



Méthodologie pour l'étude conceptuelle d'un système fortement innovant - Application au cas du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère

Adrien Monsimer

► To cite this version:

Adrien Monsimer. Méthodologie pour l'étude conceptuelle d'un système fortement innovant - Application au cas du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère. Génie mécanique [physics.class-ph]. INSA de Toulouse, 2018. Français. NNT : 2018ISAT0003 . tel-02082616

HAL Id: tel-02082616

<https://theses.hal.science/tel-02082616>

Submitted on 28 Mar 2019

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Présentée et soutenue par :

Adrien MONSIMER

le jeudi 19 avril 2018

Titre :

Méthodologie pour l'étude conceptuelle d'un système fortement innovant -
Application au cas du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie mécanique, mécanique des matériaux

Unité de recherche :

Institut Clément Ader (ICA)

Directeur/trice(s) de Thèse :

Jean-Charles MARE, Professeur des Universités, INSA Toulouse, ICA

Jury :

M. BONJOUR Eric, Professeur des Universités, Université de Lorraine, Rapporteur
M. NADEAU Jean-Pierre, Professeur Emérite, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers,
Rapporteur
Mme TROUSSIER Nadège, Professeure des Universités, Université de Technologie de Troyes,
Examinatrice
M. YANNOU Bernard, Professeur des Universités, CentraleSupélec, Examinateur
M. SICAIRE Pierre, Ingénieur Expert Circuit Carburant, Safran Helicopter Engines, Invité

Résumé

Méthodologie pour l'étude conceptuelle d'un système fortement innovant – Application au cas du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère

Dans de nombreux domaines industriels, l'innovation est mise en œuvre de manière incrémentale en cherchant à optimiser un concept donné. Ce type d'innovation est efficace sur le court terme, permettant d'arriver à améliorer le système avec une prise de risque limitée. Cependant, cette approche réduit fortement les opportunités d'amélioration future de ces systèmes. Pour faire face à des nouveaux besoins émanant des clients, l'innovation de rupture s'impose dans une vision long terme. Un changement radical de concept permet en effet de dégager des marges fonctionnelles permettant d'améliorer significativement le système. Le but de ces travaux de thèse a été, d'une part, de proposer un cadre méthodologique pour l'étude conceptuelle d'architectures de systèmes de puissance en rupture. Ceci consiste en la spécification des nouveaux besoins, la génération d'architectures système fortement innovantes, ainsi que la sélection des architectures les plus pertinentes. En s'appuyant sur une approche d'ingénierie système, ainsi que sur des techniques à l'état de l'art dans les domaines de la recherche de solutions innovantes (KCP, Brainwriting, Diagramme KJ), la combinaison des concepts (matrice morphologique) et de l'aide à la décision multicritères (TOPSIS, MAUT), une approche originale a été proposée. La méthode proposée a été appliquée au cas du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère chez l'industriel Safran Helicopter Engines. Ce contexte applicatif a permis de mettre en œuvre et d'évaluer les approches proposées dans un environnement industriel réel. Un outil implémenté sous Microsoft Excel a été développé pour le déploiement de la méthodologie proposée dans l'entreprise.

A methodology for the conceptual design of a radically innovative system – Application to a helicopter engine fuel system

In several industries, incremental innovation has been used. This approach aims at optimizing a given design. It is efficient in the short term, and enables to improve the system at low risks. Anyway, incremental innovation implies a reduction in the capacity of future improvement. In order to deal with new customer needs, radical innovation is a must in a long-term consideration. Indeed, these radical changes allow to create new functional margins, enabling to make the system even better. The aim of this thesis work is, on the one hand, to propose a methodological framework for the conceptual design of radically innovative power system architectures. This implies tomorrow's needs specification, strongly innovative architecture generation and best architectures selection. Based on a systems engineering approach, as well as state of the art techniques in the domain of creativity (KCP, Brainwriting, KJ Diagram), concepts combination (morphological matrix) or multicriteria decision making (TOPSIS, MAUT), an original approach has been proposed. On the other hand, this methodology has been implemented in an industrial framework in the case of a helicopter engine fuel system at Safran Helicopter Engines. This has enabled to obtain a return of experience on the industrial application of this methodology. A tool has been developed using Microsoft Excel for the industrial deployment of the methodology.

Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit ont été réalisés en collaboration entre le laboratoire Institut Clément Ader et l'entreprise Safran Helicopter Engines.

Mes premiers remerciements vont à mes deux encadrants de thèse, qui ont su m'accompagner tout au long de ces travaux de thèse. Merci tout d'abord au Professeur Jean-Charles Maré, mon directeur de thèse. Tu m'as énormément apporté que ce soit par ton expérience des problématiques de conception préliminaire, que par ton accompagnement humain durant toutes les phases de la thèse. Merci également à Pierre Sicaire, mon encadrant industriel chez Safran Helicopter Engines. Tu as grandement participé à ma bonne intégration au sein de l'entreprise, tout en me laissant l'autonomie me permettant de mener à bien ces travaux de recherche dans un contexte industriel. Ton expertise technique des problématiques du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère a été précieuse. Sans vos contributions, cette thèse aurait sûrement été bien différente, alors encore merci.

Mes remerciements vont ensuite à messieurs Eric Bonjour et Jean-Pierre Nadeau qui ont accepté de rapporter mes travaux de thèse. Merci pour vos rapports d'experts très constructifs. Les nombreuses questions que vous m'avez adressées montrent l'intérêt que vous avez porté à mes travaux. Je vous en suis grandement reconnaissant. Je tiens également à remercier madame Nadège Troussier ainsi que monsieur Bernard Yannou qui ont accepté d'examiner mes travaux de thèse.

Je suis infiniment reconnaissant envers tous mes collègues qui m'ont accompagné au quotidien au cours de mes trois années de thèse, que ce soit chez Safran Helicopter Engines ou à l'Institut Clément Ader. J'espère n'oublier personne en citant pour Safran Helicopter Engines et par ordre alphabétique : Kévin Beaubier, Philippe Benezech, Eric Le-Borgne, Gabriel Darrieumerlou, Bruno Facca, Carole Irigoyen, Yannick Du Laurent de la Barre, Alexis Longin et Alexandre Siret. Merci pour votre expertise technique ainsi que pour vos qualités humaines et l'ambiance très positive dans laquelle vous m'avez accueillie à l'intérieur et à l'extérieur du cadre professionnel. Côté Institut Clément Ader et par ordre alphabétique, merci à Silvio Akitani, Louis Amigues, Batoul Attar, Marc Budinger, Clément Coïc, Scott Delbecq, Francesco De Giorgi, Ion Hazyuk, Nicolas Laurien, Geneviève Mkara, Florian Sanchez et Florent Tajan. Merci à vous pour votre accueil toujours chaleureux lors de mes déplacements au laboratoire, ainsi que pour nos échanges souvent riches.

Un grand merci à tous mes amis de Grenoble, de Châteauroux, de Toulouse, de Pau et d'ailleurs. Merci pour les grands moments que nous avons vécus ensemble et sans lesquels la vie n'aurait pas la même saveur. Merci également à ma famille. Même si on ne se voit pas très souvent, votre présence m'est néanmoins précieuse. Je tiens également à remercier ma belle famille. Vous m'avez accueilli à bras ouverts, occupez désormais une belle place dans ma vie.

Mes derniers remerciements vont à Marie-Alice, mon épouse. Merci pour tout ce que tu as fait pour le chemin que nous avons parcouru et qu'il nous reste à parcourir. Merci pour la personne que tu es, et pour tout ce que tu as fait pour m'aider dans mes travaux de thèse.

En un mot, et pour conclure, merci à la Vie de m'avoir mené vers cette expérience de thèse qui m'a fait grandir, et qui m'a permis de vivre de grands moments avec des personnes d'exception.

Table des matières

Définitions	8
Acronymes.....	10
Introduction Générale.....	11
CHAPITRE 0 - Présentation des travaux de thèse	13
I. Contexte des travaux.....	13
I.A. Contexte industriel	13
I.B. Contexte laboratoire	17
II. Particularité des travaux de thèse.....	18
II.A. Spécificités du cas d'étude	18
II.B. Positionnement vis-à-vis des travaux existants	19
CHAPITRE 1 - Ingénierie des Besoins et des Exigences	21
Introduction.....	21
I. Présentation de l'ingénierie des besoins et des exigences	22
I.A. Enjeux de l'ingénierie des besoins et des exigences	22
I.B. Etat de l'art en ingénierie des besoins et des exigences.....	24
I.C. Méthodologie proposée dans le cadre de la thèse	37
II. Analyse du retour d'expérience Safran Helicopter Engines.....	38
II.A. Elicitation du besoin	38
II.B. Analyse du besoin des parties prenantes.....	44
Conclusion	46
CHAPITRE 2 - Génération d'architectures système carburant en rupture	47
Introduction.....	47
I. Etat de l'art des démarches de génération d'architectures.....	47
II. Présentation des étapes de la démarche retenue	50
II.A. Abstraire	50
II.B. Décomposer	51
II.C. Rechercher.....	51
II.D. Combiner	60
III. Proposition d'une méthode pour les travaux de thèse.....	62
III.A. Sélection méthode Abstraire.....	62
III.B. Sélection méthode Décomposer	62
III.C. Sélection méthode Rechercher	62
III.D. Sélection méthode Combiner.....	67
IV. Mise en œuvre de la méthode proposée chez Safran Helicopter Engines	68
IV.A. Abstraire et Décomposer	68

IV.B. Rechercher des solutions innovantes.....	71
IV.C. Combiner les concepts de solution	78
Conclusion	87
CHAPITRE 3 - Sélection des concepts d'architectures système carburant en rupture	89
Introduction.....	89
I. Définition du problème	89
II. Etat de l'art	91
II.A. Processus de prise de décision sur les architectures système	91
II.B. Travaux similaires et vue d'ensemble de la littérature	92
II.C. Méthodes d'évaluation des architectures.....	93
III. Méthodologie proposée.....	112
III.A. Processus.....	112
III.B. Les critères d'évaluation.....	112
III.C. Evaluation préliminaire	113
III.D. Analyse des alternatives.....	113
III.E. Prise de décision.....	115
IV. Mise en œuvre chez Safran Helicopter Engines.....	116
IV.A. Les critères d'évaluation.....	116
IV.B. Evaluation préliminaire	119
IV.C. Evaluation des alternatives	121
IV.D. Prise de décision sur les architectures	125
V. Poursuite des travaux de conception.....	132
V.A. Architecture du système EPD	132
V.B. Modélisation du système EPD.....	134
V.C. Résultats	137
Conclusion	137
Conclusion Générale.....	139
Références.....	143
Annexe.....	153

Définitions

Appréciation	Démarche de la pensée aboutissant à un jugement de valeur (CNRTL 2018)
Architecture	Organisation fondamentale d'un système. Elle est incarnée par ses composants, leur relation entre eux et à l'environnement, ainsi que par les principes qui guident sa conception et son évolution. (ISO/IEC/IEEE 2010) Comme l'indiquent les auteurs de (Fiorèse & Meinadier 2012), l'architecture peut être représentée selon différents points de vue. Ils citent deux types d'architectures : fonctionnelle et physique. Ces architectures peuvent être représentées selon différents niveaux de granularité.
Attribut	Dans le domaine de l'aide à la décision, un attribut est une caractéristique permettant de décrire une action (ou concept candidat). (Vanderpooten 2008)
Besoin	Nécessité ou désir exprimé par un utilisateur, ou par toute partie prenante intéressée par l'utilisation et l'exploitation du système (Fiorèse & Meinadier 2012)
Brainstorming	Technique de recherche d'idées originales, surtout utilisée dans la publicité et fondée sur la communication réciproque dans un groupe des associations libres de chacun de ses membres. (Larousse n.d.)
Brainwriting	Variante du Brainstorming dans laquelle les idées sont exprimées à l'écrit et non à l'oral
Brique	Dans nos travaux de thèse, une brique désigne un concept répondant à une fonction. Une architecture est constituée d'un assemblage de briques.
Cas d'utilisation	Spécification statique d'un contexte opérationnel où l'on décrit les systèmes externes qui interviennent ainsi que leurs interactions.
Contexte opérationnel	Moment de la vie du système tel que l'environnement (client, utilisateur, système externe, etc.) le perçoit.
Contradiction technique	Lorsque deux paramètres différents sont en conflit, c'est-à-dire que l'amélioration de l'un entraîne la détérioration de l'autre. (Gadd 2011)
Contrainte	Type d'exigence motivée par une restriction, limitation ou une conformité à un règlement imposé au système. (D'après (Fiorèse & Meinadier 2012))
Critère	Dans le domaine de l'aide à la décision, un critère est une caractéristique permettant de mesurer les préférences du décideur vis-à-vis de chaque action et relativement à un point de vue. (Vanderpooten 2008)
Critère d'appréciation	Caractéristique utilisée pour évaluer la performance attendue d'un produit ou celle qu'il réalise. (Afnor 2014)
Cycle de vie	Evolution du système depuis l'identification d'un besoin chez le client, le développement du système, les tests, la production, l'opération, le support, en passant par les évolutions diverses du système, jusqu'à ce qu'il soit retiré du service et démantelé. (Kossiakoff & Sweet 2003)
Design dominant	Réfère au concept qui s'est imposé sur le marché
Evaluation	Action d'apprécier la valeur d'une chose (CNRTL 2018)
Exigence	Enoncé qui spécifie une aptitude, une caractéristique ou une limitation d'un système, d'un produit ou d'un processus, pour contribuer, dans des conditions d'environnement données, à la satisfaction d'un but donné. (D'après (Fiorèse & Meinadier 2012))
Inertie Psychologique	Tendance humaine à s'attacher à des hypothèses familières et à montrer de la résistance à les remettre en cause. (adapté de (Gadd 2011))
Innovation de rupture	Innovation obtenue par le changement de concept d'un produit ou de son modèle économique
Innovation	Innovation obtenue par l'ajout progressif de fonctionnalités ou l'amélioration d'un

incrémentale	système existant, sans modification de son concept fondamental.
Maitre d'œuvre (MOE)	Personne physique ou morale qui reçoit la mission du maitre d'ouvrage de concevoir le système à faire et de contrôler sa réalisation. (Fiorèse & Meinadier 2012)
Maitre d'ouvrage (MOA)	Personne physique ou morale pour le compte de laquelle le système à faire est réalisé. (Fiorèse & Meinadier 2012)
Méthodologie	Ensemble de pratiques, techniques, procédures et règles utilisées par ceux qui travaillent dans une discipline (Project Management Institute 2008)
Mission opérationnelle	Tâche, service ou fonction spécifique, définie pour être accompli par le système (ECSS 2004)
Opérationnel	Qui relève d'un point de vue externe au système à faire.
Partie prenante	Toute personne ou entité concernée de près ou de loin par le système (son utilisation, sa réalisation, sa maintenance, sa certification...) et donc susceptible d'exprimer des exigences. (D'après (Fiorèse & Meinadier 2012))
Processus	Ensemble d'activités corrélées ou en interaction qui utilise des éléments d'entrée pour produire un résultat escompté. (ISO 2015)
Scénario opérationnel	Spécification dynamique d'un contexte opérationnel où l'on décrit la succession des activités et des échanges entre les systèmes externes et le système à faire qui couvrent l'ensemble du contexte considéré.
Sélection	Processus (opération volontaire et méthodique, phénomène inconscient ou automatique) par lequel, à l'intérieur d'un ensemble donné, certains éléments (personnes ou choses) sont choisis, retenus à l'exclusion des autres, en fonction de caractéristiques déterminées, éventuellement impliquées par une certaine fin. (CNRTL 2018)
Spécification	(1) <i>Spécification système</i> ¹ : Document prescrivant des exigences à satisfaire par le système à faire (Fiorèse & Meinadier 2012) (2) Opération de formalisation des exigences d'un niveau supérieur en exigences du niveau considéré (Fiorèse & Meinadier 2012). Dans notre cas, il s'agira d'exigences de niveau du système à faire.
Système	Combinaison d'éléments en interaction organisés pour atteindre un ou plusieurs objectifs définis (ISO/IEC/IEEE 2002)
Système à faire	Système d'étude qui fait l'objet du processus d'ingénierie système. (Fiorèse & Meinadier 2012)
Taux d'échange	Relation déclarée acceptable par le demandeur entre la variation du prix (ou du coût) et la variation correspondante du niveau d'un critère d'appréciation d'une fonction, ou entre les variations de niveau de deux critères d'appréciation d'une fonction. (Afnor 2014)
Utilisateur	Individu ou organisation qui bénéficie de l'exploitation du système
Validation	Activités dont le but est de montrer que l'activité technique réalisée répond à son objectif, que le produit résultant de l'activité répond au besoin pour lequel l'activité a été faite. (Fiorèse & Meinadier 2012) - Confirmation par des preuves objectives que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévue ont été satisfaites. (ISO 2015)
Vérification	Processus dont le but est de s'assurer que l'activité technique a été correctement réalisée (Fiorèse & Meinadier 2012) - Confirmation par examen et apport de preuves objectives que les exigences spécifiées ont été satisfaites. (ISO 2015)

¹ Dans toute la suite, le terme « système » sera volontairement omis quand il s'agira de spécification. Ainsi, le terme spécification réfèrera à la spécification système, c'est-à-dire la spécification de niveau système à faire.

Acronymes

AFIS	Association Française d'Ingénierie Système
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
EPD	Electropompe doseuse
GV	Géométries Variables
HC	Hélicoptère
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IS	Ingénierie Système
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MOA	Maitre d'ouvrage
MODM	Multi Objective Decision Making
MOE	Maitre d'œuvre
OEI	One Engine Inoperative
QFD	Quality Function Deployment
SafranHE	Safran Helicopter Engines
SAR	Score d'Amélioration Relatif
SHE	Safran Helicopter Engines
TAG	Turbine à gaz
TOPSIS	Technique for Order Preferences by Similarity to an Ideal Solution
TRIZ	Théorie de Résolution Inventive des Problèmes (acronyme russe)

Introduction Générale

Ces travaux de thèse ont été menés d'avril 2015 à avril 2018, dans le cadre d'une collaboration entre Safran Helicopter Engines et l'Institut Clément Ader. Elle traite de l'étude conceptuelle de systèmes fortement innovants, avec comme cas d'application le circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère Safran Helicopter Engines. Le besoin de thèse a été présenté par l'industriel, en partant du constat suivant. Chez Safran Helicopter Engines et de manière générale dans le domaine des turbines à gaz aéronautiques, les circuits carburant ont une architecture globalement similaire. Les nouvelles fonctionnalités y ont été ajoutées de manière incrémentale, augmentant la complexité tout en réduisant la marge fonctionnelle pour de futurs développements. Etant donné l'évolution des besoins des clients et le caractère fortement concurrentiel du domaine du moteur d'hélicoptère, les travaux de thèse ont été initiés pour proposer et évaluer des solutions en rupture vis-à-vis des pratiques de l'entreprise. Nous nous placerons pour ce faire à un niveau préliminaire du cycle de conception puisqu'il s'agira de conception d'architecture de système carburant. Cette thématique est au cœur des problématiques du groupe Ingénierie des Systèmes et Microsystèmes de l'Institut Clément Ader. Cette équipe s'intéresse en effet aux mécanismes de conception préliminaire des systèmes multiphysiques par une approche basée sur les modèles. Ce travail de thèse intervient également après plus de 10 ans de collaboration entre le laboratoire et l'industriel.

Les travaux de thèse se situent au niveau de l'étape de conception préliminaire du système, et débutent même en amont. En effet, le caractère fortement innovant des solutions attendues nous a poussé à débuter nos travaux d'étude conceptuelle dès l'analyse du besoin, comme nous l'avons représenté sur la Figure 1.

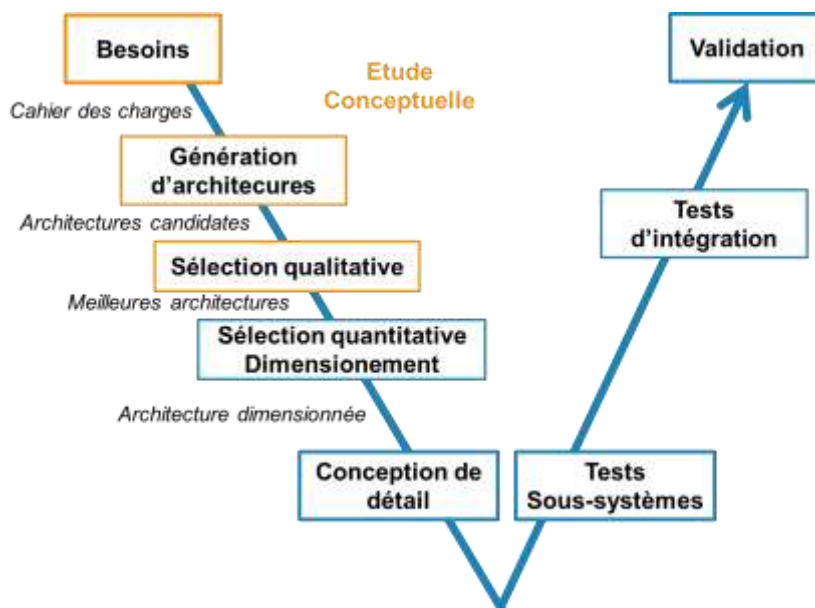


Figure 1 - Positionnement de nos travaux dans le cycle en V

Les travaux de thèse ont donc été jalonnés de 3 activités génériques que sont :

- La spécification des besoins et exigences pour un système fortement innovant. Lors de cette étape, une méthodologie a été proposée et mise en œuvre pour capter les nouveaux besoins liés à de nouvelles demandes issues des différentes parties prenantes. Ces besoins ont été formalisés puis déclinés en exigences, permettant leur quantification.
- La génération de concept d'architectures systèmes en rupture vis-à-vis des pratiques de l'entreprise. Cette étape a consisté, suite à l'identification des fonctions à remplir par le système, à générer des solutions candidates en rupture par rapport à l'existant dans l'entreprise. Pour ce faire, une méthodologie basée sur des techniques de créativité a été proposée et mise en place dans l'entreprise.
- La sélection d'architectures les plus pertinentes pour une application donnée. Cette étape a permis de sélectionner les architectures les plus pertinentes pour un cahier des charges donné. La méthodologie proposée et mise en œuvre dans le cadre de ces travaux s'appuie

sur des méthodes d'aide à la décision multi-attributs.
La structure de ce manuscrit, présentée en Figure 2, s'articule ainsi autour des trois activités que nous venons de présenter et qui ont rythmé cette thèse.

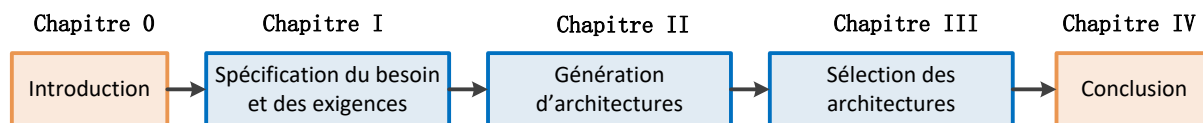


Figure 2 - Structure du manuscrit

Afin de dissocier l'aspect générique de nos travaux de la pure application au cas d'étude, chacun des chapitres I, II et III sont construits selon le modèle suivant :

- 1- Revue critique de l'état de l'art : cette partie propose une revue critique des contributions publiées relatives à l'activité concernée, dans le but de leur sélection pour notre application.
- 2- Proposition d'une méthodologie : cette partie résumé la méthodologie proposée à l'issue de la revue de l'état de l'art.
- 3- Application au cas du système carburant Safran Helicopter Engines : cette partie expose les leçons apprises lors de la mise en œuvre de la méthodologie propose dans le cadre de notre application industrielle.

Cette construction des chapitres est illustrée en Figure 3.

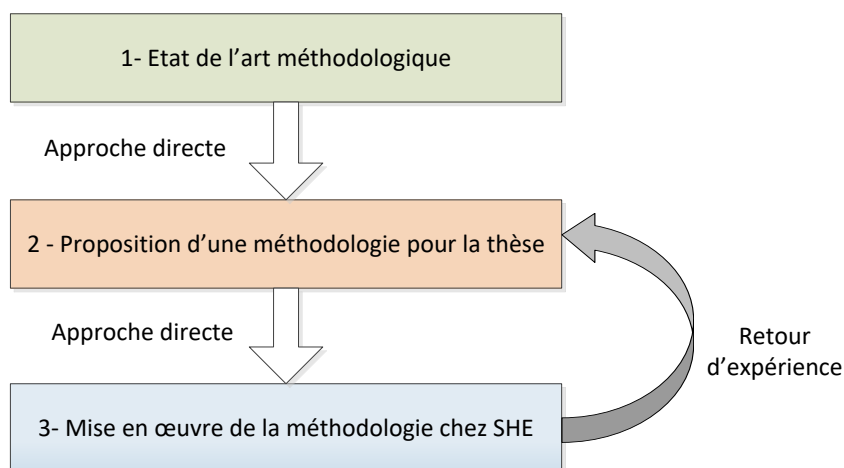


Figure 3 – Déroulement des chapitres I, II et III

Contrairement à ce que pourrait laisser supposer cette approche séquentielle des activités de proposition et de mise en œuvre de la méthodologie, la méthodologie telle qu'elle est présentée dans ce manuscrit a bénéficié du retour d'expérience de la mise en œuvre chez l'industriel, comme nous l'avons représenté en Figure 3. Par soucis de clarté et de synthèse, cet aspect itératif de la proposition d'une méthodologie n'a pas été explicité dans le manuscrit.

CHAPITRE 0 - Présentation des travaux de thèse

I. Contexte des travaux

I.A. Contexte industriel

Ce paragraphe explique le besoin industriel de disposer d'une méthodologie d'étude conceptuelle pour les circuits carburant fortement innovants.

I.A.1. Contexte hélicoptère

Depuis l'avènement de l'hélicoptère dans les débuts du 20^{ème} siècle, les évolutions des technologies et de la société en général n'ont cessé d'entraîner de nouvelles attentes vis-à-vis des hélicoptères. Bien qu'ayant déjà connu de nombreuses transformations, on les voudrait encore plus sûrs, plus fiables, plus économes et plus respectueux de l'environnement. Ces nouveaux besoins, combinés à l'optimisation des hélicoptères depuis des dizaines d'années, entraînent de nouvelles attentes en termes de motorisation de la part des hélicoptéristes. Ces dernières sont alors répercutées sur les différents sous-systèmes du moteur, dont le système carburant.

I.A.2. De l'hélicoptère au circuit carburant moteur

Pour voler, l'hélicoptère utilise la portance aérodynamique produite au niveau d'un ou plusieurs rotors, rotors eux-mêmes entraînés par un ou plusieurs moteurs, formant le système de génération de puissance de l'appareil. Ce système compte parmi les constituants les plus importants de l'aéronef. Il représente la moitié de son coût d'achat et une grande partie de son coût d'utilisation. Il contribue également grandement à sa sûreté, sa fiabilité et à sa performance. Les performances du moteur sont en effet un point clé dans la performance de charge utile d'un hélicoptère, déterminée à partir de la masse de l'hélicoptère et de la puissance de son ou ses moteur(s), ainsi que dans sa manœuvrabilité à travers les capacités d'accélération et de décélération du ou des moteur(s).



Figure 4 - Hélicoptère Airbus Helicopters H160 PT1 (Airbus Helicopters 2018)

Le moteur utilise la combustion du carburant dans l'air pour produire des gaz chauds et sous pression, permettant de récupérer de la puissance mécanique lors de leur détente dans une turbine. Pour produire la puissance désirée, le moteur nécessite que sa chambre de combustion soit à chaque instant alimentée avec le bon débit de carburant. C'est la fonction principale du circuit carburant : puiser le carburant venant du réservoir hélicoptère pour l'injecter en bonne quantité, à tout instant et avec une bonne vaporisation dans la chambre de combustion.



Figure 5 – Moteur Safran Helicopter Engines Arriel 2E (Safran 2018)

Pour la suite, il est important de noter que la quasi-totalité des cas, le réservoir est placé en dessous du moteur². Sur les gros hélicoptères, la distance verticale entre réservoir et moteur peut atteindre près de 3 mètres.

I.A.3. Rôle du système carburant dans le moteur

Le système carburant est un sous-système majeur du moteur (voir Figure 6). Bien que sa fonction principale soit de fournir du carburant dosé à la chambre de combustion, il peut également, selon les modèles, fournir la puissance pour le positionnement mécanique de volets d'air et participer au refroidissement de l'huile moteur.

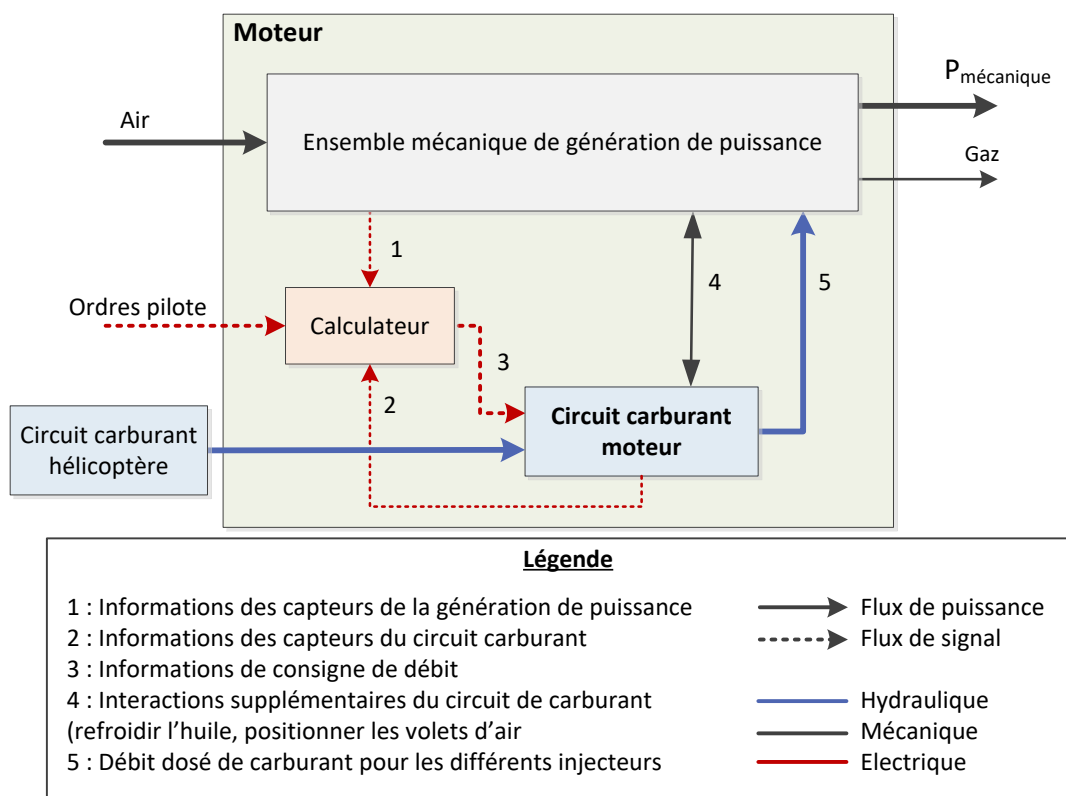


Figure 6 – Rôle du circuit carburant au sein du moteur

² Sur certains hélicoptères légers et motorisés par des moteurs à piston, le réservoir peut se trouver au-dessus du moteur. C'est le cas par exemple du Bell 47 ou du Robinson R22. Les seuls hélicoptères à turbomoteur dont le réservoir se trouve au-dessus du moteur sont en fait d'ancien hélicoptères équipés de moteurs à piston qui ont été re-motorisés par des turbomoteurs. Etant donné que nous nous intéresserons au circuit carburant d'un turbomoteur, nous pourrions considérer que dans le cadre de notre étude, le réservoir est toujours situé en dessous du moteur.

Comme on peut le voir sur la Figure 6, le circuit d'approvisionnement en carburant reliant le(s) réservoir(s) de l'hélicoptère à la chambre de combustion du moteur est séparé en deux. On trouve d'une part le « circuit carburant hélicoptère » de responsabilité hélicoptériste, et le « circuit carburant moteur³ » de responsabilité motoriste. Selon les appareils, le circuit carburant hélicoptère peut prendre différentes formes. Il peut s'agir d'un simple réservoir, comme d'un système hydraulique comportant plusieurs réservoirs, des pompes et des clapets.

D'un point de vue externe, le système carburant peut être décomposé selon les deux fonctions devant être réalisées pour tous les moteurs :

- **Déplacer le carburant** : Il s'agit d'apporter à la chambre de combustion, le carburant reçu depuis le circuit carburant hélicoptère. Comme nous l'avons vu précédemment, le réservoir est situé en dessous du moteur. Selon les fonctionnalités et performances des systèmes carburant hélicoptère, il peut être demandé au circuit carburant moteur :
 - o D'être auto-amorçant : dans le cas où la canalisation reliant le moteur au réservoir est vidée du carburant, le circuit carburant doit être capable d'aspirer l'air pour faire remonter le carburant jusqu'au moteur. C'est ce qui se passe lorsque l'on utilise une paille pour boire : il faut tout d'abord aspirer l'air pour faire remonter le liquide.
 - o D'avoir une capacité d'aspiration suffisante. Il s'agit du niveau de pression minimal admissible à l'entrée du circuit carburant.
- **Doser le carburant selon les différentes familles d'injecteurs** : Les moteurs Safran Helicopter Engines peuvent comporter jusqu'à 3 familles d'injecteurs :
 - o Les **injecteurs de démarrage**, utilisés pour l'allumage de la chambre de combustion. Ils permettent d'avoir une bonne pulvérisation du carburant avant même que le moteur n'ait démarré. Ils sont relativement peu perméables⁴ et doivent être alimentés avec une pression suffisante pour fonctionner correctement.
 - o Les **injecteurs principaux**, utilisés après l'allumage de la chambre de combustion. Ces injecteurs permettent d'avoir une bonne pulvérisation une fois que le moteur est lancé. En effet, ils utilisent la turbulence liée aux mouvements d'airs dans la chambre de combustion pour effectuer la pulvérisation. Ceci leur permet d'être relativement perméables.
 - o Les **injecteurs privilégiés**, il s'agit d'un petit groupe d'injecteurs principaux pouvant être suralimentés en cas de manœuvre de forte décélération du moteur. Ils permettent d'augmenter la marge à l'extinction de la chambre de combustion par soufflage.

et trois fonctions optionnelles (c'est-à-dire selon les types de moteur) :

- **Refroidir l'huile** : la capacité thermique du carburant peut être utilisée pour refroidir l'huile moteur. En effet, en plus de lubrifier le moteur, l'huile collecte une partie de la chaleur produite au sein du moteur. Elle peut donc être considérée comme un véritable liquide de refroidissement du moteur, qu'il refroidir à son tour.
- **Positionner les géométries variables (GV)** : le carburant pressurisé est utilisé pour alimenter en puissance les actionneurs servant à positionner des systèmes de GV du moteur, par exemple les aubes de prérotation du stator.
- **Alimenter des servitudes hydrauliques** : pour les applications avion, le carburant peut être renvoyé vers le système carburant aéronef pour alimenter des systèmes hydrauliques. Il peut s'agir par exemple de pompes à jet, utilisées pour déplacer le carburant des différents réservoirs de l'appareil.

I.A.4. Le système carburant chez Safran Helicopter Engines

Le système carburant générique de Safran Helicopter Engines est composé de quatre systèmes principaux (voir Figure 7) :

- Un système de pompage fournissant au système de dosage un débit carburant toujours

³ Ce circuit étant notre sujet d'étude, nous le nommerons simplement « circuit carburant » ou « système carburant » dans la suite du manuscrit.

⁴ La perméabilité d'un composant est la grandeur qui lie le débit de fluide à la différence de pression à ses bornes. C'est l'inverse de la résistance hydraulique.

- supérieur au besoin de la chambre de combustion,
- Un système de filtration principal qui protège de la pollution les équipements en aval.
- Un système de dosage fournissant le débit carburant strictement nécessaire à la chambre de combustion.
- Un système de répartition du débit carburant dosé aux différents injecteurs de la chambre de combustion. Les stratégies de répartition sont liées aux besoins de la chambre de combustion en fonction de ses phases d'opération.

Circuit Carburant

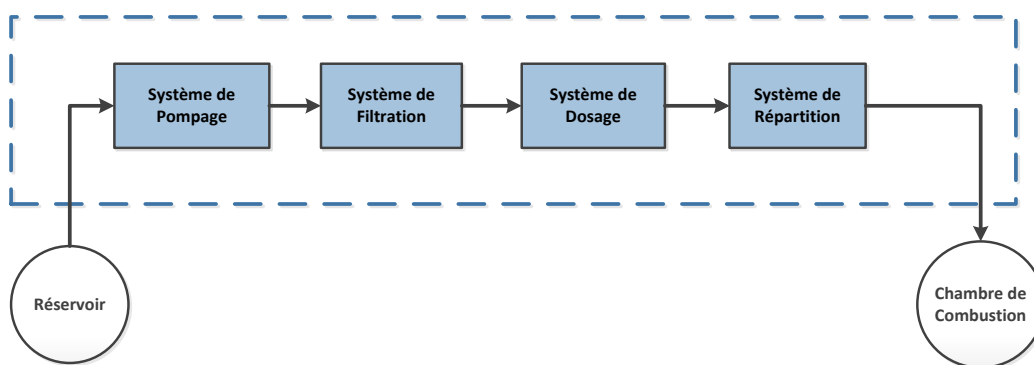


Figure 7 - Architecture circuit carburant générique

Historiquement, les nouvelles fonctionnalités sont intégrées au système carburant par l'ajout d'un système dédié, comme nous l'avons représenté en Figure 8. On parle alors d'innovation incrémentale. Les systèmes dédiés peuvent être :

- Un système d'amorçage permettant au moteur de démarrer de manière autonome en toute situation
- Un système de réchauffage carburant permettant au moteur de fonctionner à des températures de carburant au niveau du réservoir plus basses
- Un système d'actionnement de géométries variables (GV). Il s'agit de positionner les parties mobiles du moteur pour en optimiser le point de fonctionnement. L'idée est d'utiliser le carburant déjà sous pression pour alimenter les actionneurs en charge de cette tâche de positionner des GV.
- Un système de refroidissement de l'huile. On utilise l'opportunité d'avoir du carburant plus froid que l'huile pour transférer la chaleur de l'huile au carburant.
- Un système de purge des injecteurs lorsqu'ils ne sont plus alimentés, permettant d'en améliorer la fiabilité.

Circuit Carburant

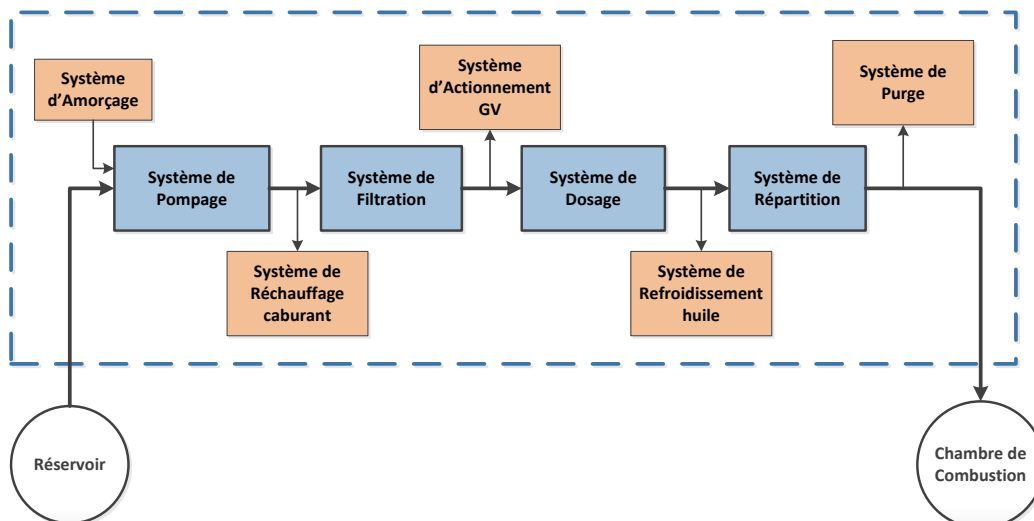


Figure 8 - Ajout incrémental de fonctionnalités au circuit carburant

Cette démarche d'innovation incrémentale est courante dans le milieu industriel car elle permet de répondre à de nouveaux besoins en se basant sur des systèmes carburant déjà existants (et donc certifiés et matures). La prise de risque se limite donc uniquement au système que l'on ajoute. Par conséquent, les systèmes carburant obtenus ont des architectures globalement similaires.

I.A.5. De l'innovation incrémentale vers l'innovation de rupture

Le problème de cette approche incrémentale de l'innovation est que l'amélioration des performances du système se fait au détriment de la capacité du système à s'améliorer (que nous appellerons marge fonctionnelle). C'est ce mécanisme que nous avons représenté en Figure 9. En procédant par innovation incrémentale entre l'état A et l'état B, on augmente bien la performance du système, tout en diminuant très significativement sa marge fonctionnelle. Pour rétablir cette capacité à s'améliorer, il est alors nécessaire d'avoir recours à l'innovation de rupture. Il s'agit de concevoir le système d'une manière totalement différente de ce qui est fait jusque-là. Comme le soulignent les auteurs de (Norman & Verganti 2014), le résultat initial d'un processus d'innovation de rupture est souvent moins performant et optimisé que le système traditionnel. C'est ce que nous avons illustré par le passage de B à C dans la Figure 9. C'est alors que l'innovation incrémentale reprend du service pour améliorer et optimiser ce nouveau concept. C'est à ce moment-là que l'intérêt de l'innovation de rupture est avéré car ce changement de concept permet d'obtenir un système nativement mieux adapté aux nouveaux besoins.

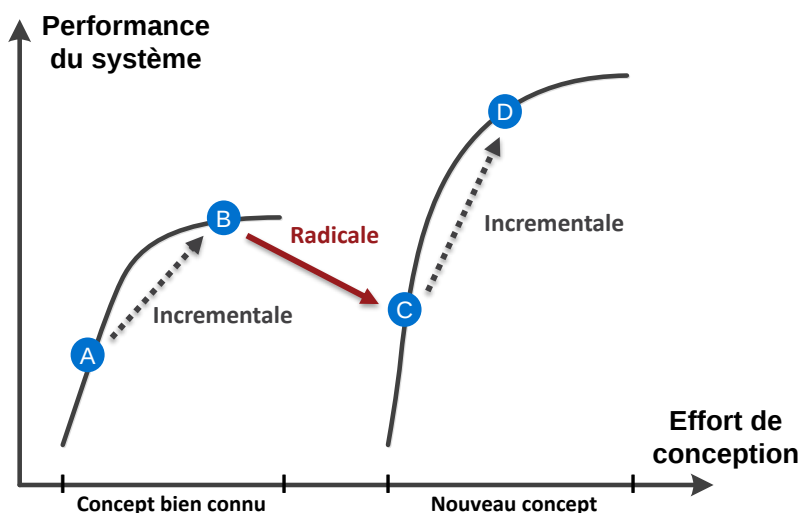


Figure 9 - Les mécanismes de l'innovation incrémentale et de rupture (inspiré de (Norman & Verganti 2014))

I.B. Contexte laboratoire

Ces travaux s'intègrent dans la thématique de recherche de l'axe Ingénierie des Systèmes et Microsystèmes (ISM) du groupe Modélisation des Systèmes et Microsystèmes Mécaniques de l'Institut Clément Ader (Toulouse). Cet axe s'intéresse en effet à la conception en phase préliminaire de systèmes mécaniques, en particulier dans le domaine aéronautique (Fraj 2014; Liscouët-Hanke 2008; Liscouët 2010). Les travaux de notre thèse sont également le fruit d'une collaboration étroite et durable entre Safran Helicopter Engines et l'Institut Clément Ader depuis 2005 au cours de projets européens (ADVACT 2005 « Advanced Actuation Concepts to provide a step change in Technology used in future aeroengine control systems ») ou nationaux FUI (Syrena 2011 « Système de Régulation Nouvelles Architectures »).

II. Particularité des travaux de thèse

II.A. Spécificités du cas d'étude

Le but de nos travaux a été de proposer une méthodologie d'étude de concepts d'architectures fortement innovants afin de sélectionner les concepts les plus prometteurs, pour un cahier des charges donné. Cette méthode a été pensée et appliquée dans le cadre de l'architecture d'un circuit carburant de moteur d'hélicoptère, dans l'entreprise Safran Helicopter Engines. Ceci étant dit, un certain nombre de spécificités se dégagent de nos travaux. Dans un souci de réutilisation de nos travaux dans des applications similaires, nous exposons dans ce paragraphe les spécificités de notre cas d'étude :

- **Une approche d'innovation de rupture** : notre méthodologie a été pensée dans le but de proposer des solutions fortement innovantes. Ceci nous a poussé à débiter nos travaux de recherche dès l'expression des besoins, pour ensuite proposer et sélectionner les solutions fortement innovantes.
- **Une approche conceptuelle** : nos travaux se placent en phase préliminaire de la conception du système. Nous traiterons de la conception d'architectures, en tant qu'assemblage de sous-systèmes en interaction les uns avec les autres, et avec leur environnement. Nos travaux ne traitent pas de dimensionnement de ces sous-systèmes ni de leur conception, mais se focalisent sur leur sélection et leur organisation.
- **Une approche systémique** : Nos travaux sont basés sur une approche d'ingénierie système. Ainsi, les différentes parties prenantes sont représentées dans les critères d'évaluation des concepts. Ceci implique un nombre de critères relativement grand, ainsi que la présence de critères non-quantifiables.
- **Une mise en œuvre sur un système multiphysique de transformation de puissance** : le système carburant d'un moteur d'hélicoptère est un système mélangeant les domaines de l'hydraulique, la mécanique, l'électrique et la thermique. Il s'agit également d'un système de transformation de puissance, permettant de déplacer et pressuriser du carburant.
- **Une mise en œuvre industrielle** : Notre approche doit pouvoir être implémentée dans un contexte industriel où l'efficacité est maître-mot. Ainsi, la méthodologie proposée doit répondre à un certain nombre de contraintes :
 - o **Maitrise du temps de mise en œuvre**. Ce point est primordial dans une approche industrielle d'un point de vue coût et délais. La méthodologie proposée étant hautement collaborative, il est souvent nécessaire de réunir des experts de plusieurs domaines. Ceci, en plus de générer du délai du fait de la relative difficulté à trouver un créneau commun, est source de coût en termes d'utilisation d'heures de travail de personnels.
 - o **Facilité d'appropriation** par des participants non-experts des méthodologies de spécification, génération et sélection de concepts. Cet aspect est important car les ingénieurs ne pourront avoir confiance en une méthode dont ils ne peuvent pas comprendre les rouages. On pensera par exemple aux méthodes d'aide à la décision multicritère, qui seront abordées au Chapitre 3 et qui peuvent être particulièrement complexes à appréhender.

Par voie de conséquence, nos travaux ont été basés sur l'évaluation qualitative de concepts. En effet les aspects d'innovation de rupture et d'approche préliminaire impliquent d'avoir à traiter un grand nombre de concepts fondamentalement différents de ceux classiquement utilisés au sein de l'entreprise. La quantification des performances de ces nouveaux concepts vis-à-vis des critères d'évaluation nécessiterait une modélisation ou des essais spécifiques. Ces moyens spécifiques ne peuvent être mis en œuvre dans nos travaux d'étude conceptuelle du fait du nombre important de nouveaux concepts à évaluer.

Les différentes caractéristiques de notre cas d'étude, présentées dans ce paragraphe, ont guidé nos travaux de recherche et les choix méthodologiques qui y ont été faits.

II.B. Positionnement vis-à-vis des travaux existants

Nos travaux de thèse se trouvent à la frontière de deux domaines de la littérature scientifique : la conception préliminaire d'une part, et l'innovation de rupture d'autre part. Lors de notre recherche bibliographique, nous n'avons collecté que très peu de contributions combinant simultanément ces deux aspects. On peut néanmoins s'en approcher en passant par l'un ou l'autre des thèmes.

« Innovation de rupture » dans les travaux de « Conception préliminaire »

Dans les travaux traitant de conception préliminaire, l'accent est rarement mis sur l'innovation. On trouve les travaux de (Moullec 2014) où l'aspect innovant des concepts proposés est principalement représenté par un nombre important d'architectures à sélectionner. Ainsi, les travaux de conception préliminaire sont souvent focalisés sur les étapes de génération et évaluation des concepts, sans prendre en compte l'étape d'analyse du besoin. La génération des architectures y est alors traitée de manière systématique, sans considérer d'apport de créativité. C'est notamment le cas des travaux de (Fraj 2014; Liscouët 2010; Moullec 2014; Biltgen & Mavris 2007a; Engler et al. 2007; Craisse et al. 2016). Les aspects d'analyse du besoin sont traités avec la démarche de conception dans des ouvrages de référence tels que (Pahl et al. 2007; Ulrich & Eppinger 2012). Ils apportent un cadre structurant ainsi une approche intégrée d'analyse des besoins, génération et sélection de solutions. Cependant, les aspects d'innovation sont abordés mais sans proposer une méthodologie spécifique. Dans cette catégorie de la littérature dédiée à la conception préliminaire, les travaux de recherche sont très majoritairement tournés vers une évaluation quantitative des performances, basée sur les modèles (Fraj 2014; Moullec 2014; Kirby 2001; Liscouët 2010). Les approches basées sur une évaluation qualitative des performances sont en revanche marginales, et concernent généralement des systèmes où l'appréciation subjective du client a une part importante. C'est le cas notamment des travaux de (Mammeri 2013) qui traitent de l'évaluation du confort dans les trains.

« Conception préliminaire » dans les travaux d'« Innovation de rupture »

La plupart des travaux traitant d'innovation de rupture, ont une approche par l'organisation de l'entreprise (Felk 2011; Arnoux 2013) ou bien une approche orientée vers les besoins et le marché (Yannou et al. 2018; Buisine et al. 2017). Dans ce dernier cas, l'approche s'intègre dans une optique de conception préliminaire par le biais de l'analyse des besoins. Ces travaux ne proposent cependant pas de méthodologie pour la sélection des concepts les plus pertinents pour une situation donnée.

De ce fait, les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit proposent une approche originale de l'étude conceptuelle d'architecture de systèmes de transformation de puissance dans le sens où ils visent à combiner judicieusement deux domaines jusqu'alors disjoints : la conception préliminaire et l'innovation de rupture.

CHAPITRE 1 - Ingénierie des Besoins et des Exigences

Introduction

L'ingénierie des besoins et des exigences constitue la première étape du processus d'ingénierie d'un système. Lorsque le système à faire est fortement innovant, il s'agit d'une étape cruciale pour permettre la créativité en phase de conception. L'objectif est, en effet, de donner une description précise et complète du système à faire tel qu'il devra se comporter du point de vue de ses parties prenantes, sans présupposer de la solution. Ainsi, il est question dans ce chapitre de poser, de manière complète et non ambiguë, le problème d'ingénierie à résoudre.

