aléatoire mais dans un cadre déterminé et évolutif. Ces évolutions sont favorisées par les possibilités qu'offrent les nouvelles technologies. D'après J. Bolot [Bolot, 2006], les applications de transport à la demande offrent de nombreuses possibilités pour une meilleure gestion des transports. Ainsi, le développement des applications numériques de transport à la demande peuvent permettre de sélectionner, et proposer au conducteur, le véhicule adapté au parcours qu'il envisage d'effectuer. Le cheminement proposé dans ce document, en aide au concepteur, va dans le sens de la diminution des coûts d'investissement supportés par les gestionnaires de flotte de véhicules tout en garantissant le niveau de sécurité exigé par ce type de système.

Conclusion du chapitre 5

Ainsi un cheminement de planification et réalisation des essais implique des étapes de modélisations et de tests qui ont pu être détaillées dans ce chapitre. Cette méthodologie permet de préparer et d'effectuer différentes analyses de manière ordonnée tout en les guidant vers un même objectif de fiabilité des SPAC. Les nombreuses interactions entre les différentes disciplines rassemblées pour ce même objectif nécessitent une rigueur dans l'utilisation, le traitement et le transfert des données à chaque étape de la démarche. Par ailleurs, sur de tels systèmes complexes, un processus agissant par priorité, tel que celui présenté, permet d'améliorer la sûreté de fonctionnement de manière plus efficace. Ce cheminement, se basant sur des objectifs de départ, l'évolution de ces derniers peut conduire à une évolution des résultats. Ce constat est fait pour la comparaison de deux types de parcours. Les écarts obtenus en faisant varier les comportements type des utilisateurs permettent d'insister sur l'importance de l'évaluation des comportements émanant d'études sociologiques.

Conclusion

L'enjeu de cette thèse est de fonder les choix de conception des systèmes mécaniques complexes sur les bases d'une réflexion pluri-disciplinaire. Un soin particulier a été porté sur les interactions entre différents domaines qui se côtoient dans ce type de projet. La thèse défendue ici est qu'il est indispensable de fonder l'élaboration et la réalisation d'essais vibro-climatiques sur une réflexion pluri-disciplinaire, afin que les résultats de ces essais puissent être intégrés dans la démarche de conception du système destiné à être produit ensuite en grande série. Un enchaînement de plusieurs études complémentaires a été présenté sur une même application concrète. La mise en application d'une telle démarche nécessite l'implication d'une équipe pluridisciplinaire.

L'étude sociologique menée sur l'évolution conjointe des comportements et des nouvelles technologies a permis de mettre en évidence que la conception des systèmes doit s'appuyer sur l'analyse de ces évolutions. Les conditions réelles d'usage dépendent du comportement des utilisateurs. Les objectifs de sûreté de fonctionnement impliquent la définition des conditions réelles d'usage. La conception des systèmes mécaniques doit ainsi reposer sur une étude sociologique de l'évolution des usages vis-à-vis du domaine de la technologie du système conçu.

Le cheminement développé en aide à la conception s'appuie sur une analyse qualitative de sûreté de fonctionnement afin de mettre en évidence les composants les plus critiques au regard de leur résistance aux conditions vibratoires et climatiques réelles d'usage. En pré-conception, la modélisation du comportement dynamique au niveau système permet de tenir compte des éléments les plus massiques du système dans sa globalité. L'influence dynamique entre les points par lesquels sont transmises les sollicitations vibratoires réelles d'usage et les points de localisation des composants critiques est simulée. Ainsi l'association des analyses qualitatives de sûreté de fonctionnement avec les analyses issues de la modélisation globale, type masses principales, du comportement dynamique du système permettent de caractériser les sollicitations des composants critiques d'un système mécanique complexe.

La modélisation du comportement dynamique d'un composant critique localisé permet de calculer le dommage par fatigue causé par sa réponse vibratoire aux sollicitations réelles d'usage du système. La comparaison du dommage sur différentes géométries du composant, pour un matériau identifié, apporte une aide au concepteur dans ses choix d'intégration. Le cheminement déroulé sur une structure mécanique reliant deux masses principales du système, permet de mettre l'accent sur l'importance que les concepteurs doivent accorder à l'ensemble des éléments d'un système mécanique complexe tel que celui étudié. En effet, les composants de liaison entre les sous-systèmes d'un système complexe ne sont généralement pas étudiés prioritairement lors de phases de conception des

systèmes, bien qu'ils puissent être la source de défaillances critiques.

La prise en compte des conditions réelles de température et de fonctionnement interne d'un système multi-physique nécessite de baser la conception sur une modélisation expérimentale du comportement des composants critiques. Pour cela, des essais environnementaux en fonctionnement sont indispensables. Ils doivent être organisés par plan d'expériences pour l'évaluation de l'influence des conditions réelles de fonctionnement sur le comportement du composant critique étudié. La représentation des corrélations entre les différents essais par analyse par composantes principales présente de manière synthétique et visuelle les évolutions en fréquence de la réponse vibratoire dues aux variations des conditions environnementales. L'analyse des effets du plan d'expériences est orientée sur les données les plus pertinentes. La quantification des inter-corrélations avec le comportement des sous-systèmes auxquels le composant critique est fixé, est faite par régression multilinéaire.

Enfin, la mise en œuvre des études menées dans ces travaux montre que l'interaction de différentes disciplines est non seulement possible, mais surtout nécessaire pour prendre en compte des conditions réelles d'utilisation dès les premières phases de conception d'un système mécanique complexe. Les liaisons entre ces études permettent de hiérarchiser, par une analyse globale du système, les analyses de comportement dynamique au niveau local au regard de l'attente des utilisateurs et de l'utilisation qui sera faite du système tout au long de son cycle de vie. Ainsi le cheminement assure au concepteur de réaliser la conception d'un système mécanique complexe dans une démarche de sûreté de fonctionnement.

Application à un système à pile à combustible pour un véhicule électrique à hydrogène

Le cheminement défendu a été mis au point par une application de conception d'un système à pile à combustible : le module énergie développé par la société Michelin, intégré à un véhicule électrique hydrogène dans le cadre du projet F-City H2. L'analyse globale de sûreté de fonctionnement a été complétée par l'application au développement d'un second système à pile à combustible, développé par la société SymbioFCCell et intégré au véhicule Renault Kangoo ZE dans le cadre du projet MOBILHyTEst. Quatre véhicules électriques à hydrogène, issues de ces deux conceptions, sont homologués et ont parcouru, à ce jour, ensemble plus de 30 000 km depuis leur mise en service.

L'étude sociologique réalisée montre que l'implantation d'un système à pile à combustible dans les véhicules électriques doit tenir compte de l'évolution des comportements de mobilité permise par les véhicules électriques à hydrogène. L'analyse de l'utilisation envisagée de ce type de véhicule permet en effet de focaliser les efforts sur des objectifs correspondant à l'évolution des comportements vis-à-vis de la mobilité rendue possible par cette technologie. L'évolution des comportements vis-à-vis de l'utilisation d'un véhicule dont l'utilisateur est propriétaire, ainsi que les dynamiques de déploiement de stations de ravitaillement en hydrogène favorisent la multiplication des flottes de véhicules électriques à hydrogène gérés en flottes. L'étude de l'expérience de l'utilisation des véhicules en libre-service OPTYMO à Belfort et son agglomération ouvre la voie aux analyses des conditions d'utilisation de véhicules, gérés en flotte, qui peuvent être tirées de l'évolution avec des

comportements. L'application du cheminement développé dans cette thèse à deux types de parcours routiers correspondant à des comportements différents d'utilisation des véhicules permet de constater un impact non négligeable de la définition de ces objectifs pour la conception de tels systèmes. Ainsi l'identification des conditions réelles d'usage doit tenir compte des évolutions de comportement vis-à-vis de la mobilité.

L'analyse globale de sûreté de fonctionnement du système à pile à combustible met en évidence les composants dont les défaillances liées au dommage créé par les sollicitations réelles d'usage sont les plus critiques. Parmi ces composants identifiés, celui sur lequel l'analyse du comportement a été approfondie dans ce document, est le tuyau d'hydrogène reliant le réservoir à la pile à combustible. Par ailleurs, la caractérisation des sollicitations réelles d'usage enregistrées aux fixations du système par des essais sur piste, ainsi que la modélisation de l'implantation des masses principales du système à pile à combustible, aboutissent à la caractérisation des sollicitations vibratoires de chacune des masses situées aux deux extrémités du tuyau d'hydrogène reliant le réservoir à la pile à combustible.

Une étude comparative du dommage subi par différentes géométries du tuyau d'hydrogène est réalisée. Elle met en évidence d'une part que la géométrie la plus courte n'est nécessairement pas la plus contraignante, et d'autre part, que la multiplication du nombre de spires d'une géométrie hélicoïdale diminue le dommage, et enfin, que les coudes doivent être écartés le plus possible les uns des autres. Cette étude, sur la base d'un modèle simple réalisé en pré-conception, doit permettre de tenir compte des objectifs de sûreté de fonctionnement dès ce stade. Les valeurs numériques obtenues lors de cette première évaluation ne pourront être comparées avec ce que subira réellement ce composant étudié, que lorsque celui-ci sera physiquement implanté dans le système à pile à combustible et dans le véhicule. En effet, les incertitudes concernant les choix définitifs de la conception, ainsi que les différentes phases de montage lors de l'intégration définitive ne sont pas quantifiées dans ce document.