Remarque préliminaire

Il est d'usage en ingénierie des besoins ((Fiorèse & Meinadier 2012; ISO/IEC/IEEE 2015; Liu 2016; Walden et al. 2015)) de distinguer :

- Les attentes ou besoins fonctionnels : qui déterminent ce que le système doit faire
- Les contraintes : qui engendrent une limitation contraignant la conception du système.

Dans la suite du document, nous ne ferons pas de distinction entre attentes et contraintes. Nous avons choisi de regrouper les attentes et contraintes sous l'appellation « besoins ». En effet, les contraintes et attentes doivent être indifféremment satisfaites par le système à faire. Ainsi, pourquoi passer du temps et de l'énergie à déterminer si tel ou tel service relève de l'attente ou du besoin ? En effet, étant donné qu'il est parfois difficile de faire la distinction entre attente et contrainte, le débat peut être long. *Considérons par exemple le cas d'un moteur automobile. Un besoin de type « Etre capable de détecter une fuite d'huile », relève-t-il de l'attente ou de la contrainte ? Certains diront qu'il s'agit d'une contrainte car la détection des fuites n'est pas une attente opérationnelle de l'utilisateur du moteur. D'autres diront que dans le contexte actuel d'évolution des services rendus à l'utilisateur, la détection de fuite en tant que dysfonctionnement fait partie des attentes que l'utilisateur a à l'égard du moteur. Et pourtant, qu'il s'agisse d'une attente ou d'une contrainte, l'exigence « Etre capable de détecter une fuite d'huile » devra être satisfaite.*

Ainsi, pour éviter de longs débats sans grande valeur ajoutée pour la suite de la démarche d'IS, nous utiliserons donc le terme « besoin » qui réfèrera aussi bien à des attentes qu'à des contraintes.

I. Présentation de l'ingénierie des besoins et des exigences

I.A. Enjeux de l'ingénierie des besoins et des exigences

I.A.1. Distinction entre besoin et exigences

Avant toutes choses, il convient de faire la distinction entre besoins et exigences :

- Les **besoins** désignent les attentes des parties prenantes du système à faire (utilisateur, exploitant, organisme législateur, acquéreur, etc.). Il s'agit donc de services ou limitations que ces parties prenantes veulent voir réalisés ou respectés par le système à faire tout au long de son cycle de vie.
- Les **exigences** relèvent quant à elles de la formalisation du besoin en un problème à résoudre par le concepteur (Fiorèse & Meinadier 2012). Les exigences sont donc une expression quantifiée et exhaustive des besoins des parties prenantes du système à faire.

I.A.1.a) *Recueil des besoins*

Dans une vision d'IS, le recueil du besoin constitue la première étape du processus de conception d'un système. Il s'agit de recueillir les attentes des parties prenantes du système à faire (utilisateur, exploitant, organisme législateur, acquéreur, etc.).

Plus qu'une activité de collecte d'informations, la spécification de besoin est un exercice de communication qui doit permettre aux parties prenantes et le MOE de se mettre d'accord sur les besoins auxquels ils devront répondre. Il s'agit de se mettre d'accord sur un vocabulaire commun qui permette à des individus issus de différentes disciplines de partager des concepts, et ainsi éviter les incompréhensions (Peugeot 2014).

I.A.1.b) *Ingénierie des exigences*

L'activité d'ingénierie des exigences intervient juste après la phase de recueil des besoins. Tout comme dans cette dernière phase, le système à faire est considéré avec un regard extérieur. Le but de l'ingénierie des exigences est de définir et maintenir à jour la définition du problème d'ingénierie à résoudre par le concepteur du système. Il s'agit dans un premier temps de formaliser et de quantifier le besoin exprimé en un problème complet et cohérent (Fiorèse & Meinadier 2012). Dans un second temps, l'ingénierie des exigences consiste à analyser, valider et faire évoluer l'ensemble des exigences relatives au système à faire (Konaté 2009).

I.A.2. Importance de l'ingénierie des besoins et des exigences

Diverses études, principalement menées dans le domaine de l'ingénierie logicielle, attestent de l'importance de l'ingénierie des besoins et exigences dans la phase de conception. Ainsi, la Figure 10 ci-dessous présente les résultats du rapport CHAOS (The Standish Group 1994) du groupe Standish de 1994. On constate ainsi que la spécification des besoins et exigences est un facteur de succès pour 40% des cas et un facteur d'échec pour 48% des cas.

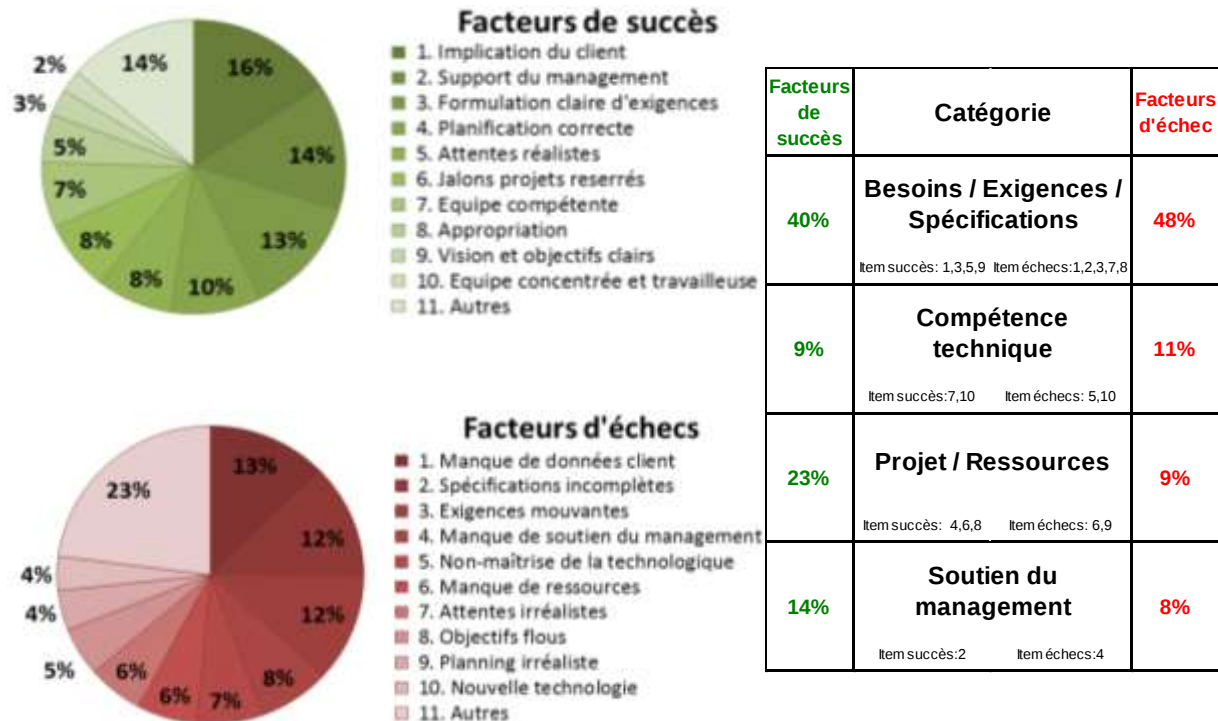


Figure 10 - Facteurs d'échec et de succès des projets informatiques d'après le Groupe Standish (d'après (The Standish Group 1994))

Martin & Leffinel confortent les conclusions du Standish groupe. En effet, comme on peut le voir en Figure 11 ci-dessous, la définition et gestion des besoins représente 56% des causes de défauts dans le domaine logiciel.

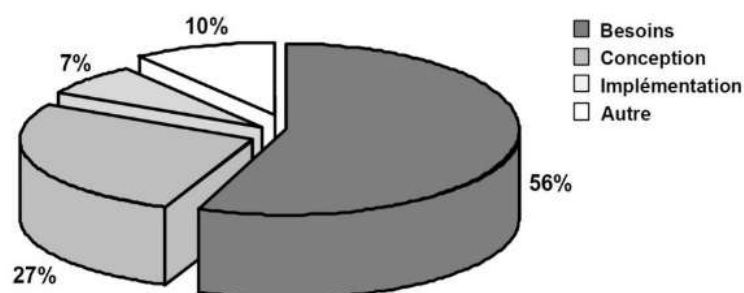


Figure 11 - Origine des défauts de qualité dans le domaine logiciel (source Martin & Leffinel), image : (Badreau & Boulanger 2014)

Ces travaux montrent qu'il est primordial pour la réussite d'un projet de conception de spécifier de manière précise et complète les besoins des parties prenantes vis-à-vis du système. C'est précisément le but des activités d'ingénierie des besoins et des exigences.

I.B. Etat de l'art en ingénierie des besoins et des exigences

I.B.1. Processus

Afin de donner un aperçu des processus mis en œuvre en ingénierie des besoins et des exigences, nous avons choisi de comparer les processus de quatre référentiels distincts. Pour ce faire, nous avons décidé de choisir un référentiel de référence afin d'y comparer les trois autres.

I.B.1.a) Présentation du processus de référence

(1) Justification du choix d'un processus de référence

Nous avons fait le choix de comparer les processus cités précédemment à la lumière de celui qui a été présenté par J. Konaté dans (Konaté 2009) (voir colonne de droite du). En effet, d'une la formulation générique de ce processus en 6 grandes étapes le rend facilement comparable aux autres. D'autre part, ces étapes représentent déjà un certain consensus en ingénierie des exigences car elles sont communes à des travaux plus anciens (Kotonya & Sommerville 1998; Nuseibeh & Easterbrook 2000; Coulin 2007). Il est également repris par (Badreau & Boulanger 2014) sans la phase de modélisation.

(2) Description du processus de référence

Dans sa thèse (Konaté 2009), J. Konaté propose un processus basé sur 6 phases distinctes : l'Elicitation, la Modélisation, l'Analyse, la Spécification, la Validation et la Gestion des exigences. Comme le montre la Figure 12, la phase de gestion des exigences est mise en œuvre parallèlement aux autres.

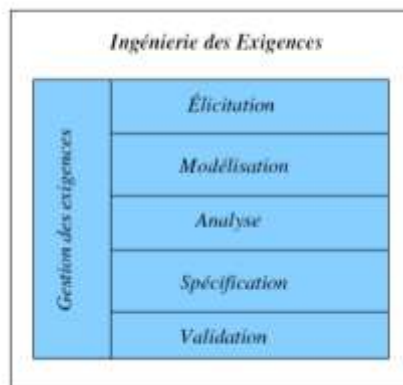


Figure 12 - Les phases de l'Ingénierie des exigences (issu de (Konaté 2009))

L'auteur donne alors une définition de chacune de ces phases :

- L'**Elicitation** des exigences consiste en la collecte, la capture, la découverte et le développement des exigences à partir de toutes les parties prenantes du système à faire.
- La **Modélisation** consiste en la représentation du problème dans le but d'avoir une meilleure compréhension du contexte ou de l'environnement du système à faire.
- L'**Analyse** consiste en l'examen et la compréhension des exigences élicitées et leur vérification en termes de clarté, complétude, exactitude et consistance.
- La **Spécification** consiste en la formalisation des exigences afin de les mettre à disposition des parties prenantes, et en particulier des parties prenantes impliquées dans l'activité de conception.
- La **Validation** consiste en la confirmation de la conformité des exigences aux besoins et désirs exprimés par les parties prenantes.
- La **Gestion** est exécutée tout au long de l'ingénierie des exigences. Elle inclut la traçabilité des exigences (suivi des modifications et suivi des allocations), le contrôle de version et de statut (allouée, non allouée par exemple) des exigences.

Le détail des différentes phases du processus est donné en Figure 13.

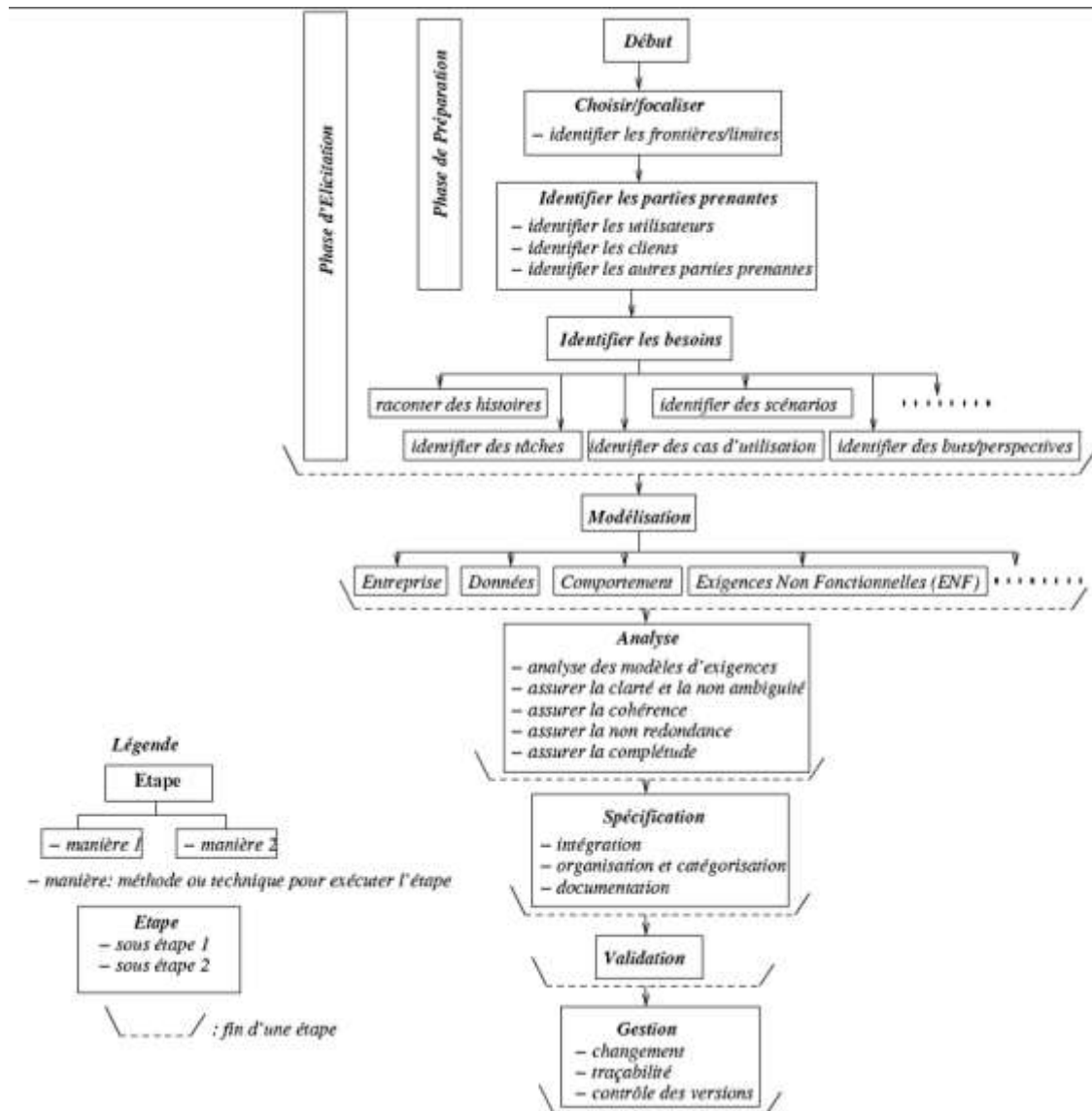


Figure 13 - Les phases du processus d'ingénierie des exigences et leurs différentes étapes (issu de (Konaté 2009))

I.B.1.b) Comparaison des différents référentiels

Nous avons choisi de représenter dans le Tableau 1 ci-dessous les grandes étapes des processus de passage des besoins aux exigences décrits dans :

- Deux référentiels d'ingénierie système génériques :
 - o Celui de l'AFIS porté par (Fiorèse & Meinadier 2012; Fanmuy 2014; Fanmuy 2012) (en première colonne)
 - o Celui de la norme ISO/IEC/IEEE 15288:2015 (ISO/IEC/IEEE 2015) (en 3^{ème} colonne).
- Deux travaux récents portant sur la spécification des exigences :
 - o « Une méthodologie de conception préliminaire basée sur SysML » par Mhenni et al. (Mhenni et al. 2014) (en 2^{ème} colonne)
 - o La thèse de J. Konaté « Approche système pour la conception d'une méthodologie pour l'élicitation collaborative des exigences » (Konaté 2009) (en dernière colonne).

La diversité de ces référentiels permet d'avoir une bonne vision des processus d'ingénierie des besoins et des exigences.

Tableau 1 - Comparaison de différents processus d'ingénierie des besoins et des exigences

AFIS (Fiorèse & Meinadier 2012; Fanmuy 2014; Fanmuy 2012)	Mhenni et al., 2014 (Mhenni et al. 2014)	ISO/IEC/IEEE 15288:2015 (ISO/IEC/IEEE 2015)	Konaté, 2009 (Konaté 2009)
Recueil des besoins des parties prenantes	Définition de la mission globale du système à faire	Identification des parties prenantes intéressées par le système	Elicitation
Analyse des fonctions rendues par le système	Identification du cycle de vie du système à faire	Définition du besoin des parties prenantes	
Caractérisation de l'environnement	Modélisation du contexte du système à faire	Définition du concept opérationnel et les autres concepts du cycle de vie du système	Modélisation
Formalisation des besoins (MOA)	Identification des interfaces externes	Transformation des besoins des parties prenantes en exigences	Analyse
Vérification et validation des exigences	Représentation des modes opérationnels utilisateur	Analyse des exigences des parties prenantes	
Hierarchisation et flexibilité des besoins	Modélisation des services rendus par le système à faire	Vérification et validation des exigences des parties prenantes	Spécification
Spécification des exigences système (MOE)	Représentation des scénarios fonctionnels	Définition des exigences système	
Vérification et validation des exigences	Spécification des exigences	Analyse des exigences systèmes	Validation
Gestion et traçabilité des exigences	Traçabilité des exigences	Vérification et validation des exigences systèmes	
		Gestion des besoins et exigences des parties prenantes	Gestion

Dans l'ensemble, les quatre référentiels partagent la plupart des étapes du processus d'ingénierie des exigences de (Konaté 2009).

On constate tout d'abord que tous les référentiels incluent l'activité de gestion et traçabilité des exigences. Cela démontre bien l'importance de cette étape dans la réussite du processus complet de conception du système à faire. En effet, nous avons vu en I.A.2 que le rapport du groupe Standish met en lumière une contribution de 13% à l'échec des projets de conception informatique au facteur « Spécifications incomplètes ».

On peut également remarquer que la phase de modélisation n'est pas mentionnée en dehors du processus de J. Konaté. Selon nous, ce constat s'explique dans tous les cas par le caractère implicite de cette étape de modélisation dans les trois autres processus. En particulier, cet aspect est prépondérant à chaque étape du processus de Mhenni et al., qui expose une méthodologie de conception préliminaire basée sur l'outil de modélisation SysML.

On constate également que dans les référentiels de l'AFIS et de la norme ISO/IEC/IEE 15288, la différence est faite entre :

- **Les exigences initiales / exigences des parties prenantes** : c'est à dire les exigences énoncées par le maître d'ouvrage (MOA) (acquéreur du système à faire, client)
- **Les exigences système** : c'est-à-dire les exigences énoncées par le maître d'œuvre (MOE) (entité en charge de la réalisation du système à faire).

Cette distinction est représentée en Figure 14.

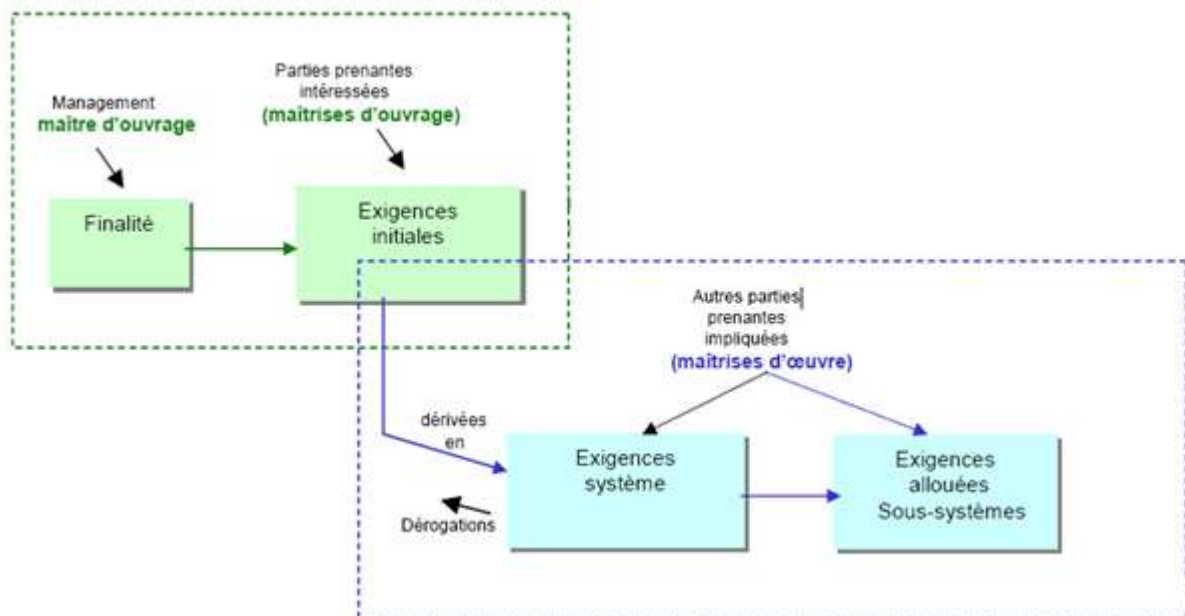


Figure 14 - Lien entre besoin, exigences initiales et exigences système (tirée de (Fiorèse & Meinadier 2012))

De manière très formelle, on peut considérer dans le cadre de la thèse que :

- les exigences initiales sont celles récoltées premièrement auprès des parties prenantes.
- Les exigences système sont celles qui ressortent des discussions ayant eu comme point de départ les exigences initiales.

Cependant, dans le cadre des travaux de thèse, les parties prenantes concernées par le système à faire (système carburant) sont essentiellement des membres de l'entreprise. Ainsi, la proximité relationnelle fait qu'il est possible de discuter des exigences initiales pour se mettre d'accord ensemble sur les exigences système. Cette mise au point est faite au cours de réunion de revue d'exigences. Ce mode de fonctionnement permet d'éviter un processus formel de dérivation des exigences système depuis les exigences initiales (Processus B de la Figure 15 ci-dessous).

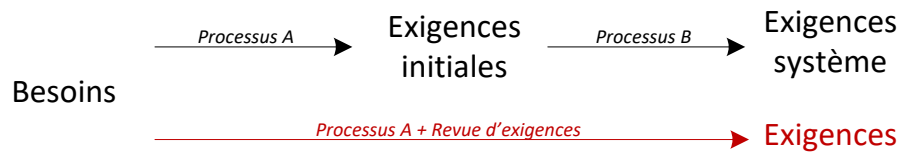


Figure 15 - Distinction entre les processus décrits dans (Fiorèse & Meinadier 2012) et (ISO/IEC/IEEE 2015) (en noir) et celui de la thèse (en rouge)

Ainsi, dans la suite de la thèse nous avons choisi de :

- Remplacer le processus formel de dérivation des exigences initiales en exigences système par une simple revue d'exigences avec les parties prenantes
- N'utiliser que le terme « exigences » pour désigner les exigences système ainsi obtenues.

Ces choix sont représentés en Figure 15 ci-dessus.

I.B.1.c) Processus retenu pour les travaux de thèse

Au cours de la thèse, l'ingénierie des besoins et des exigences a été menée selon le processus décrit dans le Tableau 2 ci-dessous. Globalement, il s'agit d'une synthèse entre les référentiels de l'AFIS et de la norme ISO/IEC/IEEE 15288.

Tableau 2 - Processus d'ingénierie des besoins et des exigences retenu pour la thèse

Processus retenu pour la thèse			
Elicitation	1	Identification des parties prenantes intéressées par le système	
	2	Définition du besoin des parties prenantes	
	3	Définition des contextes du cycle de vie du système	
Analyse	4	Transformation des besoins des parties prenantes en exigences	Spécification de besoin
	5	Analyse des exigences des parties prenantes	
	6	Validation des exigences	Spécification des exigences
		Gestion des exigences des parties prenantes	

Ce processus reprend les quatre grandes activités d'ingénierie des exigences présentées par les auteurs de (Badreau & Boulanger 2014), à savoir : éliciter, analyser, spécifier et valider.

Nous avons choisi de ne pas faire de l'activité de spécification une étape à part entière du processus car elle est effectivement incluse dans les activités déjà présentes. Ainsi, nous ne représentons pas dans le processus du Tableau 2 les documents de spécification sous la forme de livrable obtenu à la fin des phases d'élicitation du besoin et d'analyse des exigences.

De la même manière, l'activité de modélisation n'apparaît pas explicitement dans le processus proposé dans le cadre des travaux de thèse. Cependant, les techniques de modélisation sont utilisées dans le cadre de la Définition des contextes du cycle de vie du système et de la Transformation des besoins des parties prenantes en exigences (lignes 3 et 4 du Tableau 2 ci-dessus).

Conformément aux processus exposés dans le Tableau 1, l'activité de gestion des exigences a été ajoutée. Ainsi, les étapes du processus retenu pour les travaux de thèse sont les suivantes :

(1) Elicitation des besoins

- **Identification des parties prenantes intéressées par le système**

Il s'agit d'établir la liste exhaustive des parties prenantes qui ont un intérêt quelconque pour le système à faire. Il peut s'agir d'utilisateurs du système, d'exploitants, des équipes de production et de maintenance, d'organismes de réglementation, et de tout système qui interagit (échange d'énergie ou d'informations) avec le système à faire.

- **Définition du besoin des parties prenantes**

Cette étape inclut la collecte des différents besoins des parties prenantes précédemment identifiées. Il s'agit de mettre en place un référentiel complet des besoins opérationnels des parties prenantes. A l'issue de cette étape, les fonctions à remplir par le système à faire sont connues.

- **Définition des contextes opérationnels du cycle de vie du système**

Il s'agit de donner une description, du point de vue des parties prenantes, des contextes rencontrés par le système durant son cycle de vie. Ces contextes opérationnels peuvent être décrits de manière statique (état) ou bien de manière dynamique (enchaînement d'états) via l'introduction de scénarios opérationnels.

A l'issue de cette première étape, une **spécification de besoin** est produite. Elle contient les besoins exprimés par les parties prenantes ainsi que les contextes opérationnels identifiés. Cette spécification doit être validée par toutes les parties prenantes.

(2) Analyse du besoin et des exigences

- **Transformation des besoins des parties prenantes en exigences**

Il s'agit, pour chaque besoin qui doit être satisfait par le système à faire, de recueillir les exigences des parties prenantes. Ces exigences devront être cohérentes des contextes opérationnels identifiés précédemment.

- **Analyse des exigences**

Cette activité consiste en l'examen des exigences dans le but de les clarifier, supprimer d'éventuelles incohérences et s'assurer de leur complétude et unicité. Il s'agit de réunir les représentants des différentes parties prenantes du système à faire pour statuer sur les exigences à spécifier pour le système.

A l'issue de cette seconde étape, une **spécification des exigences** est produite. Elle contient la totalité des exigences applicables au système à faire. Cette spécification doit être validée par toutes les parties prenantes.

(3) Validation des exigences

Une fois la version finale de la spécification des exigences élaborée, elle est validée par toutes les parties prenantes. Cette validation est présentée de manière formelle dans le processus proposé car il s'agit de la dernière étape avant l'utilisation de ces exigences pour les activités de conception du système.

(4) Gestion des exigences des parties prenantes

Cette activité est une activité transverse qui doit être effectuée tout au long du processus d'ingénierie du système. Il s'agit de :

- Tenir à jour le référentiel d'exigences : il est primordial de disposer d'un référentiel d'exigences à jour tout au long du processus d'ingénierie du système à faire. En effet, il est inutile de concevoir un système répondant à des exigences obsolètes.
- Assurer la traçabilité des exigences : il s'agit d'assurer un lien entre les exigences de niveau système et les exigences de niveau sous-système, définies à l'issue des activités de conception. Cela permet de propager des modifications de spécification d'un niveau à un autre.

I.B.2. Bonnes pratiques

En termes de bonnes pratiques en ingénierie des besoins et des exigences, on trouve :

- L'AFIS, qui propose depuis fin 2008 un référentiel méthodologique d'ingénierie système. Il se compose à présent de :
 - o (Fiorèse & Meinadier 2012; Fanmuy 2014) pour le recueil des besoins
 - o (Fanmuy et al. 2001) et (Fanmuy 2012) pour l'ingénierie des exigences
 - o (Walden et al. 2015) servant de référentiel normatif international,
- La norme ISO/IEC/IEEE 29148 (ISO/IEC/IEEE 2011) dédiée à l'ingénierie des besoins et des exigences,
- Un ouvrage récent (Badreau & Boulanger 2014) propose également un référentiel méthodologique d'ingénierie des exigences pour les systèmes à forte composante logicielle.

I.B.2.a) Ingénierie des besoins

(1) Le recueil des besoins des parties prenantes

Il s'agit dans un premier temps d'identifier toutes les **parties prenantes**, c'est-à-dire les personnes ou entités concernées de près ou de loin par le système à faire.

Par exemple, dans le cas où le système à faire est un véhicule automobile, on trouverait parmi les parties prenantes : le conducteur, les passagers, le propriétaire mais également, le garagiste (aspect de maintenance), l'environnement extérieur (conditions climatiques, état de la route...) ainsi que la réglementation (normes anti-pollution, normes de sécurité...).

Il est important de dresser une liste exhaustive de ces parties prenantes de manière à ne pas omettre de besoins.

Dans un second temps, il s'agit de recueillir les **besoins de ces parties prenantes**. Pour ce faire, plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre :

- o Analyse de l'existant : prendre en compte les insatisfactions des parties prenantes vis-à-vis du système actuel
- o Sondage / Interview : discuter avec les représentants des parties prenantes de leur besoin
- o Analyse de textes réglementaires
- o Analyse des opportunités : Comme le souligne (Kossiakoff & Sweet 2003), du fait des progrès technologiques, le système à faire peut répondre à des besoins jusqu'alors non exprimés. *C'est le cas par exemple du smartphone. La technologie évoluant, il a été possible d'intégrer les fonctionnalités d'un ordinateur dans un téléphone mobile. Les fabricants ont donc exploité cette opportunité pour créer de nouveaux besoins (« Accéder à ses mails depuis son mobile », « Prendre des photos avec son mobile », etc.).* Notons toutefois que cette méthode ne peut être mise en place qu'en cours de conception puisqu'il faut avoir une expérience de l'état de l'art technologique.
- o Analyse des interfaces, afin d'assurer la cohérence vis-à-vis des autres systèmes de l'environnement

Durant les travaux de thèse, nous avons eu principalement recours à la méthode d'interview pour recueillir le besoin des parties prenantes internes à SHE. En effet, elle permet de discuter directement avec les représentants de chaque partie prenante.

Cette première étape du recueil des besoins opérationnels a été l'occasion de définir précisément les limites fonctionnelles du système à faire.

(2) Analyse des fonctions rendues par le système à faire

Il s'agit d'analyser les **services** rendus par le système à faire à ses parties prenantes. Ils sont caractérisés en termes de :

- Parties prenantes mises en relation
- Nature et caractéristiques des flux échangés entre le système et les parties prenantes
- Scénarios d'échange
- Transformations à réaliser
- Niveaux de services attendus (temps de réponse, sûreté de fonctionnement, performances, etc.)

Les enchainements de services rendus sont déterminés par les **scénarios opérationnels** du système à faire.

Dans un premier temps, nous avons fait le choix de ne pas nous préoccuper des aspects dynamiques de la vie du système (scénarios d'échanges, conditions de déclenchement, scénarios opérationnels, etc.).

Nous nous sommes en revanche focalisés sur le recueil d'une liste exhaustive des contextes opérationnels dans lequel peut opérer le système à faire. Il s'agit de prendre en compte le fait que le système à faire a un comportement différent selon les contextes opérationnels rencontrés. (Bonjour et al. 2009) Nous nous proposons de représenter l'intégration des contextes opérationnels dans le cycle de vie du système en Figure 16 ci-dessous.

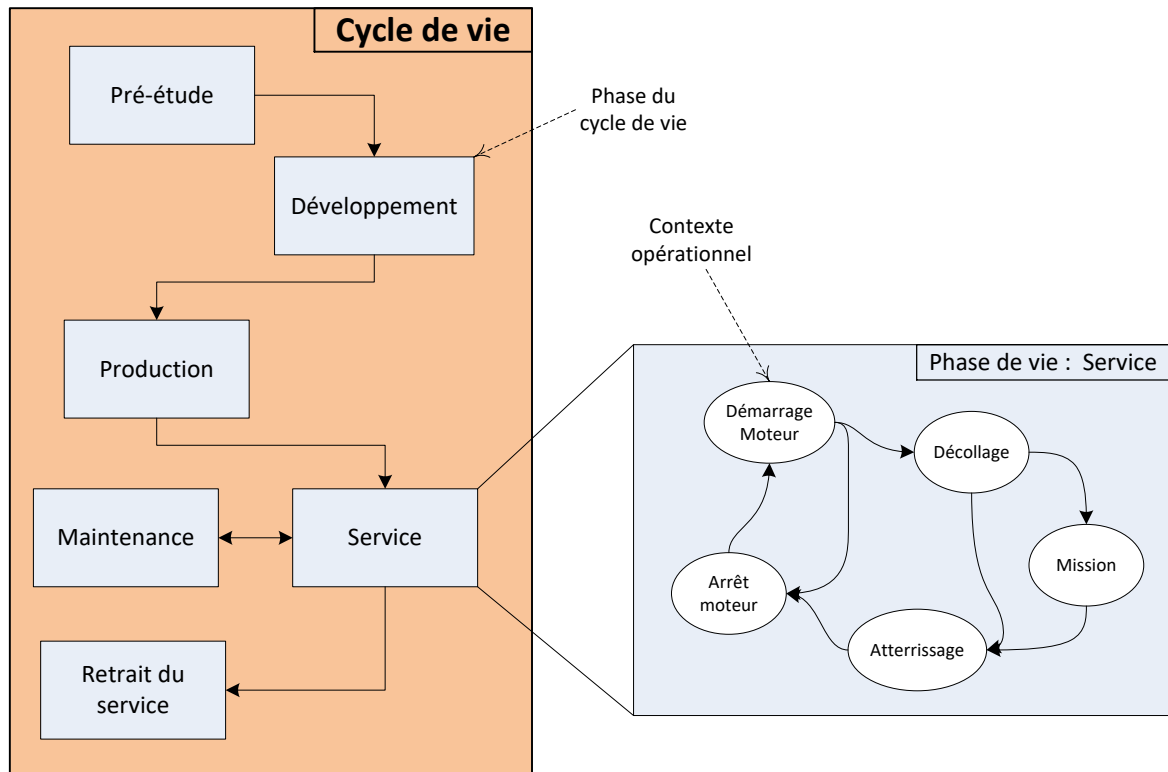


Figure 16 - Cycle de vie et exemple de contextes opérationnels pour un moteur d'hélicoptère

En effet, les besoins vis-à-vis du système à faire sont différents d'un contexte à l'autre.

Considérons, par exemple, le cas d'un ordinateur portable. En phase de service, dans un contexte opérationnel de transport, l'utilisateur exprime un besoin de compacité du système : « Etre facilement transportable ». Cependant, dans un contexte de visualisation d'un film, le besoin est d'avoir un grand écran. De plus, en phase de maintenance, le besoin est plutôt d'avoir un accès aisé à tous les composants. Dans cet exemple, le même système, vu dans des contextes distincts doit satisfaire des besoins différents et potentiellement antagonistes.

Ainsi, il est important d'avoir une vision claire des contextes opérationnels que le système à faire sera susceptible de rencontrer durant tout son cycle de vie. C'est pourquoi l'activité de recueil des besoins inclut également le recueil des contextes opérationnels du système à faire.

(3) Hiérarchisation et flexibilité des besoins

Il convient, dès la phase d'expression du besoin, de donner de la valeur aux services attendus par les parties prenantes. En effet, l'analyse de la valeur étant souvent exprimée sous la forme « utilité / coût », les parties prenantes ont la connaissance de la grandeur « utilité », alors qu'il sera du ressort du concepteur d'évaluer le « coût » associé au service rendu. Deux niveaux hiérarchiques sont retenus par les auteurs de (Fiorèse & Meinadier 2012). Nous avons choisi de les illustrer à partir de l'exemple d'une tondeuse à gazon électrique.

1- **Exigé** : besoins ou exigences obligatoires pour que le système à faire réponde à sa finalité.

« La tondeuse ne doit pas blesser (électrocution, coupure,...) l'utilisateur ou tout autre

personne présent pendant son utilisation. »

- 2- **Très souhaité** : besoins ou exigences non obligatoires mais fortement avantageux ou différentiant vis-à-vis de la concurrence

« La tondeuse ne doit pas émettre plus de x dB. »

Dans le contexte d'innovation de nos travaux, nous avons ajouté un troisième niveau hiérarchique :

- 3- **Nice to have** : besoins ou exigences non obligatoires, mais qui peuvent être avantageux ou qui sont fortement novateurs

« La tondeuse peut tondre en totale autonomie. »

En complément de la hiérarchie introduite entre les différentes exigences, la notion de flexibilité est introduite pour en évaluer les différents niveaux de performances. Il s'agit de déterminer les niveaux de performance jugés :

- Impératif : leur non satisfaction entrainerait l'incapacité à réaliser la mission concernée
« La tondeuse ne doit pas émettre plus de [niveau maximal autorisé par la réglementation] dB »
- Souhaité : leur satisfaction ou non sera jugé en fonction d'un taux d'échange représentant « le désagrément occasionné / le surcoût engendré ».
« La tondeuse ne doit pas émettre plus de [niveau1] dB » (avec [niveau 1] < [niveau maximal autorisé par la réglementation])

Synthèse

Il ressort de notre analyse que l'élicitation des besoins consiste à établir un ensemble cohérent entre **services** à rendre, **parties prenantes**, **scénarios** et **contextes** opérationnels. Les liens entre ces éléments sont décrits en Figure 17 ci-dessous.

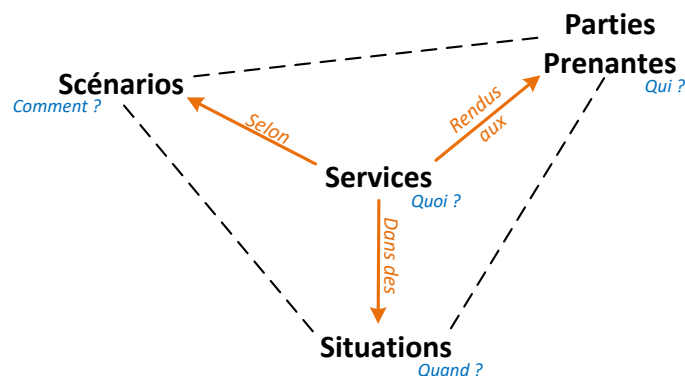


Figure 17 - Spécification d'un système à faire d'un point de vue externe

I.B.2.b) Ingénierie des exigences

Le besoin ainsi exprimé sert de point de départ à l'activité d'ingénierie des exigences. Comme nous l'avons représenté en Figure 18 ci-dessous, cette activité permet de faire le lien entre : (Fiorèse & Meinadier 2012)

- les Besoins : désirs exprimés par les parties prenantes vis-à-vis du système à faire,
- les Exigences système : traduction technique, rigoureuse et vérifiable des besoins exprimés par les parties prenantes,
- les Exigences sous-système : exigences déclinées aux sous-systèmes du système à faire à l'issue de la phase de conception de ce dernier.
- la Solution : le système à faire une fois réalisé, dont on vérifie qu'elle répond bien aux exigences.

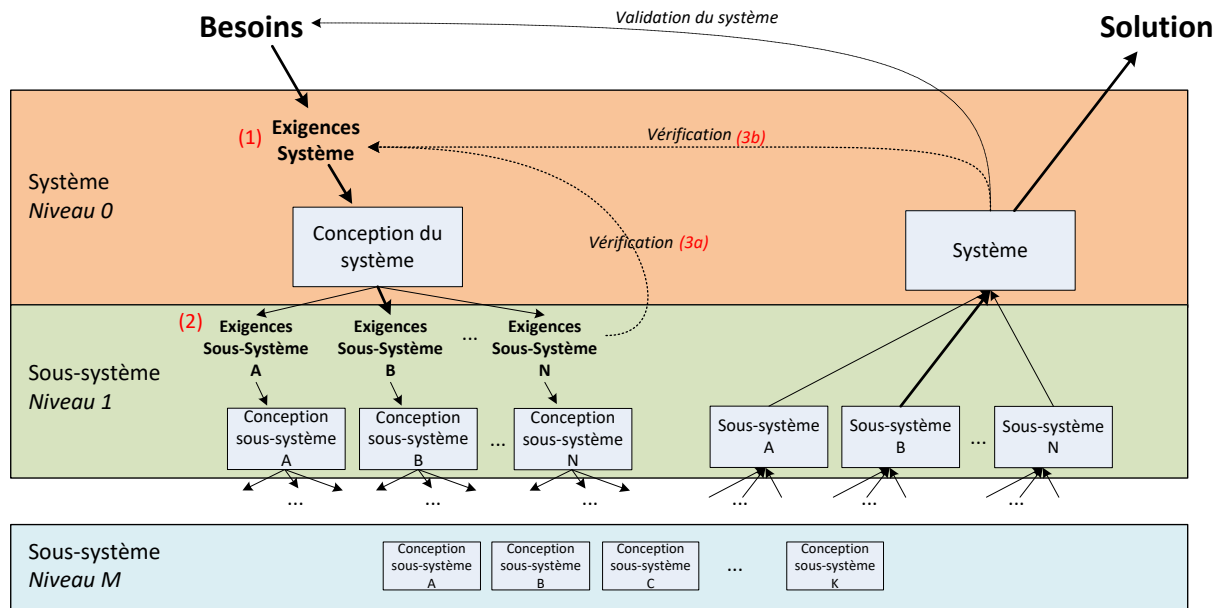


Figure 18 – L'ingénierie des exigences dans le cycle de conception d'un système (inspiré de (SAE 2010))

Les bonnes pratiques en ingénierie des exigences sont reprises dans le référentiel de l'AFIS par (Fanmuy 2012) :

(1) Définition des exigences système (1)

Il s'agit de définir un ensemble complet et cohérent d'exigences traduisant les besoins des parties prenantes. L'AFIS a fixé un ensemble de bonnes pratiques pour la rédaction d'exigences :

- ❖ Une exigence doit être **MUST** : (Fanmuy 2012; Badreau & Boulanger 2014; ISO/IEC/IEEE 2011)
 - **Mesurable** : une exigence doit pouvoir être vérifiée, et donc quantifiée
 - **Utile** : une exigence doit être strictement nécessaire. En effet, chaque exigence spécifiée aura un coût dans la suite de la phase de conception. Ce coût peut aller de la mise à jour et vérification de l'exigence à l'ajout d'une fonctionnalité ou d'un composant supplémentaire au système à faire.
 - **Simple** : une exigence doit pouvoir être comprise de la même manière et sans ambiguïté possible entre les différentes parties prenantes. Il ne doit y avoir qu'une seule interprétation possible de l'exigence. Pour se faire, les auteurs de (Fanmuy 2012) recommandent l'utilisation de :
 - Phrases simples
 - Une terminologie commune acceptée par les parties prenantes
 - **Traçable** : une exigence satisfait une demande amont et peut être allouée à un référentiel d'exigence en aval. Il convient donc d'en assurer la traçabilité.
- ❖ Une exigence ne doit pas être présentée sous la forme d'une solution ou d'un moyen, mais bien comme une demande de la part d'une partie prenante extérieure au système à faire.
- ❖ Une exigence doit être unique afin d'éviter toute confusion.
- ❖ Une exigence peut être exprimée sous la forme de :
 - Une phrase du type :
Quand <condition opérationnelle>, le système à faire doit <action> à <partie prenante>.
Cependant, de nombreuses autres formulations sont possibles comme le montrent les auteurs de (Mavin et al. 2009). Ils proposent différentes formulations en fonction du type d'exigence à formaliser (générique, déclenché par un évènement, comportement indésirable, exigence complexe, etc.).
 - Tout autre moyen permettant d'exprimer l'exigence de la manière la plus simple et non ambiguë possible (schéma, tableau, graphique, etc.).
- ❖ Comme le stipule (Badreau & Boulanger 2014), les exigences doivent être exprimées avec le bon niveau de granularité. Cela implique de ne pas exprimer d'exigences trop vagues (trop haut niveau) ou trop précises (trop bas niveau). *Considérons par exemple le cas d'un système véhicule automobile. Une exigence trop haut niveau serait « Transporter des passagers d'un point A à un point B » : elle est correcte mais n'apporte pas une information suffisamment précise à l'équipe de conception. A l'inverse, une exigence trop bas niveau serait « Le conducteur doit pouvoir tourner*

le volant en développant un effort de moins de 10 N.m» : cette exigence est trop détaillée et décrit une solution technique (contrôle de la direction via un volant).

Une fois les exigences spécifiées, c'est le début de la phase de conception du système à faire. Cependant, comme nous l'avons représenté en Figure 18 ci-dessus, l'activité d'ingénierie des exigences se poursuit encore après la conception du système.

(2) Allocation et définition des exigences sous-système (2)

Une fois les exigences spécifiées, la démarche de conception du système à faire doit finalement conduire à l'allocation de ces exigences de niveau système vers des exigences de niveau sous-système. Le but est de définir un ensemble cohérent et complet d'exigences sous-système, qui répondent aux exigences système. Ce lien d'allocation entre exigences système et sous-système est primordial car il permet la traçabilité des exigences. Elle permet, par exemple, en cas de suppression ou de modification d'une exigence système, de transmettre la modification aux exigences sous-système concernées.

(3) Vérification des exigences (3)

Comme nous l'avons vu précédemment, les exigences doivent être vérifiées et validées. Ces activités peuvent apparaître à plusieurs niveaux de la conception :

- Vérification des exigences de niveau système vis-à-vis des exigences de niveau sous-système (voir (3a) en Figure 18)
- Vérification des performances du système réalisé vis-à-vis des exigences système (voir (3b) en Figure 18).

Ainsi, il est important de prévoir le plus tôt possible la manière dont seront vérifiées et validées les exigences.

I.B.3. Outils et techniques

Comme l'expliquent les auteurs de (Badreau & Boulanger 2014), les exigences doivent être formulées de manière textuelle et peuvent être modélisées. Ils insistent particulièrement sur le fait que la modélisation des exigences ne peut pas remplacer leur formulation textuelle.

I.B.3.a) Outils de formulation textuelle des exigences

Il n'existe pas d'outil générique pour la formulation textuelle des exigences. Dans le cadre des travaux de thèse, nous avons choisi de synthétiser les exigences en utilisant le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 - Tableau de synthèse des exigences proposé dans le cadre de la thèse

ID	Exigence	Rationale	Tolérance	Vérification	Modes de fonctionnement concernés	Source
Partie Prenante 1						

Les exigences y sont présentées par partie prenante. Cela permet de conserver une vision externe du système à faire et de vérifier la consistance de la spécification de ladite partie prenante.

Ce tableau, a été élaboré suite à la mise en œuvre des bonnes pratiques décrites dans le paragraphe I.B.2. Il se compose de 8 colonnes :

- **ID** : Identifiant unique qui permet d'assurer l'identification de l'exigence
- **Exigence** : Enoncé textuel de l'exigence précédé d'un titre. Les exigences sont rédigées selon les préconisations de (Mavin et al. 2009).
- **Rationale** : Justification de l'exigence. Elle permet de comprendre comment les parties prenantes en sont arrivées à spécifier cette exigence.
- **Tolérance** : Niveau d'importance de l'exigence. Les niveaux d'importance retenus dans le cadre des travaux de thèse sont, conformément au paragraphe I.B.2.a)(3) Hiérarchisation et flexibilité des besoins : Exigé, Très souhaité, Nice to have.

- **Vérification** : Moyen mis en œuvre pour vérifier que l'exigence est bien satisfaite. Intégrer cette donnée dès la phase de spécification permet de garantir la testabilité des exigences.
- **Modes de fonctionnement concernés** : il s'agit de lister les modes de fonctionnement pendant lesquels l'exigence spécifiée est valable. Cela permet, d'un part, d'aboutir à une spécification précise de chaque mode de fonctionnement du système à faire. D'autre part, cette information permet de s'assurer que tous les modes de fonctionnement sont couverts par la spécification.
- **Source** : Document d'où est issue la spécification. Cela permet d'assurer une certaine traçabilité des exigences.

I.B.3.b) Outils de modélisation des exigences

Les exigences textuelles peuvent être complétées par des modèles afin d'en favoriser la compréhension par toutes les parties prenantes (Badreau & Boulanger 2014).

Ainsi, les auteurs de (Mhenni et al. 2014) proposent une méthodologie de conception de système mécatronique basée sur le langage de modélisation SysML. Cette méthodologie comprend une partie « Boite noire » qui correspond à la capture des besoins et exigences du système à faire. Nous proposons d'en représenter les 9 étapes dans le Tableau 3 ci-dessous

Tableau 4 – Méthodologie « Boite noire » de conception de système mécatronique basée sur SysML (d'après (Mhenni et al. 2014))

Etape	Description	Diagramme SysML utilisé	Apport de SysML
1 Définition de la mission globale du système à faire	Il s'agit de définir la fonction principale du système à faire.	Requirement diagram	Possibilité d'insérer des liens hiérarchiques entre les besoins exprimés.
2 Identification du cycle de vie du système à faire	Afin d'obtenir les besoins et exigences de manière exhaustive, toutes les phases du cycle de vie du système doivent être identifiées.	State Machine diagram (STM)	
3 Modélisation du contexte du système à faire	Il s'agit de définir les limites du système à faire pour discerner clairement ce qui est à l'intérieur de ce qui est à l'extérieur du système. Ainsi, pour chaque phase du cycle de vie, les parties prenantes seront représentées avec leurs interactions vis-à-vis du système à faire.	Block Definition diagram (BDD)	
4 Identification des interfaces externes	Il s'agit de définir plus précisément les interfaces externes entre le système à faire et les parties prenantes. Cela permet de bien maîtriser les interfaces, qui sont des points délicats de la conception système.	Internal Block diagram (IBD)	La cohérence est assurée avec les deux étapes précédentes : toute modification des interfaces externes sera propagée à tous les diagrammes.
5 Représentation des modes opérationnels utilisateur	Les modes opérationnels détaillent les usages du système à faire pendant une phase de vie donnée.	State Machine diagram (STM)	Lien entre les modes opérationnels et la phase du cycle de vie considérée.