La modélisation expérimentale de l'influence de la variation de la température extérieure et du point de fonctionnement de la pile à combustible par la réalisation d'essais vibro-climatiques sont organisés en plan d'expériences. L'exploitation des résultats met en évidence que la réponse vibratoire du tuyau d'hydrogène est davantage influencée par la température extérieure que le point de fonctionnement du système.

Perspectives

Bien que les outils et méthodes employés présentent un socle favorable aux déploiement des études de probabilité, le cheminement proposé n'intègre cependant pas la dernière étape de la démarche physico-fiabiliste consacrée à cette discipline. La rupture des systèmes mécaniques est cependant incertaine. L'évaluation de la durée de vie nécessite d'être complétée par l'estimation des paramètres d'une loi probabilité telle que la loi de Weibull. La détermination de ces paramètres nécessite de disposer de données de défaillance correspondant au système étudié. Pour cela un grand nombre d'essais doivent être réalisés. Dans le domaine des nouvelles technologies, tel que celui des systèmes à pile à combustible, la disponibilité de ces données présente un verrou aux projections probabilistes des résultats. La prise en compte de cette incertitude est cependant indispensable

à l'identification d'un intervalle de confiance sur les résultats obtenus.

L'intégration d'une analyse sociologique à une démarche d'aide à la conception a été engagée dans ce document. Il a été mis en évidence que les objectifs de sûreté de fonctionnement doivent s'appuyer sur des études sociologiques des comportements individuels pour définir les conditions réelles d'usage. Le rapprochement de ces deux disciplines mérite d'être approfondie et précisé dans le domaine d'application du système conçu. Dans le cadre des véhicules électriques à hydrogène, l'évolution des comportements vis-à-vis de la mobilité étant liée au développement des nouvelles technologies implique de définir des objectifs de fiabilité correspondant à cette évolution. L'évaluation de l'objectif de durée de vie mérite d'être revue, ainsi que les conditions d'utilisation en termes de profils énergétiques et vibratoires.

Les essais expérimentaux sous conditions climatiques n'ont cependant pas pris en compte l'effet de la variation de l'hygrométrie. D'un côté, de tels essais auraient risqué d'endommager grandement le système. D'un autre côté, ils n'auraient pas été susceptibles d'approfondir les mécanismes de dégradation sous sollicitations vibratoires. S'il fallait prendre en compte les aspects de corrosion il serait pertinent de réaliser des essais en brouillard salin car cet environnement est particulièrement corrosif dans le domaine automobile et augmente le dommage [Hägele and Sonsino, 2011].

Le cheminement développé est destiné à être appliqué à d'autres systèmes mécaniques complexes que celui qui a permis de mettre en place les interactions entre les différentes études présentées. En restant dans le domaine des système à pile à combustible, le système pourrait se restreindre à la pile à combustible, étant elle-même un système mécanique complexe. Hou et al. [Hou et al., 2013] ont pu mettre en évidence, par des essais vibratoires de longue durée, que l'environnement vibratoire a une influence importante sur le fonctionnement en régime permanent de la pile à combustible. La démarche proposée ici pourrait être appliquée uniquement à un stack de pile à combustible comme une aide à la conception de l'assemblage et des fixations de la pile à combustible. Après une décomposition fonctionnelle des différents éléments la constituant, et une analyse dysfonctionnelle, pour une zone critique identifiée, une étude approfondie de la courbe de Wöhler du matériau de cette zone est nécessaire en tenant compte de son environnement. Par ailleurs, les états de contraintes dans la zone étudiée doivent pouvoir être caractérisés. Les applications aux systèmes mécaniques contrôlés utilisés en aéronautique, au domaine des transports et de manière plus générale aux domaines qui subissent un environnement vibratoire et climatique contraignant.

Enfin, la gestion par flottes de véhicules permet une organisation de la maintenance préventive plus régulière et organisée. En France, le développement des véhicules électriques à hydrogène semble être orienté par la multiplication des véhicules gérés en flottes. Un grand nombre de sociétés privées sont déjà propriétaires des véhicules qui permettent à leurs salariés d'une part d'effectuer des déplacements dans le cadre professionnel mais également entre le domicile et lieu de travail. La technologie des véhicules électriques à hydrogène dans ce cadre, nécessiterait l'implantation des stations de recharge d'hydrogène sur les lieux de travail. La maîtrise de la durée de vie des systèmes à pile à combustible par un modèle de maintenance préventive adapté à cette technologie, est un champ de recherche peu investi qui pourrait être particulièrement bénéfique pour la stabilisation de la filière.