6	Modélisation des services fournis par le système à faire	Pour chaque mode opérationnel, un inventaire est fait des services rendus aux parties prenantes par le système à faire.	Use Case diagram (UCD)	Chaque cas d'usage est lié au mode opérationnel duquel il dépend. Relations de dépendances instaurées entre cas d'usages et parties prenantes.
7	Représentation des scénarios fonctionnels	Pour chaque service (ou cas d'usage), il s'agit de représenter l'enchaînement séquentiel des fonctions réalisées par le système à faire.	Sequence diagram (SEQ)	
8	Spécification des exigences	Les informations déduites des étapes précédentes conduisent à la spécification des exigences du système à faire.	Requirement diagram	Possibilité de définir des liens entre les exigences : dérive de, raffine, inclus.
9	Traçabilité des exigences	Cette traçabilité permet d'avoir une bonne vision de l'impact de la modification d'un cas d'utilisation ou d'un contexte sur les exigences.	Requirement diagram	Des liens sont établis entre les exigences et : - Les cas d'usage - Les rôles - Les interfaces externes.

Indépendamment du langage SysML, il existe de nombreux outils logiciels d'ingénierie des exigences. Les auteurs de (Carrillo et al. 2012) nous proposent une liste de 38 de ces logiciels. D'après leur étude, l'apport d'un tel outil repose principalement sur :

- Le fait qu'ils constituent une base commune où sont rangées les exigences de tous les acteurs du projet
- La vérification automatique des champs non renseignés
- La gestion automatique des versions du référentiel d'exigences
- La gestion de la traçabilité entre exigences et exigences dérivées.

Etant donné le caractère particulier de notre étude : une seule personne rédige et met à jour les exigences, pas de contraintes fortes de traçabilité, nous avons décidé de ne pas recourir à l'utilisation d'un logiciel dédié à l'ingénierie des exigences.

I.C. Méthodologie proposée dans le cadre de la thèse

Cette première partie nous a permis de définir une méthodologie pour l'ingénierie des besoins et des exigences chez SHE. La méthodologie a été tirée de l'état de l'art en la matière, et a été adaptée à une mise en œuvre industrielle, et pour un système aéronautique fortement innovant.

	Processus proposé		Bonnes pratiques associées	Techniques et outils associés
Elicitation	1	Identification des parties prenantes intéressées par le système	Lister et ordonner toutes les personnes ou entités intéressées par le système à faire	- Interviews - Analyse du système existant - Visio (représentation graphique)
	2	Définition du besoin des parties prenantes	- Capturer les attentes des parties prenantes - Capturer les irritants du système actuel	- Interviews - Lecture de textes réglementaires
	3	Définition des contextes opérationnels du cycle de vie du système	Faire une liste complète des contextes opérationnels du cycle de vie du système	- Interviews - Visio (représentation graphique)
Analyse	4	Transformation des besoins des parties prenantes en exigences	Caractériser le besoin sous forme d'exigence MUST (mesurable, utile, simple, traçable)	Revue d'exigences avec les parties prenantes
	5	Analyse des exigences des parties prenantes	- Discuter des exigences avec les parties prenantes - Formuler selon l'état de l'art (Mavin et al. 2009)	Tableau proposé en I.B.3.a)
	6	Validation des exigences systèmes	- Assurer le caractère vérifiable des exigences - Valider les exigences avec les parties prenantes	- Tableau proposé en I.B.3.a) - Validation des exigences avec les parties prenantes
	Gestion des besoins et exigences des parties prenantes			

II. Analyse du retour d'expérience Safran Helicopter Engines

Ce chapitre traite du retour d'expérience chez Safran Helicopter Engines de la mise en œuvre de la méthodologie de recueil des besoins et des exigences décrite précédemment.

Dans tout le chapitre, le système à faire considéré sera le système carburant d'un moteur d'hélicoptère.

II.A. Elicitation du besoin

II.A.1. Définition du besoin des parties prenantes

La définition du besoin des parties prenantes a été l'étape principale de la phase d'élicitation des besoins. Il s'agit de capter ce que les parties prenantes décrites précédemment attendent du système à faire. Cette activité a également été l'occasion de mettre en valeur les difficultés rencontrées, qu'elles soient propres à Safran Helicopter Engines ou plus générales.

II.A.1.a) D'où vient le besoin ?

(1) Sources externes à SHE

Dans le contexte du système carburant de moteur d'hélicoptère, le besoin de l'utilisateur final est de « Voler », et ce quand il le veut, de manière sûre et respectueuse de l'environnement, tout en maîtrisant les coûts. Nous nous concentrerons dans ce paragraphe uniquement sur le besoin de « Voler ». Pour répondre à ce besoin, l'avionneur fait le choix de « Faire tourner les rotors » de son aéronef. Dès lors, « Faire tourner les rotors » est à la fois :

- la solution technique retenue par l'avionneur pour répondre au besoin de l'utilisateur final
- et le besoin de niveau inférieur auquel SHE devra répondre.

Selon la même logique, le besoin « Faire tourner les rotors » est traduit au niveau Safran Helicopter Engines par « Faire fonctionner une turbine à gaz ». Ce besoin est ensuite décliné au système carburant par « Fournir la bonne quantité de carburant à la chambre de combustion ». Il est proposé de représenter sous la Figure 19 les concepts décrits ci-dessus.

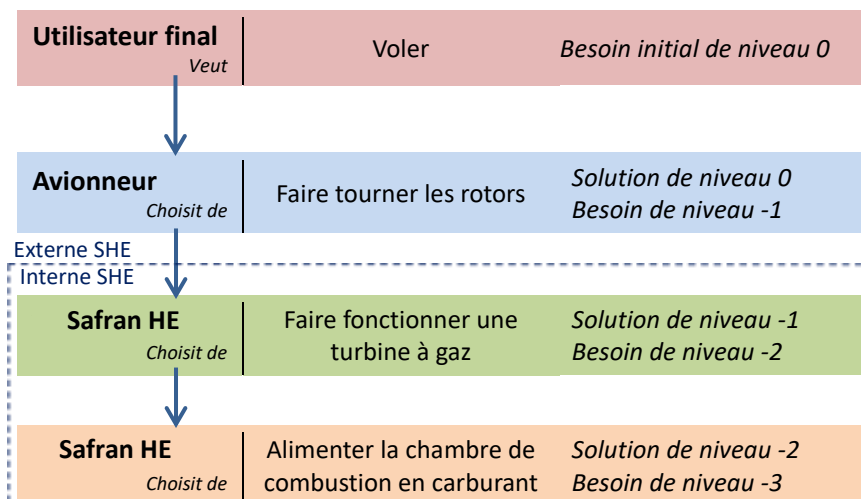


Figure 19 - Description macroscopique de la transmission du besoin depuis l'utilisateur final jusqu'au système carburant

Remarque Du fait des nombreux intermédiaires, il n'est pas toujours évident d'être au fait des nouveaux besoins des utilisateurs finaux.

(2) Sources internes à SHE

Chez SHE, la déclinaison du besoin exprimé par l'avionneur jusqu'à système carburant est conditionnée par la structure organisationnelle de l'entreprise. Nous proposons de représenter cette structure en Figure 20 ci-dessous.

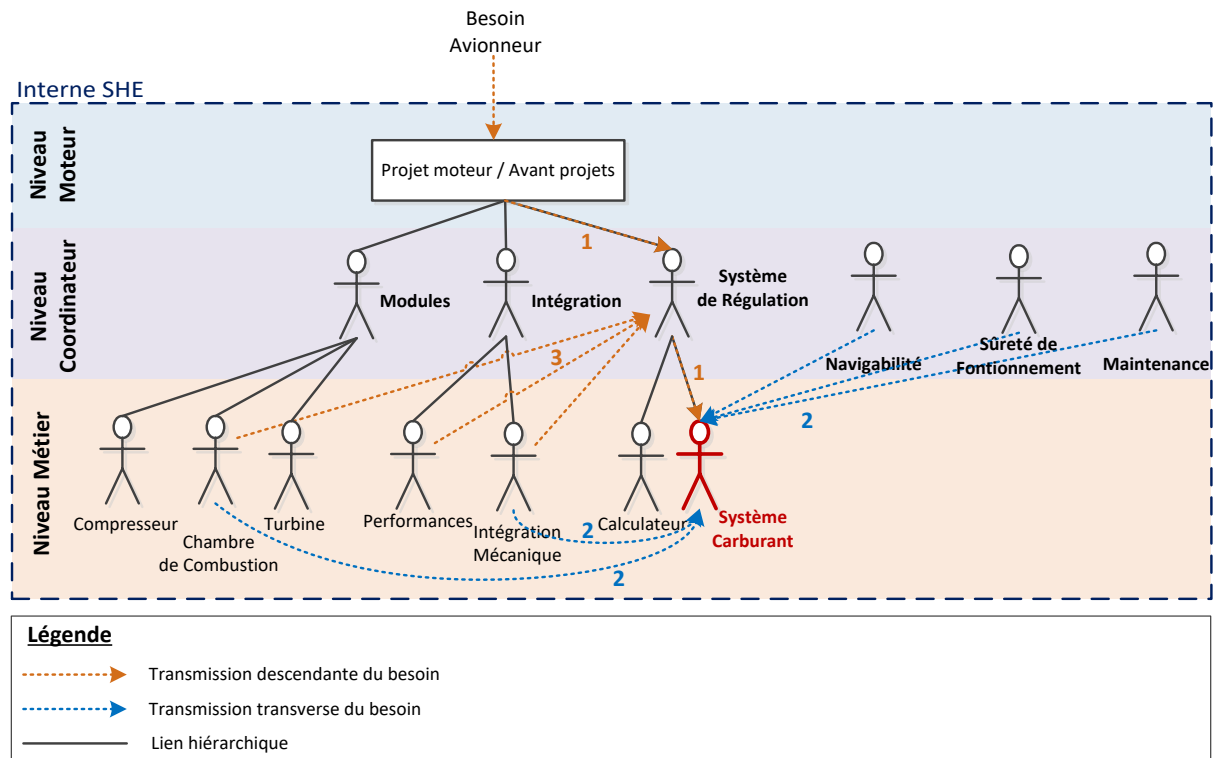


Figure 20 – Transmission du besoin en interne SHE

On peut voir sur la Figure 20 ci-dessus qu'il existe chez SHE deux mécanismes principaux de déclinaison du besoin avionneur vers le système carburant. Ainsi, il est possible de capter les besoins à travers :

1 – Une transmission descendante du besoin. Le besoin est décliné au fur et à mesure qu'il redescend dans la structure hiérarchique de l'entreprise (voir parcours 1 en orange sur la Figure 20). Ainsi dans cette configuration, le système de régulation est le seul à fournir le besoin au système carburant. Ainsi, le Système de Régulation a, dans ce cas, une activité de synthèse des besoins exprimés par les métiers pour ensuite les décliner vers le métier système carburant. Nous avons représenté cette transmission de besoin par le parcours 3 sur la Figure 20.

2 – Une transmission transverse du besoin. Le besoin est directement exprimé entre deux groupes métiers de même niveau hiérarchique dans la structure de l'entreprise (voir parcours 2 en bleu sur la Figure 20). Ainsi dans cette configuration, le besoin du système carburant est transmis par les différents métiers de l'entreprise (chambre de combustion, intégration mécanique par exemple).

Nous avons constaté que l'organisation structurelle de l'ingénierie chez SHE privilégie une transmission descendante des besoins (option 1). Ce mode de fonctionnement permet en effet aux systèmes de systèmes (Module, Intégration, Système de Régulation) de garder une vision globale des systèmes placés sous leur responsabilité. Ainsi ils peuvent être en mesure de décider si les efforts demandés au métier « répondeur » justifient la plus-value apportée au métier « demandeur », ou encore s'il serait moins coûteux à un autre métier « répondeur » de répondre à ce besoin. On peut alors faire le choix de faire porter ou non au système carburant certains besoins supplémentaires (refroidir l'huile, actionner les systèmes de GV par exemple). La prise de décision doit alors résulter d'une comparaison entre la capacité du système carburant à répondre à ces besoins, et la capacité des autres systèmes à y répondre. Nous proposons de représenter ce processus de prise de décision en Figure 21, dans le cas où le besoin à satisfaire est « Refroidir l'huile ».

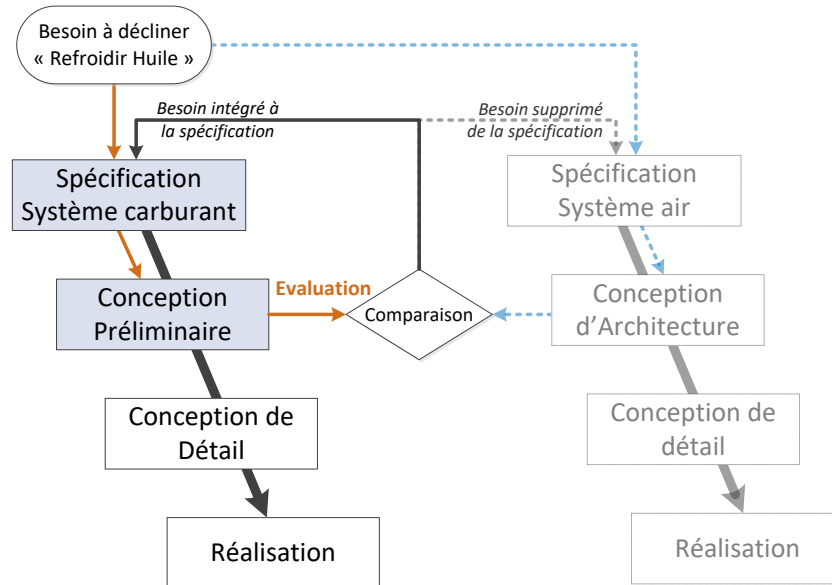


Figure 21 - Schéma du processus de décision du système en charge de répondre au besoin "Refroidir l'huile"

Dans le cas de notre exemple (Figure 21), les systèmes candidats à la satisfaction du besoin « Refroidir l'huile » sont le système carburant et le système d'air. La première étape consiste à introduire provisoirement ce besoin à la spécification de chacun des systèmes candidats. Ces derniers sont alors reconçus de manière préliminaire (aspects fonctionnels et conceptuels), ce qui permet d'évaluer leurs performances globales⁵ respectives. Cette évaluation permettra finalement de comparer les performances proposées par le système de carburant et le système d'air. Dès lors, la décision pourra être prise de faire porter le besoin « Refroidir l'huile » sur l'un ou l'autre des systèmes candidats. Dans notre exemple, c'est le système carburant a été jugé plus apte à satisfaire ce besoin. Il a donc été intégré à la spécification du système carburant et supprimé de celle du système d'air.

Ainsi, la définition même de la spécification de besoin du système carburant étant un processus itératif, nous avons jugé intéressant de construire la spécification la plus complète possible, c'est-à-dire d'y inclure les besoins pouvant être éventuellement satisfaits par d'autres systèmes. On pense notamment aux besoins de :

- Refroidir l'huile, pouvant être satisfait par le système d'air
- Positionner les géométries variables, pouvant être effectué par un système d'actionneur électrique.

Le travail d'évaluation des performances du système carburant en réponse à ces besoins fera l'objet du chapitre 3 de la thèse. Ce n'est qu'après cette évaluation que l'on pourra décider si le système carburant est le plus à même de répondre à ces besoins.

Complémentarité entre approche transverse et descendante

Comme nous l'avons vu, le processus de transmission descendante des besoins permet de prendre le recul nécessaire à une bonne allocation des besoins aux systèmes de niveau métier. Cependant dans le cadre de la thèse, il a également été impératif de mettre en place une transmission transverse des besoins (voir [option 2](#) de la Figure 20). En effet, cela a été l'occasion d'échanger directement avec les spécialistes des métiers qui émettent des besoins vis-à-vis du système carburant. Cette démarche nous a permis de discuter uniquement de besoin sans préjuger des solutions, ainsi que de faire ressortir des besoins jusqu'alors non formulés (ces deux difficultés majeures sont développées dans le paragraphe II.A.1.c) Biais cognitifs). A titre d'exemple, une discussion avec les spécialistes du métier chambre de combustion a permis de prendre en compte des besoins nouveaux qui n'avaient pas été exprimé formellement jusqu'à présent.

⁵ Dans cette phase, on s'intéresse bien aux performances globales des systèmes candidats, et non uniquement aux performances à la réponse du besoin « Refroidir l'huile ». En effet, il est possible que la prise en compte de ce nouveau besoin ne dégrade pas les performances du système aux autres besoins auxquels il répond. Par exemple, le fait d'introduire un échangeur huile/carburant peut être bénéfique pour répondre au besoin « Refroidir l'huile », mais pourra amener à dégrader les performances d'aspiration.

II.A.1.b) Points d'attention

(1) Evolution du besoin

Le besoin vis-à-vis du système carburant est intimement lié :

- Aux modifications des modes de fonctionnement du système. Le *mode « éco »* (Safran Helicopter Engines 2016) est un exemple de mode de fonctionnement fortement novateur du moteur. Dans ce mode, le système carburant doit permettre de ne pas envoyer de carburant à la chambre de combustion alors que l'arbre moteur est entraîné en rotation.
- A l'apparition de nouvelles parties prenantes : l'hybridation du moteur (Safran Helicopter Engines 2016) a entraîné l'apparition d'électroniques de puissance (*onduleurs par exemple*) qui ont un besoin de refroidissement pouvant être potentiellement traité par le système carburant.
- A la modification de systèmes en étroite relation avec le système à faire : l'actionneur de GV (actuellement hydraulique) pourrait devenir à l'avenir totalement électrique. Ceci supposerait donc une suppression d'un besoin de positionnement des géométries variables par le système carburant, ainsi que l'émergence d'un nouveau besoin potentiel de refroidissement de l'électronique de puissance liée à cet actionneur électrique.

Ainsi, il convient d'anticiper les possibilités d'évolutions pour les intégrer dès le début de la démarche d'ingénierie du système à faire. Pour ce faire, nous avons mis en place des discussions avec les spécialistes de chaque partie prenante du système carburant, ainsi qu'avec les ingénieurs de la R&T et des avant-projets pour avoir une vision la plus précise possible des évolutions à venir.

Cependant, l'obtention de ces informations n'est pas toujours possible car sur certains points, même les spécialistes n'ont pas de vision claire sur le moyen ou long terme.

(2) Expression du besoin aux interfaces

L'expression des besoins aux interfaces est un point délicat. En effet, on y trouve des éléments qui appartiennent à la fois au système carburant et au milieu extérieur, en l'occurrence :

- Le système d'injection
- L'actionneur de systèmes GV
- La pompe à jet (servitudes hydrauliques aéronaf)
- Le système de drainage
- Le système carburant hélicoptère (clapet de pied, par exemple) : il est encore plus délicat que les autres car il s'agit non pas d'une interface avec un autre système interne à Safran Helicopter Engines, mais directement d'une interface avec le client avionneur.

Considérons par exemple le cas du système d'injection. Il s'agit en effet d'un système en interface entre le système carburant et le système chambre de combustion. Plus exactement, nous proposons de le voir comme un sous-système de ces deux derniers systèmes. En effet, le sous-système d'injection appartient au système carburant dont il détermine la perméabilité hydraulique en sortie du circuit. Dans le même temps, le sous-système d'injection appartient également au système chambre de combustion dont il conditionne la qualité du spray de carburant. Nous avons choisi de représenter cette notion par la Figure 22 ci-dessous.

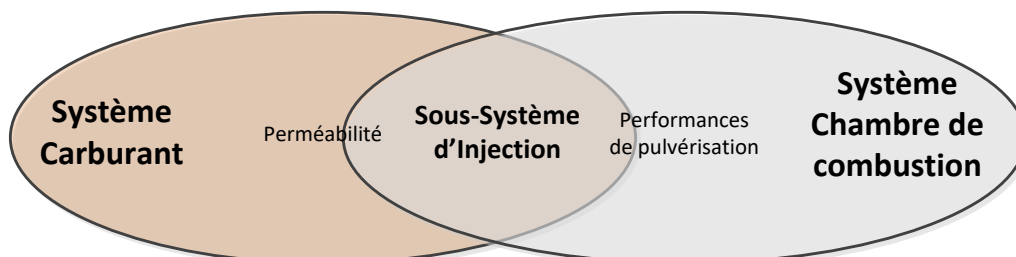


Figure 22 - Schéma de l'interface entre le système carburant et la chambre de combustion

Historiquement, la responsabilité de la conception des injecteurs est la responsabilité du système chambre de combustion. Cette situation force à une bonne communication entre les concepteurs des

deux systèmes de manière à assurer la cohérence du sous-système commun avec le système carburant. Pour atteindre cet objectif, des réunions physiques régulières ont été mises en place dans le cadre de la thèse entre notre équipe du circuit carburant et les spécialistes de la chambre de combustion. Ceci permet de maintenir une bonne communication entre les deux groupes métiers pourtant organisationnellement distincts comme nous l'avons illustré en Figure 20.

II.A.1.c) *Biais cognitifs*

La capture des besoins est perturbée par deux principes humains principaux, illustrés dans la Figure 23 ci-dessous.

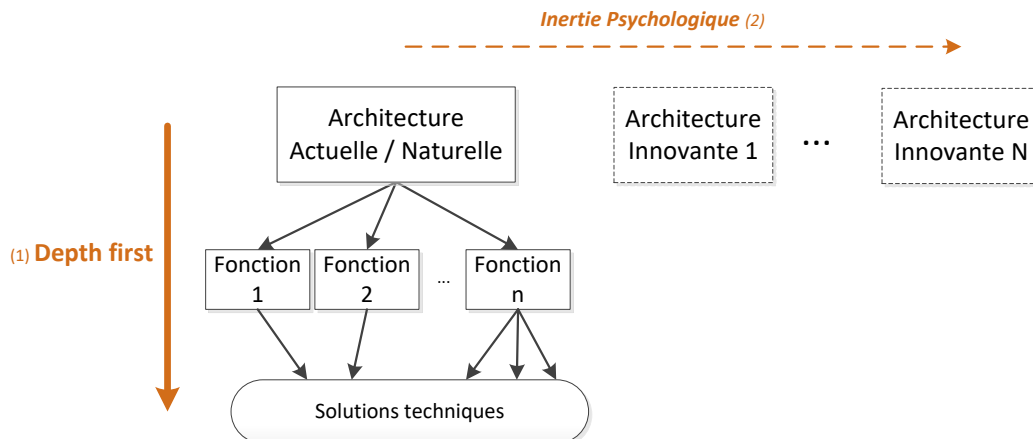


Figure 23 - Deux principes humains qui perturbent l'expression du besoin

1- Depth first (D'abord en détail)

D'après (Peugeot 2014), notre cerveau préfère d'abord aller dans le détail technique d'une solution plutôt que d'en comparer plusieurs, à niveau de détail moindre. Ce mode de fonctionnement représente une difficulté supplémentaire pour la capture des besoins. En effet, à peine les spécialistes ont-ils formulé le besoin qu'ils sont déjà en train de réfléchir aux solutions permettant d'y répondre. Ainsi, dans un contexte d'expression des besoins, le risque est d'écarter des besoins, par un raisonnement à priori, en pensant ne pas avoir les moyens de les satisfaire. Ainsi il est particulièrement important, lors de la capture des besoins, de bien recadrer la discussion avec les experts pour bien parler en termes de besoins de haut niveau et non en termes de solutions techniques.

2- Inertie psychologique

Ce concept est introduit dans la méthode TRIZ (acronyme russe signifiant « théorie de résolution inventive des problèmes »). L'inertie psychologique traduit notre difficulté à penser autrement les choses que nous connaissons bien. A titre d'exemple, est repris par les auteurs de (Choulier & Weite 2011) qui le décrivent parfaitement, selon nous :

« Nos positions d'observateur, d'utilisateur, de fabricant, ou de concepteur (... d'expert) d'un produit donné viennent malheureusement renforcer cette fixation sur le produit, s'imposant comme un cadre rigide duquel nous peinons à nous échapper, nous présentant la définition de l'objet comme la seule possible et imaginable. »

Ainsi, avant toute réflexion autour des besoins futurs, nous avons toujours pris le temps de bien expliquer aux spécialistes qu'il s'agit d'un travail d'innovation où toutes les propositions sont recevables, même si les concepts, technologies et procédés industriels associés ne sont pas encore matures. Ceci permet aux experts de se détacher de la vision qu'ils ont du système actuel pour s'autoriser à imaginer d'autres concepts.

II.A.2. Définition des contextes opérationnels du cycle de vie du système

II.A.2.a) Cycle de vie

Il s'agit tout d'abord de définir le cycle de vie du système carburant SHE. Classiquement, nous avons considéré le cycle de vie suivant :

(1) Pré-étude

C'est dans cette première phase de vie que naît le concept du système carburant. Elle inclut l'ensemble des processus qui transforment les exigences issues de l'expression de besoin client en une spécification technique boîte noire du système carburant.

(2) Développement

Cette phase de vie intègre l'ensemble des actions (études, fabrication de prototypes, essais, itérations...) effectuées pendant la période qui s'étend de la fin de la phase de pré-étude jusqu'à la certification de la première TAG, pour définir et mettre au point un système répondant aux exigences.

(3) Production

Cette phase de vie consiste en la fabrication en série des constituants du système carburant. Il s'agit également de les assembler et de les intégrer sur le moteur.

(4) Service

Il s'agit de la phase de vie où le système carburant est utilisé pour satisfaire les besoins des utilisateurs. Cette phase inclut également les activités de maintenance. Elle se termine lorsque la décision est prise de retirer le système du service.

(5) Retrait de service

Dans cette phase, toutes les opérations sont mises en œuvre pour mettre le système carburant hors d'état de fonctionnement en toute sécurité et dans le respect de l'environnement.

II.A.2.b) Contextes opérationnels

Pour chaque phase du cycle de vie décrit ci-dessus, nous avons établi la liste exhaustive des contextes opérationnels associés. Il s'agit de décrire les situations de vie dans lesquelles le système peut se trouver, du point de vue des parties prenantes. Naturellement, c'est dans la phase de service que se concentre la majorité des contextes opérationnels. Cependant, il est également important de considérer toutes les phases du cycle de vie, en particulier pour un système fortement innovant. En effet, l'utilisation de nouveaux composants par exemple, peut mener à des incompatibilités avec les moyens de test ou de fabrication de SHE. Prendre en compte ces contextes opérationnels, c'est avoir conscience de ces modifications potentielles à apporter aux moyens de l'entreprise. Cela permet donc d'avoir une vision globale des conséquences des choix techniques.

Nous avons choisi une représentation graphique sous forme d'une structure hiérarchique des contextes au sein de chaque phase du cycle de vie. Comme nous l'avons représenté en Figure 24, les contextes opérationnels de la phase de Service ont été répartis en trois catégories : Utilisation du moteur, Non-utilisation du moteur et Maintenance.

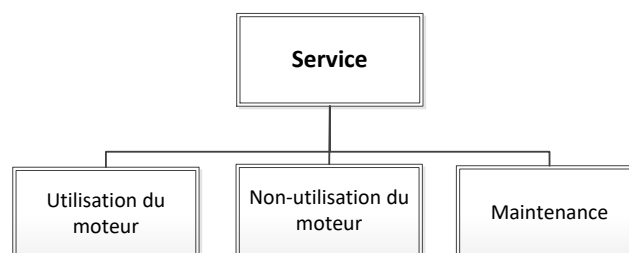


Figure 24 - Catégories des contextes de la phase de service

Ces catégories sont apparues naturellement lors de la collecte des contextes opérationnels. En effet, la phase de service compte une quarantaine de contextes. Ainsi, il a fallu les classer pour en assurer la lisibilité.

A l'issue de cette première étape d'élicitation du besoin, une spécification de besoin a été rédigée et validée par toutes les parties prenantes. Elle inclut :

- Une définition du périmètre fonctionnel du système carburant
- Les besoins exprimés par les parties prenantes (traité en II.A.1)
- Les contextes opérationnels associés (traité en II.A.2).

II.B. Analyse du besoin des parties prenantes

II.B.1. Transformation du besoin en exigences

La transformation du besoin en exigences consiste principalement en la quantification et la reformulation des besoins exprimés par les parties prenantes. Au cours de cette activité, nous avons rencontré plusieurs difficultés.

II.B.1.a) Aspects propres à Safran Helicopter Engines

(1) Choix d'un cas d'étude

La nécessité de choisir un cas d'étude pour les travaux de thèse s'est imposée à nous, et ce pour deux raisons.

Premièrement, nous avons constaté qu'en l'absence de cas d'étude bien défini il est impossible d'obtenir des exigences quantifiées de la part des parties prenantes du circuit carburant (projet moteur, métiers SHE, etc.). En effet, si les besoins fonctionnels peuvent rester globalement les mêmes d'un moteur à l'autre, le paramétrage des exigences associées varie énormément avec la gamme de puissance du moteur. Ainsi, pour obtenir des différents métiers des engagements sur des valeurs, il a été nécessaire de sélectionner un cas d'étude. Le moteur retenu pour l'étude est un petit moteur de type Arriel (gamme 650 - 950 cv).

La seconde raison de ce positionnement sur un cas d'étude en particulier, c'est qu'il paraît irréaliste de se lancer dès le départ dans la conception d'une architecture de circuit carburant permettant de répondre à tous les besoins spécifiques à chaque moteur de la gamme SHE. Ainsi, même si cette notion d'adaptabilité du circuit carburant à différents moteurs nous paraît intéressante à considérer pendant la thèse, nous pensons qu'il est préférable s'attacher, dans un premier temps du moins, à la conception d'un circuit carburant pour un moteur donné.

(2) Manque de visibilité sur les choix d'architecture moteur

En phase d'avant-projet, l'architecture haut niveau du moteur (niveau moteur de la Figure 20) n'est pas encore fixée. De ce fait, les exigences des systèmes de niveau intermédiaire (niveau coordinateur de la Figure 20) et à fortiori celles de niveau métier ne sont pas encore définies. Il est donc difficile pour les parties prenantes du système carburant de s'engager sur des exigences quantifiées. Nous avons donc choisi dans un premier temps de nous baser sur des données de moteurs existants, plus faciles à obtenir.

(3) Obtention des informations

L'obtention d'exigences relatives à des projets de recherche en cours a nécessité de rencontrer les interlocuteurs de chaque projet. Nous avons pu constater que les informations ne sont pas systématiquement diffusées entre les métiers concernant ces projets. Ainsi, il est arrivé que mes interviews révèlent, aux membres du groupe Architecture Circuit Carburant auquel j'ai été intégré, l'existence de projets ou d'initiatives pour l'avenir. Ce constat s'explique par deux facteurs principaux :

- La confidentialité : en effet, à l'intérieur même d'une entreprise, certaines informations ne sont divulguées qu'à un personnel restreint. Ceci permet de renforcer la confidentialité des informations. Dans la mesure où la confidentialité est exigée par les clients de SHE,

l'entreprise se doit de mettre tous les moyens en œuvre pour préserver ces informations.

- Le simple manque de communication : de par le nombre d'employés (2623 personnes sur le site de SHE Bordes) et par conséquent l'étendue spatiale du site (42000 m²), la communication entre les différents métiers de l'entreprise se doit d'être formelle. En effet, deux ingénieurs travaillant sur le même projet peuvent être distants d'environ 10 minutes de marche. Cependant, il serait inconcevable d'informer chaque ingénieur de tous les programmes en cours pouvant l'intéresser de près ou de loin. Il y a donc un certain équilibre à trouver en termes de communication au sein de l'entreprise de manière à ce qu'il y ait, d'une part, une bonne synergie entre les travaux menés dans les différents métiers, et en même temps, une proportion raisonnable du temps de travail dédié à la communication. Ce compromis à trouver peut parfois expliquer les manques en termes de partage des informations. A ce titre, les travaux de thèse ont permis de créer un lien supplémentaire entre le métier circuit carburant et les avant-projets.

II.B.1.b) Aspects généraux

Une des difficultés de l'activité de transformation du besoin en exigences concerne la quantification du besoin des parties prenantes. En effet, ce besoin n'est pas toujours clairement quantifié, et ce pour deux raisons :

(1) Tirer le maximum du système à faire

Pour les parties prenantes, l'objectif est d'avoir le meilleur système possible. *Prenons l'exemple d'un moteur d'hélicoptère. L'exploitant voudrait un moteur qui consomme le moins possible, le plus économe possible en termes de maintenance, le plus disponible, tout en étant le plus sûr et le plus léger possible.* Cependant, une telle description du système à faire n'est pas satisfaisante pour concevoir le bon système. En effet, du point de vue du concepteur, nous savons (Fiorèse & Meinadier 2012) que le système conçu sera le résultat d'un compromis entre ses performances au regard des différents besoins des parties prenantes. Un rôle majeur du concepteur est donc de choisir le bon compromis pour que le système conçu réponde aux attentes des parties prenantes. C'est pourquoi ces dernières doivent spécifier leur besoin sous forme d'exigences quantifiées. Une première étape en termes de quantification des exigences consiste à spécifier des valeurs cibles à atteindre ainsi qu'une plage de flexibilité. *Par exemple : la masse du système carburant doit être de 12 kg +/- 5%.* Dans le cas de systèmes complexes, il est avantageux d'aller plus loin dans la spécification en définissant des taux d'échange entre les performances clés. Pour une partie prenante donnée, le taux d'échange peut être représenté par une relation du type :

$$\text{gain} = f(\text{coût})$$

où :

- *gain* représente un gain en termes financier (*coût d'achat, coût d'exploitation par exemple*) ou critère d'appréciation (*masse, disponibilité, pollution, performances fonctionnelles, etc.*) pour la partie prenante
- *coût* représente un coût en termes financier ou de critère d'appréciation pour la partie prenante.

Pour un moteur d'hélicoptère par exemple, un taux d'échange intéressant serait le coût supplémentaire à l'achat acceptable par kilogramme gagné sur la masse du moteur.

La spécification de taux d'échange permet :

- Pour le concepteur d'avoir plus d'éléments à disposition pour choisir le compromis qui satisfera au mieux les exigences de toutes les parties prenantes
- Pour les parties prenantes, d'avoir un système qui réponde au mieux à toutes leurs attentes.

Cependant, la définition d'un tel taux d'échange n'est pas toujours facile. Ils peuvent en effet résulter de choix qui ne peuvent être faits que par les parties prenantes elles-mêmes. *Reprenons l'exemple du taux d'échange entre la masse du moteur et son coût d'acquisition. Ce taux d'échange ne peut être donné que par l'hélicoptériste, car il est le seul à avoir cette vision de haut niveau. Ce taux d'échange peut également varier d'un client à un autre. On peut en effet imaginer que certains clients seraient prêts à payer plus pour gagner en charge utile, alors que d'autres se contenteraient de la configuration actuelle. C'est donc à l'hélicoptériste que revient le choix délicat du taux d'échange à communiquer au motoriste.*

(2) Quantifier le juste besoin (vis-à-vis du produit final : moteur)

Du point de vue du système carburant ou de ses parties prenantes, il n'est pas toujours facile de se rendre compte des impacts des performances du système carburant sur les performances ressenties par l'utilisateur final du moteur (pilote, passagers, exploitant, etc.). Ainsi, il peut arriver que certaines parties prenantes expriment des niveaux d'exigences qui n'auront pas forcément d'impact opérationnel lors de la vie du moteur. Il s'agit d'un phénomène de sur-spécification. *Il peut s'agir, par exemple, de demander la même précision de dosage du débit carburant sur toute la plage de fonctionnement du moteur, alors que dans certaines parties de ce domaine une précision moindre peut être suffisante.* L'avantage de cette pratique, c'est qu'elle permet de s'assurer que le système à faire, une fois réalisé, répondra aux besoins avec de la marge. Cependant, dans un contexte d'innovation de rupture, cette pratique est à éviter car elle contraint de manière non nécessaire la conception à faire.

II.B.2. Analyse des exigences des parties prenantes

(1) Discussion des exigences pour innovation de rupture

Dans un contexte d'innovation de rupture, il est important de prendre du recul vis-à-vis des exigences spécifiées. En effet, sans pour autant entrer dans la solution technique du système carburant, de nombreuses exigences se basent sur des solutions actuelles pour les systèmes en interaction avec le système carburant. *A titre d'exemple, la spécification issue de la partie prenante « système de régulation » est basée sur les caractéristiques d'un système de régulation actuel (capacité du calculateur, répartition des fonctions, etc.).* Le but de l'activité d'analyse des exigences des parties prenantes consiste alors à discuter avec les parties prenantes concernées pour libérer les contraintes liées à l'état actuel de leurs systèmes. *Pour reprendre l'exemple précédent, il est possible qu'une rupture dans la manière de penser le système carburant doit être accompagnée par une modification de la partie prenante « système de régulation ».* Cette innovation n'est donc pas envisageable si l'on contraint le système carburant à être totalement compatible d'un système de régulation actuel.

(2) Spécifier les comportements et phénomènes propres à une technologie

Dans un contexte d'innovation de rupture, il est important de spécifier les fonctionnalités naturellement présentes dans les technologies actuellement utilisées (jeu, frottement, hystérésis, fuite, inertie, perte de charge, réponse en fréquence, etc.). *Par exemple, un système mécanique se comporte comme un filtre passe-bas de fréquence de coupure bien plus basse qu'un système électrique.* Si la même technologie est utilisée depuis longtemps, il est possible que ces fonctions ne soient plus (ou n'aient jamais été) spécifiées. Elles peuvent alors manquer en cas de changement de technologie.

(3) Spécifier en cohérence avec les méthodes de vérification et validation

Spécifier le juste besoin peut également signifier « spécifier ce que l'on peut vérifier ». En effet, il est inutile de spécifier une exigence dont on ne pourra pas mesurer la satisfaction. Cette notion est particulièrement importante en phase de conception préliminaire car l'évaluation des performances du système doit bien souvent être effectuée de manière analytique (pas de prototype réel).

Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie d'ingénierie des besoins et des exigences a été proposée dans un cadre d'innovation de rupture. Elle répond au besoin de créer un référentiel d'exigences tiré des besoins basiques pour susciter l'innovation dans une entreprise où le système à faire est conçu depuis plus de 50 ans. Cette méthodologie, basée sur la norme ISO/IEC/IEEE 15288 ainsi que sur le référentiel d'ingénierie système de l'AFIS, a été définie à travers un processus, des bonnes pratiques et des outils. Elle a été appliquée au cas d'étude de nos travaux de thèse, à savoir le système carburant du futur SHE. Cette expérience a permis de perfectionner la méthodologie proposée pour s'adapter aux contraintes de l'étude (milieu industriel, système conçu depuis longtemps par l'entreprise, interaction fortes avec d'autres systèmes, etc.).

Les travaux de cette partie de la thèse ont donné lieu à une présentation lors de la 27^{ème} Conférence Annuelle de l'INCOSE⁶ (Monsimer et al. 2017).

⁶ International Council on Systems Engineering

CHAPITRE 2 - Génération d'architectures système carburant en rupture

Introduction

Dans une première partie, un état de l'art sera présenté dans le domaine de la génération d'architecture innovante pour les systèmes techniques. Dans un second temps, une méthode sera proposée pour répondre à la problématique de Safran Helicopter Engines. Cette méthode s'appuie sur les techniques et les leçons apprises issues de la littérature. Enfin, une dernière partie concernera la mise en œuvre de cette méthodologie dans l'entreprise.

I. Etat de l'art des démarches de génération d'architectures

L'objectif de la thèse est de proposer une méthodologie de conception d'architectures de circuit carburant fortement innovantes. L'aspect « conception d'architecture » renvoie à une phase préliminaire de la conception. L'idée n'est pas de concevoir les composants du circuit carburant dans le détail mais bien d'avoir des informations sur les principes d'architectures prometteuses ou non.

Parmi les démarches de recherche de nouvelles architectures, les approches les plus comparables à notre cas d'étude sont :

- A. Fraj (Fraj 2014) et J. Liscouet (Liscouët 2010) à travers la conception de la chaîne de puissance d'un actionneur électro-mécanique. Les auteurs proposent une démarche basée sur une génération combinatoire des architectures possibles suivie de deux phases d'évaluation (haut niveau et plus détaillée).
- M. R. Kirby (Kirby 2001) à travers l'étude d'un concept de transport civil haute vitesse. L'auteur propose une démarche menée depuis l'analyse des besoins jusqu'à l'évaluation des technologies permettant d'y répondre. En particulier, un fort travail a été fait sur l'impact de la maturité des technologies à utiliser dans la solution.
- H. Gavel (Gavel 2007) propose une approche de conception de système carburant pour un avion de chasse. Il s'appuie sur le concept de matrice morphologique quantifiée, consistant en une routine de prédimensionnement du système en fonction des différents composants sélectionnés (Gavel et al. 2006).
- M.L. Moullec (Moullec 2014) qui propose une approche de génération et évaluation d'architecture à travers des réseaux bayésiens. Cette approche probabiliste est mise en œuvre dans un exemple industriel de dimensionnement de système de refroidissement d'antenne.

Dans ces travaux, on remarque qu'aucun ne s'intéresse aux méthodes de créativité pour la génération d'architecture. Ce constat a également été fait par les auteurs de (Howard et al. 2007). Cependant, dans le cadre d'une innovation de rupture (ou tout du moins d'une forte innovation), il convient de réfléchir à de nouveaux concepts radicalement différents de celui actuellement mis en œuvre. Ainsi, nous proposons dans ce chapitre un état de l'art des méthodes de créativité appliquées à un système technique.

Bien que les activités de génération et d'évaluation des architectures soient intimement liées (voir processus de (Fraj 2014; Liscouët 2010) qui mêlent évaluation/filtration haut niveau et génération de principes de solutions), nous séparerons dans cette revue de l'état de l'art ces deux problématiques. En effet, elles nécessitent chacune des outils et raisonnements particuliers.

PROCESSUS

Plusieurs auteurs proposent des processus de génération et d'évaluation d'architectures innovantes. On trouve tout d'abord les processus linéaires de type Pahl & Beitz (Pahl et al. 2007) et Ulrich & Eppinger (Ulrich & Eppinger 2012). Kroll et al. (Kroll et al. 2004) ont pris le parti d'un processus cyclique, alternant phases de génération de solutions et phases d'évaluation. Nous avons synthétisé les processus de ces trois ouvrages en Figure 25.

En 1977, Gerhard Pahl et Wolfgang Beitz publient « Konstruktionslehre », qui sera traduit en 1984 sous le nom de « Engineering Design ». Ces deux ouvrages se sont rapidement imposés comme des références mondiales en termes d'approche systématique de la conception. Nous ferons référence dans ce paragraphe à la troisième édition de la traduction anglaise (Pahl et al. 2007). Le processus de conception systématique proposé se décompose alors en deux temps : Génération puis Evaluation des solutions (voir Figure 25). Cette approche a été reprise et agrémentée d'outils nouveaux avec les travaux de (Weiss & Hari 2015; Mayda & Borklu 2014; Manami et al. 2015).

On constate que le processus de Ulrich & Eppinger (Ulrich & Eppinger 2012) est relativement proche de celui de Pahl & Beitz. Ils proposent en effet tous deux des avancements linéaires avec une décomposition du problème avant la recherche de solution, puis une évaluation des solutions candidates en deux temps incluant une première sélection gros grain puis une seconde évaluation plus précise. Ce processus linéaire est également repris, dans les grandes lignes par les travaux de M. R. Kirby (Kirby 2001), A. Fraj (Fraj 2014) et J. Liscouët (Liscouët 2010), ainsi que dans l'ouvrage de (Keinonen & Takala 2006).

L'auteur de (Kirby 2001) propose une méthodologie pour la conception de l'architecture préliminaire d'un avion. L'approche proposée est orientée sur l'évaluation et la sélection des architectures, plutôt que sur les aspects de génération des architectures, abordés rapidement à l'aide de l'outil matrice morphologique. Pour les aspects d'évaluation, elle reste cohérente avec les étapes présentées précédemment. (p.117) Cette méthodologie a été utilisée pour la conception d'un système de propulsion solaire spatial (Charania & Olds 2002). Elle a été adaptée en une méthode simplifiée ATIES (Abbreviated Technology Identification, Evaluation, and Selection), qui ne reprend que les étapes et outils principaux de la méthodologie.

Les auteurs de (Liscouët 2010) et (Fraj 2014) utilisent une approche systématique dans la lignée du processus proposé par Pahl & Beitz (Pahl et al. 2007). On y retrouve en particulier une distinction claire entre filtrage quantitatif (Sélectionner les combinaisons de (Pahl et al. 2007), voir Figure 25) et filtrage qualitatif (Evaluer selon les aspects techniques et économiques de (Pahl et al. 2007), voir Figure 25).

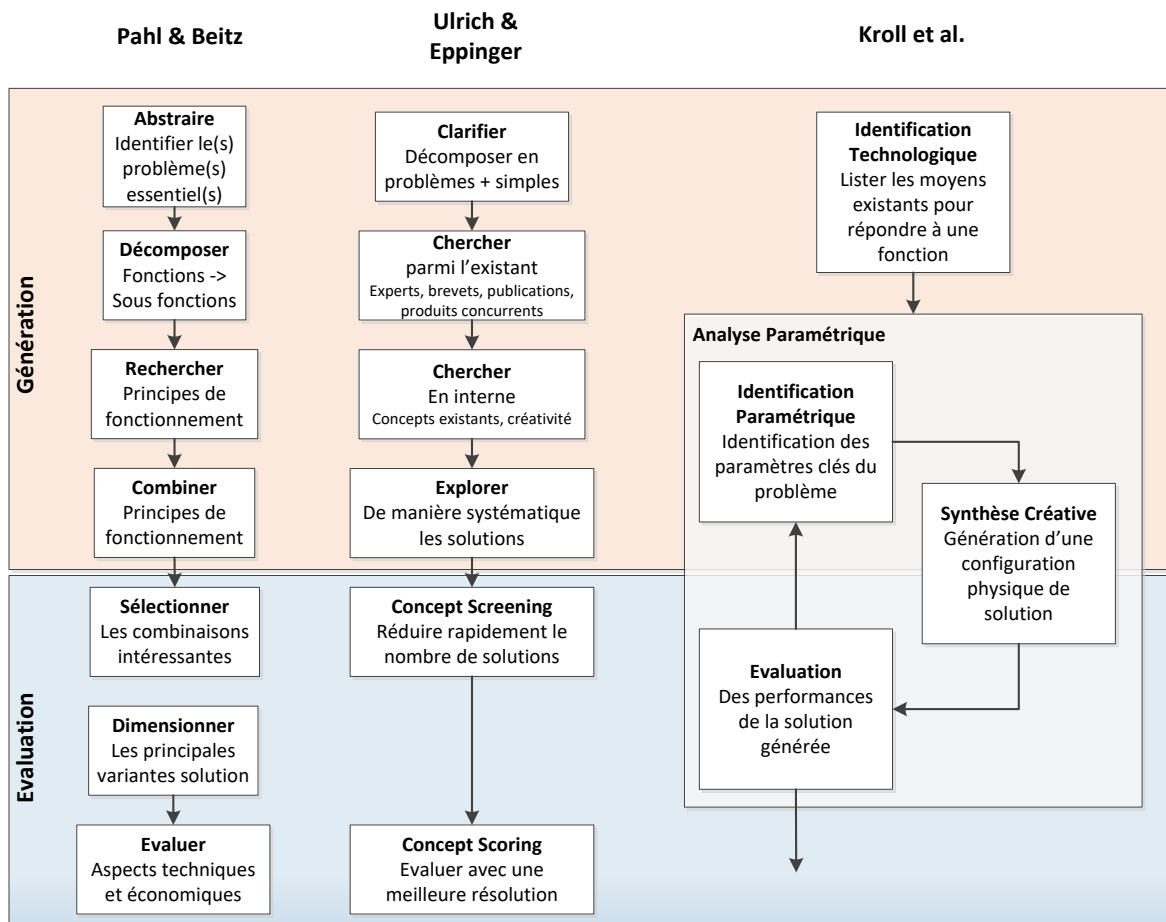


Figure 25 - Processus de génération et évaluation d'architecture système

Les auteurs de (Kroll et al. 2004) proposent un processus original de conception préliminaire. En effet, la nature cyclique de ce processus tranche d'emblée avec les processus linéaires présentés précédemment. Cependant, de notre point de vue, cette méthodologie relève plus de la technique de créativité que du processus de conception préliminaire au sens large. En effet, comme l'expliquent les auteurs, l'objectif principal de cette méthode d'Analyse Paramétrique est de simplifier la génération créative de nouvelles solutions.

"The major implication of the theoretical model that stands behind parameter analysis is that the burden of truly creative activity is shifted from what here is called creative synthesis [...] to parameter identification, [...] which will lead to the desired configurational results." (Kroll et al. 2004)

On trouve également dans la littérature des processus pour la conception préliminaire de produits tels que (Pialot 2009; Keinonen & Takala 2006) par exemple. Ces travaux s'intéressent en revanche plus à des aspects économiques et marketing qui visent à générer puis sélectionner des concepts de produits qui seront en adéquation avec un marché identifié. L'ouvrage « Product Concept Design » (Keinonen & Takala 2006) va en ce sens. Cette approche est également reprise par O. Pialot dans sa thèse, comme le montre cette citation de (Perrin 2001) : « pas d'innovation sans sanction par le marché ». Ainsi, ces processus nous paraissent en dehors du contexte de la thèse. En effet, le système à concevoir ne sera pas commercialisé en tant que tel. Ainsi, son marché est lui est alors naturellement imposé : le système carburant à concevoir doit être parfaitement adapté aux moteurs d'hélicoptères Safran Helicopter Engines.

Nous retiendrons cependant l'approche PST, d'O. Pialot (Pialot 2009) comme une méthode de génération de nouveaux concepts. Cette méthodologie met en œuvre trois moyens de proposition de nouvelles idées, de nouveaux concepts :

« Notre modèle multi-entrées PST doit être compris comme la suggestion de trois angles d'attaque pour innover [...] : une nouvelle intention peut avoir pour origine la dimension soit du potentiel de nouvelle proposition de valeur, soit de la technologie ou soit du système. » (Pialot 2009)

BILAN

Au terme de cette introduction, un premier état de l'art des processus de génération et évaluation en conception préliminaire de systèmes nous a permis de retenir la procédure de référence de Pahl & Beitz (Pahl et al. 2007). Cette procédure donne en effet un cadre générique et adapté à notre cas d'étude. En outre, les éléments pertinents d'autres méthodologies pourront être employés dans des étapes particulières de notre démarche. Nous pensons particulièrement à l'Analyse Paramétrique de (Kroll et al. 2004) et à la méthode PST de (Pialot 2009), qui proposent des pistes originales pour la génération de nouveaux concepts d'architectures.