Bibliographie

- [A. Gelman, 2007] A. Gelman, J. H. (2007). *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge University Press.
- [ADEME, 2015] ADEME (2015). Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène. Agence de l'Environnement de la Maîtrise de l'Energie.
- [Akiki, 2011] Akiki, T. (2011). *Modélisation de la dégradation de la production de puissance d'une PAC suite aux sollicitations mécaniques*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Belfort.
- [Amar, 2010] Amar, G. (2010). *Homo mobilis – Le nouvel âge de la mobilité*. Editions FYP.
- [Angelova et al., 2014] Angelova, D., Yordanova, R., and Lazarova, T. (2014). On factors influencing fatigue process in steel 316l used in hydrogen energy technologies. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49 :29–34.
- [Aström, 2007] Aström, K. (2007). Reliability analysis and initial requirements for fc systems and stacks. *Journal of Power Sources*, 171 :46–54.
- [Bassant et al., 2001] Bassant, M., Kaufmann, V., and Joye, D. (2001). *Enjeux de la sociologie urbaine*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [Belot and Picard, 2014] Belot, R. and Picard, F. (2014). The three ages of fuel cell research in france : A socio-technical system's resistance to change. *Fuel Cells*, 14 :525–532.
- [Bolot, 2006] Bolot, J. (2006). *Le transport à la demande, une piste pour le développement urbain durable*. PhD thesis, Université de Franche Comté, Besançon.
- [Borroni-Bird, 1996] Borroni-Bird, C. E. (1996). Fuel cell commercialization issues for light-duty vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 61 :33–48.
- [Boudon, 2014] Boudon, B. (2014). *Méthodologie de modélisation des systèmes mécatroniques complexes à partir du multi-bond graph : application à la liaison BTP-fuselage d'un hélicoptère*. PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.
- [Budde et al., 2012] Budde, B., Alkemade, F., and Weber, K. (2012). Expectations as a key to understanding actors strategies in the field of fuel cell and hy vehicles. *Technological Forecasting and Social Change*, 79 :6.
- [Cabanne, 2005] Cabanne, I. (2005). *Modélisation à long terme de l'évolution des trafics voyageurs à longue distance en France*. PhD thesis, Université Lumière, Lyon.

- [Callon, 1979] Callon, M. (1979). L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique. *In : Revue française de science politique*, 29e année, n°3 :426–447.
- [Candusso, 2013] Candusso, D. (2013). *Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport*. Habilitation à diriger des recherches en génie électrique, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [CGDD, 2010] CGDD (2010). La mobilité des français : Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. La Revue du Commissariat Général au Développement Durable.
- [Charon et al., 2014] Charon, W., Iltchev, M.-C., and Blachot, J.-F. (2014). Mechanical simulation of a proton exchange membrane fuel cell stack using representative elementary volumes of stamped metallic bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 :13195–13205.
- [Chevallier, 2009] Chevallier, M. (2009). Automobile : la fin du rêve. *Alternatives Economiques*, 279.
- [Choley, 2006] Choley, J. (2006). *Mécatronique : une nouvelle démarche de conception des systèmes complexes*. Technologies et Formations.
- [Chougule et al., 2013] Chougule, R., Khare, V. R., and Pattada, K. (2013). A fuzzy logic based approach for modeling quality and reliability related customer satisfaction in the automotive domain. *Expert Systems with Applications*, 40 :800–810.
- [Collier et al., 2006] Collier, A., Wang, H., Yuan, X. Z., Zhang, J., and Wilkinson, D. P. (2006). Degradation of polymer electrolyte membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31 :1838–1854.
- [Collong and Kouta, 2015] Collong, S. and Kouta, R. (2015). Fault tree analysis of proton exchange membrane fuel cell system safety. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 :8248–8260.
- [CPP, 2011] CPP (2011). Méthodes et procédures pour définir un niveau de risque acceptable dans les différents domaines concernés par l'adaptation au changement climatique. gouvernance du risque ainsi défini. Note de cadrage du Comité de la Prévention et de la Précaution.
- [Douglas, 1977] Douglas, T. (1977). Structured analysis (sa) : Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transactions on software engineering*, 3 :6–15.
- [Dupuis, 2000] Dupuis, P.-E. (2000). Essais de vibrations mesures et exploitation des résultats. *Techniques de l'Ingénieur*, bm5160.
- [EIGA, 2007] EIGA (2007). Determination of safety distances. European Industrial Gas Association IGC Doc 75/07/E.
- [EIHP2, 2003] EIHP2 (2003). Risk acceptance criteria for hydrogen refueling stations. European Integrated Hydrogen Project Phase 2.
- [Flonneau, 2004] Flonneau, M. (2004). Transports en ville. *Histoire Urbaine*, 11.
- [Flonneau and Guigueno, 2009] Flonneau, M. and Guigueno, V. (2009). *De l'histoire des transports à l'histoire de la mobilité*. Presses Universitaires de Rennes.
- [Fouillé, 2011] Fouillé, L. (2011). *L'attachement automobile mis à l'épreuve : étude des dispositifs de détachement et de recomposition des mobilités*. PhD thesis, Université Européenne de Bretagne, Rennes.

- [Gallez and Kaufmann, 2009] Gallez, C. and Kaufmann, V. (2009). *Aux racines de la mobilité en sciences sociales. De l'histoire des transports à l'histoire de la mobilité?* Presses Universitaires de Rennes.
- [Gallez et al., 1997] Gallez, C., Orfeuil, J.-P., and Polacchini, R. (1997). L'évolution de la mobilité quotidienne : croissance ou réduction des disparités? *Recherche Transport Sécurité*, 56 :27–42.
- [GAM-EG-13, 1992] GAM-EG-13 (1992). Essais généraux en environnement des matériels. Ministère de la Défense, Délégation Générale pour l'Armement (Norme Française).
- [Gerbec, 2008] Gerbec, M. (2008). Operational and safety analyses of a commercial pemfc system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 :4147–4160.
- [Greene et al., 2013] Greene, D. L., Lin, Z., and Dong, J. (2013). Analyzing the sensitivity of hydrogen vehicle sales to consumers' preferences. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 :15857–15867.
- [GuidezJ et al., 2007] GuidezJ, M., Durand, H., Quetelard, B., and Varnaison-Revolle, P. (2007). La mobilité urbaine des années 2000 : vers un « découplage » entre la possession et l'usage de la voiture? *Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques*, 3 :1–8.
- [Géradin and Rixen, 1996] Géradin, M. and Rixen, D. (1996). *Théorie des Vibrations, Application à la Dynamique des Structures*. Editions Masson.
- [H2MobilitéFrance, 2015] H2MobilitéFrance (2015). Mobilité hydrogène france. Consortium regroupant les acteurs de la filière.
- [Hauser and Clausing, 1988] Hauser, J.-R. and Clausing, D. (1988). The house of quality. *Havard Business Review*, 66 :63–73.
- [Hord, 1978] Hord, J. (1978). Is hydrogen a safe fuel? *International Journal of Hydrogen Energy*, 3 :157–176.
- [Hou et al., 2013] Hou, Y., Hao, D., Shen, C., and Shao, Z. (2013). Experimental investigation of the steady-state efficiency of fuel cell stack under strengthened road vibrating condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 :3767–3772.
- [Hägele and Sonsino, 2011] Hägele, N. and Sonsino, C. (2011). Structural durability of forged automotive aluminium chassis components submitted to spectrum loading and salt-corrosion by the example of a tension strut. *Procedia Engineering*, 10 :330–339.
- [Jolliffe, 2002] Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis, Second Edition*. Springer.
- [Kagan et al., 1973] Kagan, A., Linnik, Y., and Rao, C. (1973). *Characterization Problems in Mathematical Statistics*. Wiley.
- [Kamarudin et al., 2006] Kamarudin, S. K., Daud, W. R. W., Som, A. M., Takriff, M. S., and Mohammad, A. (2006). Technical design and economic evaluation of a pem fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 157 :641–649.
- [Kanezaki et al., 2008] Kanezaki, T., Narazaki, C., Mine, Y., Matsuoka, S., and Murakami, Y. (2008). Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 :2604–2619.