II. Présentation des étapes de la démarche retenue

Comme nous l'avons vu précédemment, nous nous baserons dans la suite de l'étude sur la démarche générale proposée par les auteurs de (Pahl et al. 2007). Elle consiste, pour la phase de génération d'architectures, en quatre étapes : Abstraire, Décomposer, Rechercher et Combiner. Cette partie donne une description de chacune de ces étapes et des méthodes à disposition pour les mener à bien.

II.A. Abstraire

Il s'agit de faire apparaître les fonctions essentielles proposées par la liste des exigences. Cette formulation du problème ne doit préjuger d'aucun principe de fonctionnement du système à concevoir. Bien souvent, le plus pratique est de raisonner de manière fonctionnelle. Cela permet en effet d'appréhender le système à faire du point de vue des services qu'il devra rendre, plutôt que par sa composition.

Voici quelques exemples de reformulation du problème :

- On ne conçoit pas une porte de garage mais un moyen de sécuriser le garage de manière à ce que la voiture soit protégée des intempéries et des voleurs (issu de (Pahl et al. 2007))
- On ne conçoit pas un téléviseur mais plutôt un moyen pour l'utilisateur de visualiser des films
- On ne conçoit pas une clé mais un moyen de déverrouiller l'accès au véhicule et de le démarrer.

Cette étape, qui dans certains cas peut s'avérer très rapide, est primordiale. En effet, elle permet aux entreprises de ne pas s'enfermer dans leur domaine d'expertise et de réfléchir aux opportunités d'autres domaines. On pensera par exemple aux clés de voiture, dont nous avons représenté l'évolution en Figure 26 ci-dessous.



	1950	2001	2008	Futur
Déverrouillage	Mécanique	Electronique (back-up mécanique)	Electronique (back-up mécanique)	Logiciel ?
Démarrage	Mécanique	Mécanique	Electronique	Logiciel ?

Figure 26 - Evolution du cœur de métier associé à la clé de voiture

A l'origine, il s'agit de clés traditionnelles, dont le fonctionnement relevait purement de la mécanique. Au fil des évolutions, la clé est devenue progressivement un boîtier électronique, communiquant sans contact avec le véhicule. Demain, la clé de voiture relèvera peut être du logiciel via une application pour smartphone. Ainsi, le fait d'abstraire les fonctions principales de la clé de voiture a permis d'évoluer vers de nouvelles générations de clés utilisant des domaines technologiques nouveaux.

II.B. Décomposer

Par décomposition, les auteurs de (Pahl et al. 2007) entendent décomposition fonctionnelle depuis les fonctions principales identifiées précédemment, vers des sous-fonctions. Le but de la décomposition fonctionnelle est de réduire la complexité du système à faire. Il s'agit de structurer la ou les fonction(s) principale(s) du système à concevoir en plusieurs sous-fonctions moins complexes, comme illustré en Figure 27 ci-dessous.

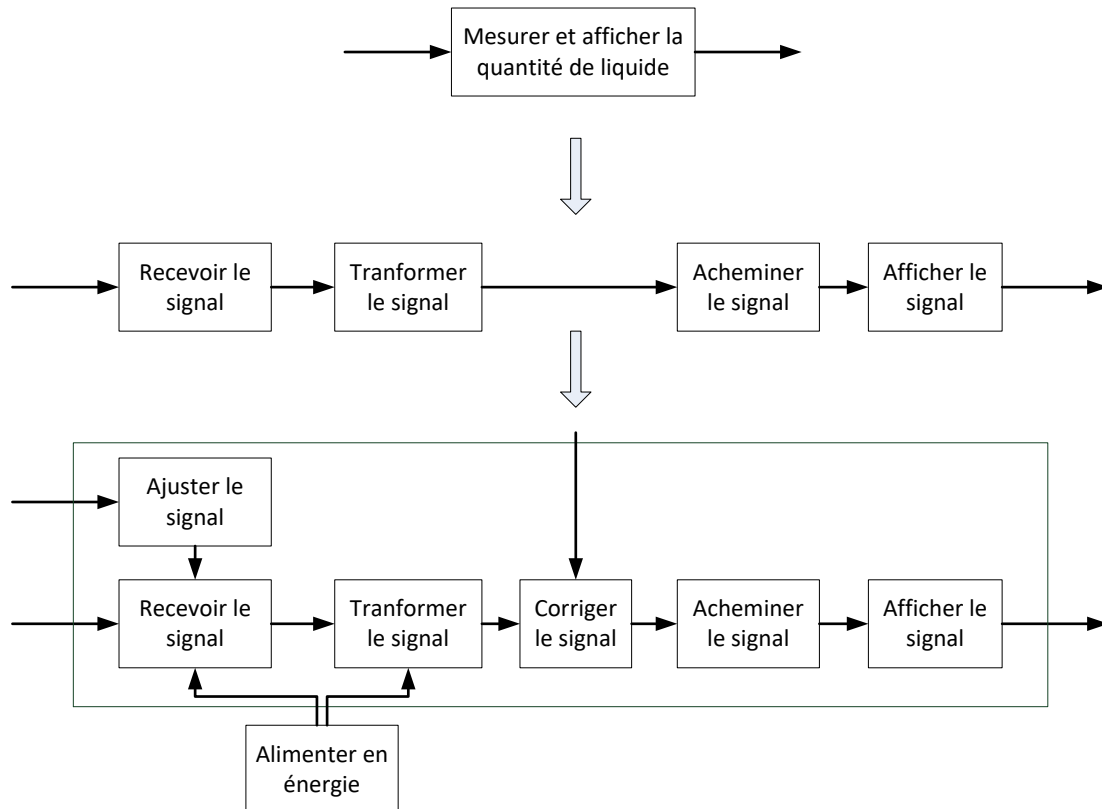


Figure 27 - Décomposition de la structure fonctionnelle dans le cas d'une jauge à carburant (adapté de (Pahl et al. 2007))

Comme le soulignent les auteurs de (Weber et al. 1998), il existe deux niveaux de décomposition fonctionnelle :

- Un **niveau primaire**, indépendant du concept solution retenu pour le système à concevoir. Il s'agit alors d'une décomposition fonctionnelle unique nécessaire et suffisante à la satisfaction des exigences. Cette formulation unique et complète permettra d'explorer l'espace des solutions dans son intégralité par la suite.
- Un **niveau secondaire**, dépendant du concept solution retenu pour le système à concevoir. Ce second type de décomposition fonctionnelle est, elle, orientée par une solution donnée. Elle est obtenue en partant de la décomposition primaire, en allant plus loin dans la décomposition de chaque fonction.

Le but de cette étape de décomposition est de mettre en œuvre la décomposition fonctionnelle de niveau primaire du système à faire. Les décompositions de niveau secondaire seront générées lors de l'étape suivante de recherche de solutions.

II.C. Rechercher

Une fois les fonctions primaires du système définies, il convient d'en rechercher des principes de fonctionnement innovants pour le produit visé. C'est principalement dans cette étape que doivent se concentrer les efforts de créativité. Cependant, la créativité n'apparaît pas comme le mode de fonctionnement naturel de l'être humain. En effet, comme le souligne G. Altshuller dans (Altshuller

1984), nous sommes tous en proie à l'inertie psychologique, qui est, le principal ennemi de la créativité. Elle est tenace et nécessite des outils spécifiques pour être vaincue.

II.C.1. Classement des outils recherche de créativité

Comme le constate B. Tyl dans sa thèse (Tyl 2011), il existe à ce jour de nombreux outils de créativité. Il cite notamment les travaux de Ngassa et al. (Ngassa et al. 2003) qui ont étudié pas moins de 172 méthodes. Une telle quantité d'outils pose la question de leur classification. Le but étant de savoir quel(s) outil(s) utiliser pour une situation donnée. En effet, comme le rappelle Runco, *"It is unwise to claim that one creativity tool would apply to all domains and all problems for all people."* (Runco 2007). On trouve dans la littérature plusieurs types de classement des méthodes et outils de créativité.

Historiquement, c'est H. Geschka qui propose une première classification des méthodes de créativité dans (Geschka 1983). Il se base alors sur deux critères : le principe de fonctionnement et le principe de déclenchement d'idées. En combinant ces principes, il obtient quatre catégories de méthodes de génération d'idées créatives, que nous avons résumées dans le Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 – Les quatre catégories de méthodes de créativité (d'après (Geschka 1983))

		Principe de déclenchement	
		Variation d'autres idées	Confrontation autre problème
Principe de fonctionnement	Intuition	Association intuitive Les participants partent d'idées d'autres personnes pour générer de nouvelles idées par association.	Confrontation intuitive Les idées doivent venir d'évènements, mots, pensées ou sensations totalement déconnectées du problème. <i>Utilisation</i> : Méthode qui mène souvent à d'authentiques innovations. A utiliser si les méthodes de brainstorming et brainwriting se montrent infructueuses. (Geschka 1983)
	Systématique	Variation systématique La génération d'idée se déroule en deux étapes : 1- Les concepts de solution basiques sont développés systématiquement 2- Des solutions individuelles sont générées par combinaison ou par variation des concepts proposés en 1-.	Confrontation systématique Les idées sont générées à partir d'éléments stimulants choisis de manière systématique. Cela permet de choisir des objets qui seront plus « efficaces » en termes de déclenchement d'idées que ceux de la confrontation intuitive pour un problème donné.

La distinction entre principe de fonctionnement systématique et intuitif est également repris dans la littérature par (Couger 1995), (Shah et al. 2003) ou encore (Pahl et al. 2007). Selon nous, la popularité d'une telle distinction peut s'expliquer par la forte différence de manière de penser entre les méthodes intuitives et systématiques. En effet, on conçoit directement que les méthodes systématiques, suivant un déroulement discursif, seront plus faciles à mettre en œuvre dans le cadre d'un problème d'ingénierie. Cependant, cette approche systématique peut être considérée comme moins propice à l'innovation de rupture (Li et al. 2007). Cet aspect d'innovation forte ou de rupture est de la plus grande importance dans le cadre de nos travaux. En ce sens, McFadzean (McFadzean 1998b) a développé une typologie selon un degré de changement de paradigme plus ou moins important à susciter chez les participants.

Van Gundy propose une classification intéressante du point de vue de la mise en œuvre de la méthode. Il s'agit de les classer selon le nombre de participants, tout en distinguant les outils utilisables individuellement ou collectivement.

"Idea Power: Techniques and Resources to Unleash the Creativity in Your Organization, by Arthur Van Gundy. (1992)."

D'une manière plus générale, les auteurs de (Pahl et al. 2007) distinguent les techniques de résolution de problème de conception par deux approches :

- L'approche Générative consiste à proposer plusieurs solutions puis à choisir celle qui répond

- le mieux aux problèmes, étant donné les objectifs à atteindre.
- L'approche Corrective consiste à rechercher des solutions par une démarche d'amélioration et d'adaptation d'une idée originelle, dans le but d'atteindre les objectifs.

Tableau 6 - Comparaison des deux catégories de techniques de résolution de problèmes en conception d'après (Pahl et al. 2007)

	+	-
Recherche générative	Favorise l'émergence d'idées nouvelles	Plus long à mettre en œuvre : nécessite pour le concepteur de trouver l'équilibre entre le temps disponible et le nombre de solutions candidates.
Recherche corrective	Obtention rapide de solutions concrètes	Risque de rester fixé sur une solution qui n'est pas forcément la meilleure

Enfin, les auteurs de (Yan & Childs 2015) proposent une sélection de l'outil de créativité basé principalement sur la personnalité des participants. Leur personnalité est évaluée à l'aide de l'indicateur Myers-Brigg. Cependant, il n'est pas proposé de corrélation entre les outils existants et les personnalités des participants.

A la suite de cet inventaire de la littérature sur la classification des méthodes de créativité, nous avons choisi de faire ressortir quatre paramètres (le type de problème, les moyens méthodologiques, les moyens humains et le type de solution désiré) influant sur le choix de la méthode de créativité. Nous les avons représentés en Figure 28 ci-dessous.

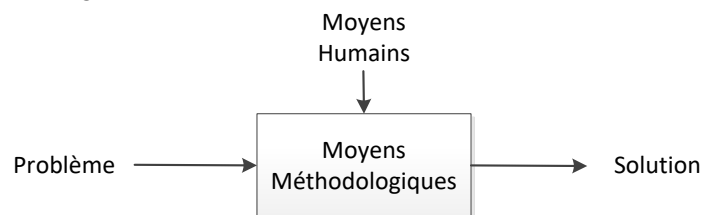


Figure 28 – Paramètres de choix d'une méthode de créativité

En guise de synthèse, nous proposons dans le Tableau 7 un récapitulatif des différentes classifications des techniques de créativité présentes dans la littérature.

Tableau 7 – Classification des techniques de créativité présentées dans la littérature

Paramètre	Référence littérature	Catégories
Moyens méthodologiques	(Geschka 1983)	Fonctionnement intuitif/systématique, Déclenchement par variation ou confrontation d'idées
	(Mckoy et al. 2001)	Représentation des idées : graphique, textuelle, hybride
	(Samuel & Jablokow 2010)	Convergent/Divergent, Style cognitif Adaptatif/Innovant, Difficulté de la prise en main
	(Shah et al. 2003)	<i>Intuitif</i> : Germinal, Transformationnel, Progressive, Organisationnel and Hybride <i>Logique</i> : Basé sur le passé, Analytique
	(Pahl et al. 2007)	Recherche générative, Recherche corrective
	(Thompson & Lordan 1999)	Cinq groupes de techniques les plus appropriés pour les ingénieurs : brainstorming, synectique, analyse morphologique, brainwriting et check-listes
Moyens humains	(Samuel & Jablokow 2010)	Niveau de difficulté de prise en main (1-5)
	(Yan & Childs 2015)	Type de personnalité MBTI (Myers-Briggs Type Indicators)

Type de solution	(McFadzean 1998b) d'après (Nagasundaram & Bostrom 1993)	Préservation du paradigme, Extension du paradigme, Changement de paradigme
	(Li et al. 2007)	Orienté problème, Orienté fonction, Orienté produit, Orienté sur la forme

Nous avons pu constater qu'il n'y a pas véritablement de classification des méthodes par type de problème dans la littérature. Cependant, les articles sur lesquels nous nous sommes basés sont orientés sur la créativité dans le cadre de la conception en ingénierie.

II.C.2. Les méthodes de génération d'idées

Nous avons représenté en Figure 29 une sélection des principales méthodes de génération d'idées. Elles sont classifiées selon les critères proposés par (Shah et al. 2003). De nouvelles méthodes ont été ajoutées à cette classification en s'appuyant sur les travaux suivants : (Shah 1998; Shah et al. 2016; Markman et al. 2011; Geschka 1983).

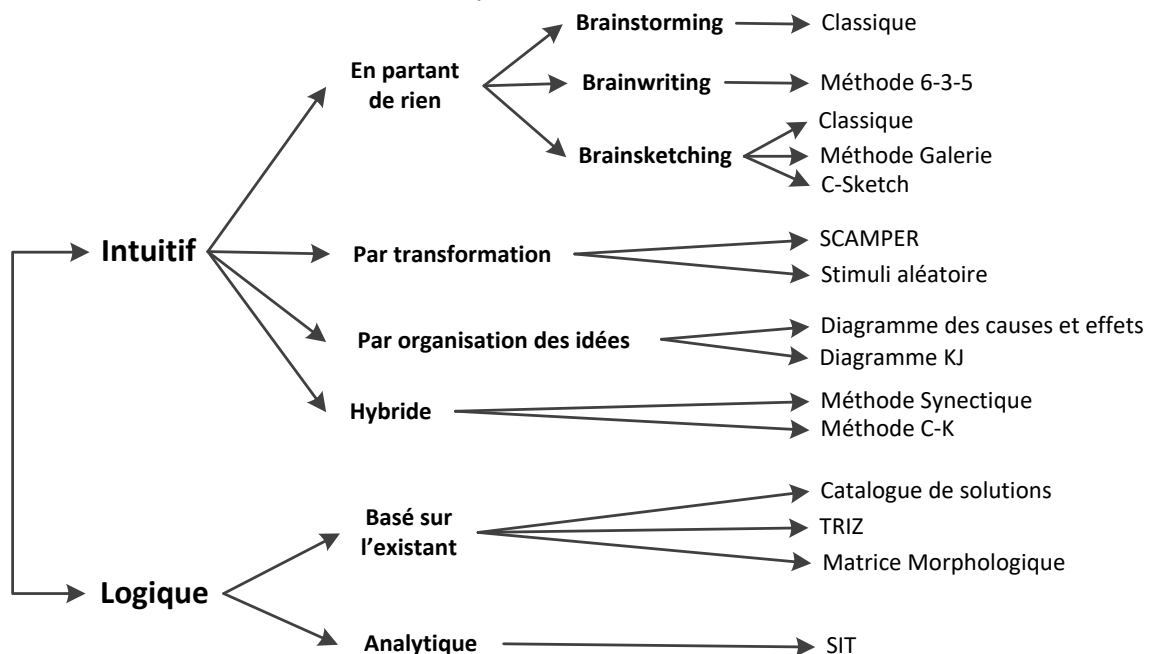


Figure 29 – Classification des principales méthodes de génération d'idées

Nous proposons dans cette partie de faire une description rapide de chaque méthode ou famille de méthodes.

II.C.2.a) Les méthodes intuitives

(1) En partant de rien

Brainstorming Classique

Il s'agit d'une technique de créativité de groupe proposée par Alex Osborn en 1940 (Osborn 1948). Elle repose sur le principe d'association d'idées entre des personnes issues de milieux différents.

Le principe d'une séance de brainstorming est que les participants expriment le plus d'idées possibles. Elles sont alors notées par l'animateur. Chacun doit se retenir de tout jugement pendant la séance de brainstorming. Ceci doit en effet permettre l'émergence d'idées potentiellement irréalistes, qui, par associations d'idées peuvent déboucher sur des idées de solutions réalisables. (Pahl et al. 2007) Pour accroître l'efficacité du brainstorming, Alex Osborn a proposé les quatre règles suivantes (Osborn 1940) :

- Générer un maximum d'idées
- Ne pas critiquer les idées proposées
- Chercher à faire des combinaisons avec les idées précédemment proposées
- Encourager les idées « extrêmes », c'est-à-dire les idées qui semblent irréalistes.

Une séance de brainstorming doit durer 30 à 40 minutes. Le groupe de participants doit contenir entre 5 et 15 personnes. Il est important de ne pas se limiter à un groupe d'experts, mais au contraire d'enrichir le groupe de personnes non-techniques, ou qui travaillent en dehors du domaine d'étude. Il s'agit pour les participants d'expliquer leurs idées et de les noter sur le tableau.

Les avantages de cette méthode résident en sa simplicité et sa bonne acceptation par les ingénieurs. Elle peut être mise en place rapidement, sans grand travail préliminaire. De plus, elle est déjà largement pratiquée en entreprise. De ce fait, les ingénieurs y sont habitués et l'ont acceptée.

L'inconvénient principal de cette méthode c'est la difficulté à apporter des idées en rupture avec le design dominant. Cet aspect du brainstorming est mis en avant par J.-P. Derumier (Derumier 2016). L'auteur explique en effet que les connaissances mobilisées lors d'une séance de brainstorming sont fortement influencées par la formulation initiale de la problématique. Il conclut alors qu'il n'y a que peu de chance de voir des idées en rupture sortir de ces séances. De plus, comme le rappellent les auteurs de (Thompson & Lordan 1999), le brainstorming est une des techniques de créativité les plus populaires, et par voie de conséquence, est souvent mal utilisée (les quatre règles ne sont pas suivies, il n'y a pas d'animateur, brainstorming non intégré à un processus de créativité plus global).

Brainwriting

Méthode 635

Après avoir été familiarisés avec la problématique, les six participants sont invités à noter sur une feuille de papier trois propositions de solution. Dans le cadre de cette technique, les idées sont notées sous forme de mots ou phrases. Ensuite, chaque participant donne sa feuille à son voisin qui la complète de trois nouvelles propositions. Le processus continue jusqu'à ce que les cinq autres participants aient fait leurs trois propositions (Pahl et al. 2007). Le déroulement de cette méthode est schématisé en Figure 30.

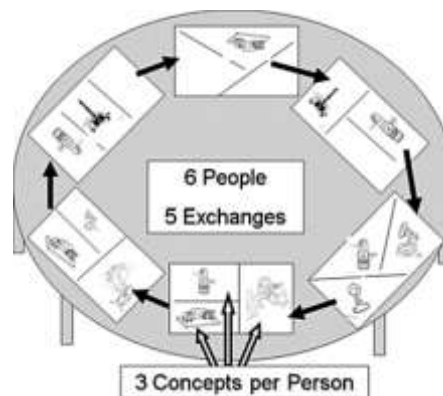


Figure 30 - Illustration de la méthode "6-3-5" issue de (Markman et al. 2011)

Brainsketching

Classique

(Markman et al. 2011) citant (Vangundy 1988)

Les participants dessinent leurs idées sur une large feuille de papier, en incluant au besoin de brèves annotations. Après un temps, les participants échangent leur dessins et complètent ce qu'ils viennent de recevoir. Cette technique permet de promouvoir l'expression visuelle des idées.

Méthode Galerie

(Markman et al. 2011) citant (Vangundy 1988)

Les participants dessinent leurs idées sur une large feuille de papier. Après un temps donné, les participants se déplacent pour échanger autour de leurs schémas. Cette phase de discussion permet aux participants de clarifier leurs idées. Elle est suivie d'une seconde phase de dessin.



Figure 31 - Illustration de la méthode galerie adaptée de (Markman et al. 2011)

C-Sketch (Collaborative Sketching)

(Markman et al. 2011)

Cette technique suit le même déroulement que la méthode « 6-3-5 » décrite précédemment. La différence réside dans le fait que les idées doivent être exprimées uniquement sous forme de dessins.

(2) Par transformation

Stimuli aléatoire

Cette méthode a été décrite par E. De Bono (De Bono 1970). Elle est basée sur la génération d'idées à partir d'un stimulus aléatoire (mot, image,...). Les but est alors pour les participants de faire un lien entre leur problème et le stimulus. Cette technique est simple à mettre en œuvre et demande peu de travail préparatoire. Néanmoins, comme l'explique E. De Bono (De Bono 1970), l'efficacité de cette technique repose en grande partie sur la confiance que les participants ont de trouver des solutions intéressantes. Dans le cadre d'une utilisation par des ingénieurs, cela peut être problématique car cette technique peut être mal acceptée.

SCAMPER

La méthode SCAMPER a été introduite par Eberle dans les années 70 (Eberle 1971). Les étapes suggérées par cette méthode correspondent à chaque lettre de son titre : Substituer, Adapter, Modifier, Proposer une autre utilisation, Eliminer, Réarranger/Inverser. L'avantage de cette méthode est d'être simple à comprendre. Cependant, comme le soulignent les auteurs de (Yilmaz & Seifert 2010), elle ne propose aucune technique pour mettre en pratique ces conseils.

(3) Par organisation d'idées

Diagramme des causes et effets (diagramme d'Ishikawa, diagramme des 5M)

Cette méthode sert de structure à la pensée créative. Elle s'articule autour du diagramme d'Ishikawa, qui permet de représenter toutes les causes d'un effet donné. Comme représenté en Figure 32, les causes sont articulées autour de 5 grands axes (les 5 M) : Main d'œuvre, Matériel, Matière, Méthodes, Milieu (Valeins 2009).

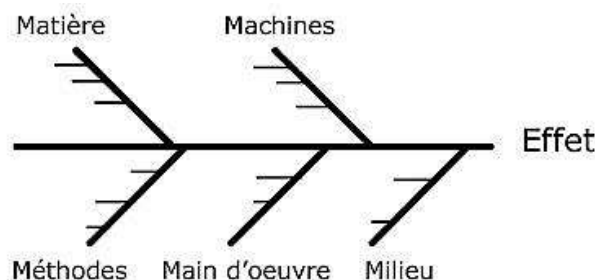


Figure 32 - Diagramme d'Ishikawa (issu de (Valeins 2009))

De par les axes avancés pour classer les causes, nous en déduisons que cette méthode est plutôt pensée pour résoudre des problèmes organisationnel ou managériaux. Elle paraît ainsi peu appropriée à notre cas de conception d'un système de puissance.

Diagramme KJ

Le diagramme KJ permet de trier les idées issues d'une séance de brainstorming. Durant la séance de créativité, chaque idée aura été notée sur un post-it. La technique consiste à regrouper les post-it

ayant des points communs. Un titre sera donné à chaque groupe ainsi formé. Si plus de 9 groupes sont formés, alors ils doivent être restructurés pour obtenir au plus 9 grandes familles de solutions (Mycoted n.d.). La représentation graphique de ces groupes et sous-groupes jusqu'aux idées élémentaires est appelé diagramme KJ.

(4) **Hybride**

Synectique

Cette technique a été proposée par Gordon (Gordon 1961). Elle repose principalement sur l'analogie avec des domaines étrangers au problème posé. La méthode synectique s'appuie sur un processus systématique dont les étapes principales sont : (Pahl et al. 2007)

- La familiarisation du problème par les participants
- Le rejet des conventions familières grâce à l'aide d'analogies avec d'autres domaines
- Le choix d'une analogie en particulier et sa comparaison avec le problème posé
- Le développement d'une solution issue de cette analogie.

Si le résultat n'est pas satisfaisant, le processus doit être répété avec une analogie différente. L'animateur a un rôle très important dans la réussite de cette technique car il est en charge d'orienter le groupe vers les analogies pertinentes (Pahl et al. 2007; Thompson & Lordan 1999).

Méthode KCP (ou DKCP)

La méthode KCP repose sur la théorie C-K (Hatchuel & Weil 2002). Cette dernière repose sur la proposition fondamentale selon laquelle « tout raisonnement de conception suppose la distinction entre deux espaces associés : l'espace des concepts (désigné par « C ») et l'espace des connaissances (désigné par « K ») » (Hatchuel & Weil 2002). Cette distinction est fondamentale pour les auteurs car « sans connaissance on ne peut pas concevoir et avec seulement des connaissances on ne fait que reproduire » (Hatchuel & Weil 2002).

La méthode KCP est parfois nommée DKCP. Ceci vient de l'idée de certaines entreprises de distinguer la phase « D » de définition des concepts initiaux de la phase « K » d'injection des connaissances (Derumier 2016).

D'après les auteurs de (Hatchuel et al. 2009), la méthode KCP comporte 3 étapes :

- 1- **Phase K : Séances d'injection de connaissances** (6 à 10 demi-journées)
Des séances de connaissances (K) sont menées pour construire les connaissances de base et les partager entre les membres du groupe. Cette phase d'injection de connaissance doit permettre aux participants de s'ouvrir à de nouvelles perspectives. Les principaux domaines d'injection de connaissances sont : les utilisateurs, les clients, la stratégie de l'entreprise, l'état de l'art et la phénoménologie (connaissances scientifiques de phénomènes qui peuvent être physiques, sociologiques, etc.). Le but de cette étape est double. D'une part, elle permet d'affaiblir la définition actuelle du système à concevoir. Ceci permettant ainsi de s'ouvrir à une nouvelle définition de celui-ci. D'autre part, elle permet de créer des liens entre le problème et des éléments externes au domaine du problème.
- 2- **Phase C : Séminaire de créativité** (séminaire résidentiel de 2 jours)
A la différence des autres techniques de créativité, des concepts initiaux sont utilisés comme points de départ à la séance. Ces concepts ne seront pas considérés comme des propositions à la fin de la séance. Ils sont uniquement là pour orienter le groupe. Durant le processus, les idées d'un groupe peuvent être réutilisées par un autre groupe.
- 3- **Phase P : Synthèse des propositions**
Le but de cette étape est d'établir une stratégie de conception précisant les jalons à fixer pour développer les différents concepts (prototypes, maquettes, programmes de recherche, etc.). Cela permet aux participants, ainsi qu'au management, d'avoir une vision d'ensemble du champ des solutions, en évitant de se focaliser sur une solution dominante.

Toujours d'après les auteurs de (Hatchuel et al. 2009), cette méthode a déjà été mise en œuvre dans différentes entreprises, comme nous l'avons résumé dans le Tableau 8.

Tableau 8 - Entreprises ayant utilisé la méthode KCP et les projets associés (d'après (Hatchuel et al. 2009))

Entreprises	Projets
RATP	Transit rapide par bus Métro du 21ème siècle

	Service de bus local La marche Arrêt de bus de nuit
Thales	Cockpit du futur Centre de contrôle et d'opération du futur Nouvelle génération d'avions monocouloir
Vallourec	Post-filetage de tubes
Volvo	Véhicule durable
Areva	Réseaux intelligents (Smart Grids)
Competitive cluster Moveo	Sécurité pour les véhicules à deux roues
Sagem	Réseau domestique
Safran Helicopter Engines	Nouvelle génération de turbines d'hélicoptères

D'après F. Arnoux (Arnoux 2013), la méthode KCP est très intéressante pour produire des concepts en rupture. Il explique en effet qu'il s'agit d'une méthode complète permettant aux concepteurs de se détacher de la fixation aux concepts actuels. Après lecture du Tableau 8, nous percevons que la méthode KCP est principalement utilisée pour des projets de très haut niveau. Son principal défaut est la lourdeur de sa mise en œuvre (temps, nombre de participants).

II.C.2.b) Les méthodes systématiques

(1) Basée sur l'existant

La méthode TRIZ

TRIZ est un acronyme Russe signifiant Théorie pour la Résolution Inventive des Problèmes. Cette méthode a été créée en 1984 par G. Altshuller (Altshuller 1984). Depuis, elle a été sans cesse développée et modifiée. Comme l'explique Choulier ((Choulier 2000), cité par (Tyl 2011)), la méthode TRIZ peut être utilisée de trois manières différentes.

- TRIZ peut être abordée comme une boîte à outils : chacune des technique de TRIZ peuvent être utilisés indépendamment en fonction des besoins
- TRIZ peut être utilisée de manière séquentielle en suivant la logique de l'algorithme ARIZ
- TRIZ peut être considérée comme une façon de penser et de poser un regard nouveau sur un problème.

Nous listerons ici les principaux outils de TRIZ (selon (Gadd 2011)). Cette liste n'est pas exhaustive mais présente les outils les plus utilisés de la méthode TRIZ.

- Les 40 principes pour résoudre les contradictions.

En se basant sur l'analyse de 50 000 brevets (Gadd 2011), Altshuller propose 40 principes basiques permettant d'éliminer les contradictions techniques. La force de cet outil est de sélectionner les principes applicables en fonction des contradictions rencontrées. Il est souvent représenté sous la forme d'une matrice carrée. Ses 39 lignes et colonnes contiennent la même séquence de paramètres ou indicateurs. Les paramètres en colonne représentent l'indicateur à améliorer, tandis que les paramètres en ligne sont ceux que le concepteur souhaite ne pas détériorer. Ainsi, l'utilisateur entre sa contradiction technique par l'intersection d'une ligne (paramètre à améliorer) avec une colonne (paramètre à ne pas détériorer), et obtient dans la case correspondante de la matrice le numéro des principes pertinents pour l'élimination de la contradiction. Cette matrice est disponible en ligne sur le site internet (Solid Creativity n.d.) par exemple. Il existe également une version plus ergonomique de cet outil sans la représentation matricielle sur ce site internet (Solid Creativity n.d.).

- 8 Principes d'évolution, pour perfectionner les systèmes existants
- Liste d'effets : catalogue de moyens connus pour résoudre des problèmes donnés
- Ressources et Trimming
- Analyse des fonctions
- Solutions Standards
- Déclencheurs de créativité : ils permettent de vaincre l'inertie psychologique dans la recherche de solutions. Par exemple :
 - o « Size-Time-Cost »

Il s'agit de chercher des solutions au problème en exagérant les options de taille (très grand ou très petit), temps (très rapide ou très lent) et coûts (en dépensant énormément ou sans

rien dépenser). Ces solutions sont là pour suggérer aux concepteurs des solutions, plus réalistes, auxquelles ils n'avaient pas forcément pensé. Comme l'écrit Altshuller dans (Altshuller 1984) :

"One can, for instance, take the word "icebreaker" out of the context of the problem, but I still retains the image of an icebreaker, something, "in the shape of a ship", approximately corresponding to the size of an icebreaker, acting approximately at the same speed and costing approximately the same"

L'atout de cet outil est de proposer aux concepteurs de considérer le système de manière inhabituelle, dans le but de vaincre l'inertie psychologique.

- « Smart Little People »

Le principe de cet outil est de représenter le problème à l'aide d'une multitude de petits personnages. Cela permet de bien comprendre le problème à traiter. Son fonctionnement est basé sur l'empathie que l'on éprouve pour ces personnages, qui permet de créer une analogie personnelle avec le problème à traiter. Aussi simpliste qu'elle puisse paraître, l'auteure de (Gadd 2011) assure l'avoir mise en œuvre de manière concluante pour traiter des problèmes sérieux d'ingénierie.

- Technique des 9 boîtes

Cet outil permet de poser un problème précis pour en proposer les solutions. Il s'agit de considérer les solutions originales en agissant :

- A l'extérieur du système, sur le système, sur les constituants du système
- En avance, sur le moment ou après.

- Idéalité

Ce retour d'expérience indique que TRIZ est une méthode pertinente qui peut mener à de l'innovation de rupture. La méthode TRIZ a été utilisée pour la conception de la rampe de distribution de carburant du moteur Trent 900 de Rolls Royce. Ceci a permis, selon l'auteure de (Gadd 2011), une réduction de 95% du temps de fabrication (Gadd 2011).

Contrairement à la méthode KCP, la méthode TRIZ nous apparaît plutôt orientée vers la recherche de solution à des problèmes techniques.

Matrice Morphologique

L'approche morphologique développée par Zwicky (Zwicky 1948) consiste à séparer un système complexe en sous-systèmes essentiels. Pour chacun de ces sous-systèmes, des solutions seront proposées par d'autres méthodes de génération d'idées, comme présenté dans la Figure 33 ci-dessous. Le principe de cette méthode est ensuite de combiner les solutions des sous-systèmes pour obtenir différentes solutions pour le système complet.

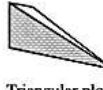
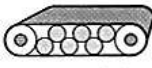
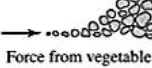
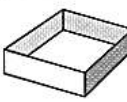
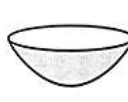
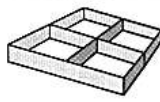
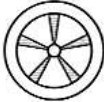
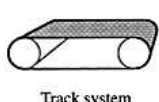
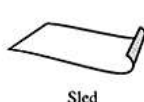
	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Vegetable picking device		 Triangular plow	 Tubular grabber	 Mechanical picker
Vegetable placing device	 Conveyor belt	 Rake	 Rotating mover	 Force from vegetable accumulation
Dirt sifting device	 Square mesh	 Water from well	 Slits in plow or carrier	
Packaging device				
Method of transportation		 Track system	 Sled	
Power source	Hand pushed	Horse drawn	Wind blown	Pedal driven

Figure 33 - Exemple de matrice morphologique (tiré de (Design & Develop For You n.d.))

L'avantage de cette méthode est qu'elle est logique et donc intelligible pour des ingénieurs. Son inconvénient principal est qu'elle dépend d'une source d'idées pour les sous-systèmes élémentaires. C'est de ces concepts de solutions élémentaires que dépendra le caractère fortement innovant ou non des solutions globales proposées.

Catalogues de solution

Les catalogues de solution consistent à fournir, pour un problème donné, un panel de solutions déjà connues et approuvées. L'avantage de cette méthode c'est qu'elle donne produit rapidement des solutions. L'inconvénient c'est que ces solutions sont déjà existantes. Elles peuvent donc être soit peu innovantes (déjà mises en œuvre par exemple), soit potentiellement innovantes mais éloignées du problème à traiter.

(2) Analytique

SIT (Structured Inventive Thinking)

Cette méthode a été développée par Horowitz dans le milieu des années 90 (Horowitz 1999). Elle a été pensée dans le prolongement de la méthode TRIZ, dans une volonté de simplification de sa mise en œuvre. Elle s'applique à des systèmes existants souffrant d'effets indésirables. Cette méthode s'appuie sur un premier postulat selon lequel les idées les plus innovantes restent toujours proches du problème initial. C'est ce qu'Horowitz appelle la condition du « Monde Clos » (Horowitz 1999). Cela signifie que le monde de la solution n'introduit pas de nouveaux éléments par rapport au monde du problème. La deuxième condition posée par la méthode SIT, c'est le changement qualitatif. Il doit permettre de supprimer le conflit entre la cause du problème et son effet, ou bien de le surpasser. Ma méthode SIT s'articule autour de deux stratégies de solution : extension et restructuration et cinq provocateurs d'idées : Unification, Multiplication, Division, Rupture de la symétrie, Elimination d'un objet.

II.D. Combiner

Cette étape consiste à combiner les différents principes de fonctionnement précédemment mis en lumière pour chaque fonction, afin de former un concept de système candidat à la réponse au problème de conception.

La méthode la plus utilisée pour cette tâche de combinaison est la matrice morphologique (Pahl et al. 2007; Kirby 2001; George 2012; Dieter & Schmidt 2013; Gavel 2007). Cette méthode, introduite par Zwicky (Zwicky 1948), consiste à générer des solutions d'architectures par combinaisons de solutions des fonctions et sous-fonctions du système. La Figure 34 ci-dessous présente un exemple de matrice morphologique. Un exemple de solution d'architecture système y est représenté par une ligne brisée bleue.

Fonctions	Sous-Fonctions	Solutions				
		#1	#2	#3	#4	#5
Fonction F1	SF 11					
	SF 12					
Fonction F2	SF21					
	SF22					
Fonction F...	...					

● — ● Exemple de solution d'architecture système

Figure 34 - Exemple de matrice morphologique

Les auteurs de (Weber et al. 1998; George 2012) ont présenté des méthodes originales d'utilisation de la matrice morphologique. Comme le soulignent les auteurs de (Dieter & Schmidt 2013), la génération par matrice morphologique peut rapidement mener à un grand nombre de concepts candidats. En ce sens, la méthode proposée par l'auteur de (George 2012) permet d'en réduire le nombre de combinaisons. Elle permet également d'anticiper l'étape d'évaluation en proposant des concepts candidats fonctionnels et composés d'éléments compatibles entre eux. L'approche de (George 2012) se compose de six étapes, représentées sur la Figure 35, et décrites ci-dessous : Elle repose sur un va et vient entre des matrices morphologiques et des matrices d'option.

Etape 1 : Matrice morphologique par groupes

La matrice morphologique est établie. Pour chaque fonction, les concepts sont regroupés en familles pour plus de lisibilité.

Etape 2 : Matrice morphologique filtrée

Un premier filtrage grossier des concepts solution est effectué. Il permet d'écarter les concepts irréalistes.

Etape 3 : Matrice morphologique de niveau 1

Des paires de fonctions sont mises en valeur afin d'explorer leur synergies éventuelles.

Etape 4 : Matrice d'options de niveau 2

Les paires de fonctions décrites précédemment deviennent des modules fonctionnels. Pour chaque module fonctionnel, les concepts candidats sont explicités. La nouvelle matrice obtenue est appelée matrice d'options.

Etape 5 : Matrice morphologique de niveau 2 puis Matrice d'options de niveau 2

Une nouvelle matrice morphologique est alors créée, reprenant les modules fonctionnels précédemment énoncés.

Etape 6 : (optionnelle) Combinaisons fonctionnelles alternatives

Il est possible de reprendre le processus avec des modules fonctionnels différents. Cela pourrait permettre de générer de nouveaux concepts.

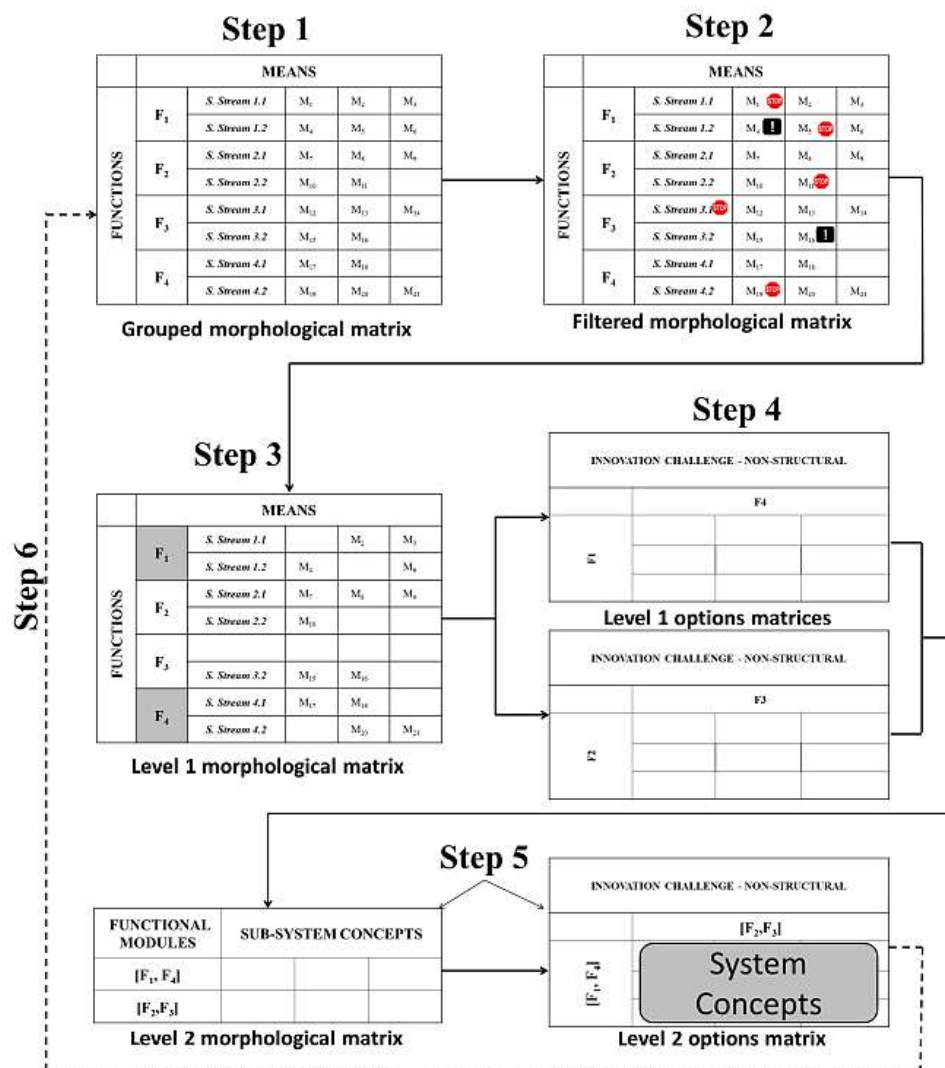


Figure 35 - Méthodologie systématique de génération de concept proposée dans la thèse de (George 2012)

III. Proposition d'une méthode pour les travaux de thèse

Ce chapitre est dédié à la présentation du processus de sélection, pour chaque étape, d'une méthodologie adaptée à notre cas d'étude. Il aboutira à la proposition d'une méthode pour la génération d'architectures dans le cadre de la thèse.

III.A. Sélection méthode Abstraire

Cette étape d'abstraction relève essentiellement du travail précédemment réalisé dans le cadre de la spécification du besoin. Il a en effet été question de mettre en lumière les fonctions essentielles à rendre par le système à concevoir, sans préjuger de son principe de fonctionnement.

III.B. Sélection méthode Décomposer

La décomposition fonctionnelle du système est déclinée de la spécification de besoin du système à concevoir. Ce document énonce en effet les différentes fonctions que le système devra satisfaire.

III.C. Sélection méthode Rechercher

Suite à l'inventaire de la littérature sur les choix de méthodes de créativité, voir paragraphe II.C, une sélection a été faite en accord avec les spécificités de notre étude. Ce choix méthodologique est présenté dans ce paragraphe.

III.C.1. Critères de sélection

Pour pouvoir être applicable à notre cas d'étude au sein de Safran Helicopter Engines, la méthode proposée devra :

- Être applicable à la résolution d'un problème technique
- Permettre l'innovation de rupture
- Pouvoir être mise en œuvre sans faire intervenir de prestataire extérieur
- Pouvoir être mise en œuvre rapidement et avec un nombre restreint de participants.

Le but, pour l'entreprise, est de disposer d'une méthode rapide à mettre en œuvre permettant d'identifier des architectures en rupture.

III.C.2. Comparaison des méthodes de génération d'idées

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe II.C.1, les différents critères de sélection d'une méthode de génération d'idées sont : le type de solution attendu, les moyens humains à disposition et le type de problème à résoudre.

III.C.2.a) Type de solution

(1) Impact de la représentation des idées

Lors de la démarche de créativité, les idées peuvent être représentées soit de manière graphique ou textuelle. Les auteurs de (Mckoy et al. 2001) proposent une classification de quelques techniques selon ces trois critères (voir Figure 36).

Représentation Graphique	Représentation Textuelle	Représentation Croisée
• C-Sketch • Méthode Galerie	• Brainstorming • Diagramme KJ • Check-list • Méthode d'affinité • Storyboarding • Diagramme des causes et effets • Méthode 635	• Analyse Morphologique • Synectique

Figure 36 – Classification de quelques méthodes de créativité par types de représentation des idées (traduit de (Mckoy et al. 2001))

Plusieurs expériences (Mckoy et al. 2001; Markman et al. 2011) ont conduit à la même conclusion concernant la représentation des idées. La représentation graphique des idées permet d'augmenter le nombre et la qualité des concepts générés. Les auteurs de (Markman et al. 2011) ont également constaté que plus de concepts de haute qualité sont générés lorsque les idées sont affichées au mur, par un seul dessin.

Ainsi, les auteurs de (Markman et al. 2011) suggèrent de procéder en deux temps. Ils proposent tout d'abord d'afficher les idées au mur (méthode Galerie, brainsketching) pour générer un grand nombre de solutions de qualité. Dans un second temps, il est suggéré de faire circuler les idées de participant à participant (6-3-5, C-sketch) en utilisant des mots et dessins pour développer les détails des solutions.

(2) Innovation de rupture

La notion d'innovation de rupture est reprise dans l'article (Li et al. 2007) sous l'appellation « Fonction-oriented creative design », décrite par les auteurs :

« The purpose is to design a new product or system. The improvement of main functions of the existing product or system possibly reaches its limitation, so instead of dealing with the problems in the existing product or system, designers should jump out of the existing system, think of the ultimate goal of the design, and find if there are other better ways to reach it. The strategy taken here is to solve the maximised problem and change working principles (second order change) of system. » (Li et al. 2007)

Cette approche correspond donc parfaitement à notre démarche d'innovation de rupture d'un système existant. Les techniques prescrites par les auteurs pour ce cas de figure sont :

- Concept-fan
- FBS mapping
- Seaching new principles from scientific-effects base.

Cependant, les auteurs ne donnent pas de détails ou de justification quant au choix de ces techniques.

De son côté, l'auteur de (Geschka 2007) (cité par (Schöllhammer 2015)) précise que les approches de type « Matrice morphologique » et « Confrontation avec des images ou expressions » sont bénéfiques pour la conception au niveau système, d'une solution qui apportant de nouvelles fonctions ou bénéfices.

McFadzean (McFadzean 1998a) propose une classification des techniques de créativité, selon trois niveaux de changement de paradigme (voir Figure 37) :

- Préservation du paradigme
- Extension du paradigme
- Changement de paradigme

Préservation du paradigme

Extension du paradigme

Changement de paradigme

• « Sécurisant » • Pas nécessaire d'utiliser son imagination • Associations libres • Utilisable par des groupes expérimentés ou non	• Peut être considéré comme inconfortable • Utilisation de l'imagination nécessaire • Fantaisie et stimuli aléatoires • Plutôt destiné aux groupes expérimentés	
- Brainstorming - Brainwriting	- Stimulations par les objets - Métaphores	- Pensée idéale - Images fertiles

Figure 37 – Classification des techniques de créativité selon le niveau de changement de paradigme (adapté de (Mcfadzean 1996))

Mcfadzean (McFadzean 1998a), en accord avec (Nagasundaram & Bostrom 1993), fait le constat que les techniques de brainstorming et brainwriting semblent peu appropriées pour un changement de paradigme.

(3) Rôle de l'animateur

Enfin, l'auteur de (McFadzean 1998a) stipule que dans le cadre des techniques de créativité impliquant un changement de paradigme, l'animateur doit être expérimenté. Il doit permettre à chacun des participants de s'exprimer librement. Plus encore, il doit être en mesure de conduire le groupe à une véritable synergie pour que les idées nouvelles soient échangées. Ce constat est appuyé par l'article (Mcfadzean & Nelson 1998). Les auteurs défendent l'idée selon laquelle que les équipes fonctionnent plus efficacement avec l'aide d'un animateur. En effet, ce dernier sera en mesure de proposer les techniques de créativité adaptées à la situation.

III.C.2.b) Moyens humains

(1) Approche rationnelle ou intuitive

Lorsque que l'on veut appliquer des techniques de créativité avec des ingénieurs, les approches rationnelles sont en général plus adaptées (Geschka 2007).

Les auteurs de (Samuel & Jablokow 2010) ont proposé un classement de techniques de créativité selon leur type d'approche. Le classement comprend cinq niveaux, de la plus rationnelle vers la plus intuitive (voir Figure 38).

(2) Groupe ou individuel

D'après (Markman et al. 2011), l'utilisation de techniques de groupe est très bénéfique. En effet, au fur et à mesure que les membres apportent leurs idées, la solution complète gagne en qualité. De plus, une grande partie des idées générées sont influencées par les autres membres du groupe.

(3) Niveau de difficulté de la prise en main

(Samuel & Jablokow 2010) proposent un classement de quelques techniques par niveau de difficulté. Ces différents niveaux sont évalués sur une échelle qualitative de 1 (très facile à maîtriser) à 5 (très difficile à maîtriser). La Figure 38 illustre cette classification.