- [Kano et al., 1984] Kano, N., Seraku, N., Takahashi, F., and Tsuji, S. (1984). Attractive quality and must-be quality. *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, 14 :39–48.
- [Kaufman and Guidez, 1998] Kaufman, V. and Guidez, J.-M. (1998). *Les citoyens face à l'automobilité*. CERTU.
- [Kervern, 1995] Kervern, G.-Y. (1995). *Éléments fondamentaux des cindyniques*. Economica.
- [Klaiber, 1996] Klaiber, T. (1996). Fuel cells for transport : can the promise be fulfilled ? technical requirements and demands from customers. *Journal of Power Sources*, 61 :61–63.
- [Kouta and Play, 2007a] Kouta, R. and Play, D. (2007a). Durée de vie d'un système mécanique-analyse de chargements aléatoires. *Techniques de l'Ingénieur*, bm5030.
- [Kouta and Play, 2007b] Kouta, R. and Play, D. (2007b). Durée de vie d'un système mécanique-Étude de l'impact de sollicitation aléatoire. *Techniques de l'Ingénieur*, bm5032.
- [Labarrere et al., 1978] Labarrere, M., Krief, J. P., and Gimonet, B. (1978). *Le filtrage et ses applications*. Cepadues-Éditions.
- [Lachaize, 2004] Lachaize, J. (2004). *Étude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse.
- [LaChance et al., 2009] LaChance, J., Tchouvelev, A., and Ohi, J. (2009). Risk-informed process and tools for permitting hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 :5855–5861.
- [Lacoume et al., 1997] Lacoume, J.-L., Amblard, P.-O., and Comon, P. (1997). *Statistiques d'ordre supérieur pour le traitement du signal*. MASSON.
- [Lalanne, 1999a] Lalanne, C. (1999a). *Vibration et chocs mécaniques-Analyse pratique des mesures*. Hermès Science Publications.
- [Lalanne, 1999b] Lalanne, C. (1999b). *Vibration et chocs mécaniques-Dommages par fatigue*. Hermès Science Publications.
- [Lalanne, 1999c] Lalanne, C. (1999c). *Vibration et chocs mécaniques-Elaboration des spécifications*. Hermès Science Publications.
- [Laprie et al., 1995] Laprie, J. C., Arlat, J., Blanquart, J. P., Costes, A., Crouzet, Y., D. Y., Fabre, J. C., Guillermain, H., Kaâniche, M., Kanoun, K., Mazet, C., Powell, D., Rabéjac, C., and Thévenod, P. (1995). *Guide de la sûreté de fonctionnement*. Cépadues.
- [Larminie and Dicks, 2003] Larminie, J. and Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained, Second Edition*. Wiley.
- [Lassudrie-Duchêne, 1971] Lassudrie-Duchêne, B. (1971). La demande de différence et l'échange international. *Cahiers de l'ISEA, Economies et Sociétés*, 6 :juin.
- [Le Breton, 2005] Le Breton, E. (2005). *Bouger pour s'en sortir. Mobilité quotidienne et intégration sociale*. CARmand Colin, coll. « Sociétales ».
- [Le Moigne, 1999] Le Moigne, J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod.

- [Lehericy, 2007] Lehericy, Y. (2007). *Endommagement et cumul de dommage en fatigue dans le domaine de l'endurance limitée d'un acier inoxydable austénitique 304L*. PhD thesis, Ecole National Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, Poitiers.
- [Leis, 1978] Leis, B. (1978). Fatigue-life prediction for complex structure. *Journal of Mechanical Design, Trans.ASME*, 100 :2–9.
- [Lemaire, 2005] Lemaire, M. (2005). Comment manager une étude mécano-fiabiliste ? In *17ème Congrès Français de Mécanique*, Troyes.
- [Ligeron, 1979] Ligeron, J.-C. (1979). *La fiabilité en mécanique : un outil d'aide à la conception*. Desforges.
- [Lin et al., 2013] Lin, Z., Dong, J., and Greene, D. L. (2013). Hydrogen vehicles : Impacts of doe technical targets on market acceptance and societal benefits. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 :7973–7985.
- [MacIntyre et al., 2007] MacIntyre, I., Tchouvelev, A. V., Hay, D. R., Wong, J., Grant, J., and Benard, P. (2007). Canadian hydrogen safety program. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 :2134–2143.
- [Marin, 2010] Marin, F. (2010). *Développement d'une méthodologie d'essais de fatigue accélérée de pièces mécaniques sur table vibrante*. PhD thesis, Université de Liège, Liège.
- [Merle, 2010] Merle, I. (2010). *La fiabilité à l'épreuve du feu. La prévention des risques d'accidents majeurs dans une usine Seveso II*. PhD thesis, Institut d'études politiques, Paris.
- [Michler et al., 2015] Michler, T., Naumann, J., Hock, M., Berreth, K., Balogh, M. P., and Sattler, E. (2015). Microstructural properties controlling hydrogen environment embrittlement of cold worked 316 type austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering : A*, 628 :252–261.
- [Michler et al., 2013] Michler, T., Naumann, J., Weber, S., Martin, M., and Pargeter, R. (2013). S–n fatigue properties of a stable high-aluminum austenitic stainless steel for hydrogen applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 :9935–9941.
- [Mihalache, 2007] Mihalache, A. G. (2007). *Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué*. PhD thesis, Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers, Anger.
- [Mine et al., 2009] Mine, Y., Narazaki, C., Murakami, K., Matsuoka, S., and Murakami, Y. (2009). Hydrogen transport in solution-treated and pre-strained austenitic stainless steels and its role in hydrogen-enhanced fatigue crack growth. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 :1097–1107.
- [Mock and Schmid, 2009] Mock, P. and Schmid, S. A. (2009). Fuel cells for automotive powertrains—a techno-economic assessment. *Journal of Power Sources*, 190 :133–140.
- [Monnet, 2013] Monnet, J.-C. (2013). *Un sociologue chez Renault : de Pierre Bourdieu à Carlos Ghosn (1985-2005)*. Armand Colin.
- [Montreux, 2001] Montreux, Y. (2001). La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. *Techniques de l'Ingénieur*, AG4670 :1–17.
- [Najjar, 2013] Najjar, Y. S. H. (2013). Hydrogen safety :the road toward green technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 :10716–10728.

- [Nepal et al., 2010] Nepal, B., Yadav, O. P., and Murat, A. (2010). A fuzzy-ahp approach to prioritization of cs attributes in target planning for automotive product development. *Expert Systems with Applications*, 37 :6775–6786.
- [Noguer, 2015] Noguer, N. (2015). *Aide à l'analyse fiabiliste d'une pile à combustible par la simulation*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort.
- [NORMDEF-0101, 2009] NORMDEF-0101 (2009). Guide d'application de la démarche de personnalisation en environnement climatique. Ministère de la Défense, Délégation Générale pour l'Armement (Norme Française).
- [Noyes and Pérès, 2007] Noyes, D. and Pérès, F. (2007). Analyse des systèmes sûreté de fonctionnement. *Techniques de l'Ingénieur*, ag3520.
- [ONISR, 2013] ONISR (2013). Les vitesses pratiquées. Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, <http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere>.
- [OPECST, 2012] OPECST (2012). Les développements technologiques liés aux voitures écologiques. Technical report, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
- [Paclisan, 2013] Paclisan, D.-M. (2013). *Optimisation par la modélisation de l'expérimentation vibratoire des systèmes pile à combustible pour le transport terrestre*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort.
- [Pitoiset and Preumont, 2000] Pitoiset, X. and Preumont, A. (2000). Spectral methods for multiaxial random fatigue analysis of metallic structures. *International Journal of Fatigue*, 22 :541–550.
- [Puchi-Cabrera et al., 2008] Puchi-Cabrera, E., Staia, M., Tovar, C., and Ochoa-Pérez, E. (2008). High cycle fatigue behavior of 316l stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 30 :2140–2146.
- [Rabier, 2007] Rabier, F. (2007). *Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Tarbes.
- [Rausand and Hoyland, 2004] Rausand, M. and Hoyland, A. (2004). *System reliability theory, models, statistical methods, and applications*. Wiley.
- [Rodionov et al., 2011] Rodionov, R., Wilkening, H., and Moretto, P. (2011). Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 :2398–2406.
- [Ross, 1977] Ross, D. T. (1977). Structured analysis (sa) : A language for communicating. *IEEE Transactions on software engineering*, 3 :16–34.
- [Rosyid, 2007] Rosyid, O. A. (2007). Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 :3194–3200.
- [Sheller, 2004] Sheller, M. (2004). Automotive emotions : Feeling the car. *Theory Culture and Society*, 21 :221–242.
- [Shiba et al., 1995] Shiba, S., Jouslin de Noray, B., Morel-Martine, and Noye, D. (1995). *La Conception à l'écoute du marché. Organiser l'écoute des clients pour en faire un avantage concurrentiel*. INSEP Editions.