Mastery Level	More Adaptive Cognitive Style	←			More Innovative Cognitive Style
5	ARIZ; 76 Standard Solutions		Bio-mimicry		Abstraction; Analogy
4	Su-Field Model	Scientific Effects	TILMAG; Function Structure	HIT; Provocation & Movement; Trends	
3	Function Analysis	AFD		Nine Screens	
2	40 Inventive Principles	SCAMPER; MLP Modeling	Imaginary Brainstorming; Job Scoping	Random Stimulus; Concept Triangle; Ideal Final Result	
1	Zone of Conflicts; Time of Conflicts	Brainwriting; Contradiction Modeling; 5 Whys	Green Thinking Hat	Separation Principles; Ideality	Brainstorming

Table Legend:
 ARIZ = Algorithm of Inventive Problem Solving; MLP = Many Little People; HIT = Heuristic Ideation Technique
 Su-Field = Substance-Field; AFD = Anticipatory Failure Determination
 TILMAG = Transformation of Ideal Solution Elements with an Association Matrix

Figure 38 – Classification des techniques de créativité par niveau de difficulté et par style cognitif (issu de (Samuel & Jablokow 2010))

(4) Culture de l'entreprise

D'après E. McFadzean (McFadzean 1998a), une séance de résolution créative de problème nécessite une culture d'entreprise propice à l'innovation et à la pensée créative. Il montre que ceci implique de :

- Assurer la sécurité des participants. Ils ne peuvent être créatifs s'ils ont peur de la critique ou d'éventuelles sanctions (Anderson et al. 1992).
- Encourager les employés à remettre en question ce qui « a toujours été fait de cette manière » (Jones & McFadzean 1997).
- Employer des personnes venues de divers horizons permet d'avoir des points de vue différents sur le problème (Jones & McFadzean 1997).
- Permettre aux employés de passer du temps sur des projets de recherche qui leur tiennent à cœur. A titre d'exemple, le Post-It a pu être développé par la société 3M parce qu'elle a notamment permis à un de ses inventeurs de travailler sur ce concept novateur (Henry & Walker 1991).
- Mettre en place des équipes de résolution créative de problèmes. Les membres de ces équipes doivent partager les mêmes objectifs. Les équipes fonctionneront plus efficacement avec l'aide d'un animateur qui sera en mesure de proposer les techniques de créativité adaptées à la situation (McFadzean & Nelson 1998).

III.C.2.c) Type de problème

Il n'existe pas dans la littérature actuelle de classification des techniques de créativité par domaine d'application. Cependant, beaucoup de références concernent la conception en ingénierie. Ainsi, à défaut d'avoir un panel des techniques employées dans différents domaines, nous avons pu obtenir des retours d'expérience dans le domaine qui nous intéresse.

Dans le cas de publications non spécialisées dans la conception, il a été possible de distinguer les techniques non applicables à notre problème. On pensera par exemple aux méthodes Océan Bleu, Lean Startup, Business model nouvelle génération trop orientées business/marché ou la méthode Delphi qui va plutôt dans le sens de la prévision économique et stratégique.

III.C.3.Synthèse de différentes méthodes

Dans le cadre de notre approche d'innovation de rupture en conception en ingénierie, les bonnes pratiques suivantes ont été listées lors du travail bibliographique :

- Utiliser des représentations graphiques des idées plutôt que textuelles (Mckoy et al. 2001; Markman et al. 2011). Les auteurs de (Markman et al. 2011) proposent même de procéder en

- deux temps. Tout d'abord via une méthode de type Galerie, puis via échange d'idées de proche en proche au sein des participants.
- Certaines techniques sont recommandées pour obtenir de l'innovation de rupture :
 - (Li et al. 2007) : Concept fan, FBS mapping, Recherche nouveaux principes à partir de bases d'effets scientifiques
 - (Geschka 2007) : Matrice morphologique, Confrontation avec des images ou expressions
 - (McFadzean 1998a) : Idéalisation, Rich Pictures, Object Stimulation, Métaphores
 - La présence d'un animateur expérimenté est bénéfique pour la génération intuitive d'idées (McFadzean 1998a).
 - Certaines techniques sont plus faciles à prendre en main que d'autres. Quelques techniques ont ainsi été classées par niveau de difficulté par (Samuel & Jablow 2010), comme nous l'avons vu au paragraphe III.C.2.b)(3).
 - L'effet de groupe est très bénéfique pour la génération d'idées (Markman et al. 2011).

La méthode que nous proposons pour les travaux de thèse repose sur différentes techniques, comme nous l'avons représenté en Figure 39. Elle sera mise en œuvre dans le cadre d'une séance de créativité.

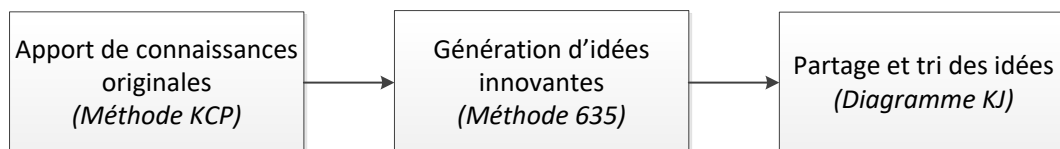


Figure 39 - Méthode intuitive de génération d'idées proposée

Les différentes étapes de la méthode proposée sont détaillées ci-dessous.

1. **Apport de connaissances originales** en lien avec la thématique de la séance, mais déconnectés des habitudes de conception de l'entreprise et/ou des participants. Cet apport d'information est emprunté à la phase K de la méthode KCP (Hatchuel et al. 2009; Derumier 2016). Comme nous l'avons expliqué au paragraphe II.C.2.a)(4), l'intérêt de cette technique est double. Elle permet, d'une part, d'affaiblir la définition actuelle du système à concevoir dans l'esprit des participants. D'autre part, cette pratique crée des liens entre le problème et des éléments externes qui peuvent inspirer les participants.
2. **Génération d'idées originales : Méthode 635.** Pour la méthode créativité en elle-même, nous avons choisi une méthode de type brainwriting (cf. II.C.2.a)(1)). Cela permet en effet d'obtenir une méthode facile à mettre en œuvre en un temps restreint. De plus, sa proximité avec le brainstorming, couramment pratiqué dans l'entreprise, permettra à cette méthode d'être plutôt bien acceptée par les ingénieurs. Enfin, le fait pour les participants de travailler personnellement et à l'écrit permet à chacun de s'exprimer librement. Il n'est pas rare en effet de voir des brainstorming où la parole est monopolisée par une minorité de participants.

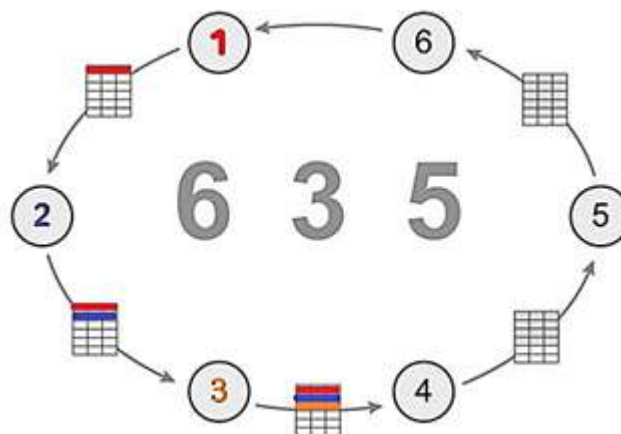


Figure 40 - Déroulement d'une séance de brainwriting selon la méthode 635 (adapté de (Christian Höfling 2017))

Le déroulement de la méthode sera le suivant. Chaque participant a 5 minutes pour noter 3 idées sur une feuille de papier. Une fois le temps écoulé, chaque participant donne sa feuille à son voisin. Chacun a alors à nouveau 5 minutes pour compléter la feuille qu'il reçoit de 3 nouvelles idées, en s'inspirant des idées déjà proposées sur la feuille. Ces échanges de feuilles continuent jusqu'à ce que chaque participant retrouve sa feuille initiale. Ce déroulement est illustré par la Figure 40 ci-dessus.

3. Partage et tri des idées : Diagramme KJ. Suite à la phase de réflexion silencieuse et personnelle que représente la méthode 635, il nous a paru intéressant de créer un moment de partage verbal entre les participants. Cette dernière étape prendra la forme d'une séance de tri des idées par Diagramme KJ (expliqué au paragraphe II.C.2.a)(3)). Le but est alors moins de classer les idées par groupe, que de permettre aux participants de discuter et de développer leurs idées à l'oral.

Nous proposons un récapitulatif des différentes techniques de créativité impliquées dans la méthode proposée dans le Tableau 9, ci-dessous. Il y est détaillé les points forts et les points faibles de chaque méthode au regard de notre application. Une dernière colonne rappelle également les éléments effectivement retenus pour nos travaux.

Tableau 9 – Techniques de créativité impliquées dans la méthodologie proposée

Techniques de créativité	Points forts	Points faibles	A retenir pour notre application
Matrice Morphologique	Bonne approche système du problème	Besoin de passer par une autre technique pour générer les concepts élémentaires	Utile pour structurer l'approche de génération d'architecture système
KCP	Très adapté à l'innovation de rupture	Très lourd à mettre en œuvre. Approprié pour des réflexions sur un niveau plus élevé.	Aspect apport de connaissance
Brainstorming Brainwriting Brainsketching	- Bon potentiel d'innovation de rupture - Rapide - Connue et acceptée	Nécessite de créer les conditions propices à l'émergence de solutions vraiment innovantes	Brainwriting pour son aspect personnel, permettant à chacun de s'exprimer
TRIZ	Outils plutôt logiques et faciles à prendre en main	Plutôt orienté vers la résolution de problèmes techniques en conception de détail	Etat d'esprit d'ouverture, boîte à outils intéressante pouvant servir durant les séances de créativité

Les points faibles de l'approche proposée résident essentiellement dans :

- L'absence d'un animateur professionnel des techniques de créativité : qui pourrait être pertinent pour guider efficacement les groupes de recherche de solutions innovantes.
- La simplicité apparente des approches mises en œuvre, qui peut les faire percevoir négativement. Le brainwriting peut paraître simpliste à côté de méthodes telles que TRIZ ou KCP. Cependant, ces dernières nécessitent :
 - o un accompagnement professionnel pour leur mise en œuvre
 - o plus de temps de la part des participants (entre 5 et 7 journées pour une méthode KCP, contre moins d'une journée pour une méthode de type brainwriting).

III.D. Sélection méthode Combiner

Pour l'étape de combinaison des concepts de solution, la méthode systématique de matrice morphologique (présentée dans le paragraphe II.D) nous est apparue particulièrement intéressante car elle permet d'avoir une vision systématique des solutions candidates.

IV. Mise en œuvre de la méthode proposée chez Safran Helicopter Engines

Cette partie traite de la mise en œuvre chez Safran Helicopter Engines de la méthode proposée dans la partie III.

IV.A. Abstraire et Décomposer

Nous avons constaté que les étapes d'abstraction et de décomposition sont fortement liées. Nous avons donc choisi de les regrouper dans ce paragraphe.

IV.A.1. Abstraction du problème de conception

Le système carburant doit être un moyen de fournir à la chambre de combustion le bon débit massique de carburant au bon endroit et au bon moment. Optionnellement, le système carburant pourra être un moyen de positionner des géométries variables (GV), de refroidir l'huile moteur ou d'alimenter des consommateurs hydrauliques (pompe à jet avion, par exemple).

Nous avons d'ores et déjà identifié deux fonctions principales pour le système carburant :

- Déplacer le carburant du réservoir jusqu'à la chambre de combustion du moteur
- Doser le débit massique de carburant fourni à chaque instant vers les bons injecteurs de la chambre de combustion.

Ainsi que trois fonctions principales optionnelles :

- Positionner les GV du moteur
- Refroidir l'huile moteur
- Alimenter des consommateurs hydrauliques.

Une fois les fonctions principales du système à concevoir formalisées, on entre dans l'étape de décomposition fonctionnelle à proprement parler.

IV.A.2. Décomposition fonctionnelle du système à concevoir

(1) *Un processus itératif*

La décomposition fonctionnelle d'un système n'est pas unique, comme le précisent les auteurs de (Dieter & Schmidt 2013). Chacune d'entre elles représente une certaine vision du système (par exemple : vision énergétique, opérationnelle,...), qui est elle-même partielle et partiale. Il est donc important, pour la suite du processus, de choisir une « bonne » décomposition fonctionnelle du système ; c'est-à-dire une décomposition qui :

- Permette de faire apparaître les architectures candidates le plus naturellement possible
- Soit en phase avec les exigences du système. Par exemple, pour un système ayant de fortes contraintes énergétiques, une décomposition fonctionnelle s'appuyant sur les chemins de puissance sera bienvenue
- Permette la plus grande indépendance entre les fonctions. Ceci permet de réduire la complexité du problème de conception. Il s'agit en effet de répondre à chaque fonction séparément plutôt que de considérer le système dans son ensemble. Même si l'on constate que l'indépendance totale entre les fonctions n'est pas réaliste, il est bénéfique de réduire le plus possible les interactions entre celles-ci. En effet, les fonctions doivent toujours garder une interaction minimale afin de jouer leur rôle au sein du système.

Si on s'intéresse aux deux fonctions principales présentées ci-dessus, on peut arriver, dans un premier temps, à la décomposition fonctionnelle représentée en Figure 41.

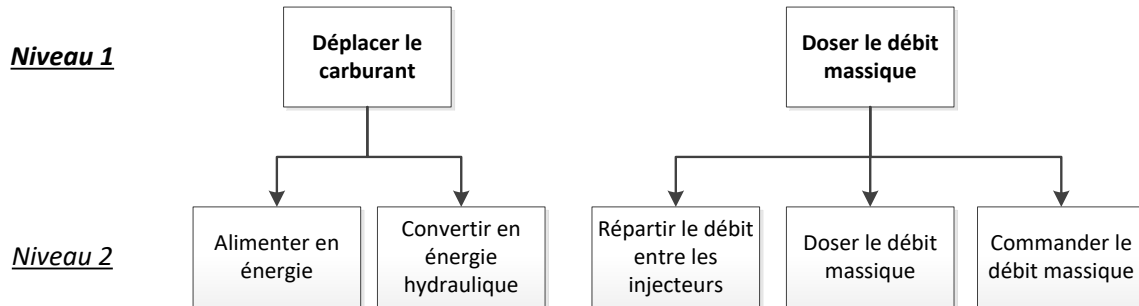


Figure 41 - Décomposition initiale des fonctions principales du système carburant

Après utilisation de ces fonctions de Niveaux 2 pour la génération d'architectures candidates, nous avons constaté que :

- Il n'était pas pertinent de considérer une fonction « Alimenter en énergie » en tant que telle. C'est en effet une fonction induite par le besoin de déplacer du fluide. Elle peut donc s'intégrer aux autres fonctions impliquant de transmettre de l'énergie au fluide.
- La fonction « Convertir en énergie hydraulique » ne nous est finalement pas parue assez précise vis-à-vis du véritable besoin. En effet, l'énergie hydraulique est générée dans un but bien précis qu'il est plus intéressant d'explicitier directement : « Amorcer, Aspirer, Gaver ». De plus, il peut également y avoir de la conversion en énergie hydraulique au sein de la fonction « Doser le débit massique ». On peut en effet imaginer une machine hydraulique qui générerait à tout instant le débit nécessaire au fonctionnement du moteur. Cet aspect va donc à l'encontre de la volonté d'indépendance entre les fonctions.
- Les fonctions « Doser » et « Répartir » sont étroitement liées. En effet, répartir le carburant entre les injecteurs c'est, d'une certaine manière, doser le carburant que l'on envoie à chaque injecteur. Ainsi ces deux fonctions ont été regroupées.

Ainsi la décomposition fonctionnelle a évolué au cours du processus de génération d'architecture pour être plus proche des spécificités opérationnelles du système carburant. Une nouvelle décomposition fonctionnelle est représentée en Figure 42.

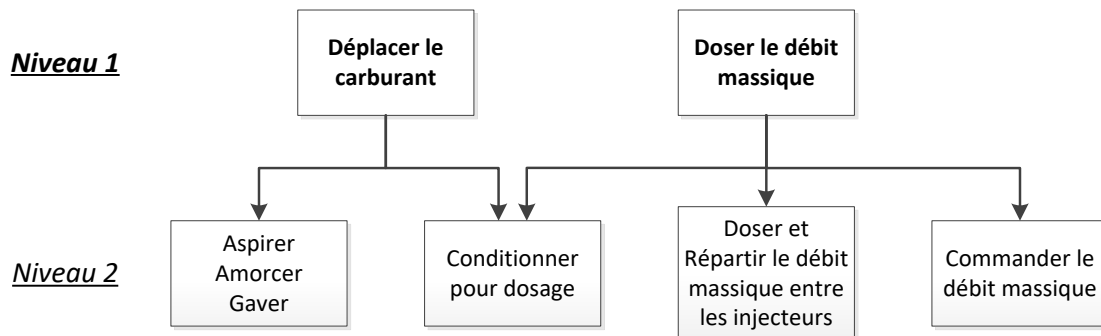


Figure 42 – Décomposition intermédiaire des fonctions principales du système carburant

En utilisant à nouveau cette décomposition pour générer des architectures conceptuelles, nous nous sommes rendu compte que de nouvelles modifications ont été nécessaires. En effet :

- Les trois fonctions « Amorcer », « Aspirer » et « Gaver » sont finalement les contributeurs d'une fonction plus importante : « Fournir une pression de gavage au reste du système carburant ». De plus, ces trois fonctions peuvent être réalisées ensemble ou de manière indépendante. Il a donc été décidé de les décomposer, au sein d'un troisième niveau de décomposition fonctionnelle.
- Les fonctions « Doser » et « Conditionner pour dosage » sont étroitement liées. En effet, le concept retenu pour la fonction « Doser » implique (ou exclue) d'office toute une famille de solutions pour la fonction « Conditionner pour dosage ». Ainsi, ces deux fonctions ont été fusionnées au niveau 2, et apparaissent séparément au niveau 3.
- Le regroupement des fonctions « Doser » et « Répartir » a été abandonné. Bien que ces deux fonctions puissent être fortement liées (cas où l'on doserait directement à l'injecteur par exemple), elles peuvent aussi être fortement dissociées pour des architectures où

l'on considèrerait plusieurs systèmes de dosage distincts pour assurer la répartition. Ainsi, ces deux fonctions ont été à nouveau dissociées.

- Une fonction « Réchauffer le carburant » a été ajoutée. En effet, en générant les architectures, nous avons constaté qu'un système de réchauffage pouvait être nécessaire afin de répondre au besoin de fonctionner par temps froid sans additif anti-givre.

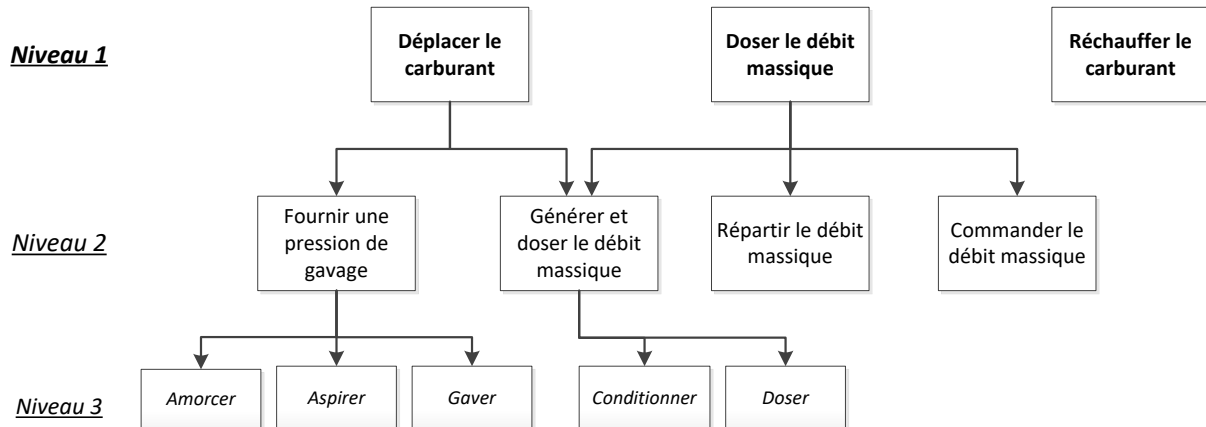


Figure 43 – Décomposition retenue pour les fonctions principales du système carburant

Tout ceci montre que la décomposition fonctionnelle du système carburant est, tout d'abord, loin d'être unique. Nous avons proposé trois décompositions différentes, mais bien d'autres pourraient être imaginées. Ensuite, les itérations successives pour arriver à la décomposition retenue nous ont bien montré que le choix d'une décomposition fonctionnelle impose un certain angle de vue sur le système. Il convient par conséquent de choisir l'angle de vue fonctionnel qui permettra d'être le plus efficace possible dans la génération d'un large panel d'architectures. Nous proposons de mettre en évidence ce processus itératif entre Décomposition fonctionnelle et Génération d'architectures en Figure 44.

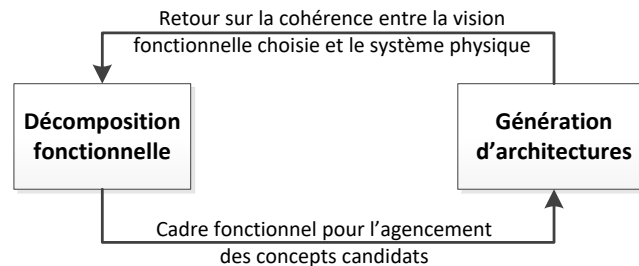


Figure 44 - Illustration du processus itératif existant entre la Décomposition fonctionnelle et la Génération d'architectures

(2) Permettre la créativité

La décomposition des fonctions implique d'adopter le bon un angle de vue sur le système à concevoir. Nous avons remarqué que certaines décompositions fonctionnelles peuvent nuire à la créativité des solutions proposées. *Considérons, par exemple, la première décomposition que nous avons faite de la fonction « Déplacer le carburant » en « Alimenter en énergie » et « Convertir en énergie hydraulique ».* Cette décomposition convient tout à fait pour une solution de type « pompe » : alimentée par un arbre mécanique et fournissant de l'énergie hydraulique (débit ou pression). Cependant, il apparaît qu'elle correspond bien moins bien à une solution de type « gravité + effet venturi », telle qu'utilisée sur les motos, avec le réservoir situé au-dessus d'un carburateur à effet venturi. C'est un point fondamental que nous avons observé : la décomposition fonctionnelle peut avoir tendance à privilégier les solutions classiques, au détriment de solutions plus originales. Dès lors, afin d'éviter de trop restreindre notre espace de solutions, la décomposition fonctionnelle ne sera

pas menée à plus bas niveau à ce stade du processus de conception. Ainsi, dans l'étape suivante de recherche de concepts candidats, nous avons choisi d'utiliser :

- Les décompositions de niveau 2 et 3 (voir Figure 43) pour la génération d'architectures
- La décomposition de niveau 1 (voir Figure 43) pour les séances de créativité.

Cette distinction permet à la fois :

- De présenter les résultats de manière plus structurée, en utilisant une décomposition plus fine pour la génération d'architectures
- De garder la plus grande ouverture d'esprit quant aux solutions proposées lors des séances de créativité, en utilisant un découpage fonctionnel haut niveau.

Il est à noter que la formulation de la fonction « Fournir une pression de gavage », utilisée dans la décomposition fonctionnelle finale, permet de dépasser la limitation de créativité mise en avant dans l'exemple ci-dessus. Cependant, cette décomposition ayant été obtenue à l'issue d'un processus itératif, la recherche de concepts candidats a été menée avec la première version de la décomposition fonctionnelle pour permettre une première itération.

(3) Définition des fonctions principales

Etant donné que les fonctions principales de niveau 2 vont être largement utilisées pour la génération d'architectures, nous en donnons ici les définitions précises.

- « Fournir une pression de gavage » : Il s'agit, à partir du carburant fourni par le système carburant hélicoptère (niveau de pression bas, hauteur à vaincre), de fournir au reste du système du carburant sous une pression suffisante pour en permettre le bon fonctionnement.
- « Doser le débit » : Il s'agit d'envoyer à chaque instant le bon débit à la chambre de combustion dans sa globalité.
- « Répartir le débit » : Il s'agit, à chaque instant, de diriger vers les bons injecteurs, la bonne proportion du débit total chambre de combustion.
- « Commander » : Il s'agit de commander les sous-systèmes du système carburant afin de fournir à chaque instant le bon débit, aux bons injecteurs.

IV.B. Rechercher des solutions innovantes

IV.B.1. Déroulement des séances

La méthode de créativité proposée a été mise en œuvre sous forme de deux séances de créativité de 2h chacune. Conformément au paragraphe précédent, les thèmes des séances étaient respectivement « Déplacer le carburant » et « Doser le carburant ». Le minutage de cette séance est précisé en Figure 45, ci-dessous.

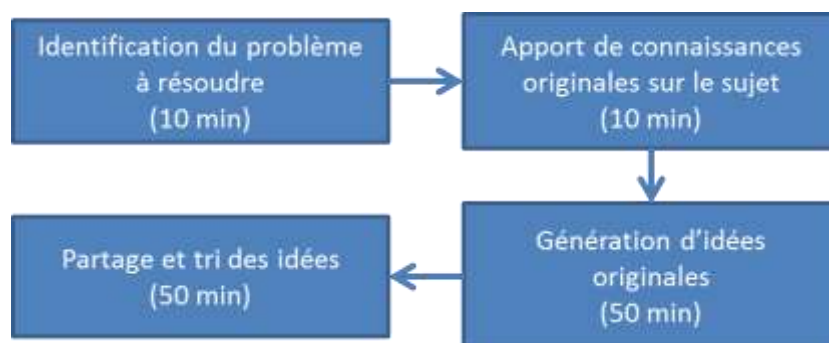


Figure 45 – Déroulement de la méthode de créativité proposée

La séance de créativité reprend les trois étapes décrites au paragraphe III.C.3. Une étape initiale a été ajoutée à ce triptyque : « Identification du problème à résoudre », d'une durée de 10 minutes.

(1) Identification du problème à résoudre

Il s'agit, pour l'animateur, de présenter le contexte et le sujet de la séance aux participants. Nous avons veillé à ne pas ajouter trop de contraintes au problème afin de ne pas nuire à l'originalité des

solutions qui seront proposées.

(2) **Apport de connaissances originales sur le sujet**

L'animateur a présenté sur un diaporama des principes ou technologies en lien avec la thématique considérée. Il ne s'agit cependant pas de faire uniquement un état de l'art des pratiques de l'entreprise et de ses concurrents, mais bien d'apporter des connaissances étrangères au domaine de l'entreprise. Le but étant de stimuler les participants, ainsi que de les mettre dans un état d'ouverture d'esprit et de rejet du jugement des principes ou solutions présentées.

(3) **Génération d'idées originales**

Cette étape a été mise en œuvre par l'utilisation de la Méthode 635 (plus de détails sur cette méthode au paragraphe II.C.2.a)(1)). Chaque participant est assis devant une feuille A3, contenant 6 lignes de 3 post-it (voir photo en Figure 46). Nous avons jugé intéressant de numéroter les post-it à l'aide d'une lettre (associée à la feuille sur laquelle il est collé) et un chiffre (associé à la ligne où il se trouve). Cette numérotation permettra la traçabilité des idées. Elle sera utilisée uniquement dans le but de mieux comprendre la méthode, et de l'améliorer. Comme indiqué sur la feuille (visible en Figure 46 ci-dessous) chaque participant remplit les 3 post-it de la ligne, en associant 1 idée à 1 post-it. A chaque rotation et pour une feuille donnée, une nouvelle ligne de post-it est remplie par un nouveau participant.



Figure 46 – Support A3 utilisé pour la mise en œuvre de la méthode 635

A la fin de l'étape de génération d'idées, les feuilles A3 de chaque participant ont été prises en photos. Ces dernières permettront d'avoir une trace de l'historique des idées générées au cours de la séance.

(4) **Partage et tri des idées**

L'utilisation de post-it, plutôt que d'écrire directement sur la feuille blanche, est justifiée par le déroulement de l'étape suivante : « Partage et tri des idées ». Les post-it sont lus à haute voix par les participants qui échangent sur les idées, et proposent des post-it comportant des idées similaires à celui venant d'être lu. Les post-it contenant des idées proches sont alors détachés de leurs feuilles A3 pour être affichés au tableau. Ils forment alors un groupe comportant un titre défini collégialement. Au fur et à mesure de la séance, plusieurs groupes sont formés et complétés. C'est à l'animateur de veiller à ce que la structure des groupes d'idées soit cohérente. Ce moment doit encore permettre l'échange et la génération de nouvelles idées. Aucun jugement ne doit être apporté sur les idées émises. La séance se termine lorsque tous les post-it ont été attribués à un groupe.

IV.B.2. Choix des participants

Le groupe de travail était composé d'un animateur ainsi que de 6 participants pour la séance concernant la fonction « Doser », et 7 participants pour la séance sur la fonction « Déplacer ». Afin de rester au plus près de la méthode originale (qui prévoyait 6 participants et donc 5 rotations), nous avons conservé, pour la séance « Doser » un nombre de 5 rotations. Il est donc à noter qu'au cours de cette séance, chaque participant n'aura eu que 6 des 7 feuilles entre les mains.

L'animateur n'a pas participé à la séance à proprement parler. Son rôle a été d'animer la réunion, en présentant le problème puis l'apport de connaissances sur le sujet. Durant la « Génération d'idées originales », il a été en charge de la gestion du temps entre chaque rotation, ainsi que du rappel des règles de la séance. Durant la phase de « Partage et tri des idées », son rôle a été d'organiser les idées par thèmes, avec l'accord des participants.

Lorsqu'une réunion est organisée sur le thème du système carburant en rupture, nous avons estimé qu'il était impératif d'inviter les deux experts architecture système carburant ainsi que l'auditeur technique système carburant. De plus, lorsque l'on évoque des solutions techniques, nous avons trouvé important de convier les concepteurs des composants du système (2 personnes). Si l'on souhaite limiter le nombre de participants à 6 ou 7, cela laisse 1 ou 2 places libres. Nous avons alors choisi d'inviter soit des membres du groupe de R&T de l'entreprise (particulièrement ouverts à ces sujets d'innovation) ou un novice (jeune alternant du groupe architecture système carburant, afin d'avoir un œil extérieur sur le problème. Les participants ont donc finalement été :

- 2 experts architectes système carburant
- 2 experts concepteurs des composants du système carburant
- 1 membre de l'audit technique système hydraulique
- 1 (« Doser ») ou 2 (« Transporter ») membres de la R&T niveau système de régulation
- 1 novice (« Doser »), jeune alternant au groupe architecture système carburant.

IV.B.3. Retour d'expérience sur la méthode

IV.B.3.a) *Retour des participants*

Suite aux deux séances de créativité menées chez Safran Helicopter Engines, les participants ont pu donner leur avis sur la méthode proposée.

(1) *Apport de connaissances originales*

- **Aspects positifs** : Cette étape permet une bonne imprégnation des participants dans la démarche de créativité.
- **A améliorer** :
 - Il serait bénéfique d'accentuer le mélange entre les technologies et les principes physiques présentés.
 - Il serait intéressant d'ouvrir également sur les industries et marchés proches de ceux de l'entreprise.
 - Il serait intéressant de solliciter des personnes extérieures au domaine pour présenter leurs concepts.

(2) *Génération d'idées originales*

- **Aspects positifs** :
 - La méthode semble adaptée aux participants. Elle a été bien comprise et mise en œuvre.
 - Le fait de donner ses idées par écrit permet à chacun de s'exprimer.
- **A améliorer** :
 - Les participants trouvent, en général, qu'il serait bon d'augmenter le temps entre les rotations. En effet, au fur et à mesure de la séance, les post-it se remplissent et demandent plus de temps pour être lus et assimilés. Il a été constaté au cours des séances que le temps nécessaire aux participants va en augmentant au fil des rotations.

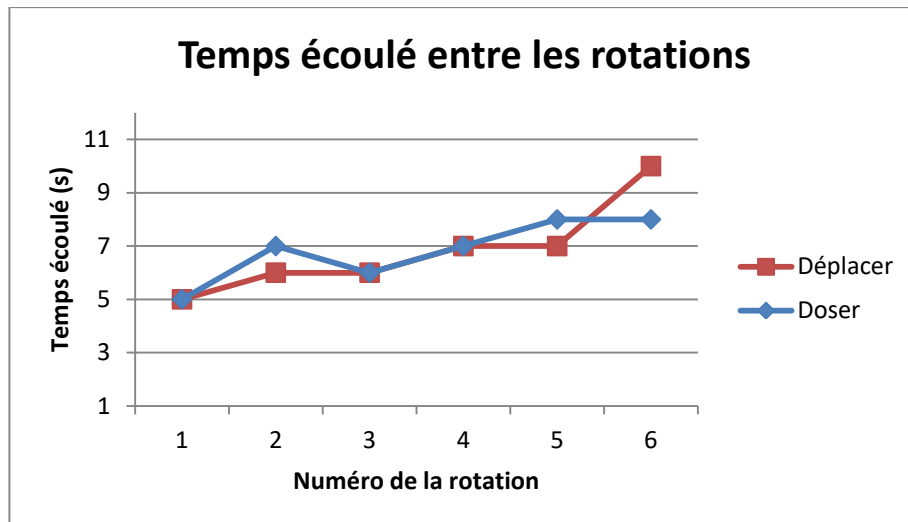


Figure 47 - Evolution du temps nécessaire aux participants pour formuler leurs idées au fil de la séance

Comme le montre la Figure 47 ci-dessus, le temps entre deux rotations est passé de 5 minutes (temps stipulé par la Méthode 635) à 10 minutes (séance « Déplacer ») et 8 minutes (séance « Doser »). Cette variation du temps entre chaque rotation a été permise par l'animateur. Il a en effet permis un dépassement des 5 minutes préconisées dès lors qu'au moins un des participants était en train d'écrire.

Nous noterons également que certains participants trouvent une vraie plus-value dans la spontanéité induite par la contrainte de temps.

- Même si la séance s'est bien déroulée, certains participants trouveraient intéressant d'aller vers plus d'anonymat dans les réponses. En effet, étant donné la rotation des feuilles, il est aisé de remonter à l'auteur des idées.
- Certains participants ont constaté qu'ils ont tendance à souvent rebondir sur les idées de la personne immédiatement précédente. Ils suggèrent alors d'introduire un parcours plus élaboré des feuilles au cours de la séance, qui leur permettrait d'avoir, à chaque rotation, un « participant immédiatement précédent » différent. Il faudrait alors s'assurer que chaque participant ne remplit qu'une seule fois chaque feuille.

(3) **Partage et tri des idées**

- **Aspects positifs** : Le fait de pouvoir discuter des idées, suite à la période de brainwriting, a été jugée pertinent par les participants.
- **A améliorer** :
 - Certains participants ont suggéré d'augmenter le temps consacré à cette étape afin d'avoir le temps de lire tous les post-it.
 - L'ajout d'un scribe, permettant d'assurer par écrit la traçabilité des idées et discussions émises a été proposé par un participant.
 - Même si on ne peut pas tout anticiper, le fait de préparer les grandes catégories de tri des idées permettrait de gagner du temps.

IV.B.3.b) Choix des participants

Dans la mesure où chaque participant s'est entièrement prêté au jeu, le fait d'avoir une grande proportion d'ingénieurs en lien étroit avec le système carburant ne semble pas avoir été un obstacle à la créativité.

IV.B.3.c) Analyse quantitative des résultats

Suite à ces deux séances de créativité, des statistiques quantitatives ont été menées. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de la méthode proposée, nous avons introduit quatre indicateurs :

- Le nombre de post-it initiaux : quantité de post-it mis à la disposition de l'ensemble des

participants. Dans notre cas, il s'agit de 18 post-it par participant⁷. Pour la séance « Déplacer » (7 participants), le nombre de post-it initiaux est donc de 126 alors que pour la séance « Doser » (6 participants) il est de 108.

- Le nombre de réponse : il s'agit du nombre de post-it ayant été rempli par les participants durant la séance.
- Le nombre de réponses pertinentes : il s'agit du nombre de réponses restantes une fois que l'on a enlevé les solutions absolument impossibles (téléportation par exemple).
- Le nombre d'idées obtenues correspond à la quantité de solutions différentes répertoriées après analyse des résultats de la séance de créativité. Il s'agit des idées originales qui seront exploitables pour l'entreprise. Il est à noter que toutes ces idées ne répondent pas précisément au problème posé lors de la séance. Il peut donc s'agir d'idées qui ne seront pas forcément utiles dans ce cadre mais qui pourront être réutilisées dans un autre contexte ou pour d'autres fonctions du système carburant.

Nous avons présenté les résultats obtenus lors de nos deux séances de créativité en Figure 48, ci-dessous. Etant donné que les deux séances de créativité n'ont pas accueilli le même nombre de participants, les résultats ont été exprimés en pourcentage du nombre de post-it initiaux.

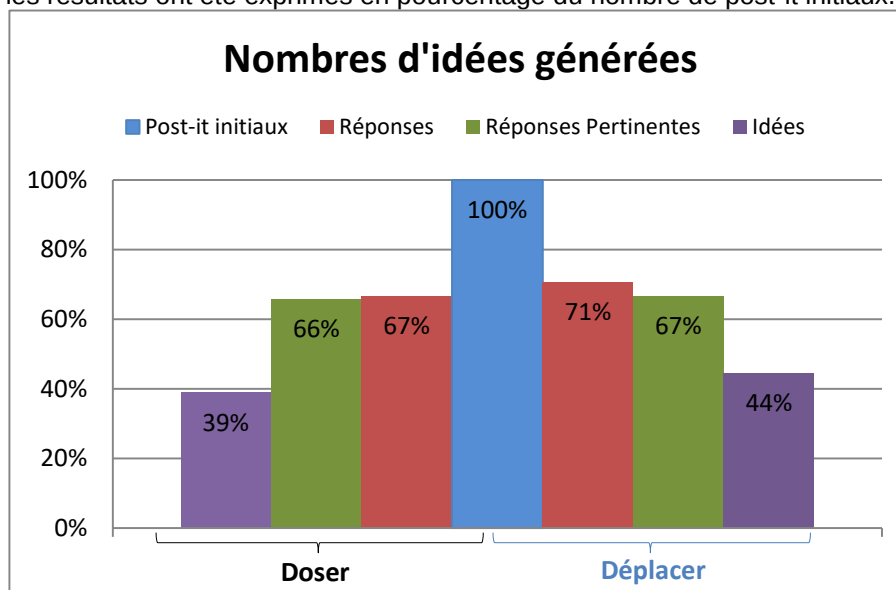


Figure 48 – Statistiques quantitatives sur le nombre d'idées générées au cours des deux séances de créativité

On constate que les résultats obtenus sont très similaires entre les deux séances. En effet, si la séance « Déplacer » a généré une plus grande proportion de réponse (71% contre 67%), cet écart a été comblé par l'élimination des réponses non-pertinentes. Ainsi, les deux séances ont effectivement généré 66% (« Doser ») et 67% (« Déplacer ») de réponses pertinentes. Après analyse des idées obtenues on distingue 39% (42 idées) d'idées originales issues de la séance « Doser », contre 44% (56 idées) d'idées originales issues de la séance « Déplacer ».

Ainsi, les résultats obtenus entre les deux séances sont relativement proches. En effet la séance « Déplacer » n'a fourni que 5% du nombre de post-it initiaux d'idées de plus que la séance « Doser ». Il est difficile d'expliquer cet écart relativement faible entre les deux séances. En effet, de nombreux paramètres ont été modifiés, à savoir :

- Le nombre de participants : 7 participants pour la séance « Déplacer » contre 6 pour la séance « Doser ».
- Le sujet : Les deux sujets proposés peuvent avoir influencé le nombre de réponse des participants.
- Les participants
 - Différents participants : entre la séance « Déplacer » et la séance « Doser », un des participants a été remplacé par un nouveau participant.
 - Participants déjà familiers de la méthode en séance « Doser » : la séance « Doser » ayant eu lieu après la séance « Déplacer », tous les participants sauf

⁷ Chaque participant étant muni, en début de séance, d'une feuille A3 contenant 18 post-it (voir Figure 46)

un connaissaient déjà le principe de la méthode. L'absence de nouveauté dans la méthode peut avoir entraîné un léger manque d'engouement par rapport à la première séance. Ceci pourrait expliquer l'écart de 4% de post-it remplis.

Du fait de ce nombre important de paramètres variant en même temps, il ne nous est pas possible à ce stade de relier un de ces paramètres à l'écart constaté entre les deux séances. Cependant, dans une perspective de réutilisation de la méthode, il peut être intéressant de regarder ces résultats sous un autre angle. En effet, lors de sa mise en œuvre de la méthode en entreprise, les participants, leur nombre ainsi que le thème de la séance seront en permanence modifiés d'une séance à l'autre. Ainsi, même s'il nous est impossible de lier précisément les résultats aux différents paramètres de la méthode, nous pouvons néanmoins constater qu'avec des paramètres issus d'une mise en œuvre en entreprise, le nombre d'idées générées se situe autour de 40% (+/- 4%) du nombre de post-it initiaux. Cette conclusion est cependant à modérer étant donné le faible nombre (2) de séances considérées.

IV.B.3.d) Analyse quantitative du déroulement de la séance

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de la séance de créativité, nous avons analysé l'historique de la génération des idées au travers de chaque feuille A3. Nous avons choisi de trier les post-it selon trois catégories :

- Les propositions : Post-it contenant une idée qui n'a pas été inspirée par le post-it d'un autre participant
- Les rebonds : Post-it contenant une idée qui a été dérivée ou qui s'est inspirée du post-it d'un autre participant
- Les post-it vides : Post-it qui n'ont pas été remplis.

Pour chacune des deux séances de créativité, et pour chaque rotation, nous avons compté le nombre de propositions, rebonds et post-it vides. Les résultats sont présentés dans les Figure 50 et Figure 49 ci-dessous.

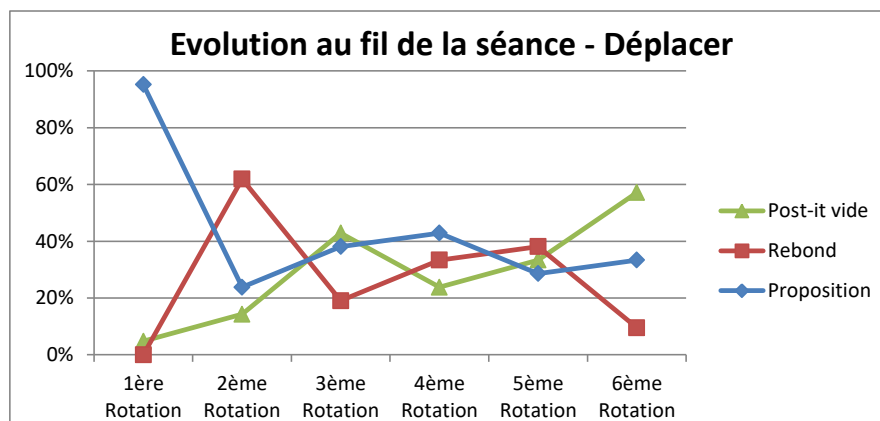


Figure 49 - Historique de la génération des idées par types au cours de la séance "Déplacer"

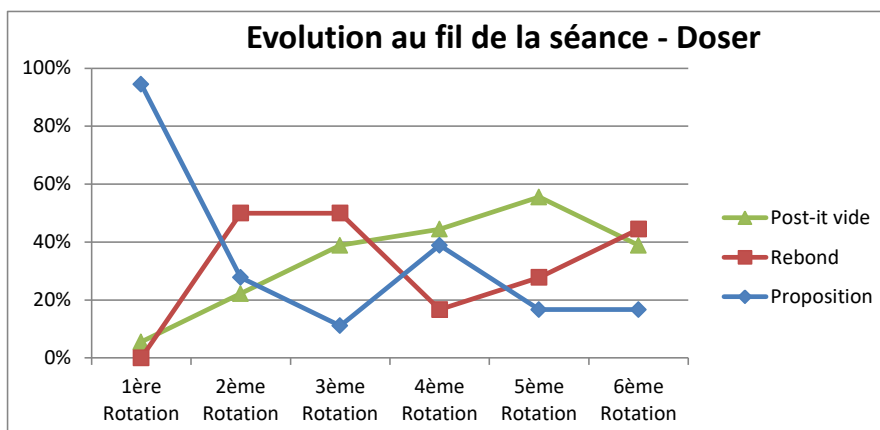


Figure 50 - Historique de la génération des idées par types au cours de la séance "Doser"

Dans les deux séances, on constate que la première rotation est constituée quasi-uniquement de proposition (95%). Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a pas encore d'idées proposées, et donc pas de rebonds possibles. Les post-it vides sont également relativement faibles pour cette première rotation (1 post-it vide pour chaque séance). Ainsi, pour chaque séance, toutes les feuilles A3 contenaient 3 idées (soit le maximum) à la fin de première rotation, sauf une qui n'en contenait que 2.

Lors de la seconde rotation, une augmentation brutale de la proportion de rebonds est constatée dans les deux séances. Elles représentent en effet plus de la moitié des post-it avec 62% de rebonds pour la séance « Déplacer » et 50% pour la séance « Doser ». Nous en déduisons que les participants ont massivement recours au rebond en seconde rotation. C'est d'ailleurs la rotation où le rebond le plus utilisé pour les deux séances. On remarque également une augmentation de la proportion de post-it laissés vides (14% pour « Déplacer » et 22% pour « Doser »).

A partir de la troisième rotation, deux comportements différents sont observés entre les deux séances de créativité. Pour la séance « Déplacer », une stabilisation autour de 33% est observée pour les trois catégories jusqu'à la cinquième rotation. Au cours de la séance « Doser », les écarts sont plus importants entre les catégories.

De manière logique, on observe une augmentation globale du nombre de post-it vides tout au long des rotations. Ceci pouvant être expliqué par le fait que plus des participants ont donné d'idées, moins ils en ont de nouvelles à apporter.

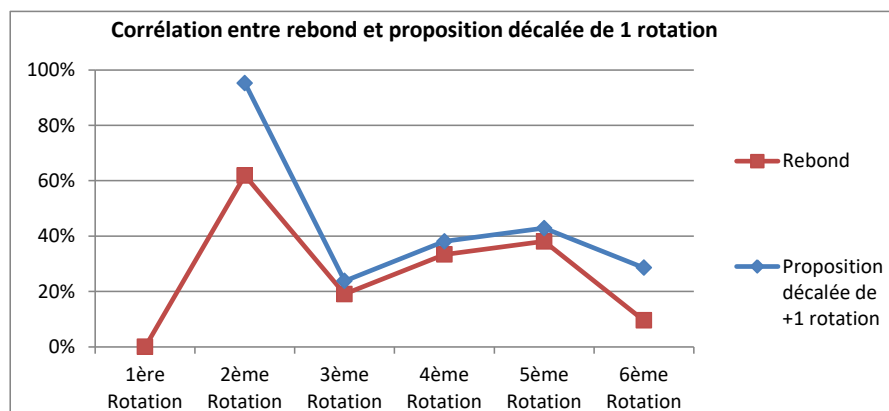
Déplacer

La première rotation est nécessairement constituée de propositions (95%). La seconde rotation se caractérise par une chute brutale du nombre de propositions et une franche augmentation des rebonds (+60%). Ceci peut s'expliquer par le fait que les participants s'appliquent à rebondir sur les idées de la rotation 1.

Cependant, on observe entre les rotations 3 et 5 une stabilisation des proportions des types de réponses :

- Propositions : moyenne 37% (de 29 à 43%)
- Rebonds : moyenne 30% (de 19 à 38%)
- Vides : moyenne 33% (de 24 à 43%)

On observe également que la courbe de rebond a les mêmes variations que la courbe de proposition avec un retard de 1 rotation.



De plus, on observe, comme dans la séance doser le cycle de 3 rotations qui se dessine. Même s'il est moins prononcé que précédemment, on a bien :

- Rotations 1-2-3 : Diminution brutale des propositions et augmentation franche des rebonds, dans un premier temps. Puis chute à nouveau des rebonds au profit des propositions.
- Rotations 4-5-6 : le même schéma est observé mais de manière bien moins marquée.

Néanmoins, on remarque que les variations des 3 courbes sont cycliques de période 3.

Attention car ces tendances sont relativement fragiles au vu d'éventuelles imprécisions de traitement des données.

Doser

Dans les 3 premiers tours : le nombre de proposition diminue fortement tandis que le nombre de post-it vides augmente régulièrement. Le nombre de rebond augmente très rapidement au second tour et se stabilise au 3ème. Au 4ème tour, on assiste à une 2ème vague de propositions. Les rebonds diminuent alors que les vides restent en quasi-constante augmentation. La 5ème rotation voit l'apogée des post-it vides (55%), avant une retombée à 40% à la 6ème rotation. Dans ces deux derniers tours, le nombre de proposition est stable (17%) et le nombre de rebond en augmentation.

On observe un cycle de 3 rotations :

- T0 : Fortes propositions, peu de rebonds
- T0+1 : Plus de rebonds que de propositions
- T0+2 : Augmentation de l'écart entre rebonds et propositions.

On observe 2 fois ce cycle de 3 rotations au cours de notre expérience.

IV.B.3.e) *Recommandations*

Les séances de créativité ont été menées selon une méthode de créativité originale. Cette dernière a été bien acceptée et appliquée par les participants. Leurs retours ont néanmoins permis d'élaborer les recommandations suivantes pour les prochaines utilisations de la méthode de créativité :

- Prévoir des parcours plus élaborés des feuilles contenant les post-it, de manière à ce que :
 - Chaque participant n'écrive qu'une seule fois sur chaque feuille,
 - Pour un participant donné, le participant ayant eu la feuille juste avant lui ne soit jamais le même,
 - Les participants ne sachent pas de qui ils reçoivent la feuille. On pourrait imaginer que l'animateur ramasse toutes les feuilles avant de les redistribuer, à chaque rotation.
- Prévoir une augmentation du temps donné aux participants au fur et à mesure des rotations.
- Enregistrer la phase de partage et tri des idées afin de ne pas perdre une idée lancée à la volée. On pourra aussi bien nommer un scribe pour retracer directement les échanges. Cependant nous pensons qu'il peut être préjudiciable de nommer scribe un des participants car il ne pourra pas participer à cette partie de la séance.

IV.C. Combiner les concepts de solution

Une fois les concepts de solution des fonctions générés, la prochaine étape consiste à les combiner pour générer les architectures candidates. Dans la suite du manuscrit, le terme brique sera utilisé pour désigner un concept de solution d'une fonction. Une architecture est donc constituée d'un ensemble de briques.

IV.C.1. Liens entre les fonctions principales

Les architectures sont générées à partir des fonctions principales du système carburant. Comme nous l'avons représenté en Figure 51, la génération d'architectures candidates se fait dans le sens inverse du sens de la transmission de puissance. Il débute par le choix de la brique pour la fonction « Répartir ». Le choix du concept solution de répartition doit être fait en premier car il en découle le nombre de fonctions « Doser » à prévoir. Dans un second temps, la brique de dosage est sélectionnée, suivie de celle de la fonction « Fournir une pression de gavage ». Enfin, la stratégie de commande du système est décidée. Cette sélection à l'inverse du sens physique d'écoulement permet, à chaque bloc fonctionnel, d'imposer les conditions dont il a besoin en entrée, à son bloc précédent.

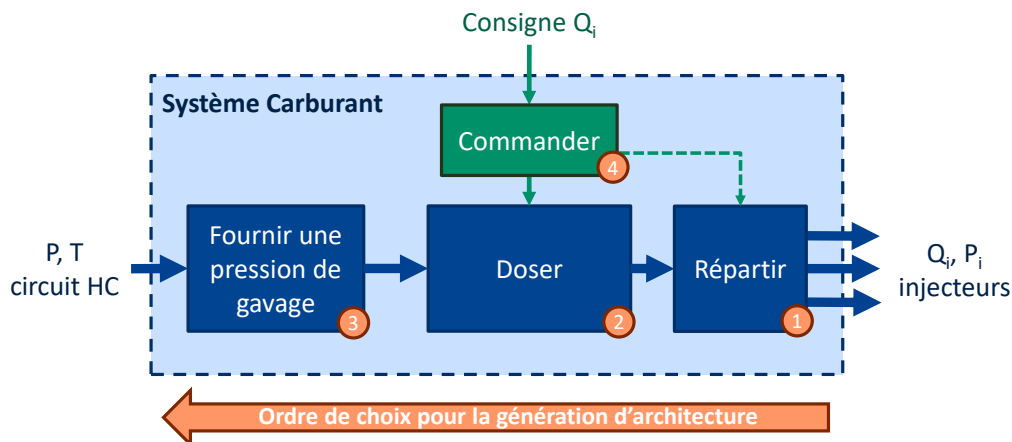


Figure 51 – Cheminement de la construction d'une architecture haut niveau système carburant

IV.C.2. Solutions candidates pour les fonctions principales

Les architectures candidates sont représentées en utilisant le principe de la matrice morphologique : lister les briques candidates pour chaque fonction du système, puis les assembler de manière combinatoire. Etant donné le nombre important de catégories et de familles de briques candidates pour nos fonctions, nous avons proposé une nouvelle représentation de la matrice morphologique. Il s'agit non pas de la représenter sous forme de tableau mais sous forme d'arbres de décision. Cela permet une meilleure lisibilité de par le caractère synthétique de cette représentation qui permet de faire visuellement la distinction entre des nœuds de sélection ou de combinaison.

Afin d'alléger les figures, une notation a été introduite pour désigner l'opération de combinaison : $\boxed{X}$. Il s'utilise de la manière décrite en Figure 52 :

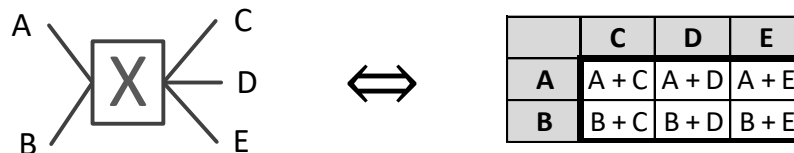


Figure 52 - Définition de l'opérateur visuel de combinaison

Dans l'exemple ci-dessus, les solutions possibles sont les couples A-C, B-C, A-D, B-D, A-E, B-E.

La génération des architectures suit la décomposition fonctionnelle présentée ci-dessus. Pour sa mise en place, nous avons jugé nécessaire de décomposer la fonction « Doser » selon deux catégories :

- Dosage par orifice ou Dosage volumétrique par dissipation, nécessitant un étage supplémentaire de « Conditionnement du fluide pour dosage ». Il s'agit de briques nécessitant d'être alimenté avec un carburant à un niveau de pression défini.
- Dosage volumétrique par production de puissance hydraulique, pour être directement alimenté par la pression de gavage carburant.

En incluant cette nouvelle sous-fonction de « Conditionner pour dosage », le processus de génération d'une architecture système carburant devient celui de la Figure 53 ci-dessous.

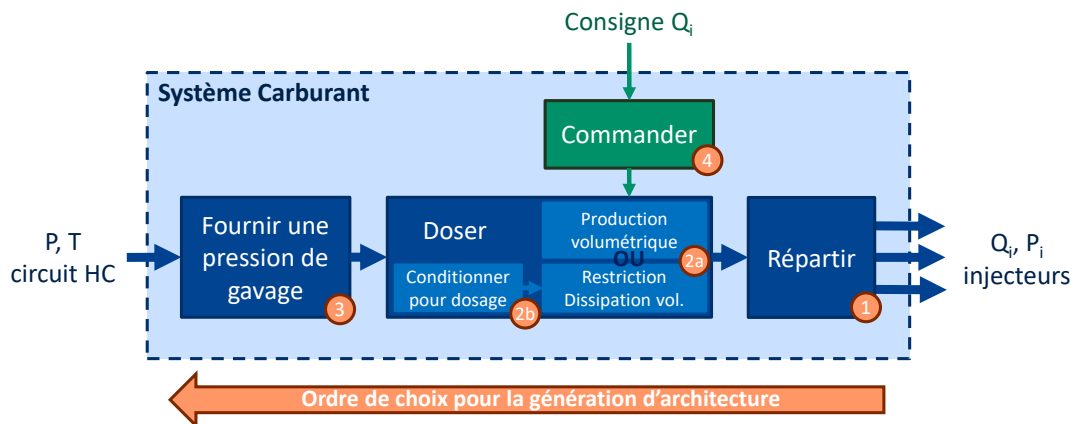


Figure 53 – Cheminement de la construction d'une architecture système carburant incluant le conditionnement pour dosage

Pour chaque fonction principale, nous avons représenté graphiquement les briques associées (Figures 54, 55, 57, 58, 59). Toutes les briques ont été numérotées pour en permettre l'identification de manière rapide et précise. Par mesure de confidentialité, la correspondance entre les briques et leurs identifiant ne peut être donnée dans ce manuscrit.

- Fonction « Répartir »

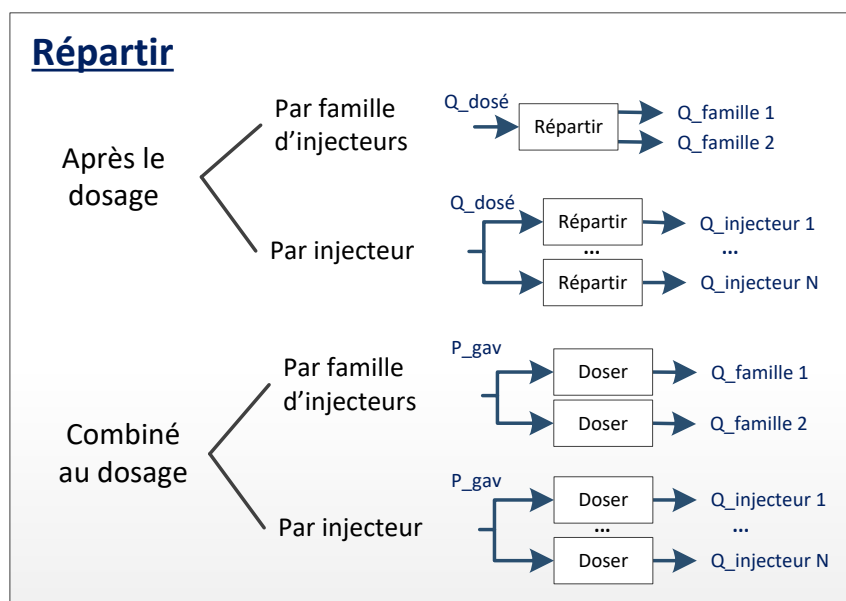


Figure 54 – Représentation des briques candidates pour la fonction « Répartir »

L'objectif de la fonction « Répartir » est de d'envoyer le bon débit, ou la bonne fraction du débit dosé total, à chaque famille d'injecteur. Selon que le dosage soit fait en même temps que la répartition, ou non, et que l'on répartisse par famille d'injecteur ou à chaque injecteur, 4 briques ont été générées pour cette fonction.

- Fonction « Doser »

L'objectif de cette partie est d'énumérer, de façon la plus exhaustive possible, les moyens de doser un débit de carburant. Dans un souci d'exhaustivité, nous sommes directement partis des principes physiques permettant un tel dosage : le dosage volumétrique et le dosage par restriction.

Dosage volumétrique

Le premier principe que nous avons identifié pour doser un débit de fluide consiste en un dosage volumétrique. Une machine volumétrique est en effet parcourue par un débit proportionnel à sa

vitesse de rotation. Ainsi, il est possible de commander le débit en agissant sur la vitesse de rotation.

Une machine volumétrique peut être utilisée selon deux modes :

- Production de puissance hydraulique : de l'énergie mécanique de rotation est apportée à la machine, qui la transmet à son tour au fluide. La pompe doit alors être alimentée en fluide sous une pression de gavage (notée **P_{gav}** en Figure 55).
- Absorption de puissance hydraulique : de l'énergie hydraulique est apportée à la machine sous forme d'une différence pression à ses bornes, ce qui a pour effet d'entraîner la machine en rotation⁸. Le débit est alors contrôlé en freinant la machine, qui génère alors de l'énergie mécanique. La machine doit alors être alimentée sous une pression quelconque (notée **P** en Figure 55). Cette pression doit cependant être suffisamment importante pour pouvoir entraîner la machine sur toute la plage de débit.

Nous avons représenté graphiquement les 6 briques de dosage volumétrique en Figure 55.

Dosage par restriction

Ce principe de dosage s'appuie sur la caractéristique hydraulique d'une restriction. Elle est donnée par la formule :

$$Q = C.S.\sqrt{\Delta P} \quad (\text{II-1})$$

Où :

Q est le débit volumique circulant à travers la restriction.

C est un coefficient, dépendant de la géométrie de la restriction et de la densité du fluide. Il peut également dépendre du nombre de Reynolds lorsque celui-ci est inférieur à quelques centaines.

S est la surface de passage du fluide à travers la restriction.

ΔP est la différence de pression entre l'amont et l'aval de la restriction :

$$\Delta P = P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}} \quad (\text{II-2})$$

Un débit Q particulier peut être établi en imposant un jeu de paramètres C , S ou ΔP particulier. Pour une géométrie de restriction et un fluide donné, le coefficient de débit (C) peut être considéré comme constant en première approche. En effet, pour des vitesses d'écoulement suffisamment élevées, il ne dépend plus que de la géométrie de la restriction et de la densité du fluide. Pour commander un débit Q , il est alors nécessaire et suffisant de commander l'un des deux paramètres (S ou ΔP) et de connaître l'autre. Nous avons représenté les possibilités de commande de débit dans le Tableau 10 ci-dessous. Pour chaque grandeur S ou ΔP , la valeur 1 indique que le système agit sur la grandeur pour commander le débit, tandis que la valeur 0 indique que le système n'a pas d'action sur celle-ci.

Tableau 10 - Principes de dosage du débit à travers une restriction en commandant S et ΔP

S	ΔP	Principe de dosage associé
0	0	<i>Pas de dosage possible</i>
0	1	S fixée, ΔP commandé
1	0	S commandée, ΔP quelconque
1	1	S commandée, ΔP régulé
		S régulée, ΔP commandé

Du point de vue du vocabulaire, nous nous devons de clarifier les différents termes utilisés dans le tableau, à savoir :

- Grandeur commandée : c'est la grandeur « réglante » sur laquelle on agit directement pour obtenir la valeur de débit souhaitée (« grandeur réglée »)
- Les grandeurs régulées, mesurées et fixées sont des grandeurs qui doivent être connues pour pouvoir doser le débit. On les distingue par le fait que :
 - o Une grandeur régulée est connue car sa valeur est maintenue à une valeur de

⁸ Compte tenu du fait que la sortie de la machine volumétrique est un débit, nous avons trouvé judicieux d'adopter cette vision causale. Bien entendu, la vision causale inverse aurait pu être adoptée.

consigne par le système. Cette valeur de consigne a été déterminée en phase de conception du système.

- Une grandeur quelconque est connue du fait qu'elle est mesurée à chaque instant. La valeur de cette grandeur n'est pas fixée par le système et peut varier en fonction du temps et des conditions d'opération.
- Une grandeur fixée est une grandeur dont la valeur est intrinsèquement connue (la surface de passage du fluide à travers la restriction par exemple). Cette valeur a été choisie en phase de conception du système.

Dans notre cas, la pression en aval de la restriction est toujours imposée par la pression en sortie du système carburant (P_{chambre}) et les pertes de charges liées au débit circulant entre l'aval de la restriction et la chambre de combustion. Le système de dosage ne peut donc avoir aucune action sur la pression en aval de la restriction (P_{aval}) au cours du dosage. Ceci implique deux choses :

- P_{aval} devra toujours être mesurée pour obtenir la valeur du ΔP (équation (II-2)) et permettre le dosage
- Pour agir sur le ΔP , le système de dosage ne pourra effectivement agir que sur la pression en amont de la restriction (P_{amont}).

Dès lors, il paraît opportun de traduire les conditions en ΔP , énumérées dans le Tableau 10, en condition de P_{amont} , étant donné que c'est sur cette grandeur que le système de dosage aura effectivement autorité. Nous avons alors remarqué qu'il existe deux manières distinctes d'obtenir un ΔP quelconque en agissant sur la P_{amont} :

- En fonctionnant avec une P_{amont} quelconque, la mesure du ΔP s'obtient simplement par différence des deux mesures en pression en amont et aval de la restriction,
- En régulant P_{amont} , la mesure du ΔP s'obtient par différence entre la valeur de pression régulée en amont, et la valeur de pression mesurée en aval.

Nous avons représenté cette correspondance entre conditions en ΔP et P_{amont} dans le Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 - Correspondance des conditions de ΔP et de P_{amont}

Condition de ΔP	Traduction en termes de P_{amont}
ΔP commandé	P_{amont} commandé en fonction de P_{aval}
ΔP régulé	P_{amont} régulé en fonction de P_{aval}
ΔP quelconque	P_{amont} régulé
	P_{amont} quelconque

Nous avons synthétisé les correspondances entre les conditions en ΔP et en P_{amont} dans le Tableau 11 ci-dessus.

Ce nouveau niveau de détail a été inclus dans la réalisation de la condition de ΔP quelconque aux principes déjà énumérés dans le Tableau 10. Ainsi, les différentes variantes de dosage par restriction sont résumées dans le Tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12 – Principes de dosage du débit à travers une restriction

S	ΔP	Principe de dosage associé
0	1	S fixe, ΔP commandé
1	0	S commandée, P_{amont} quelconque
		S commandée, P_{amont} régulé
1	1	S commandée, ΔP régulé
		S régulée, ΔP commandé

Tout comme pour le dosage volumétrique, nous avons représenté ces cinq possibilités de dosage par restriction en Figure 55. Pour plus de clarté, des notations ont été introduites concernant les conditions de pression :

- **P** désigne une pression amont quelconque
- **P_{reg}** désigne une pression amont régulée à une valeur fixe (ou à plusieurs valeurs fixes)

- ΔP_{reg} désigne une pression amont régulée en fonction de la pression aval mesurée afin d'obtenir une différence de pression constante aux bornes de la restriction
- ΔP_{com} désigne une différence de pression amont/aval commandée.

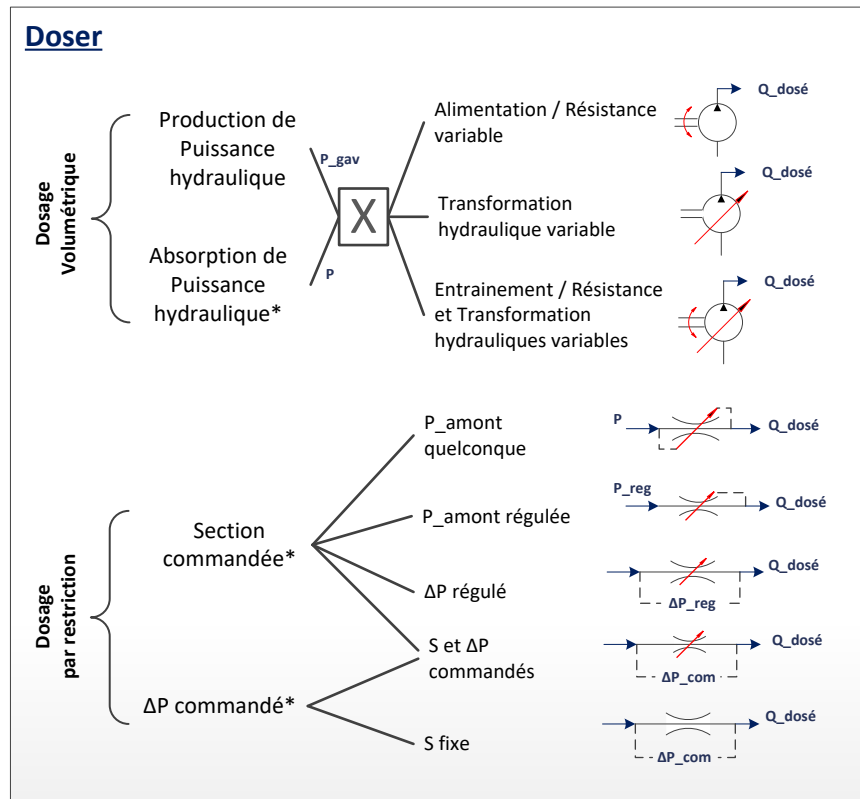


Figure 55 – Représentation des briques candidates pour la fonction « Doser »

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs conditions de pression d'entrée de la brique de dosage peuvent être nécessaires, selon le concept choisi. Lorsqu'une pression de gavage est exigée, cette dernière est directement fournie par la fonction « Fournir une pression de gavage ». Lorsque d'autres conditions de pression en amont de la brique de dosage sont nécessaires, il convient de les assurer via une fonction « Conditionner pour le Dosage », comme nous l'avons représenté en Figure 56.

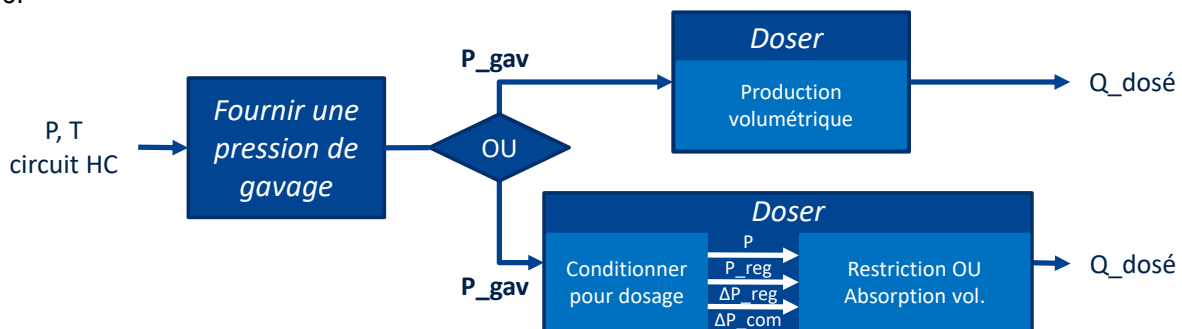


Figure 56 – Représentation des deux options de réalisation de la fonction « Doser »

Pour chaque besoin en pression d'alimentation de la brique de dosage sélectionnée, un ou plusieurs concepts de conditionnement sont proposés. Nous avons représenté ces briques candidates en Figure 57. Le concept de conditionnement pour le dosage est donc sélectionné directement à la suite du concept de dosage.

Nous rappelons que les briques de dosage volumétrique de production de puissance hydraulique ne nécessitent pas de fonction de conditionnement pour le dosage. Ces principes de dosage peuvent être directement connectés au concept de la fonction « Fournir une pression de gavage ».

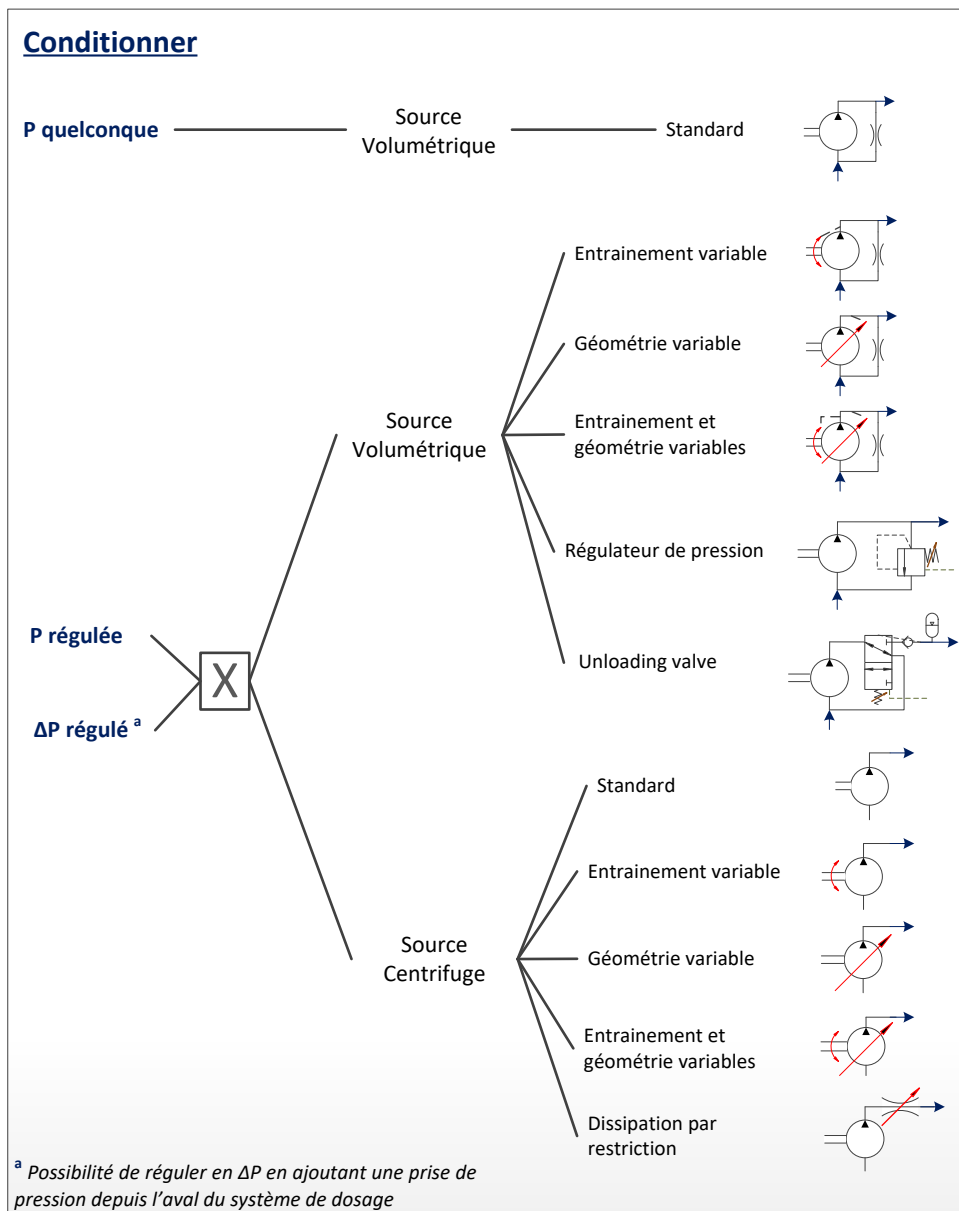


Figure 57 – Représentation des briques de conditionnement pour le dosage candidates pour la fonction « Doser »

Les schémas hydrauliques représentant les solutions ont été ajoutés lorsque cela a été possible. Ils sont uniquement présents à titre d'illustration des briques. En ce sens, les traits pointillés (---) habituellement utilisés pour représenter une prise de pression hydromécanique, sont utilisés dans les schémas ci-dessous pour désigner un capteur de pression quelconque (pouvant être aussi bien électromécanique qu'hydromécanique). La flèche rouge représente à chaque fois le moyen de commander le système présenté.

- Fonction « Fournir une pression de gavage »

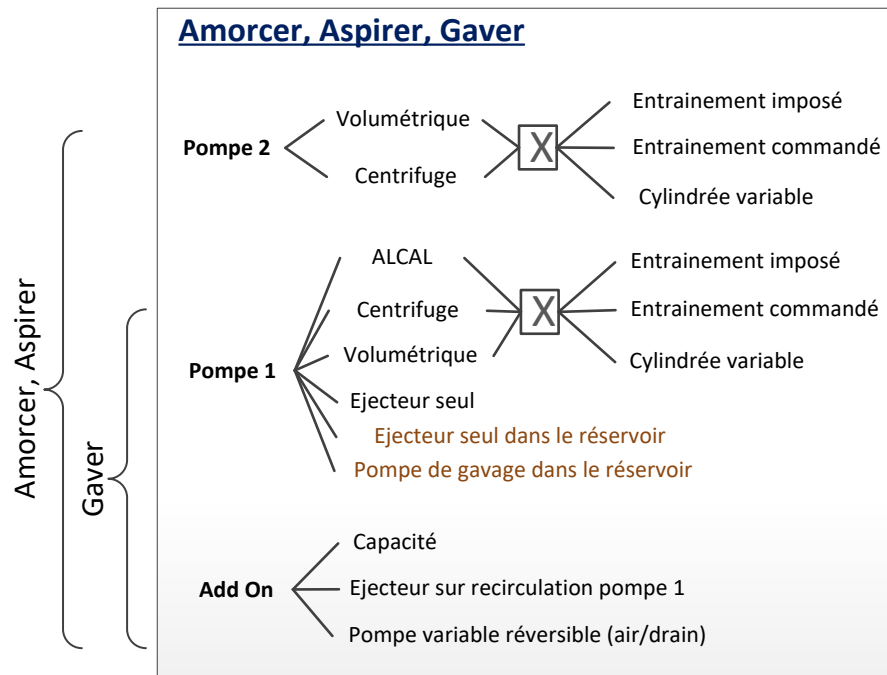


Figure 58 - Représentation des briques candidates pour la fonction « Amorcer, Aspirer, Gaver »

Les briques situées dans le réservoir hélicoptère ont été représentées d'une couleur différente car elles impliquent une modification du périmètre de responsabilité moteur/hélicoptère sur le circuit carburant.

Les briques correspondant à « Pompe 2 » correspondent à la brique qui a déjà été sélectionnée dans la fonction « Doser » ou « Conditionner ». Sa présence redondante dans cette fonction traduit le fait que le composant associé peut également jouer un rôle dans les fonctions « Amorcer » et « Aspirer ». Les briques « Pompe 1 » correspondent à un composant ajouté pour participer aux fonctions « Amorcer », « Aspirer » et « Gaver » (notées AAG dans la suite). Les briques « Add-on » correspondent à des briques pouvant être sélectionnées ou non, seules ou combinées entre elles. En ce sens, les briques « Add-on » dérogent à la règle de sélection des familles « Pompe 1 » et « Pompe 2 » où une seule brique par famille est sélectionnée.

- Fonction « Commander »

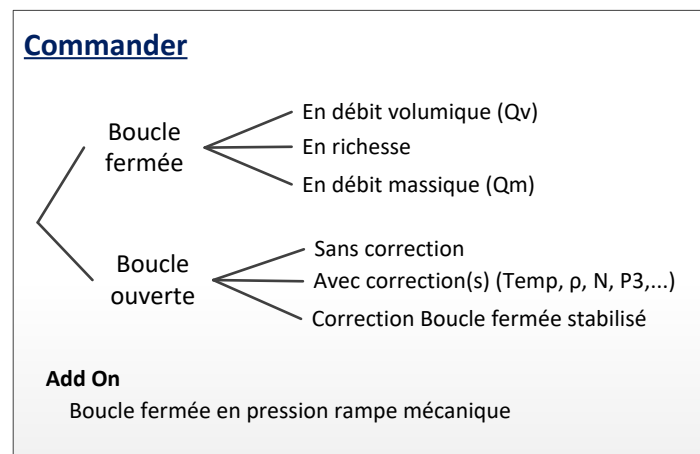


Figure 59 - Représentation des briques candidates pour la fonction « Commander »

Comme pour la fonction AAG, la brique de la famille « Add-on » pourra être sélectionnée ou non en

supplément des autres briques présentées.

- **Fonction « Réchauffer »**

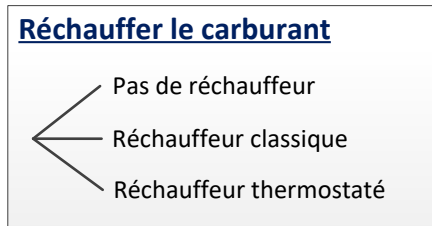


Figure 60 - Représentation des briques candidates pour la fonction « Réchauffer le carburant »

Cette fonction répond à un besoin particulier de fonctionner sans additif anti-givre pour une température du carburant dans le réservoir supérieure à X°C. Cette température peut être, selon les projets, d'une importance élevée, dans ce cas le réchauffeur n'est pas nécessaire et la brique « Pas de réchauffeur » sera sélectionnée d'office. Elle peut également être modérée, auquel cas la brique « Réchauffeur classique » sera sélectionnée. Enfin, la température minimale de fonctionnement sans additif anti-givre peut être basse, auquel cas la brique « Réchauffeur thermostaté » est sélectionnée. Cette dernière brique possède en effet l'avantage de pouvoir réchauffer fortement le carburant par temps froid tout en limitant son échauffement par temps chaud.

IV.C.3. Faisabilité de l'architecture proposée

Pour proposer une architecture « faisable », qui peut « fonctionner », il n'est pas possible d'assembler n'importe quelle brique avec n'importe quelle autre. Ainsi, une matrice de compatibilité est mise en place afin d'indiquer les briques qui peuvent être associées ou non. Cette matrice permet d'associer toutes les briques deux à deux et d'indiquer leur compatibilité au moyen d'un chiffre :

- 1 si les deux briques sont compatibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent être associées à la même architecture
- 0 si les deux briques ne sont pas compatibles et ne peuvent pas être associées à la même architecture.

Un exemple de matrice est donné en Figure 61 ci-dessous.

		Doser				Conditionner pour dosage						Amorcer, Aspirer, Gaver Pompe 1 Add On										Commander				Répartir			Thermique						
		D13	D14	D31	D32	C12	C15	C22	C23	C25	C26	A111	A121	A131	A112	A122	A132	A123	A14	A15	A01	A03	A04	A05	Cm1	Cm2	Cm2	Cm2	R11	R12	R21	R22	T0	T1	T2
Doser	D13																								0	0									
	D14																								0	0									
	D31					0	0	0	0	0	0														0	0				0					
	D32					0	0	0	0	0	0															0	0			0					
Conditionner pour dosage	C12			0	0																														
	C15			0	0																														
	C22			0	0																														
	C23			0	0																														
	C25			0	0																														
	C26			0	0																														
Amorcer, Aspirer, Gaver Pompe 1 Add-on	A111																							0											
	A121																							0											
	A131																							0											
	A112																							0											
	A122																							0											
	A132																							0											
	A123																							0											
	A14																							0											
	A15																							0											
	A01																							0											
	A03												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
	A04																						0												
A05																																			
Commander	Cm11	0	0																																
	Cm12	0	0																																
	Cm21																																		
	Cm22																																		
	Cm23																																		
Répartir	R11																																		
	R12			0	0																														
	R21																																		
	R22																																		
Thermique	T0																																		
	T1																																		
	T2																																		

Figure 61 - Exemple de matrice de compatibilité

IV.C.4. Nombre d'architectures candidates

Suite à l'établissement de la matrice de compatibilité, nous avons pu compter le nombre d'architectures compatibles. Cela correspond au nombre de combinaisons de briques autorisées par la matrice de compatibilité. La génération d'architecture à partir de la matrice morphologique a été effectuée à l'aide d'un outil que nous avons implémenté sous Microsoft Excel/VBA. Ainsi, 153 792 architectures distinctes et fonctionnelles ont été proposées à l'issue de cette étape de génération d'architectures.

Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie de génération d'architectures candidates a été proposée dans un cadre d'innovation de rupture. Elle répond au besoin d'apporter des architectures système novatrices dans une entreprise où le système à faire est conçu depuis plus de 50 ans. Cette méthodologie est basée sur une combinaison de techniques de créativité intuitives (KCP, Brainwritting 635, Diagramme KJ) et d'outils systématiques de type matrice morphologique et matrice de compatibilité. Elle a été appliquée au cas d'étude de nos travaux de thèse, à savoir le système carburant du futur. Ainsi, plus de 100 000 architectures candidates compatibles ont été générées. Cette expérience a permis d'améliorer la méthodologie proposée pour s'adapter aux contraintes de l'étude (système complexe dont les fonctions peuvent être liées les unes aux autres, grand nombre d'architectures candidates, etc.).

CHAPITRE 3 - Sélection des concepts d'architectures système carburant en rupture

Introduction

Une fois le besoin et les exigences définies dans un premier temps et les architectures candidates répondant à ce besoin générées dans un second temps, il reste la dernière étape de sélectionner les architectures les plus pertinentes. Cette étape n'est pas des moindres, et tout particulièrement dans notre contexte d'innovation de rupture car elle implique de comparer des alternatives nombreuses et originales. La notion de pertinence des alternatives est intéressante car elle mêle à la fois les attentes des parties prenantes du système (amont de la conception) et les performances que fournira le système une fois réalisé. Prendre une décision en phase de conception d'architecture, c'est être capable en phase préliminaire, de lier ces deux étapes (initiale et terminale) de la conception du système.

Pour ce faire, nous procéderons tout d'abord à une revue critique de la littérature concernant les méthodes utilisées pour la prise de décision. Nous présenterons dans un second temps la méthodologie proposée pour les travaux de thèse. Enfin, un retour d'expérience relatif à l'application de cette méthodologie dans le cadre du système carburant chez Safran Helicopter Engines sera développé.

I. Définition du problème

Chaque problème d'évaluation d'architectures est unique. Il possède ses propres caractéristiques de complexité, variété des alternatives, nombre d'architectures candidates, etc. Comme nous allons le voir dans l'état de l'art bibliographique (partie II), il existe une grande variété de méthodes d'évaluation d'architectures. Aussi, il convient dans un premier temps de définir le problème que nous voulons résoudre, afin de tirer de la littérature les solutions les plus adaptées à notre cas. En outre, cette définition du problème permettra une réutilisation plus facile de ces travaux dans un cas similaire qui pourra être facilement identifié.

(1) Caractéristiques du problème de sélection d'architectures

Les caractéristiques de notre problème d'évaluation d'architecture sont :

1. Un grand nombre d'architectures candidates

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2, plus de 100 000 architectures candidates ont été générées. Cela a pour effet de privilégier une approche automatisable ou générique de l'évaluation des architectures.

2. Un nombre fini d'architectures candidates

Bien qu'élevé, le nombre d'architectures candidates est fini. Les architectures peuvent donc être énumérées de manière exhaustive avant d'être évaluées. Nous avons donc affaire à un problème de sélection d'architectures les plus pertinentes parmi une liste d'architectures candidates.

3. Une grande diversité d'architectures candidates

Les architectures candidates utilisent des concepts fortement innovants dont les approches d'évaluation des performances peuvent varier grandement. *Par exemple, on ne procédera en effet pas de la même manière pour l'évaluation des performances d'une pompe entraînée électriquement, que pour une pompe entraînée mécaniquement par la turbine. En effet, en plus d'avoir des principes de fonctionnement différents, ces deux solutions n'ont pas le même périmètre fonctionnel. En effet, la pompe entraînée électriquement pourrait offrir des fonctions différentes d'une pompe entraînée mécaniquement par la turbine.*

4. Des critères d'évaluation principaux variés et non modélisables.

Il était important dans notre cas d'étude de prendre un compte un certain nombre de critères

d'évaluation afin de prendre en compte les différentes attentes des parties prenantes. Cela nous a conduit à considérer 20 critères d'évaluation, ce qui est élevé pour un travail d'évaluation préliminaire pour lequel les critères sont plus généralement au nombre de 3 ou 4 (Moullec 2014; Svahn 2006; Gavel 2007; Liscouët-Hanke 2008) voire onze à 15 (Kirby 2001; Biltgen & Mavris 2007b), mais n'intègrent pas de critères de type sûreté de fonctionnement ou maintenance. De plus, les performances de chaque architecture candidate vis-à-vis des critères d'évaluation ne peuvent, pour la plupart, pas être quantifiées par des modélisations simples et génériques (précision de dosage, coûts de maintenance, robustesse, etc.).

Toutes ces caractéristiques font qu'il est à priori difficile d'obtenir une évaluation équitable des performances de chaque architecture. C'est ce qui a justifié dans nos travaux un effort important sur la méthodologie de sélection des architectures.

(2) *Un problème de décision multi attribut (MADM)*

Les auteurs de (Tzeng & Huang 2011) reprennent la distinction classique déjà évoquée par (Gal et al. 1999) selon laquelle l'aide à la décision multicritère (MCDM⁹) se décompose en deux catégories : l'aide à la décision multi objectif (MODM¹⁰) et l'aide à la décision multi attribut (MADM¹¹). La distinction entre ces deux disciplines repose sur le type de problème à résoudre. La distinction est clairement présentée dans les travaux de (Gaouas Oussama 2014) :

- Les méthodes de MODM traitent de l'identification d'une solution préférée parmi un ensemble de solutions potentiellement infini. Les solutions sont définies de manière implicite, par l'intermédiaire d'un ensemble de contraintes. En ingénierie, les problèmes de dimensionnement appartiennent à cette catégorie de problèmes de décision. Il convient en effet d'ajuster des paramètres de conception (matériau, dimensions,...) pour satisfaire des contraintes de conception (masse, résistance, etc.). Pour répondre à ce type de problème, les méthodes d'optimisation sont tout particulièrement indiquées (Hassan 2014). En effet, dans un problème de MODM, l'espace des solutions doit être exploré de manière intelligente car ce dernier est infini. C'est ce que permettent les méthodes d'optimisation.
- Les méthodes de MADM traitent de la prise de décision entre des solutions discrètement définies et aux attributs souvent multiples. Il s'agit alors de sélectionner la ou les meilleures architectures candidates dans l'espace de solution.

Notre sujet d'étude nous place plutôt dans la partie MADM. En effet, notre problème de sélection d'architecture comporte bien un nombre fini d'architectures candidates, définies de manière explicite.

(3) *Type de problème d'aide à la décision*

Comme développé dans (Figueira, Greco, et al. 2005; Grabisch 2005; Mammeri 2013), la problématique de prise de décision peut être divisée en quatre types :

- La **problématique du choix** : il s'agit d'obtenir un ensemble, de plus petite cardinalité possible, de « bonnes » alternatives¹².
- La **problématique de classification (ou tri)** : il s'agit de ranger les alternatives dans des catégories préalablement définies. Elles peuvent être, par exemple, « Excellent », « Acceptable », « Insuffisant », « Inacceptable ».
- La **problématique de classement** : il s'agit d'attribuer un classement à chaque alternative (1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème}, ... n^{ème}).
- La **problématique de scorage** : il s'agit d'attribuer un score (sur un intervalle de notation prédéfini, par exemple entre 0 et 1) à chaque alternative.

⁹ MCDM : Multi Criteria Decision Making

¹⁰ MODM : Multi Objective Decision Making

¹¹ MADM : Multi Attribute Decision Making

¹² L'auteur de (Mammeri 2013) précise que les méthodes répondant à ce type de problème feront ressortir un ensemble qui contiendra des alternatives équivalentes ou incomparables entre elles. Ces alternatives ne seront pas nécessairement toutes bonnes.

Dans notre cas, on ne s'attend pas à n'obtenir qu'une seule architecture sélectionnée à l'issue du processus de décision. En effet, les analyses de ces dernières étant préliminaires, elles comportent une certaine imprécision. Il serait donc intéressant d'avoir en fin de processus un panel d'architectures sélectionnées de faible taille (de l'ordre d'une dizaine d'architectures). Ainsi, notre strict besoin est celui d'une classification. Notre but est en effet d'obtenir dans la catégorie « Excellent » un faible nombre d'alternatives les plus prometteuses. Nous noterons toutefois que le classement et le scoring peuvent également répondre à notre problématique. Cependant, ces deux problématiques sont plus complexes et donc plus coûteuses à mettre en œuvre. En échange, elles apportent également des informations supplémentaires. Le classement apporterait une hiérarchie parmi les architectures retenues ; tandis que le scoring apporterait une quantification de l'écart de préférence entre les architectures retenues.

II. Etat de l'art

Le domaine de l'aide à la décision multi critère couvre énormément de domaines, comme le montrent les auteurs de (Aruldos et al. 2013). En particulier, des travaux ont récemment été menés dans les domaines de l'informatique (Falessi et al. 2011), la santé (Marsh et al. 2014), la logistique (Govindan et al. 2015; Senthil et al. 2014) le tourisme (Akincilar & Dağdeviren 2014), etc.

Pour plus de clarté, nous utiliserons dans cette partie du manuscrit le terme « alternative » pour désigner une architecture candidate.

II.A. Processus de prise de décision sur les architectures système

Une revue de la littérature concernant les processus de prise de décision sur les architectures de systèmes en ingénierie nous a permis de dégager un processus général pour l'évaluation d'architecture. Elle se compose des 4 étapes décrites ci-dessous.

1- Etablir les critères d'évaluation

La première étape du processus d'évaluation de concepts consiste à définir les critères qui seront utilisés par la suite pour l'évaluation des alternatives.

2- Sélection préliminaire

Dans les cas où l'espace des solutions contient beaucoup d'alternatives, il peut être intéressant de procéder à une sélection préliminaire. Elle permet d'écarter d'emblée un certain nombre d'architectures candidates. C'est notamment le cas des approches de (Weiss & Gilboa 2004; Pahl et al. 2007; Dieter & Schmidt 2013; Kirby 2001; Schrage 1999). D'après (Dieter & Schmidt 2013; Ullman 2010), cette sélection peut être effectuée sur des critères d'évaluation absolus, de type :

- Fonctionnalité de l'architecture : est-ce que l'architecture candidate fonctionne ? Est-ce qu'elle peut effectivement réaliser les fonctions pour lesquelles elle a été imaginée ?
- Maturité technologique : les technologies utilisées sont-elles suffisamment matures pour l'application visée ? Dans notre cas d'innovation radicale, nous accorderons relativement peu d'importance à ce critère. Ceci permettra en effet d'ouvrir l'espace des solutions à des technologies non matures aujourd'hui mais qui pourraient l'être à moyen ou long terme.
- Contraintes du problème : l'architecture candidate répond-elle aux contraintes du problème avec un niveau de performance supérieur au seuil minimal acceptable ?

Cette étape d'évaluation préliminaire n'est cependant pas présente dans tous les processus d'évaluation d'architecture que nous avons étudiés (ISO/IEC/IEEE 2015; Biltgen & Mavris 2007b; Sun et al. 2000).

3- Evaluation des alternatives vis-à-vis des métriques

Dans la majorité des cas d'évaluation d'architecture système de la littérature, les performances des alternatives sont évaluées quantitativement par modélisation (Kirby 2001; Liscouët-Hanke 2008; Gavel 2007; Moullec 2014). Cependant comme nous l'avons vu au paragraphe I(1), dans notre cas, il n'est pas possible d'évaluer de manière quantitative les alternatives au regard des critères retenus. A cet effet, les auteurs de (Schrage 1999; Biltgen & Mavris 2007b) proposent des processus

d'évaluation ne comprenant pas d'étape de modélisation. Les concepts sont alors évalués de manière qualitative par des experts du domaine.

Comme l'explique l'auteur de (Martin 2017) dans son aperçu de la nouvelle norme ISO/IEC 42030 Architecture Evaluation, cette étape d'évaluation peut être divisée en deux sous étapes, comme on peut le voir en Figure 62.

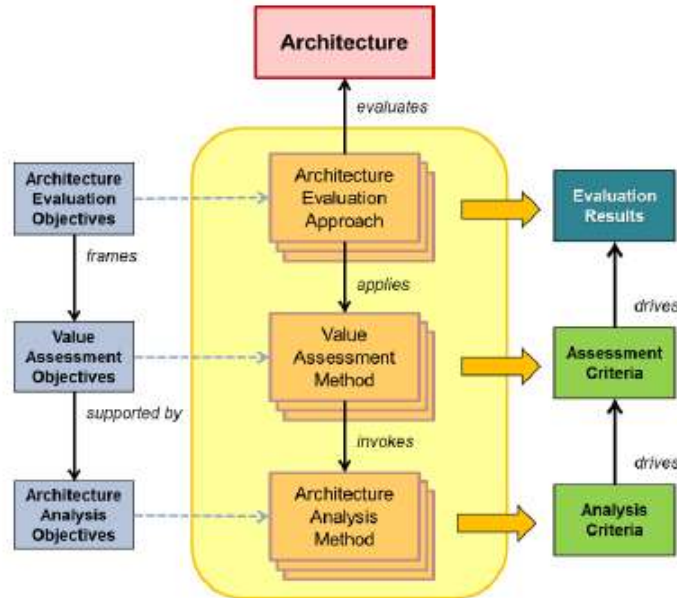


Figure 62 - Cadre de la nouvelle norme ISO/IEC 42030 Architecture Evaluation (issu de (Martin 2017))

Ces deux étapes sont :

- L'analyse (« analysis » dans le texte) qui consiste à déterminer les performances de l'alternative par rapport aux critères. On répond dans cette étape à la question « Quoi ? ». C'est dans cette étape que la modélisation peut être utilisée.
- L'appréciation (« assessment » dans le texte) qui consiste à évaluer l'utilité ou la valeur du système. On répond dans cette étape à la question « Et alors ? ».

Illustrons cette différence avec l'exemple d'une voiture. L'étape d'analyse pourra fournir une information du type « la puissance du moteur est de 110 chevaux ». Cette information d'analyse sera reprise dans l'étape d'appréciation par des informations de type : « bonne capacité à dépasser » ou encore « bonne capacité à maintenir la vitesse en phase de montée ». L'analyse s'intéresse aux faits techniques tandis que l'appréciation en renseigne l'intérêt final.

Dans le cadre de nos travaux, la phase d'analyse n'a pu être effectuée. En effet, les performances des architectures selon critères que nous avons utilisés ne peuvent être obtenues par modélisation, comme nous l'avons expliqué au paragraphe I(1). Ainsi, l'évaluation des architectures a directement été effectuée par appréciation par les experts des performances des architectures, ou plus précisément des briques d'architectures, vis-à-vis de chaque critère.

4- Sélection des alternatives préférées

Cette étape consiste à discriminer les différentes architectures au regard de leurs appréciations vis-à-vis des différents critères, en prenant en compte le cahier des charges spécifiques de chaque projet. Elle s'appuie sur un modèle de décision. Ce dernier peut, par exemple, consister en une synthèse des résultats d'une ou plusieurs méthodes de MADM (Kirby 2001).

II.B. Travaux similaires et vue d'ensemble de la littérature

Nous présentons dans le Tableau 13 ci-dessous une sélection de travaux de sélection d'architecture système en ingénierie dont les démarches sont comparables à la nôtre. Pour chaque référence, les points communs et différences entre notre approche et l'approche décrite sont exprimés dans les

colonnes. On trouve finalement une colonne résumant les méthodes mises en œuvre par les auteurs. Celle-ci permet de préparer la sélection d'une méthode de MADM, qui sera présentée plus loin.

Tableau 13 – Travaux de sélection d'architecture système en ingénierie

Travaux	Points communs	Différences	Méthodes utilisées
(Kirby 2001)	Conception préliminaire d'un système avion	Méthode d'évaluation des alternatives basée sur les modèles physiques	Modèles physiques Matrice de compatibilité TOPSIS
(Svahn 2006; Gavel 2007)	Conception préliminaire de système carburant avion	Problème ramené à une optimisation sur les critères de : masse, puissance et fiabilité	Matrice morphologique Modèles physiques Optimisation
(Engler et al. 2007)	Sélection de concept de missile	Mise en place de la matrice de décision non traitée	IRMA ¹³ Matrice de compatibilité Matrice de décision TOPSIS
(Biltgen & Mavris 2007b)	Sélection de concept d'avion d'attaque	Mise en place de la matrice de décision non traitée	QFD Matrice de décision TOPSIS
(Liscouët-Hanke 2008)	Conception préliminaire de sous-systèmes énergétiques avion	Méthode basée sur les modèles de haut niveau, uniquement sur des critères énergétiques Pas de MADM	Modèles physiques Optimisation
(Jankovic et al. 2012)	Evaluation d'architecture basée sur des avis d'experts	Donne des informations sur les compromis à faire mais ne va pas jusqu'à la prise de décision	Outils matriciels de type QFD étendu
(Moullec 2014)	Evaluation d'architectures système complexes	Démarche basée sur des modèles physiques simples	Modèles physiques Réseaux Bayésiens
(Craisse et al. 2016)	Sélection de concept de sous-systèmes avion	S'intéresse uniquement à la sélection de la méthode de MADM	<i>Retenue</i> : MAUT Additive <i>Évaluées</i> : AHP, MAUT, TOPSIS

Parmi ces travaux, on trouve donc principalement :

- Des travaux plutôt orientés sélection de concepts, où l'aspect évaluation technique des concepts n'est pas traité (Engler et al. 2007; Biltgen & Mavris 2007b; Craisse et al. 2016)
- Des travaux plutôt orientés optimisation où les alternatives sont évaluées par des modèles physiques (Svahn 2006; Gavel 2007; Liscouët 2010; Moullec 2014).

Par voie de conséquence, il apparaît clairement qu'il n'y a que peu de publications où l'évaluation des concepts d'architecture est traitée autrement que par un problème d'optimisation.

On remarque dans le Tableau 13 que la méthode TOPSIS est majoritairement utilisée dans les projets de sélection de concept d'architecture en ingénierie.

II.C. Méthodes d'évaluation des architectures

Ce paragraphe présente les méthodes ou bonnes pratiques issues de la littérature pour chaque étape du processus de sélection d'architecture système.

¹³ IRMA : Interactive Reconfigurable Matrix of Alternatives

II.C.1. Les critères d'évaluation

II.C.1.a) Deux types de critères d'évaluation

De nombreux travaux (Sun et al. 2000; Biltgen & Mavris 2007b; Martin 2017; ISO/IEC/IEEE 2015; Lo 2013) utilisent des critères techniques pour servir d'intermédiaire entre les besoins de haut niveau des parties prenantes et les performances des alternatives. On distingue alors :

- Les **critères d'évaluation techniques**, qui sont utilisés par les concepteurs pour analyser les différentes alternatives. *Si l'on prend le cas d'un moteur de voiture, par exemple. Les critères d'évaluation techniques seraient : « Rapport poids/puissance », « Caractéristique de couple en fonction du régime », « Compacité », « Fiabilité », etc.*
- Les **critères d'évaluation client**, qui sont utilisés pour l'appréciation des différentes alternatives par les clients finaux. *Si l'on reprend le cas d'un moteur de voiture, le client final est le conducteur ou usager de la voiture. Les critères clients seraient alors : « Agrément de conduite », « Fiabilité », « Coût d'opération », etc.*

L'idée de cette distinction est qu'il est plus facile d'évaluer le système du point de vue des critères techniques, mais la valeur globale du système ne peut être prise en compte qu'à travers des critères client. Ainsi, le système sera directement évalué vis-à-vis des critères techniques. Ces performances techniques seront ensuite transposées vis-à-vis des critères clients. C'est précisément le but de la méthode de Quality Function Deployment (QFD) que de faire le lien entre la « Voix du Client » et la « Voix de l'Ingénieur ». Celle-ci est principalement incarnée par un outil matriciel appelé Maison de la Qualité¹⁴ (HOQ) ou encore matrice QFD (Hauser & Clausing 1988). Comme nous l'avons représenté en Figure 63, cette permet de quantifier cette relation entre les critères techniques et les critères clients.