- [Shiba and Walden, 2006] Shiba, S. and Walden, D. (2006). *Breakthrough Management : Principles, Skills, and Patterns or Transformational Leadership*. Confederation of Indian Industry.
- [Signoret, 1992] Signoret, J. (1992). *Le risque technologique*. Presse universitaire de France.
- [Skipper, 2008] Skipper, C. (2008). *Effects of internal hydrogen on fatigue strength of type 316 stainless steel*. PhD thesis, Tufts University, Ann Arbor- United States - Massachusetts.
- [SMAU, 2005] SMAU (2005). Cahiers de la mobilité. Syndicat Mixte Aire Urbaine.
- [Sonsino, 1995] Sonsino, C. (1995). Multiaxial fatigue of welded joints under inphase or out-of-phase local strains and stresses. *International Journal of Fatigue*, 17 :55–70.
- [Stiglitz, 2010] Stiglitz, J.-E. (2010). *Le Triomphe de la cupidité*. Les liens qui libèrent.
- [Sun and Wang, 2001] Sun, J. and Wang, L. (2001). Fatigue analysis of non-linear structures with von mises stress. *Journal of Sound and Vibration*, 245 :947–952.
- [Tinson, 2010] Tinson, W. (2010). *Plans d'expérience : constructions et analyses statistiques*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- [Urry, 2004] Urry, J. (2004). The system of automobility. *Theory Culture and Society*, 21 :25–39.
- [Urry, 2008] Urry, J. (2008). Governance, flows, and the end of the car system? *Global Environmental Change*, 18 :343–349.
- [van Bree, 2010] van Bree, B. (2010). A multi-level perspective on the introduction of hydrogen and battery-electric vehicles. *Technological Forecasting and Social Change*, 77 :529–540.
- [Veseley and Goldberg, 1981] Veseley, W. E. and Goldberg, F. F. (1981). *Fault Tree handbook*. U.S.Nuclear Regulatory Commission.
- [Villemeur, 1988] Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation*. Eyrolles.
- [Vrabie et al., 2003] Vrabie, V., Granjon, P., and Servière, C. (2003). Spectral kurtosis : from denition to application. In *6th IEEE International Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing (NSIP 2003*, Grado-Trieste, Italy.
- [Wahdame, 2007] Wahdame, B. (2007). *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Franche-Comté, Belfort.
- [Wieland, 2009] Wieland, C. (2009). Reliability computing of polymer-electrolyte-membrane fuel cell stacks through petri nets. *Journal of Power Sources*, 190 :0034–0039.
- [Yadav and Goel, 2008] Yadav, O. P. and Goel, P. S. (2008). Customer satisfaction driven quality improvement target planning for product development in automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 113 :9997–1011.

Résumé :

L'intégration de systèmes mécaniques complexes soumis à des environnements vibratoires contraignants nécessite de tenir compte, dès la conception, des sollicitations réelles d'usage.

La thèse montre que l'environnement vibratoire ainsi que la durée d'exposition dépendent de l'utilisation qui sera faite d'un système tout au long de son cycle de vie. L'évaluation de son utilisation repose sur l'évolution conjointe du comportement des utilisateurs et du développement de la technologie du système.

L'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système mécanique complexe a permis de considérer le système dans son ensemble et d'investiguer ainsi de façon approfondie le comportement dynamique de composants critiques. La modélisation simple de systèmes mécaniques précise qualitativement et quantitativement les comportements dynamiques principaux et simule les sollicitations vibratoires auxquelles un composant critique identifié est soumis. Sur cette base, la modélisation du comportement d'un composant mécanique permet d'évaluer le dommage par fatigue qu'il subira. Cet indicateur apporte au concepteur une aide aux choix de la géométrie du composant. Enfin, l'environnement climatique ainsi que des impacts liés au fonctionnement interne du système, ont été pris en compte par la réalisation d'essais vibro-climatiques en fonctionnement. Ces études ont été menées sur un système à pile à combustible intégré à un véhicule électrique à hydrogène. Elles ont permis de mettre au point un cheminement comme appui à la conception des systèmes mécaniques complexes.

Le cheminement pluridisciplinaire proposé dans cette thèse repose donc sur l'interaction de travaux de recherche issus principalement des domaines de la sociologie, de la sûreté de fonctionnement et de la mécanique.

Mots-clés : Conception, usages, sûreté de fonctionnement, comportement dynamique, système pile à combustible

Abstract:

The integration of complex mechanical systems subject to stringent vibration environments requires consideration of the real conditions of use from the beginning of the design phase.

The thesis shows that the vibration environment and the duration of exposure to this environment depend on the use of the system throughout its life cycle. The evaluation of its use is based on the joint evolution of both the user behavior and the system technology development.

The dependability analysis of a complex mechanical system leads to consider the system as a whole and thus to investigate in depth the dynamic behavior of critical components. A basic modeling of the mechanical system allows to qualitatively and quantitatively identify key dynamic behaviors and determines the vibration loads to which selected critical components are subjected. On this basis, modeling the behavior of a mechanical component leads to assess its fatigue damage. This indicator helps the designer in his choice of component geometry.

Finally, the climatic environment as well as effects related to the internal functioning of the system, have been taken into account by performing vibro-climatic tests of on an operating systems, i.e. a fuel cell system integrated into a hydrogen electric vehicle. This helped to develop a procedure to support the design of complex mechanical systems.

The multidisciplinary path proposed in this thesis is therefore based on the interaction of research works mainly issued from the fields of sociology, dependability and mechanics.

Keywords: Design, uses, dependability, dynamic behavior, fuel cell system