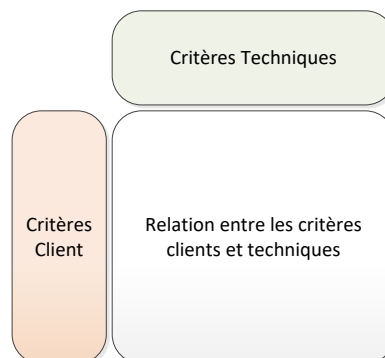


Figure 63 - Principe élémentaire de la matrice QFD

Ainsi, en donnant les pondérations des critères clients, on peut en déduire les pondérations des critères techniques. Ou encore, en donnant la performance vis-à-vis des critères techniques on peut remonter à la performance vis-à-vis des critères clients.

II.C.1.b) Notion d'interdépendance critères d'évaluation

L'auteur de (Moullec 2014) met en garde sur la notion d'interdépendance entre les critères. Il s'agit d'une dépendance mutuelle entre deux critères. Si les critères A et B sont interdépendants, la modification du critère A entraîne systématiquement une modification du critère B. Cette notion d'interdépendance est présente dans de nombreux cas de choix multi critères. *Si on prend par exemple le choix d'un smartphone, on voit directement un lien de dépendance entre le critère « Compacité » et le critère « confort de lecture ». En effet, en général plus le smartphone sera grand, plus il aura un grand écran et donc plus il sera confortable à lire.*

L'interdépendance entre deux critères peut être de deux types :

¹⁴ House of Quality en anglais

- Cohérente : une amélioration de la performance vis-à-vis du critère A entraîne une amélioration de la performance vis-à-vis du critère B. *Si on prend l'exemple d'une voiture par exemple, il y a interdépendance cohérente entre le critère de « Faible consommation de carburant » et celui de « Autonomie ». En effet, une amélioration de la performance de « Faible consommation de carburant » entraîne intrinsèquement un gain en « Autonomie ».*
- Conflictuelle : une amélioration de la performance vis-à-vis du critère A entraîne une détérioration de la performance vis-à-vis du critère B. *C'est le cas de l'exemple précédent concernant le smartphone où il y a interdépendance conflictuelle entre la « Compacité » et du « Confort de lecture ». Une dégradation de la « Compacité » entraîne une amélioration du « Confort de lecture » dans la mesure où un écran plus grand peut être utilisé.*

L'interdépendance entre les critères peut être représentée à l'aide de la matrice QFD évoquée dans le paragraphe précédent, comme nous l'avons représenté en Figure 64.

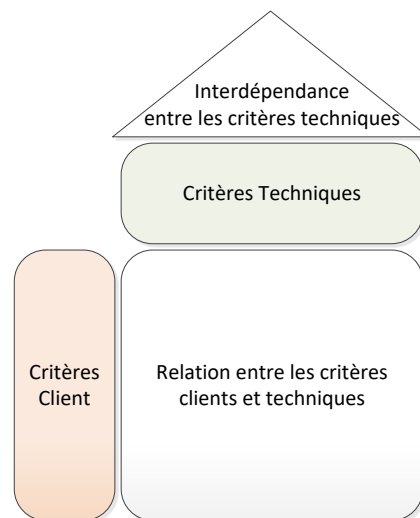


Figure 64 - Matrice QFD prenant en compte l'interdépendance des critères techniques

Cette interdépendance est représentée sous la forme d'une demi-matrice carrée placée au-dessus des critères techniques. Elle indique ainsi la dépendance de ces critères deux à deux. Un codage simple permet de déterminer si les critères sont cohérents ou conflictuels. *On notera par exemple, +1 pour les critères cohérents, 0 pour les critères indépendants et -1 pour les critères conflictuels.*

(1) Définition des poids des critères

Une fois la liste des critères établis, il convient de les discriminer au vu de leur importance relative. Usuellement, des poids (nombre compris entre 0 et 1) sont affectés à chaque critère. C'est de la répartition de ces poids entre les différents critères dont il est question dans ce paragraphe. Pour des problèmes comportant relativement peu de critères (3 ou 4 critères par exemple), il est relativement aisé d'attribuer directement les poids à chaque critère. Cependant, dans les cas où le nombre de critères est important (plus de 10 critères, par exemple), cette attribution directe des critères est plus délicate et pourrait s'avérer peu précise. En ce sens, des méthodes de type tri croisé ont vu le jour pour répondre à cette problématique. Dans le cadre de cette technique, les poids sont obtenus suite à la comparaison de chaque critère deux à deux. La matrice résultat de la comparaison des critères deux à deux est appelée matrice de comparaison. L'auteur de (Limayem 2001) dresse un état de l'art complet des méthodes de tri croisé pour le calcul de pondération. Il remarque que les méthodes existantes sont efficaces mais peu utilisées en pratique.

« Soulignons, par ailleurs, que les approches présentées dans ce chapitre ne sont pas toutes récentes. Pour autant, elles ne souffrent pas des biais que nous avons relevés dans certaines méthodes inexactes utilisées à l'heure actuelle sur le terrain. Cela donne une mesure du gouffre qui sépare le monde de la recherche de celui de la pratique. » (Limayem 2001)

Dans la littérature, on trouve trois grandes familles de méthodes de pondération de critères :

(2) Les méthodes de tri-croisé

Dans cette famille de méthodes, la première étape, commune à tous, est le remplissage de la matrice

de comparaison des critères deux à deux, notées matrice **A**. Comme nous l'avons représenté en Figure 65 ci-dessus, il s'agira de ne remplir que la partie triangulaire supérieure de la matrice. En effet, dans notre cas, l'appréciation d'un critère i par rapport à un critère j est simplement l'inverse de l'appréciation du critère j par rapport au critère i . La matrice **A** est donc réciproque, $A_{ij} = A_{ji}^{-1}$. Cela représente donc $\frac{n(n-1)}{2}$ comparaisons à renseigner, correspondant aux cases bleues de la matrice représentée en Figure 65. Une fois la matrice **A** remplie, on peut appliquer une méthode de pondération des critères décrite ci-dessous.

	Critère 1	Critère 2	...	Critère n
Critère 1	1			
Critère 2		1		
...			1	
Critère n				1

Figure 65 - Représentation de la matrice **A** de comparaison entre les critères deux à deux

L'auteur de (Limayem 2001) dresse un état de l'art comportant quatre méthodes de calcul de pondération par tri croisé. Il s'agit, à partir des comparaisons des critères deux à deux de donner une répartition optimale des poids des critères. Les différentes méthodes évoquées sont :

- Approches déterministes
 - o Valeurs propres (VP)
 - o Régression logarithmique selon les moindres carrés (RLMC)
 - o Moyenne géométrique sur les lignes (MGL)
 - o Moyenne géométrique sur les lignes et colonnes (MGLC)
- Approches prenant en compte les imprécisions inhérentes au jugement humain
 - o Logique floue
 - o Probabiliste

Dans nos travaux de thèse, nous ne nous attarderons que sur les approches déterministes basées sur les valeurs propres. En effet :

- Les approches logarithmiques paraissent adaptées à des problèmes de pondération plus complexes où les opinions sont multiples (différents avis de plusieurs personnes à prendre en compte). L'auteur de (Limayem 2001) parle par exemple des applications de dégustation ou plus généralement des comparaisons faisant intervenir les sens. Dans notre cas, même si plusieurs experts sont autour de la table pour établir la pondération des critères, nous savons qu'un consensus pourra être établi en séance. Ainsi, la prise en compte d'opinions multiples n'est pas un attendu dans notre approche.
- Les approches à moyenne géométrique permettent quant à elles d'avoir une matrice de comparaison non réciproque. Cela signifie que si la comparaison d'un critère A par rapport à un critère B donne une notation c , la comparaison du critère B par rapport au critère A pourrait donner une notation différente de l'inverse de c . Comme l'évoque l'auteur de (Limayem 2001), ce cas de figure est très particulier, et peut avoir lieu par exemple en comparaison d'aliments, le palais se transformant au fur et à mesure de la dégustation. Là encore, étant donné la nature rationnelle des critères à évaluer, nous n'aurons pas besoin de telles approches dans nos travaux.
- Les approches prenant en compte les imprécisions inhérentes au jugement humain peuvent être intéressantes pour notre application. Nous choisissons dans un premier temps de ne pas inclure cette dimension dans notre étude. Cela nous permettra une mise en œuvre plus rapide d'une méthodologie simple, que l'on pourra raffiner, complexifier par la suite.

Présentation de l'approche basée sur des valeurs propres

Cette méthode fût proposée pour la première fois par l'auteur de (Saaty 1977). Elle consiste à trouver la plus grande valeur propre de la matrice de comparaison **A**. On la note λ_{max} , et v son vecteur propre associé. On norme ensuite le vecteur v qui devient v^* . On a donc :

$$\sum_{i=1}^n v_i^* = 1 \quad (III-1)$$

Pour chaque critère i , le poids associé sera donc v_i^* .

Cette méthode prévoit également une vérification de la consistance du résultat, via le calcul de l'index de consistance CI . Cette vérification prend la forme de l'équation ci-dessous.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} < 0,1 \quad (III-2)$$

Où n est le nombre de critères.

Une méthode alternative de détermination des pondérations

En 1987, l'auteur de (Harker 1987) propose une approche alternative de détermination des poids des critères qui repose sur la méthode AHP à base de valeurs propres. En exploitant la propriété de transitivité de l'importance relative entre deux critères, cette méthode permet de déterminer les pondérations en exploitant une matrice de comparaison incomplète. Dans son article, l'auteur applique sa méthode à la pondération de la distance entre Philadelphie et 6 villes. Pour chaque ville (représentant des critères dans notre cadre de pondération de critère), un poids est associé en fonction de sa distance à Philadelphie. Harker propose ainsi les pondérations obtenues avec la matrice de comparaison complète (remplie à 100%) et avec des taux de remplissage intermédiaire. Nous avons représenté les résultats de cet exemple dans la Figure 66, ci-dessous.

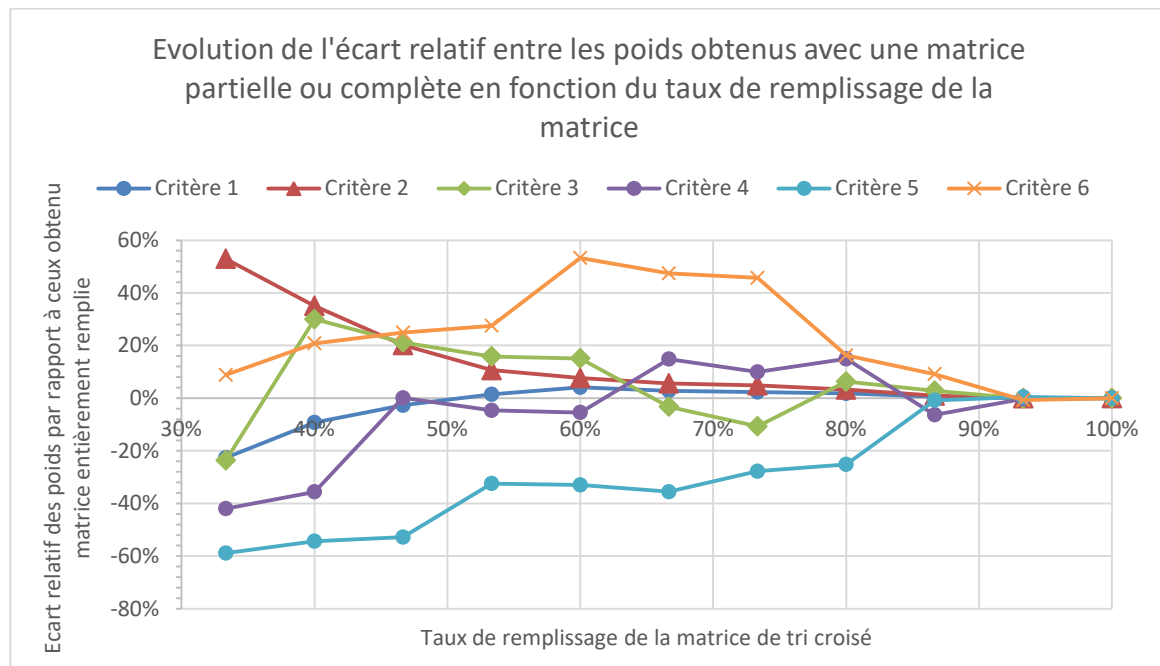


Figure 66 - Ecart relatif entre les poids obtenus avec une matrice de comparaison partiellement remplie, par rapport à ceux obtenus avec la matrice intégralement renseignée (réalisé à partir des résultats de (Harker 1987))

Nous pouvons tout d'abord constater qu'un taux de remplissage de 93% de la matrice de comparaison entraîne un écart relatif maximal de 1% sur les poids des 6 critères. On constate, de manière attendue, que l'écart relatif global sur les pondérations augmente avec les faibles taux de remplissage de la matrice. Ce résultat conforte le fait que plus on fournit d'information à la matrice de comparaison, plus les pondérations seront proches de celles obtenues avec la matrice entièrement remplie. Nous observons que le meilleur compromis entre gain de temps (taux de remplissage de la matrice de comparaison) et précision des pondérations se situe aux alentours de 87% de taux de remplissage de la matrice, avec un écart de -6% à +9% par rapport aux poids obtenus matrice intégralement remplie. Globalement, on pourra retenir que sur cet exemple, un gain de 10% sur le remplissage de la matrice de comparaison entraîne une dispersion maximale des pondérations de 10%. En deçà de ce taux de remplissage de 90%, la dispersion des pondérations augmente très fortement. Ainsi, à 80% de remplissage de la matrice de comparaison, les dispersions des poids vont de -25% à +16%.

Cette méthode alternative pourra être testée dans le cadre de nos travaux de thèse. Elle ne permettra à priori que de gagner 10% du temps de remplissage de la matrice de compatibilité. Un gain de temps qui se fera, à en croire notre exemple, au prix d'une perte de précision d'estimation des pondérations de l'ordre de 10%.

(3) Une méthode de tri simple

Il s'agit de la méthode BWM (Best-Worst Method) introduite par les travaux de (Rezaei 2015). Nous avons choisi l'appellation « tri simple » pour cette méthode car elle comporte, comme nous allons le voir par la suite, moins de comparaisons (ou croisements) que les méthodes de tri croisé. Cette méthode est fortement récente par rapport aux autres, car elle a été proposée par l'auteur de (Rezaei 2015) en 2015.

La détermination des poids de chaque critère se déroule en 3 étapes.

- 1- Il convient tout d'abord de déterminer le critère le plus important, et le critère le moins important aux yeux des décideurs.
- 2- Il s'agit ensuite de déterminer la préférence du critère le plus important vis-à-vis de tous les autres (notés a_i^B). Et de la même manière, la préférence de tous les critères vis-à-vis du critère le moins important (notés a_i^W). Nous avons représenté les comparaisons à effectuées par des cases bleues dans la Figure 67 ci-dessous.

	Critère 1	Critère 2	...	Critère n
Critère le plus important				
	Critère 1	Critère 2	...	Critère n
Critère le moins important				

Figure 67 - Données d'entrée pour la méthode BWM

- 3- Il s'agit ensuite de calculer les poids k_i optimaux pour chaque critère i . Cela s'effectue en résolvant le problème de minimisation de ε suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall i = 1..n, \left| \frac{k_B}{k_i} - a_i^B \right| \leq \varepsilon \\ \forall i = 1..n, \left| \frac{k_i}{k_W} - a_i^W \right| \leq \varepsilon \\ \sum_{i=1}^n k_i = 1 \\ \forall i = 1..n, k_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (\text{III-3})$$

Où :

- k_B et k_W représentent, respectivement, le poids associé au critère le plus important, et celui associé au critère le moins important.
- a_i^B et a_i^W représentent les préférences exprimées à l'étape 2-.

L'auteur propose également un calcul d'index de consistance que nous ne détaillerons pas ici. Pour plus de détails, on pourra consulter (Rezaei 2015).

Par rapport à la méthode AHP, cette méthode est plus rapide à mettre en œuvre car on n'effectue que $2n - 2$ comparaisons (comme nous l'avons représenté en Figure 67 ci-dessus), contre $\frac{n(n-1)}{2}$ pour la méthode de tri croisé. D'après l'auteur de (Rezaei 2015), la méthode BWM donne des résultats avec un degré de confiance similaire à celui de la méthode AHP. Ces deux caractéristiques en font une bonne candidate pour notre application.

(4) Par déclinaison hiérarchique des poids

Les poids des critères peuvent également être déduits par allocation des poids de critères de plus haut niveaux. C'est ce que propose la méthode QFD, que nous avons déjà évoquée au paragraphe II.C.1.b). La matrice QFD propose en effet de résumer la contribution de la satisfaction des critères techniques à la satisfaction des critères clients.

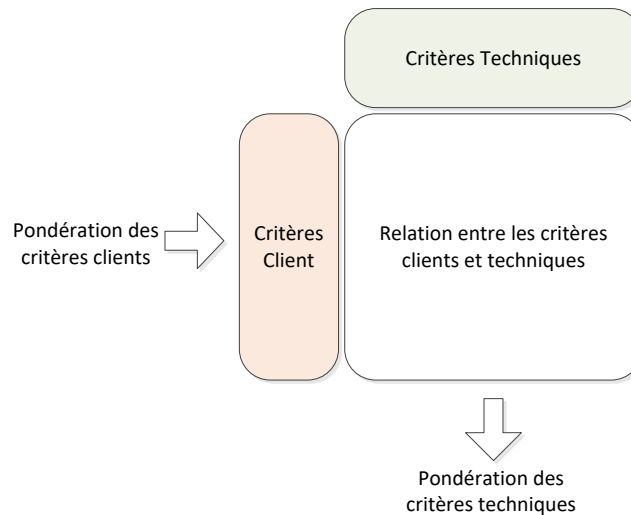


Figure 68 - Utilisation de la matrice QFD pour la pondération des critères techniques

Les poids du critère technique numéro j (k_j^{tech}) est alors calculé sous la forme :

$$k_j^{tech} = \sum_i Q_{ij} \cdot k_i^{client} \quad (III-4)$$

Avec :

k_i^{client} le poids associé au critère client numéro i

Q_{ij} le coefficient de la matrice QFD.

II.C.2. Evaluation préliminaire

Cette étape consiste à effectuer une première évaluation rapide des alternatives afin d'en présélectionner un nombre réduit. Elle est particulièrement indiquée pour les problèmes comportant un grand nombre d'alternatives. On trouve deux approches principales dans la littérature :

- **L'évaluation des alternatives** par rapport à des critères définis précédemment (Kirby 2001). Des limites dures sont placées sur ces critères, interdisant la sélection d'une architecture ne les respectant pas. Ainsi, les alternatives qui ne sont pas suffisamment performantes sur ces critères particuliers sont éliminées.
- **L'évaluation des briques d'alternatives** (Pahl et al. 2007) : il s'agit dans ce cas d'effectuer la pré-sélection au niveau de chaque brique plutôt que de l'alternative en elle-même. Cette pré-sélection au niveau de chaque brique permet principalement de s'assurer de la faisabilité des briques proposées.

Ces deux méthodes peuvent être appliquées avec les mêmes critères que ceux appliqués dans la prochaine étape (Kirby 2001), ou bien avec des critères supplémentaires, qualifiés de critères périphériques par l'auteur de (Moullec 2014). L'auteur cite par exemple des critères de fabricabilité ou fiabilité par exemple.

L'évaluation de la compatibilité entre les briques d'alternatives est également perçue comme une technique d'évaluation préliminaire par les auteurs de (Pahl et al. 2007). Cependant, nous intégrerons cet outil dans une prochaine étape de la démarche de sélection des alternatives.

II.C.3. Analyse des alternatives

L'objectif de cette étape est de fournir une analyse des performances des alternatives vis-à-vis des critères établis précédemment. Ces performances seront synthétisées dans une matrice de décision, que nous avons représentée en Figure 69.

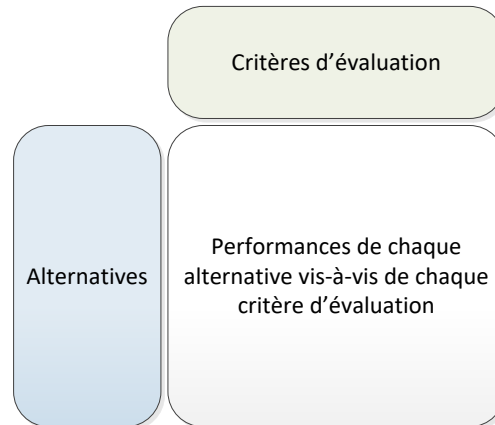


Figure 69 – Matrice de décision attendue à l'issue du processus d'évaluation des alternatives

Cette matrice de décision attribue à chaque alternative son niveau de performance vis-à-vis de chaque critère. Elle sera ensuite exploitée dans la phase de prise de décision sur les alternatives.

II.C.3.a) Approche générale

Tout comme dans le cadre de l'évaluation préliminaire, la littérature propose deux approches distinctes que nous avons représentées en Figure 70.

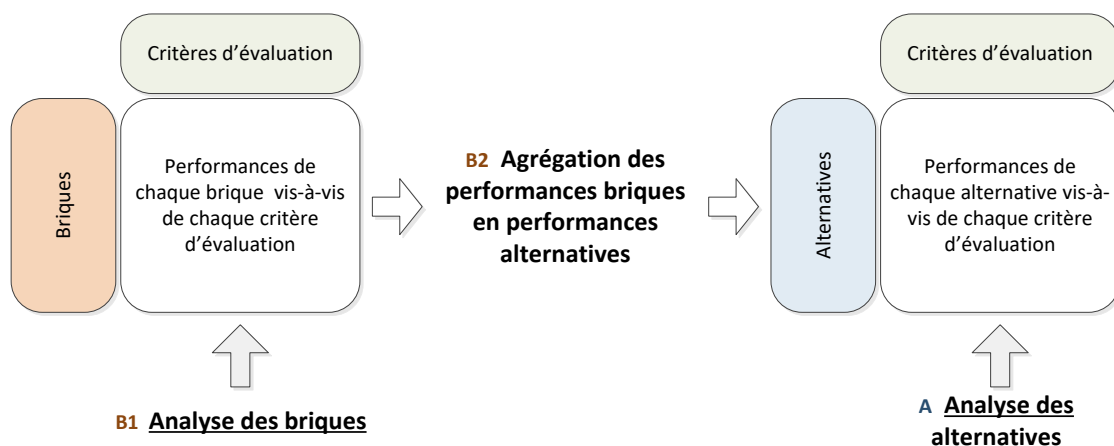


Figure 70 – Deux approches distinctes pour l'évaluation des alternatives

A- Evaluer directement les alternatives (noté **A** en Figure 70) : c'est l'approche d'analyse la plus directe. Les performances de l'alternative sont directement analysées. Cette approche est notamment adaptée :

- Aux problèmes où un modèle physique permet de quantifier les performances des alternatives vis-à-vis des critères, comme dans les travaux suivants (Gavel 2007; Moulec 2014; Kirby 2001)
- Aux problèmes contenant un nombre raisonnable d'alternatives : dans ce cas, il est réaliste de se pencher sur chaque alternative pour l'analyser (Biltgen & Mavris 2007b).

B- Evaluer les briques d'alternatives (noté **B** en Figure 70), puis les agréger pour obtenir les

évaluations des alternatives. Cette approche est plus coûteuse car elle ajoute une étape d'agrégation des performances des briques en performances des alternatives (notée **B2** en Figure 70). Cette approche est néanmoins nécessaire dans les cas où :

- Le nombre d'alternatives est trop grand pour permettre aux concepteurs ou experts de pouvoir analyser chaque alternative en détail.

ET

- L'analyse des alternatives ne peut être automatisée. Cela peut être dû, par exemple, au fait que les critères techniques portent sur des attributs non modélisables à ce niveau-là de la conception (coût, masse, tolérance aux pannes, etc.).

Cette approche est peu documentée dans la littérature, notamment du point de vue de la prise en compte des synergies lors de l'agrégation des briques.

Etant donné les caractéristiques de notre cas d'étude (voir paragraphe I(1)), nous nous situerons dans l'approche par évaluation des briques d'alternatives, ce qui représente 45 briques à analyser.

II.C.3.b) Analyse des alternatives ou briques d'alternatives

Du point de vue des méthodes d'analyse, il n'y a pas de différence selon que l'on traite d'alternatives ou de briques d'alternatives. En effet, les méthodes à disposition restent les mêmes pour évaluer, par exemple, un modèle de voiture (alternative) et un modèle de moteur (brique d'alternative). On pourra en effet dans les deux cas avoir recours à une technique de modélisation ou à des avis d'experts.

Dans de nombreux cas de la littérature (Kirby 2001; Moullec 2014; Liscouët-Hanke 2008; Gavel 2007), l'analyse des alternatives est effectuée à l'aide de modèles physiques. Ils permettent d'obtenir des mesures quantitatives des performances des alternatives.

Dans d'autres cas, comme le nôtre, il n'est pas possible d'obtenir d'indicateurs quantifiés correspondants aux critères sélectionnés. L'analyse des alternatives ne peut donc pas être effectuée de manière quantitative. Bien souvent, cette analyse est donc qualitative, et obtenue par consultation d'experts. En ce sens, l'auteur de (Lo 2013) propose un cadre collaboratif pour la notation qualitative des concepts.

II.C.3.c) Agrégation des notes de briques pour obtenir celles des alternatives

Ce paragraphe traite de l'agrégation des notations des briques en notations des alternatives. Il s'agit de la transformation notée **B2** en Figure 70. Il n'y a dans la littérature que peu de publications qui traitent de cette problématique. L'auteur de (Holley 2011) propose pour chaque critère une agrégation des briques sous forme de somme, minimum, maximum ou moyenne. Cette approche semble intéressante car elle permet de prendre en compte le caractère additif ou extensif de chaque critère. Concernant la prise en compte d'éventuelles interactions entre les briques pouvant être sélectionnées au sein d'une même alternative, le manque de cadre méthodologique nous amène à envisager une démarche basée sur des règles implémentées au cas par cas.

II.C.3.d) Echelle de notation

Dans le cadre de l'analyse qualitative des alternatives (ou briques d'alternatives) par des experts, il convient de définir un système de notation. Son but est de restituer la connaissance des experts des avantages et inconvénients de chaque alternative.

Dans la littérature, on trouve plusieurs exemples de systèmes de notation basés sur des appréciations qualitatives (Weiss & Gilboa 2004; Lo 2013; Pahl et al. 2007) . Ces échelles de notations peuvent être définies par deux caractéristiques principales :

- Type de notation :

- Absolue : Les alternatives sont évaluées de manière absolue, sans utiliser de point de comparaison clairement défini. Ce type de notation est utilisé, par exemple, dans les

travaux de (Weiss & Gilboa 2004).

- Relative : Les alternatives sont évaluées par rapport à une référence. Cette référence peut être par exemple, la performance attendue, ou bien la performance d'une des alternatives. Dans ce dernier cas, cela permet de réduire le nombre d'alternatives à analyser, étant donné que l'alternative de référence aura une note neutre sur tous les critères. Ce type de notation relative est utilisé, par exemple, dans les travaux de (Lo 2013).
- **Nombre de niveaux** : le nombre de niveaux de l'échelle correspond au nombre de notes distinctes qu'elle comporte. Selon les auteurs, elle peut varier de 4 (Mauvais, En dessous de la moyenne, Au-dessus de la moyenne, Bon à Excellent) (Weiss & Gilboa 2004), à 11 (note de 0 à 10) chez (Pahl et al. 2007). Des cas intermédiaires existent, comme l'échelle à 7 niveaux de (Lo 2013) (forte dégradation, dégradation moyenne, faible dégradation, pas d'effet, faible amélioration, amélioration moyenne, forte amélioration). Comme l'ont suggéré les auteurs de (Weiss & Gilboa 2004), nous pensons que le choix du nombre de niveaux doit être fait en fonction de la précision des informations données par les experts. En effet :
 - Il n'y a nul besoin d'utiliser une échelle à 11 niveaux si le savoir est lui-même peu sûr. Cela entraînera de plus une perte de temps liée à des interrogations entre deux niveaux de notation.
 - A l'inverse, l'utilisation d'une échelle contenant trop peu de niveaux pourrait, en présence d'informations précises, fournir des résultats trop grossiers.

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser :

- Une échelle relative : cela permet de fixer une référence identifiée et logique à partir de laquelle les autres alternatives seront évaluées. L'alternative de référence correspond à l'architecture la plus moderne actuellement utilisée sur les moteurs de l'entreprise. Le deuxième effet bénéfique est d'éviter d'avoir à noter les briques constituant l'alternative de référence, ce qui représente dans notre cas une économie de l'ordre de 15% du nombre de briques à analyser.
- Un nombre de niveaux intermédiaires, de type (Lo 2013) à 7 niveaux. Cela nous apparaît être un bon compromis au vu de la relative imprécision des évaluations de briques fortement innovantes par les experts.

II.C.4. Prise de décision

Une fois les différentes alternatives analysées, il convient de prendre une décision sur la ou les alternatives les plus pertinentes.

II.C.4.a) Méthodes de prise de décision

Nous n'entendons pas, dans cette partie, donner une description complète et rigoureuse de chacune des méthodes qui seront évoquées. Notre objectif est plutôt de pouvoir donner au lecteur un bon aperçu de la philosophie globale de chaque méthode. Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter les références suivantes (Mammeri 2013; Tzeng & Huang 2011; Martel & Roy 2006).

Nous introduisons ici des notations sur les caractéristiques de notre problème d'aide à la décision. Ces notations sont à considérer pour toute la suite.

a, b : désigne deux alternatives

A : désigne l'ensemble des alternatives

n : nombre de critères, indexé en i (i variant de 1 à n)

$u(a)$: Utilité, ou score de l'alternative a à l'issue de l'agrégation

k_i : pondération donnée au critère numéro i

$g_i(a)$: performance analytique de l'architecture a vis-à-vis du critère numéro i

$v_i(a)$: valeur de la performance de l'alternative a vis-à-vis du critère numéro i , il s'agit de $v_i(g_i(a))$

(1) Les grandes familles de méthodes

Comme nous l'avons représenté en Figure 71, les méthodes de prise de décision se classent en 3 grandes catégories distinctes mais qui peuvent être complémentaires.

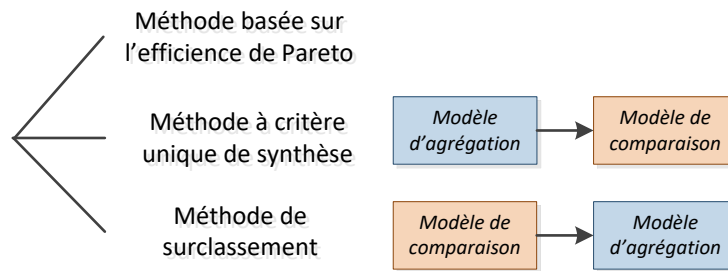


Figure 71 – Les grandes familles de méthode d'aide à la décision

- **La méthode de l'efficacité de Pareto**

Cette méthode se base sur la caractérisation d'un ensemble d'alternatives dites efficaces au sens de la dominance de Pareto. Celui-ci contient l'ensemble des alternatives pour lesquelles l'amélioration des performances sur un critère entraînerait une diminution des performances sur au moins un autre critère. L'inconvénient de cette méthode, c'est que dans des problèmes à fort nombre de critères, un grand nombre de concepts appartiennent au front de Pareto. Il conviendrait donc alors d'utiliser une seconde méthode d'aide à la décision pour discriminer ces concepts optimum au sens de Pareto.

- **Les méthodes à critère unique de synthèse (agréger puis comparer)**

Il s'agit dans cette famille de méthode d'utiliser un modèle d'agrégation pour synthétiser les performances des critères en un indicateur unique. Cela ramène donc le problème initialement multi critères en un problème uni critère pour lequel la prise de décision est aisée. D'où son appellation « Agréger puis comparer ». La difficulté dans ces méthodes réside dans le modèle d'agrégation qui doit proposer une synthèse représentative des performances des alternatives et des préférences du décideur.

- **Les méthodes de surclassement (comparer puis agréger)**

Cette famille de méthodes s'appuie tout d'abord sur une comparaison des performances des alternatives critère par critère. Ceci permet d'avoir une bonne prise en compte de l'aspect multicritère du problème de décision. Ces informations relatives à chaque critère sont ensuite synthétisées via des méthodes d'agrégation complexes. On parle donc de méthode « Comparer puis agréger ». L'inconvénient de cette famille de méthode provient principalement de la complexité du modèle d'agrégation permettant la prise de décision finale.

(2) Méthode d'efficacité de Pareto

La méthode d'efficacité de Pareto est basée sur la relation de dominance entre les alternatives. Elle a été introduite par V. Pareto en 1986. Cette relation est définie par l'équation suivante, où $g_i(a)$ représente la performance de l'alternative a pour le critère numéro i .

$$a \text{ domine } b \iff \begin{cases} \forall i = 1..n, & g_i(a) \geq g_i(b) \\ \exists j, & g_j(a) > g_j(b) \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

Cette relation de dominance peut se traduire en français par : « a domine b si et seulement si a est meilleure ou égale à b sur tous les critères sauf au moins un où a est strictement meilleure que b ».

On constate tout d'abord qu'il n'est pas raisonnable, dans notre cas, de s'attendre à trouver une alternative qui dominerait toutes les autres. Nous nous intéresserons plutôt aux alternatives qui sont non dominées par toutes les autres alternatives. Cet ensemble, appelé solutions efficaces ou front de Pareto, donne les alternatives pour lesquelles l'amélioration d'un critère entraînerait nécessairement une dégradation de performances sur un autre critère.

Les avantages de cette approche par efficacité de Pareto sont :

- Il n'y a pas besoin de calculer de pondération sur les critères.
- Les évaluations de performances des alternatives vis-à-vis des critères n'ont pas besoin

d'être exprimées de manière quantitative et précise. Il suffit simplement de pouvoir dire si une notation est meilleure qu'une autre. Ainsi, une échelle de notation qualitative peut être suffisante.

L'inconvénient principal de cette méthode c'est qu'elle ne permet pas de discriminer les alternatives du front de Pareto. Cette méthode répond en effet à un problème de tri (cf. paragraphe I(3)) entre deux ensemble alternatives dominées et alternatives non-dominées. Si l'ensemble des alternatives non-dominées est trop grand au sens de l'attente des décideurs, une autre méthode d'aide à la décision devra être mise en œuvre au sein de cet ensemble.

(3) **Description des méthodes à critère unique de synthèse (agrégé puis comparer)**

Ces méthodes reposent sur l'agrégation des informations multi-critères de chaque alternative, en un critère unique de synthèse la caractérisant.

(a) AHP : Analytical Hierarchy process

La méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) a été introduite par (Saaty 1980). Cette méthode est basée sur des techniques de pondération, comme nous l'avons présenté au paragraphe II.C.1.b(2). Il s'agit en effet de calculer des pondérations pour :

- Chaque alternative pour un critère donné. Cela donne lieu à l'application d'une méthode de tri croisé, qui doit être renouvelée pour chaque critère (soit n fois). Cette étape permet d'obtenir une matrice des préférences relatives de chaque alternative, pour chaque critère.
- Chaque critère relativement à l'objectif global. Il s'agit ici classiquement de pondérer les différents critères vis-à-vis des objectifs fixés par les décideurs.

Une fois ces deux pondérations effectuées, l'agrégation est effectuée en utilisant une des techniques des méthodes suivantes.

Dans notre cas comportant de nombreuses alternatives et critères, l'inconvénient principal de cette méthode c'est de devoir comparer les alternatives deux à deux pour chaque critère, ce qui est trop gourmand en temps.

(b) MAUT : Multiple Attribute Utility Theory

Cette méthode, introduite par (Keeney & Raiffa 1976), consiste à agréger tous les critères en une seule dimension, appelée fonction d'utilité. Ainsi, la méthode MAUT consiste principalement à trouver l'opérateur d'agrégation qui représentera le mieux les préférences du décideur. De nombreuses formes existent pour cet opérateur d'agrégation. Nous en présentons ici deux des plus utilisées. Pour plus d'informations sur les autres méthodes d'agréations on pourra se référer à (Grabisch 2005).

- Forme additive

Aussi appelée SAW (Simple Additive Weighting method), elle a été utilisée pour la première fois par (Churchmann & Ackoff 1954), soit bien avant la théorie MAUT, c'est la méthode d'aide à la décision la plus simple.

$$u(a) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(a) \quad \text{avec } k_i > 0, \sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (\text{III-6})$$

- Forme multiplicative

Cette formulation est utilisée dans le cas où la condition de l'équation (III-6) n'est pas vérifiée. Dans ce cas, la fonction d'utilité est donnée par :

$$u(a) = \frac{\prod_{i=1}^n [1 + K k_i v_i(a)] - 1}{K} \quad \text{avec } \begin{cases} k_i > 0 \\ \sum_{i=1}^n k_i \neq 1 \\ K > -1 \\ K \neq 0 \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

où K est l'unique racine réelle non nulle et supérieure à -1 de l'équation :

$$\prod_{i=1}^n [1 + K k_i] = K + 1 \quad (\text{III-8})$$

Comme le remarquent les auteurs de (Grabisch 2005), une attention toute particulière devra être apportée quant à la commensurabilité des valeurs des différents critères.

(c) TOPSIS : Technique for Order Preferences by Similarity to an Ideal Solution

Cette technique a été introduite par les auteurs de (Hwang & Yoon 1981).

L'utilité de l'alternative a se construit ici par comparaison entre :

- La distance (notée $d^+(a)$) de l'alternative a avec une solution idéale (notée a^+)
- La distance (notée $d^-(a)$) de l'alternative a avec une solution anti-idéale (notée a^-)

Il est donné par l'équation :

$$u(a) = \frac{d^-(a)}{d^-(a) + d^+(a)} \quad (\text{III-9})$$

Ces distances sont calculées comme suit :

$$d^+(a) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{k_i^2}{g_i^2(A)} [g_i(a^+) - g_i(a)]^2} \quad (\text{III-10})$$

$$d^-(a) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{k_i^2}{g_i^2(A)} [g_i(a) - g_i(a^-)]^2} \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$$g_i^2(A) = \sum_{a \in A} g_i^2(a) \quad (\text{III-12})$$

Enfin, les alternatives idéales et anti-idéales se caractérisent par les meilleures performances et, respectivement, les moins bonnes performances, que prennent les alternatives de A pour chaque critère. Cela donne :

$$\begin{cases} g_i(a^+) = \max_{a \in A} g_i(a) \\ g_i(a^-) = \min_{a \in A} g_i(a) \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

Comme le font remarquer les auteurs de (Martel & Roy 2006), le défaut inhérent à la méthodologie TOPSIS est que la modification, l'ajout ou le retrait d'une alternative peut potentiellement modifier le résultat de la prise de décision sur les autres alternatives. En effet, cela implique une modification de $g_i^2(A)$ qui se répercute sur $u(a)$ via $d^+(a)$ et $d^-(a)$.

A l'inverse, le fait de comparer les performances de chaque alternative à la meilleure ou la moins bonne performance observée permet à la méthode TOPSIS de s'affranchir de la commensurabilité entre les échelles des différents critères.

(4) Description des méthodes de surclassement (comparer puis agréger)

Ces méthodes reposent sur le concept de surclassement qui peut être défini selon (Grabisch 2005) comme de la manière suivante. On dit que le concept a surclasse le concept b (a suclasse b est noté aSb) s'il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b , sans qu'il y ait de raisons importantes pour refuser cette affirmation.

Comme l'explique l'auteur de (Grabisch 2005), les méthodes de surclassement ont pour avantage principal de faire disparaître tout problème de commensurabilité. En effet, les préférences sont par construction homogènes entre elles dans ce type de méthodes. L'inconvénient de ces méthodes réside dans l'établissement d'un ordre total ou partiel, suite à l'agrégation des préférences. Pour plus de détails, on pourra lire le paragraphe sur le théorème d'Arrow de (Grabisch 2005).

(a) ELECTRE : Elimination Et Choix Traduisant la Réalité

ELECTRE est une véritable famille de méthodes à part entière dont nous présentons les plus courantes dans le Tableau 14. Elle a été proposée par (Roy 1968).

Tableau 14 - Méthodes les plus courantes de la famille ELECTRE

Type de problématique	Méthode
Problématique de choix	ELECTRE I
	ELECTRE Iv
	ELECTRE Is
Problématique de classification	ELECTRE Tri-B
	ELECTRE Tri-C
Problématique de classement	ELECTRE II
	ELECTRE III
	ELECTRE IV

Nous présentons dans ce paragraphe les grandes lignes de cette famille de méthodes. Pour plus d'informations sur ces méthodes, on pourra se référer à (Figueira, Mousseau, et al. 2005).

ELECTRE I

La proposition « a surclasse b » (aSb) est validée si et seulement si trois conditions sont satisfaites : la concordance, la discordance et le non veto.

- Concordance :

On définit l'indice de concordance $c(a, b)$, qui mesure à quel point a est au moins aussi bon que b . Cet indice est défini par :

$$c(a, b) = \frac{1}{K} \sum_{i \in Q(a, b)} k_i \quad (\text{III-14})$$

Où :

- $Q(a, b) = \{i, g_i(a) \geq g_i(b)\}$
- $K = \sum_{i=1}^n k_i$

- Discordance

On définit l'indice de discordance $d(a, b)$ qui mesure à quel point a ne surclasse pas b . Cet indice est défini par :

$$d(a, b) = \frac{\max_{i \in R(a_k, a_m)} [k_i (g_i(b) - g_i(a))]}{\max_{c, d \in A} [k_i (g_i(c) - g_i(d))]} \quad (\text{III-15})$$

Où : $R(a, b) = \{i, g_i(a) < g_i(b)\}$

- Non veto

Le veto est là pour empêcher la relation de surclassement (aSb) dans le cas où un critère serait trop en désaccord avec cette proposition. Le veto est utilisé lorsque :

$$g_i(b) - g_i(a) > v_i(g_i(a)) \quad (\text{III-16})$$

Où $v_i(g_i(a))$ est appelé seuil de veto.

Dans le cas où la condition de veto est respectée, et si $c(a, b) > c^*$ et $d(a, b) < d^*$ alors a surclasse b . Sinon a ne surclasse pas b .

Avec :

- c^* est appelé niveau de concordance. Il s'interprète comme un niveau minimum de majorité requis pour valider la préférabilité de l'alternative a sur l'alternative b.
- d^* est appelé niveau de discordance. Il s'interprète comme le niveau maximum de discordance vis-à-vis de la proposition « a surclasse b » pour que cette dernière puisse être considérée vraie.

Ainsi, il convient de définir :

- Un niveau de concordance c^*
- Un niveau de discordance d^*
- Une fonction seuil de veto par critère $v_i(g_i(a))$.

ELECTRE II

Cette deuxième version introduit la possibilité de discriminer les concepts candidats via l'introduction des relations de surclassement faible et fort. De plus, une contrainte supplémentaire a été ajoutée sur la relation de préférence. Pour que a soit préférée à b, il faut que $c(a, b) > c^*$ et $c(a, b) \geq c(b, a)$.

ELECTRE III

La troisième version de la méthode ELECTRE permet d'introduire des incertitudes dans le choix du niveau de concordance et le seuil de veto. Ceci est effectué via l'introduction de deux seuils :

- Un seuil d'indifférence : permettant à deux alternatives dont les performances sont proches d'être indifférentes
- Un seuil de préférence : permettant à une alternative d'être strictement préférée à une autre dans le cas où leur écart de performance est suffisamment important.

(b) PROMETHEE

Cette méthode fût introduite par le travail de (Brans et al. 1984). Elle est basée sur la généralisation de la notion de critère.

La différence de performance de l'alternative a par rapport à l'alternative b est exprimée sous forme d'un index de préférence :

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n k_i f_i(a, b) \quad (\text{III-17})$$

où $f_i(a, b)$ est la fonction de préférence. Elle peut être définie de plusieurs manières que nous ne détaillerons pas ici. Dans tous les cas, elle est l'image de la différence de performances de l'alternative a et b vis-à-vis du critère numéro i. Pour plus d'information concernant les fonctions de préférences, on pourra consulter (Tzeng & Huang 2011).

On en déduit alors les flux de préférence entrants et sortants :

$$\begin{cases} \Phi^+(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b) \\ \Phi^-(a) = \sum_{b \in A} \pi(b, a) \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

Les relations de préférence sont alors déduites de ces flux entrants et sortants :

$$\begin{cases} aP^+b \text{ ssi } \Phi^+(a) > \Phi^+(b) \\ aI^+b \text{ ssi } \Phi^+(a) = \Phi^+(b) \end{cases} \quad (\text{III-19})$$

$$\begin{cases} aP^-b \text{ ssi } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ aI^-b \text{ ssi } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \end{cases} \quad (\text{III-20})$$

On définit également le flux de préférence net :

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) + \Phi^-(a) \quad (\text{III-21})$$

Ces concepts sont communs à toutes les versions de la méthode PROMETHEE. Leurs différences proviennent de la manière de définir la relation de préférence en fonction de ces outils que sont les relations de préférence et d'indifférence.

PROMETHEE I

Dans la méthode PROMETHEE I, trois relations distinctes sont définies :

- La préférence, notée P^I
- L'indifférence, notée I^I
- L'incomparabilité, notée R .

Les cas dans lesquels une alternative est préférée, indifférente ou incomparable à une autre sont donnés dans le Tableau 15 ci-dessous.

Tableau 15 – Définition des relations de préférence et d'indifférence de PROMETHEE I

	aP^+b	aI^+b	Autre
aP^-b	aP^Ib	aP^Ib	aRb
aI^-b	aP^Ib	aI^Ib	aRb
Autre	aRb	aRb	aRb

On constate que la méthode PROMETHEE I fournit un pré-ordre partiel, du fait de l'incomparabilité de certaines alternatives.

PROMETHEE II

Cette méthode reprend le principe PROMETHEE I, mais en fournissant un pré-ordre total. La préférence et l'indifférence sont alors définies comme suit :

$$\begin{cases} aP^{II}b \text{ ssi } \Phi(a) > \Phi(b) \\ aI^{II}b \text{ ssi } \Phi(a) = \Phi(b) \end{cases} \quad (\text{III-22})$$

PROMETHEE III

Cette méthode introduit un intervalle de neutralité entre les valeurs des flux de préférences des alternatives. Elles permettent à des alternatives qui ont des flux très proches mais pas nécessairement égaux de pouvoir tout de même être considérés comme indifférents. En effet, dans PROMETHEE II, une telle situation mènerait à ce que l'alternative avec le flux net légèrement supérieur soit préférée à celle ayant un flux légèrement inférieur.

Cet apport de PROMETHEE III nous semble essentiel étant donné qu'il nous rapproche de ce que nous pensons intuitivement : « deux alternatives dont les flux nets sont proches sont similaires ».

PROMETE IV

Cette méthode reprend les avancées de PROMETHEE III en les étendant au cas d'un nombre infini d'alternatives. Ceci étant en dehors du cadre de nos travaux, nous ne détaillerons pas cette approche. On pourra consulter les travaux de (Tzeng & Huang 2011) pour plus d'informations.

(c) Prise en compte des incertitudes

Comme l'explique l'auteur de (Moullec 2014), les incertitudes devraient être prises en compte en conception d'architecture. En effet, ces phases de conception préliminaire ne comportent que peu de données qui ne varieront pas au cours du processus de conception.

Etant donné le temps borné de ces travaux de thèse, nous ne pourrions pas y intégrer la prise en compte des incertitudes. Nous donnons tout de même les pistes bibliographiques permettant d'approfondir cet aspect. Il y a dans la littérature plusieurs approches pour la prise en compte

d'incertitude en conception préliminaire. Parmi elles, on compte :

- Logique floue (Zadeh 1988) : beaucoup de méthodes précédemment décrites ont leur variantes en logique floue. Pour plus de détails, on pourra lire (Tzeng & Huang 2011). Pour aller plus loin, une logique floue de type 2 peut être utilisée pour refléter l'attitude optimiste ou pessimiste du décideur. Cela a été fait, par exemple chez (Akay et al. 2011).
- Réseau de Neurones (Haykin 1994) : un exemple plus récent peut être donné avec les travaux de (Huang et al. 2006) qui utilisent un réseau de neurones pour la prise de décision.
- Réseaux Bayésiens (Jensen & Nielsen 2007). Plus récemment, les travaux de (Moullec 2014) utilisent les réseaux bayésiens pour la sélection d'architectures de systèmes complexes, en prenant en compte les incertitudes.

II.C.4.b) Synthèse des comparaisons de méthodes MADM dans la littérature

Ce paragraphe a pour but de répertorier les comparaisons qui ont été faites dans la littérature concernant les méthodes MADM.

Le cadre de comparaison proposé par les auteurs de (Craisse et al. 2016) nous paraît intéressant car il s'applique à l'évaluation d'alternatives d'architectures de systèmes techniques : les sous-systèmes d'un avion. En ce sens, le problème proposé contient des similarités avec notre cas d'étude qui permettent d'établir un parallèle pertinent :

- Structure hiérarchique du problème : comme nous, les critères d'évaluations sont organisés de manière hiérarchique. En effet, les critères de haut niveau sont déclinés en critères techniques.
- Grand nombre d'alternatives : l'approche devra donc être sobre en calculs, et particulièrement en sollicitation des experts pour évaluer les alternatives. On pense par exemple à la méthode AHP qui est particulièrement demandeuse dans ce domaine.
- Facilité d'utilisation car pour une utilisation par des ingénieurs non spécialistes des MADM.

	Easy to Use	No Ranking Reversal	Computational Efficiency	Ability to Solve Problem with Hierarchical Requirements
Additive	✓	✓	✓	✓
AHP	×	×	×	✓
MAUT	×	✓	×	✓
Multiplicative	×	✓	✓	×
TOPSIS	✓	×	✓	×

Figure 72 - Comparaison de différentes méthodes tirée de (Craisse et al. 2016)

Nous présentons en Figure 72 le comparatif réalisé par les auteurs de (Craisse et al. 2016). Leur conclusion a été la sélection de la méthode Additive (SAW) qui leur apparaît comme simple à utiliser, sobre en calculs, adaptée à des problèmes hiérarchiques et enfin l'absence d'effet d'anomalie de classement¹⁵. Ce dernier critère semble capital pour les auteurs de l'étude, éliminant de ce fait la méthode TOPSIS pourtant couramment utilisée (Kirby 2001; Biltgen & Mavris 2007b; Engler et al. 2007; Tran 2010). Cette anomalie provient du fait que l'ajout ou le retrait d'une alternative influe sur le classement des autres alternatives. Néanmoins, comme l'expliquent les auteurs de (Wang & Luo 2009) dans leurs travaux, les méthodes AHP et TOPSIS ne sont pas les seules à produire cet effet d'anomalie de classement. Ils montrent en effet que ce phénomène existe également dans les méthodes SAW, avant de conclure que ce phénomène qui se produit dans de nombreuses méthodes de décision devrait être considéré comme normal et non comme un biais.

Les travaux de (Tran 2010) ont été l'occasion de comparer 3 méthodes de prise de décision que sont SAW, WP¹⁶ et TOPSIS. Ces travaux ont été menés dans un cadre technique de sélection d'interface

¹⁵ Nous utilisons « anomalie de classement » pour traduire « ranking reversal ».

¹⁶ Weighting Product Method, Méthode de produit pondéré. Il s'agit d'une méthode proche de la méthode SAW mais où les performances à chaque critère sont élevées au poids de ce critère avant d'être multipliées.

pour terminaux mobiles. L'auteur a montré que, même si l'anomalie de classement était certes plus prononcée dans la méthode TOPSIS que dans les autres, cette dernière restait néanmoins plus précise pour identifier le rang de chaque alternative.

Les auteurs de (Aruldoss et al. 2013) montrent dans leur revue des méthodes de prise de décision multi critères que les méthodes ELECTRE, TOPSIS et Grey Theory ont été largement utilisées. D'après les auteurs, elles répondent chacune à un problème spécifique :

- ELECTRE pour des problèmes de type choix (cf. I(3) pour la classification des problèmes de décision)
- TOPSIS pour des problèmes de classement (cf. I(3) pour la classification des problèmes de décision)
- Grey Theory pour les problèmes où les données disponibles sont incomplètes.

Les travaux de (Lo 2013) apportent un nouvel éclairage à notre choix de méthode d'aide à la décision. Il distingue selon que les informations que le décideur a sur les alternatives soient :

- Précises, dans ce cas l'auteur recommande la méthode MAUT qui a l'avantage d'être simple et bien connue. Il déconseille tout de même l'utilisation de l'opérateur d'agrégation de type somme pondérée du fait de son fort effet compensatoire, et recommande l'utilisation de la moyenne géométrique à la place.
- Imprécises, dans ce cas, l'auteur conseille deux méthodes, qu'il juge néanmoins mal adaptées aux problèmes comportant un nombre élevé (> 10) de critères ou d'alternatives. Il s'agit de :
 - o La méthode AHP qui est simple mais qui utilise une agrégation de type somme pondérée, entraînant les problèmes de compensation déjà évoqués. Cette méthode est simple mais semble mal adaptée si le nombre de critères ou d'alternatives est élevé (>10). On y retrouve toujours agrégation potentielle par somme pondérée
 - o Méthode Macbeth : Elle intègre la détection des incohérences, des interactions avec l'utilisateur et l'analyse sensibilité et robustesse. Cependant, elle reste mal adaptée si nombre de critères ou alternatives est élevé (>10).

Enfin, l'auteur de (Mammeri 2013), qui propose une approche de MADM pour l'évaluation du confort des trains a quant à lui sélectionné :

- Une méthode à critère unique de synthèse : l'intégrale de Choquet (Choquet 1954), pour sa capacité à modéliser les interactions entre critères
- Et une méthode de surclassement : la méthode ELECTRE Tri car elle est, selon l'auteur, la principale méthode de surclassement permettant d'obtenir un tri.

On notera finalement que les auteurs de (Kirby 2001; Biltgen & Mavris 2007b; Engler et al. 2007), dont les thématiques sont proches des nôtres, ont utilisé la méthode TOPSIS, sans nécessairement motiver leur choix.

II.C.4.c) Choix de la méthode de MADM

A la suite de la synthèse de la littérature, effectuée dans le paragraphe précédent, un certain nombre de conclusions apparaissent :

- Concernant les méthodes de synthèse :
 - o La méthode AHP semble écartée. En plus d'être substantiellement plus longue à mettre en œuvre que les autres méthodes, elle souffre d'importantes anomalies de classement.
 - o La méthode TOPSIS est également une bonne candidate pour notre application. Forte d'une large sélection dans des travaux antérieurs, elle présente une bonne précision de classement malgré des anomalies que nous jugeons « normales » au sens de (Tran 2010).
- Méthode de surclassement : La méthode ELECTRE semble être plébiscitée au sein de cette famille (Mammeri 2013; Aruldoss et al. 2013). Néanmoins, relativement peu d'études ont été menées sur ce type de méthodes, ce qui fragilise cette conclusion.

Pour la suite de nos travaux, nous considérerons la méthode TOPSIS, étant donné sa simplicité de mise en œuvre et la pertinence de ses résultats. Nous les comparerons dans la suite de nos travaux à

la méthode MAUT, qui consiste en la moyenne pondérée classiquement utilisée en ingénierie.

Nous n'avons pas retenu de méthodes de surclassement du fait de leur complexité de mise en œuvre qui imposerait l'utilisation d'un logiciel dédié. Ces méthodes sont également plus demandeuses en termes de données de sélection de type seuils d'indifférence, de préférence et de veto, augmentant encore le temps de mise en œuvre de la méthode.

Enfin, les méthodes d'efficacité de Pareto n'ont pas été retenues pour notre étude. Du fait de l'imprécision relative de l'évaluation des alternatives qui pourrait nous conduire à considérer tout de même des alternatives dominées dans la sélection finale. Nous pensons notamment au cas où une alternative a dominerait une alternative b pour une note supérieure de quelques pourcent sur chaque critère. Dans notre cadre d'étude, l'alternative b doit être considérée du fait des incertitudes sur les notations des alternatives. Cette approche par efficacité de Pareto est mieux adaptée à un cadre d'optimisation pur dans lequel le jeu de paramètres b devrait être écarté.

III. Méthodologie proposée

Cette partie présente la méthodologie qui, suite à la revue de l'état de l'art, a été proposée et mise en œuvre dans le cadre des travaux de thèse.

III.A. Processus

Nous avons représenté en Figure 73 le processus que nous avons proposé et mis en œuvre dans le cadre des travaux de thèse.

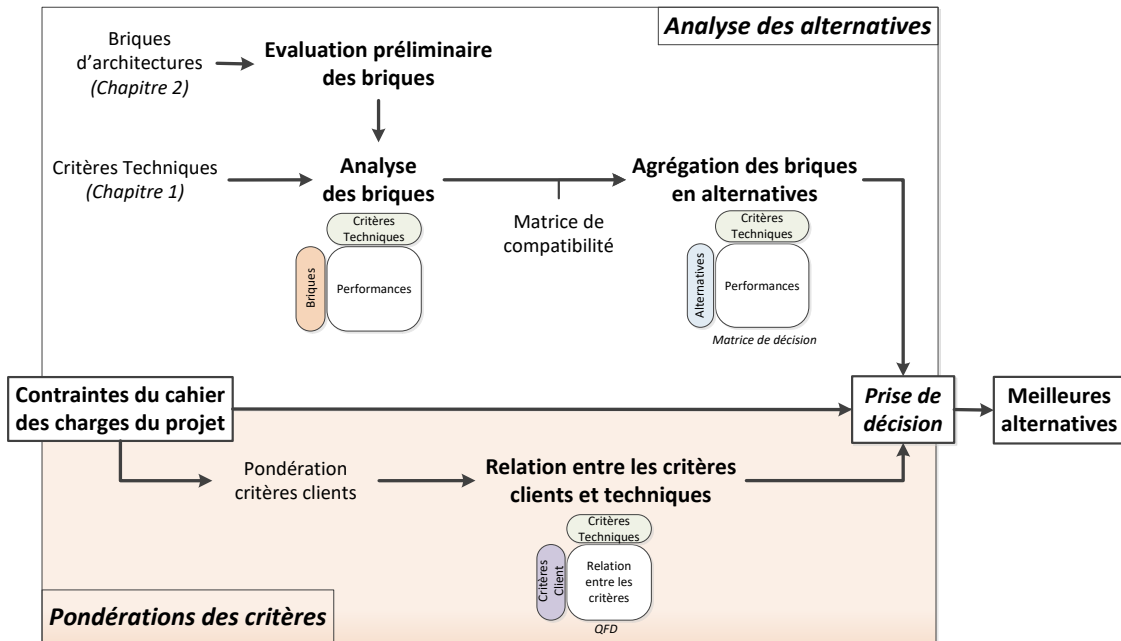


Figure 73 - Vue d'ensemble du processus de de sélection d'architecture

Comme nous l'avons représenté dans la partie supérieure de la Figure 73, nous avons choisi de travailler jusqu'au dernier moment avec les briques d'alternatives, et non les alternatives elles-mêmes. Cette position s'explique par le fait que le nombre de briques est raisonnable (45) alors que le nombre d'alternatives est bien plus grand (plus de 20 000). Ainsi, il est possible de considérer chaque brique d'alternative individuellement, ce qui serait impossible en raisonnant directement sur les alternatives.

On peut constater dans le processus de sélection d'architectures proposés que la sélection par matrice de compatibilité arrive relativement tardivement. Ceci peut paraître en contradiction la démarche du Chapitre 2 dans lequel la matrice de compatibilité avait d'ores et déjà été utilisée dès l'étape de génération des architectures, soit bien en amont du processus de sélection. Cette apparition tardive de la matrice de compatibilité dans le processus de sélection s'explique par un gain de temps. En effet, le fait de procéder à l'étape d' « Evaluation préliminaire des briques » avant de remplir la matrice de compatibilité permet de réduire le nombre de briques à considérer. Ceci entraîne alors une diminution de la taille de la matrice de compatibilité, et donc un gain de temps pour les utilisateurs.

III.B. Les critères d'évaluation

Ce paragraphe concerne la partie « Pondération des critères » de la démarche représentée en Figure 73. Nous avons choisi de considérer les deux types de critères d'évaluation (technique et client), introduits au paragraphe II.C.1.a) :

- Les critères de niveau client nous ont été directement transmis par l'entité en charge des avant-projets de l'entreprise. Cette entité possède une bonne vision des critères d'évaluation des moteurs par les clients, ainsi que de leurs importances relatives. Ils nous ont ainsi fournis

- les pondérations des critères de niveau client.
- Les critères d'évaluation technique du système carburant ont été définis directement à partir des besoins exprimés par les parties prenantes (voir Chapitre 1). Les pondérations des critères techniques, qui serviront directement à l'évaluation des briques et des architectures, a été effectuée par déclinaison des poids des critères clients, comme présenté au paragraphe II.C.1.b)(4). Cette approche consiste à répartir les poids des critères clients vers les critères techniques via la prise en compte de la contribution de chaque critère technique à chaque critère client.

III.C. Evaluation préliminaire

L'objectif de cette étape est de réduire le nombre d'alternatives en écartant, le plus tôt possible, celles dont on sait qu'elles seront irréalisables ou qu'elles ne répondront pas au besoin. Dans un contexte d'innovation de rupture où le champ des possibles doit être élargi au maximum, cette évaluation préliminaire devra être effectuée avec précaution. En effet, elle ne permettra d'écarter que les alternatives clairement non fonctionnelles ou infaisables. Cette étape d'évaluation préliminaire ne dressera en aucun cas une liste exhaustive des alternatives à écarter.

Des modèles de prédimensionnement des sous-systèmes seront mis en place, afin d'en déterminer les grandeurs caractéristiques. Ces briques seront ensuite validées ou écartées sur un jeu réduit de critères fonctionnels ou de fabricabilité, par exemple.

III.D. Analyse des alternatives

III.D.1. Analyse des briques

Comme expliqué au paragraphe II.C.3.b), dans notre cas, l'analyse des briques d'alternatives sera effectuée de manière qualitative par consultation d'experts. Cette étape consiste donc à remplir la matrice que nous avons représentée en Tableau 16.

Tableau 16 - Tableau d'analyse des performances des briques d'alternatives

Fonctions	Code brique	Critère 1	Critère 2	Critère 3	...	Critère n
Répartir	R11					
	R12					
	R21					
	R22					
Doser	D13					
	D14					
	D31					
	D32					
	D33					
...	...					

Chaque brique d'alternative, identifiée par un code unique, est évaluée selon chaque critère (numéroté ici de 1 à n) et par rapport à une brique de référence. Cette dernière est reconnaissable à sa ligne colorée et au symbole « » apposé à la suite de son code. Ces briques de référence constituent l'alternative « état de l'art » chez Safran Helicopter Engines. L'évaluation de chaque brique est effectuée par l'attribution d'une note, selon l'échelle de notation que nous avons choisie. Cette dernière est représentée en Tableau 17. Il s'agit d'une échelle de notation :

- **Relative** : les briques sont évaluées selon leur potentiel à améliorer (opportunité) ou à

- détériorer (risque) la performance actuelle, représentée par les briques de référence.
- **Qualitative** : le jugement n'est pas donné sous forme quantitative mais bien qualitative (fort potentiel, potentiel moyen, faible potentiel). Même si elles sont numériques (de -3 à +3), les notes représentent des niveaux qualitatifs : 1 pour faible, 2 pour moyen, 3 pour fort ainsi que + pour une amélioration et - pour une détérioration.
- **A 7 niveaux** : la notation retenue est composée de 7 niveaux. Comme nous l'avons expliqué au paragraphe II.C.3.d), cette échelle constitue, à priori, un bon compromis entre complexité de la notation et précision des informations disponibles (jugement qualitatif des experts).

Tableau 17 - Echelle d'évaluation des briques d'alternatives

Type	Description	Note
Opportunité	Fort potentiel d'amélioration	+3
	Potentiel d'amélioration moyen	+2
	Faible potentiel d'amélioration	+1
	Pas d'amélioration ni de détérioration	0
Risque	Faible potentiel de détérioration	-1
	Potentiel de détérioration moyen	-2
	Fort potentiel de détérioration	-3
	Pas de lien fonctionnel	NA

III.D.2. Agrégation des briques en alternatives

Cette étape consiste à assembler les différentes briques pour former des alternatives. La démarche mise en œuvre pour effectuer cette agrégation a été présentée au paragraphe IV.C du Chapitre 2. Du point de vue de l'évaluation des alternatives, les aspects de compatibilité des briques entre elles, ainsi que d'agrégation des notes de briques en notes alternatives doivent être considérés.

III.D.2.a) Compatibilité entre les briques

L'agrégation des différentes briques pour former des alternatives doit tout d'abord s'intéresser à la compatibilité entre les différentes briques. Cela revient à se demander quelles sont les briques qui peuvent, ou non, être assemblées au sein d'une même alternative. Les détails sur cette activité ont été donnés lors de la génération des architectures, dans la partie IV.C.3 du Chapitre 2. Le résultat est la matrice de compatibilité des briques.

III.D.2.b) Agrégation des notes des briques

Cette étape consiste à déterminer les notes de chaque alternative à partir des notes des briques, comme nous l'avons représenté en Figure 73. Nous avons utilisé l'opérateur somme, présenté au paragraphe II.C.3.c), auquel nous avons ajouté une notion de pondération pour chaque fonction. Ceci permet de prendre en compte, pour chaque critère, l'impact de chaque fonction dans l'évaluation de l'alternative globale. Ces pondérations ont été prises en compte via une matrice d'agrégation des notes, représentée en Figure 74. Pour chaque critère, un poids est attribué à chaque fonction, représentant sa contribution à la note finale de l'alternative. Pour chaque critère, la somme des poids attribués aux différentes fonctions doit être de 100%.

Fonctions	Critère 1	Critère 2	Critère 3	...	Critère n
Répartir			0%		
Doser			X%		
Conditionner			X%		
Pompe 2			X%		
Pompe 1			X%		
Add-On			X%		
Commander			0%		
Cm Add-On			0%		
Thermique			X%		

La somme fait
100%

Figure 74 – Matrice d'agrégation des notes

Pour le remplissage de cette matrice, des méthodes de types tri-croisés ou tri simple peuvent être utilisées, comme nous l'avons décrit au paragraphe II.C.1.b)(1). En pratique, étant donné que le nombre de fonctions est raisonnable¹⁷, ces poids ont été déterminés directement.

III.D.3.Prise en compte des contraintes du cahier des charges

Alors que la démarche de génération des alternatives est basée sur des critères et des briques d'architectures génériques, la prise de décision doit être faite dans le cadre d'un projet particulier, ayant ses propres besoins et contraintes. Cela consiste à sélectionner, parmi les briques et critères génériques, les éléments pertinents pour un projet donné. Comme nous l'avons vu au paragraphe III.B, la sélection des critères est faite via l'utilisation de règles métiers. Il en va de même pour les briques, qui peuvent être sélectionnées ou écartées avant même le processus de décision, afin de satisfaire les contraintes du cahier des charges du projet considéré.

III.E. Prise de décision

Pour la prise de décision, deux méthodes d'aide à la décision ont été utilisées : TOPSIS et MAUT. Comme nous l'avons vu au paragraphe II.C.4.b), ces deux méthodes possèdent l'avantage d'être faciles à comprendre et à utiliser. L'utilisation de ces deux méthodes s'est avérée fructueuse car elles ne mettent pas nécessairement en avant les mêmes types d'architectures. Ceci permet d'apporter une certaine diversité aux architectures sélectionnées.

Pour analyser les résultats de ces deux méthodes, nous avons proposé et mis en œuvre deux approches complémentaires :

- Une approche topologique, basée sur la répartition des architectures sur une échelle de valeur que nous avons définie
- Une approche analytique, basée sur les briques et associations de briques présentes dans les meilleures architectures.

Cette démarche ainsi que les résultats obtenus dans notre cas d'étude sont détaillés au paragraphe IV.D.

¹⁷ Pour un critère donné, le nombre de fonctions à comparer est d'autant plus faible que toutes les fonctions ne sont pas forcément contributrices. Plus de détails est donné au paragraphe IV.C.2.

IV. Mise en œuvre chez Safran Helicopter Engines

Ce paragraphe présente notre mise en œuvre chez Safran Helicopter Engines de la méthodologie proposée dans le paragraphe III. Il expose en particulier les leçons apprises au cours de cette expérience. La mise en œuvre de cette méthodologie a permis, à partir des 1 140 480 architectures potentielles, générées à partir des 54 briques présentées au Chapitre 2, de sélectionner une dizaine d'architectures. La méthodologie a été appliquée en utilisant le cahier des charges du système carburant d'un moteur développé récemment. Ceci a permis de comparer les architectures proposées avec l'architecture qui a été retenue au moment de sa conception.

IV.A. Les critères d'évaluation

IV.A.1. Présentation des critères d'évaluation utilisés

Les critères techniques et clients que nous avons définis dans nos travaux sont présentés en Tableau 18 et Tableau 19 respectivement.

Tableau 18 - Liste des critères d'évaluation techniques

Catégorie	Critères d'évaluation techniques
Performances	Capacité d'aspiration
	Capacité d'amorçage
	Précision de dosage
	Contrôle de l'homogénéité aux injecteurs
	Réponse dynamique
	Fonctionnement sans additif anti-givre
	Minimisation des rejets (drains et fuites)
	Démarrage rapide et fiable
Compatibilité	Facilité d'intégration d'une purge
	Compatibilité GV hydrauliques
	Potentiel à refroidir l'huile
	Présence d'un clapet de pied
Physique	Masse
	Coût d'achat
Navigabilité	Capacité à interrompre de manière sûre le débit carburant
Maintenance et Sûreté de fonctionnement	Tolérance aux pannes (dispatch)
	Accessibilité
	Capacité à surveiller le système
	Fiabilité (MTBUR)
	Coût de réparation

Les critères d'évaluation techniques sont issus de l'analyse des besoins conduite lors du Chapitre 1. On constate que les critères d'évaluation client sont composés de critères d'appréciation mais aussi de points importants et de facteurs d'échec.

Tableau 19 – Liste des critères d'évaluation client

Catégorie	Critères d'évaluation Client
Critères d'appréciation client	Sécurité des vols
	Disponibilité
	Coût d'opération
	Coût d'acquisition
	Confort de maintenance
	Performances
Points importants	Température minimale de fonctionnement sans additif AG
	Fonctionnement sans pompe(s) de gavage
Facteur d'échec	Masse

Au total, on dénombre ainsi 20 critères techniques et 10 critères clients. Un des intérêts de notre étude d'architectures est de prendre en compte les nombreux critères techniques, représentatifs des attentes principales des parties prenantes. Ce point a été développé au paragraphe I(1). Cependant, ce nombre important de critères est un désavantage car il alourdit et rallonge les étapes d'analyse des alternatives.

IV.A.2. Pondération des critères d'évaluation

Comme nous l'avons présenté au paragraphe III.B, les pondérations des critères d'évaluation client nous ont été directement fournies par le service des avant-projets de l'entreprise.

		CRITERES EVALUATION CLIENT						
		XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	
CRITERES EVALUATION TECHNIQUE		Safety	Disponibilité	Coût d'opération	Coût d'acquisition	Confort de maintenance	Performances	
Performances	Capacité d'aspiration	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Capacité d'amorçage	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Précision de dosage	0%	0%	0%	0%	0%	28%	1%
	Contrôle de l'homogénéité aux inje	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Réponse dynamique	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Fonctionnement sans additif anti-g	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Minimisation des rejets (drains et f	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Démarrage rapide et fiabilisé	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
Compatibilité	Facilité d'intégration d'une purge	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Compatibilité GV hydrauliques	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Potentiel à refroidir l'huile	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Présence d'un clapet de pied	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
Physique	Masse	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Coût d'achat	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
Navigabilité	Capacité à interrompre de manière sûre le débit carburant	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
Maintenance et Sûreté de fonctionnement	Tolérance aux pannes (dispatch)	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Accessibilité	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Capacité à surveiller le système	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Fiabilité (MTBUR)	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%
	Coût de réparation	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%	XX%

Figure 75 – Aperçu de la matrice servant à la pondération des critères techniques à partir des pondérations des critères client

Pour ce qui est des pondérations des critères techniques, nous avons choisi de les déduire de ces critères d'évaluation client, via la méthode de déclinaison hiérarchique des pondérations, développée au paragraphe II.C.1.b)(4). La matrice servant à l'implémentation de la méthode est présentée en

Figure 75. Par mesure de confidentialité, les valeurs ont été masquées. Nous avons simplement gardé celle de la ligne « Précision de dosage », qui servira d'exemple par la suite. En colonne sont représentés les critères clients (en vert) et en ligne les critères techniques (mauve). Une fois la matrice remplie, les pondérations des critères clients sont entrés dans les cases bleues, et les pondérations des critères techniques obtenues par somme pondérée en colonne rouge. Cette approche s'est naturellement imposée car elle reflète rigoureusement les préférences des clients finaux. Cependant, nous avons constaté lors de son application qu'une grande partie des poids (55%) se concentre sur les 5 critères de la catégorie « Maintenance et Sûreté de fonctionnement », tandis que les 8 critères de la catégorie « Performances » ne recouvrent que 24% des préférences. Cette répartition nous paraît cohérente étant donné les fortes attentes en termes de fiabilité et surveillance des systèmes aéronautiques. Cependant, du point de vue des experts circuit carburant, certains critères techniques se retrouvent sous-représentés.

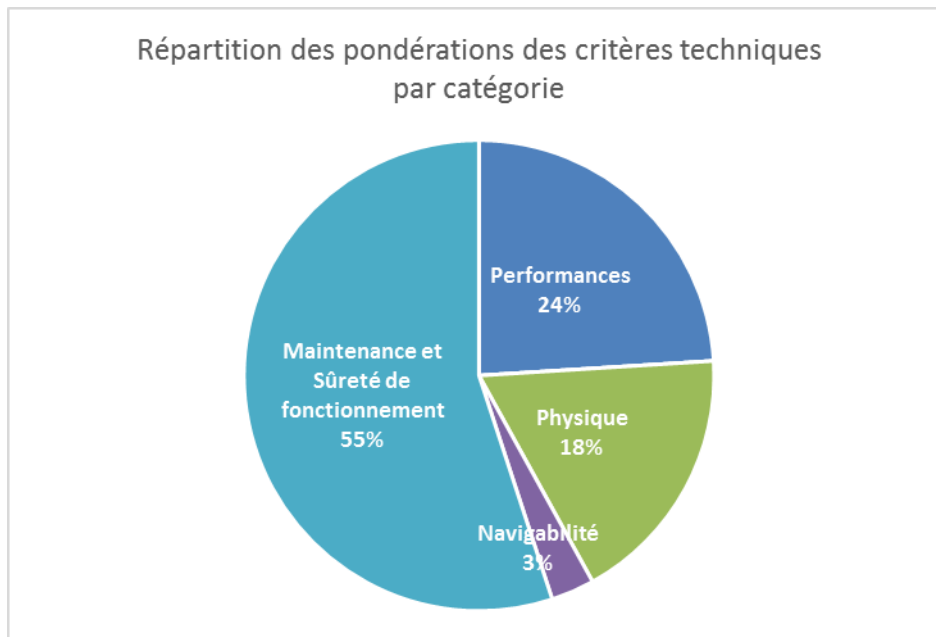


Figure 76 - Répartition des pondérations des critères techniques par catégories

C'est notamment le cas du critère technique « Précision de dosage », qui reçoit une pondération de 1%, jugée trop faible du point de vue des experts circuit carburant. Ce décalage entre le ressenti des concepteurs et celui du client peut s'expliquer de deux manières.

1- Dissymétrie entre améliorations et détériorations de performance

La première façon d'expliquer cette différence de préférence entre les concepteurs et les clients concernant le poids du critère technique repose sur le caractère non symétrique des améliorations ou détériorations de la performance à ce critère. Nous avons représenté ce phénomène sur la Figure 77. Nous avons constaté qu'une dégradation $-\Delta$ de la performance du circuit carburant sur ce critère pouvait entraîner des baisses de performances importantes à l'échelle du moteur (point D sur la Figure 77). Dans le même temps, une amélioration $+\Delta$ de la performance à ce critère n'entraînera qu'une très faible plus-value pour le client final (point A sur la Figure 77).

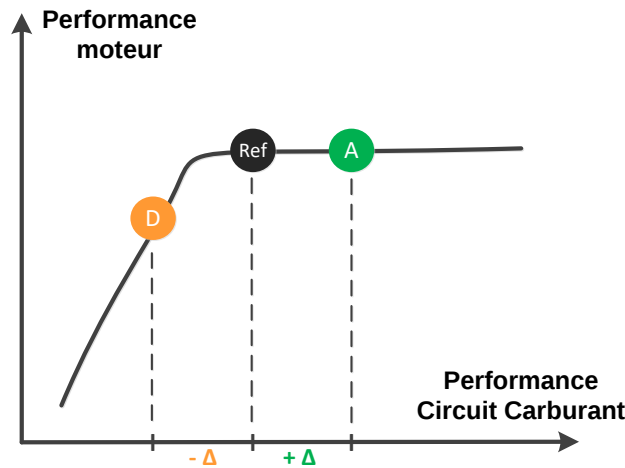


Figure 77 - Illustration de la dissymétrie entre amélioration et dégradation de la performance dans le cas du critère « Précision de dosage »

Ainsi, il y a donc deux manières de voir les choses :

- En se plaçant dans le cas d'une amélioration de la précision de dosage au niveau circuit carburant, on ne constate pas d'amélioration significative au niveau moteur, ce faible poids est légitime. Ce point de vue semble être plutôt celui des clients.
- En se plaçant en revanche dans le cas d'une détérioration de la précision de dosage au niveau circuit carburant, on constate une nette détérioration de la performance au niveau moteur. Dans ce cas, un faible poids sur le critère « Précision de dosage » n'est pas justifié. Ce point de vue semble être plutôt celui des experts circuit carburant.

Une solution permettant de concilier ces deux visions serait de définir un seuil minimal de performance du circuit carburant vis-à-vis de chaque critère afin d'éliminer les architectures qui entraînent une dégradation trop importante au niveau moteur. Cela pose alors la question de la valeur des seuils de performance à déterminer pour chaque critère. Ils pourront être discutés avec les experts, en s'aidant des performances de l'architecture de référence.

2- La préférence client peut être biaisée par le produit actuel

Le faible score du critère technique de « Précision de dosage » est directement lié au poids du critère client « Performances ». C'est en effet le seul critère client auquel il contribue, et il requiert seulement 3% des préférences clients. Ce relatif manque d'intérêt des clients finaux pour le critère de « Performances » peut s'expliquer de deux manières.

Dans certains cas, on pourrait estimer que les clients n'ont pas besoin de performances exceptionnelles : ils évoluent dans des conditions environnementales clémentes et n'ont pas particulièrement besoin d'avoir un moteur réactif. Cependant, il est évident que ce cas n'est pas représentatif de la majorité des clients de l'entreprise. En effet, la spécificité de l'hélicoptère vis-à-vis des autres types d'aéronefs est d'être principalement utilisé dans des milieux hostiles et/ou pour effectuer des manœuvres proches du sol ou d'obstacles, avec éventuellement une visibilité dégradée ou des conditions aérodynamiques qui requièrent beaucoup de précision.

Une deuxième piste d'explication pourrait venir de l'image de marque de Safran Helicopter Engines. En effet, les moteurs de l'entreprise étant réputés pour avoir de bonnes performances, il est possible que les clients nous renvoient une image biaisée en dégradant leur préférence vis-à-vis des performances du moteur, tout en sachant qu'elles seront au rendez-vous. Cette deuxième explication semble plus générique dans la mesure où elle peut être applicable à tous types de clients. Ce constat montre bien la nécessité d'instaurer des seuils, jouant le rôle de garde-fou, pour maintenir un certain niveau de performances sur ces critères techniques pouvant apparaître comme sous-évalués par les clients.

IV.B. Evaluation préliminaire

L'intérêt de cette étape réside dans sa capacité à réduire rapidement le nombre de briques à analyser. Ceci constitue un gain de temps important pour l'application de la suite de la méthodologie. Il convient

cependant d'être très prudent dans l'élimination des briques afin de ne pas écarter une brique qui aurait pu être intéressante. Cette remarque est particulièrement valable dans notre cadre d'innovation de rupture, où l'on se doit d'évaluer des briques fortement innovantes. Ces dernières, de par leur caractère novateur peuvent susciter la réticence des concepteurs, mais ne doivent pas être écartées pour autant. Cette étape d'évaluation préliminaire des alternatives a été mise en œuvre de deux manières différentes dans nos travaux : par les modèles et par jugement qualitatif.

IV.B.1. Evaluation préliminaire par les modèles

Cette technique a principalement été appliquée à la fonction « Doser ». L'idée était pour chaque brique de la famille « Dosage par restriction », de vérifier que les critères de taille d'orifice, niveaux de pression et pilotabilité, étaient bien réalistes et compatibles de notre application. Ces évaluations préliminaires nous ont conduit à éliminer 3 des 5 briques de la famille, comme nous l'avons représenté en Figure 78.

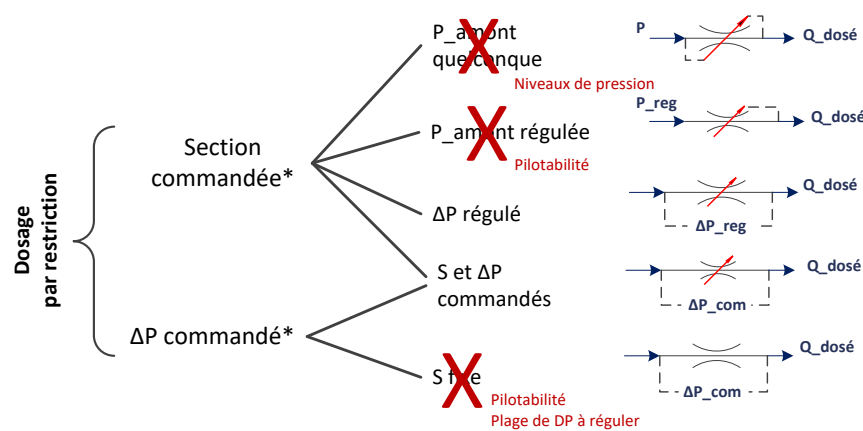


Figure 78 – Briques de la famille « Dosage par restriction » éliminées suite à l'évaluation préliminaire par les modèles

Ces évaluations ont été conduites à l'aide de modèles préliminaires, construits à partir d'équations élémentaires de l'hydraulique, et en considérant des conditions typiques (fluide, température, coefficient de débit, etc.). Leur but n'est pas d'être très précis, mais de donner rapidement, une idée des ordres de grandeurs en jeu. Un exemple de mise en œuvre de cette démarche d'évaluation préliminaire par les modèles est donné en Annexe A.

Cette technique basée sur les modèles est très intéressante dans le sens où elle permet d'avoir rapidement des informations quantifiées sur les briques étudiées. Cependant, elle ne peut être appliquée qu'à des briques simples dont on peut tirer des informations utiles à la décision rapidement. En effet, dans notre cas, les écueils des briques de dosage par restriction portaient sur des critères facilement modélisables (taille des orifices, niveaux de pression nécessaires, pilotabilité). Néanmoins, pour la plupart des autres briques cela n'a pas été le cas. Si l'on prend l'exemple des briques de dosage volumétriques, les écueils se situent plutôt au niveau de la précision de dosage ou de la fiabilité. Cependant, ces deux informations ne peuvent pas être obtenues avec confiance par des modèles simples.

IV.B.2. Evaluation préliminaire par jugement qualitatif

Cette technique est plus délicate à mettre en œuvre que la précédente. Il s'agit en effet de juger de l'intérêt d'une brique sans avoir d'informations quantifiées sur lesquelles s'appuyer. Elle permet donc d'écarter des solutions qui seraient, d'après l'expérience des experts, trop pénalisantes sur des critères clés. Cette technique a, par exemple, été appliquée à la famille « Dosage volumétrique » de la fonction « Doser ». Elle a permis d'éliminer quatre des six briques initialement présentes, comme nous l'avons représenté en Figure 79.

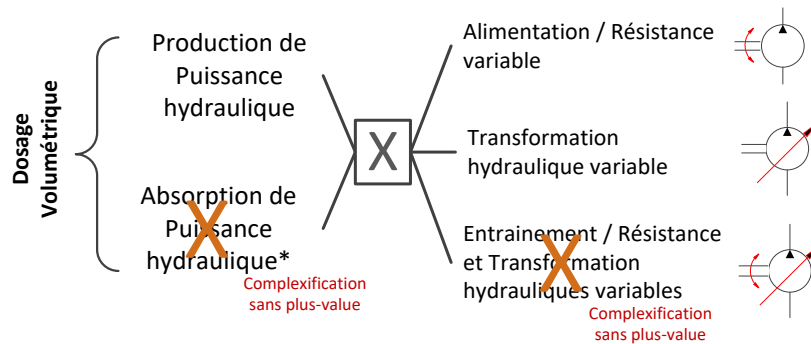


Figure 79 - Briques de la famille "Dosage volumétrique" éliminées suite à l'évaluation préliminaire par jugement qualitatif

Comme on peut le constater sur la Figure 79, une comparaison a été faite implicitement entre les risques apportés par la briques (complexification, dé-fiabilisation,...) et les opportunités (ici plus-value). Nous avons considéré que lorsqu'une brique apporte uniquement des risques, sans opportunité supplémentaire par rapport à une brique concurrente, alors elle peut être écartée.

Cette méthode étant moins rigoureuse que la méthode par les modèles, il est important de garder une trace des briques ayant été écartées par jugement qualitatif, afin de pouvoir éventuellement les réintégrer au processus de décision.

IV.B.3. Bilan de l'évaluation préliminaire

A l'issue de l'évaluation préliminaire, 12 briques ont été écartées, sur les 54 briques initiales. Cela représente plus de 20% de briques évaluées. Même si cette évaluation préliminaire n'a pu être mise en œuvre que pour deux des 8 blocs fonctionnels, l'économie en termes de briques à analyser par la suite est très intéressante. A titre indicatif, cette économie en termes de briques entraîne un passage de 1 140 480 alternatives potentielles à 259 200 alternatives¹⁸, comme nous l'avons représenté en Figure 80. Ce constat fait de l'évaluation préliminaire un moyen rapide et efficace de réduire le nombre de briques à analyser, et donc le temps nécessaire à la démarche de sélection d'architecture.

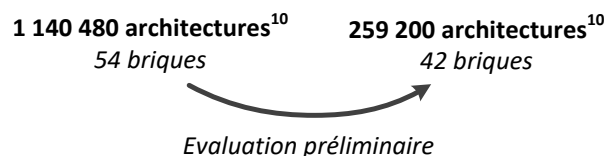


Figure 80 – Bilan des architectures sélectionnées à l'issue de l'évaluation préliminaire

IV.C. Evaluation des alternatives

Cette étape consiste à capter, pour chaque critère, les performances de chaque architecture. Comme nous l'avons introduit précisément, cette analyse a été mise en œuvre sur les briques. Les performances des architectures ont ensuite été obtenues par agrégation des performances des briques.

IV.C.1. Evaluation des briques

IV.C.1.a) Temps de mise en œuvre

Cette étape est une des étapes critiques du processus de sélection d'architectures. Il s'agit en effet de capter les avis des experts pour chaque brique vis-à-vis de chaque critère. Cela représente dans

¹⁸ Le nombre d'alternatives potentielles est ici calculé en supposant que toutes les briques sont compatibles entre elles.

notre cas 680¹⁹ avis à récolter. Certains avis peuvent être très rapidement obtenus, comme par exemple dans les cas où la fonction ne participe pas à la satisfaction du critère. Mais dans d'autres situations, l'attribution des notes peut nécessiter plus de discussions entre experts. Finalement, il nous aura fallu 22 heures de réunion pour récolter les avis nécessaires à l'évaluation. Ce temps est relativement important, surtout en considérant qu'il y avait entre 2 et 4 experts à chaque réunion. Nous constatons que cette durée nécessaire à l'analyse des briques peut être influencée par deux paramètres :

- Le nombre de briques : On voit bien ici l'importance de l'évaluation préliminaire, qui peut, par la réduction du nombre de briques, permet de réduire considérablement le temps d'analyse des briques.
- Le nombre de critères : l'équilibre doit être trouvé entre le nombre de critères et les besoins influant sur la sélection des architectures.

IV.C.1.b) *Echelle de notation*

Comme nous l'avons expliqué au paragraphe III.D.1, nous avons choisi une échelle de notation relative, qualitative et à 7 niveaux de notation.

L'aspect relatif de l'échelle de notation a été bénéfique d'après notre expérience. Ce choix a permis en effet d'offrir aux experts un point de comparaison, ce qui a favorisé le processus d'évaluation. Nous pensons que le recours à une échelle relative dont la référence est bien connue des participants permet de gagner du temps lors de la phase d'analyse des briques.

L'aspect qualitatif de l'échelle de notation a été bien accueilli par les participants. Nous noterons toutefois qu'une échelle représentée par des lettres au lieu des chiffres apporterait plus de clarté quant au fonctionnement de notation. En effet, l'utilisation de chiffres (1, 2, 3) pour représenter des grandeurs qualitatives (faible, moyen, fort) peut être ambiguë pour les participants. Cette notation peut être en effet facilement confondue avec une note quantitative sur 3. Nous suggérons par exemple l'utilisation des lettres : F pour faible, M pour moyen et E pour élevé. Nous avons représenté cette suggestion dans la dernière colonne du Tableau 20.

Tableau 20 - Suggestion de notation par des lettres

Type	Description	Notation utilisée	Notation suggérée
<i>Opportunité</i>	Fort potentiel d'amélioration	+ 3	+ E
	Potentiel d'amélioration moyen	+ 2	+ M
	Faible potentiel d'amélioration	+ 1	+ F
	Pas d'amélioration ni de détérioration	0	0
<i>Risque</i>	Faible potentiel de détérioration	- 1	- F
	Potentiel de détérioration moyen	- 2	- M
	Fort potentiel de détérioration	- 3	- E
	Pas de lien fonctionnel	NA	NA

L'utilisation d'une **échelle à 7 niveaux**, bien que suggérée par la revue de la littérature du paragraphe II.C.3.d), s'est avérée quelque peu décevante à l'usage. Bien qu'elle ait tout de même permis de mener à bien notre analyse des briques, nous avons pu constater que cette échelle a pu manquer de finesse pour l'évaluation de certaines briques. Ainsi, nous suggérons d'utiliser une échelle de notation comportant plus de niveaux. Un échelle à 9 niveaux par exemple, basée sur les grandeurs Faible, Moyen, Bon, Elevé pourrait améliorer les choses, tout en gardant une certaine simplicité. Le risque en effet de la multiplication des niveaux est de prendre plus de temps pour évaluer les briques. Ceci est particulièrement valable si les différences entre les niveaux ne sont pas clairement définies.

¹⁹ 680 avis = 20 critères x (42 briques retenues suite à l'évaluation préliminaire – 8 briques de référence)

IV.C.1.c) L'analyse par les experts

Dans le cadre de notre démarche de sélection d'architecture, les différentes briques ont été analysées par deux types d'experts :

- Les experts du système carburant, référents dans les sujets d'architecture du système carburant, qui sont intervenus pour tous les critères.
- Les experts de la maintenance, responsables des aspects de maintenance du système carburant, qui sont intervenus pour les 5 critères de la catégorie « Maintenance et Sécurité de fonctionnement ».

Nous avons remarqué, au cours des différentes séances dédiées à l'évaluation des briques, que les experts du système carburant et ceux de la maintenance ne se basent pas sur les mêmes informations pour juger une brique. En effet, les experts système carburant peuvent donner une opinion basée sur un concept de brique d'alternative (par exemple : pompe volumétrique à entraînement variable). Tandis que les experts maintenance doivent connaître la technologie qui sera implémentée dans le concept pour pouvoir donner une opinion (par exemple : pompe volumétrique dont l'entraînement variable est réalisé par un moteur électrique). Cela s'explique par le fait que la technologie utilisée dans une brique a un impact plus important sur les critères de maintenance que sur les autres critères d'évaluation. C'est une des difficultés du travail d'architecture que de pouvoir concilier des experts de métiers différents.

Etant donné le nombre déjà important de briques à évaluer, nous n'avons pas effectué de distinction par technologie utilisée dans les solutions concernant :

- L'entraînement commandé des pompes des fonctions « Conditionner » et « Amorcer, Aspirer, Gaver » qui peut être électrique ou mécanique,
- La régulation de la différence de pression dans la fonction « Conditionner » pouvant être hydromécanique ou électrique,
- L'actionnement de la cylindrée variable de la pompe de la fonction « Amorcer, Aspirer, Gaver » pouvant être électrique ou mécanique.

Dans nos travaux, le cas électrique a ainsi été choisi par défaut pour l'évaluation de ces briques.

Le seul cas où la distinction par technologie utilisée a été mise en œuvre concerne l'entraînement commandé, électrique ou mécanique, de la pompe doseuse. Cette disjonction a été faite car il s'agit d'une brique qui remplit à elle seule de multiples fonctions telles que le dosage, le conditionnement, et l'amorçage. Ainsi, il était important avoir des informations les plus précises possibles sur cette brique. Nous avons observé dans ce cas que la version à entraînement mécanique est dominée, au sens de l'efficacité de Pareto (méthode présentée au paragraphe II.C.4.a)(2)), par la version à entraînement électrique. Cela signifie que la méthode d'entraînement électrique a été jugée égale ou meilleure que la version mécanique, sur tous les critères. Une telle évaluation ne saurait néanmoins pas écarter définitivement la version mécanique. En effet, la connaissance des performances de ces technologies pour cette application est relativement faible. Ainsi, les deux versions seront conservées pour la suite de la démarche de sélection d'architecture. Pour les départager, nous suggérons plutôt de mener une étude complémentaire dédiée qui permettra d'obtenir des informations plus détaillées.

Cet exemple nous montre donc que la distinction entre deux technologies est difficile à évaluer avec une bonne confiance en phase d'architecture. En effet, étant donné que nous avons affaire à deux technologies qui ne sont pas actuellement utilisées sur les systèmes actuels de l'entreprise. Les experts n'ont donc pas beaucoup d'éléments fiables pour juger. Ainsi, il paraît cohérent de ne pas entrer dans le détail des technologies dans cette phase-là de la sélection d'architectures.

IV.C.2. Agrégation des briques en alternatives

Pour l'agrégation des briques en alternatives, nous avons considéré notre échelle qualitative basée sur les chiffres 1, 2 et 3 comme une notation quantitative de valeurs, respectivement, 1, 2 et 3. Cette échelle quantitative nous est apparue être la plus cohérente, étant donné qu'elle reprend les chiffres de notre échelle qualitative.

Au moment d'agréger les notes des briques, nous pensions initialement partir sur des opérateurs de type minimum, maximum, somme, moyenne, présentés au paragraphe II.C.3.c). Cependant, nous

nous sommes rendus compte que cette agrégation n'était pas vraiment représentative des performances de l'architecture réellement obtenue. En effet, pour un critère donné, l'influence de chaque fonction sur sa satisfaction peut être plus ou moins importante. Cette importance relative des fonctions dans l'agrégation de la note d'un critère n'est pas prise en compte par les opérateurs présentés précédemment. Nous avons donc procédé à une pondération des fonctions pour chaque critère.

Cette technique a certes nécessité du temps supplémentaire pour attribuer les pondérations à chaque bloc fonctionnel, mais elle permet d'avoir une note agrégée au niveau architecture qui est représentative de ses performances réelles.

IV.C.3. Prise en compte des contraintes du cahier des charges

Cette étape a été nécessaire pour assurer une bonne prise en compte du besoin de chaque projet dans la sélection des architectures. Bien qu'elle concerne principalement les critères de compatibilité, cette activité peut également influencer sur des critères de « Performances » comme « Capacité d'aspiration » ou « Capacité d'amorçage », par exemple. Cette étape s'appuie sur 3 types d'actions, comme nous l'avons représenté en Figure 81.

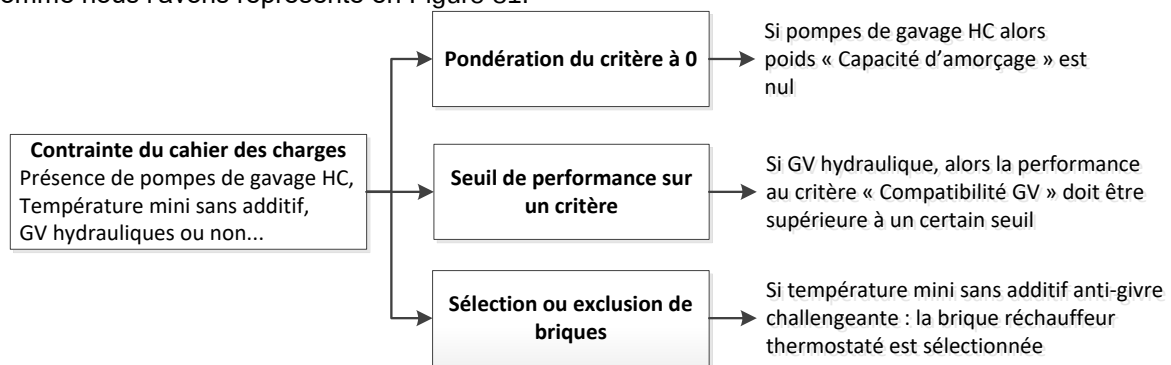


Figure 81 - Leviers d'action de la prise en compte des contraintes du cahier des charges

Ces 3 actions consistent en :

- **La pondération nulle d'un critère** : dans le cas où le critère d'évaluation n'est plus pertinent, son poids est ramené à 0, ce qui implique de ne pas le prendre en compte dans le processus de sélection.
- **L'utilisation d'un seuil de performance sur le critère** : dans le cas où le critère d'évaluation est pertinent pour le cahier des charges, une performance minimale doit être garantie. Elle est mise en œuvre via un seuil minimal de performances à ce critère.
- **La sélection ou exclusion de briques** : dans certains cas, comme celui de la fonction « Réchauffer le carburant », le cahier des charges permet directement d'imposer la brique qui sera utilisée. Les deux autres briques de ce bloc fonctionnel sont donc par conséquent écartées.

Comme nous l'avons représenté en Figure 82, cette technique nous paraît très efficace car elle permet à la fois de réduire le nombre d'architectures candidates (passage de 76 896 à 2 240 alternatives), tout en étant plus proche de la demande du cahier des charges projet. Cette réduction peut cependant varier d'un projet à l'autre.

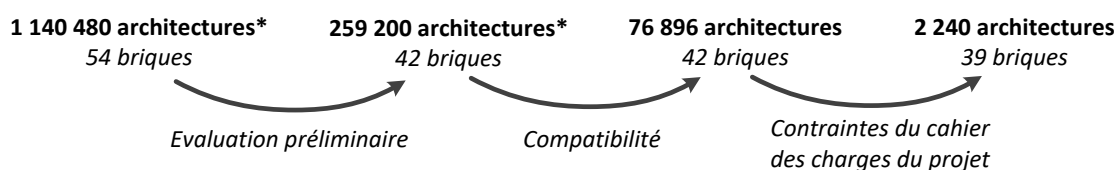


Figure 82 - Evolution du nombre d'architectures candidates avant l'étape de prise de décision

* Nombres d'architectures calculés de manière purement combinatoire sans savoir si les briques sont compatibles entre elles ou non.

Cette activité d'évaluation des architectures est la dernière étape avant la prise de décision sur les architectures restantes. Comme on peut le voir sur la Figure 82, les étapes d'évaluation préliminaire, de prise en compte de la compatibilité entre les briques et des contraintes du cahier des charges ont déjà permis d'éliminer 99,8% des architectures initialement proposées.

IV.D. Prise de décision sur les architectures

Pour la prise de décision, dernière étape du processus de sélection d'architectures, nous avons utilisé deux méthodes : TOPSIS et MAUT. Nous nous sommes toujours ramené à des cas où la somme des poids des différents critères est égale à un. Ceci permet d'appliquer directement la formulation additive de la méthode MAUT. Celle-ci consiste ainsi en une simple somme pondérée des notes. Cette méthode est la plus intuitive pour les ingénieurs. La méthode TOPSIS a été quant à elle choisie pour son caractère partiellement compensatoire, comme nous l'avons vu au paragraphe II.C.4.b).

Pour chaque architecture, on obtient alors 2 classements basés sur les critères uniques de synthèse des méthodes TOPSIS et MAUT. L'objectif de cette étape du processus de sélection d'architectures est de distinguer les architectures les plus prometteuses.

IV.D.1. Comparabilité des résultats des différentes méthodes d'aide à la décision

- Scores relatifs à l'architecture de référence et consistance des scores

La première étape d'interprétation des résultats issus des méthodes de prise de décision est de les ramener dans notre contexte d'évaluation relative à une architecture de référence. Pour les méthodes MAUT, ceci est déjà le cas. En effet, l'architecture de référence a reçu le score 0 et les autres architectures ont des scores positifs (amélioration) ou négatifs (détérioration). Ainsi, il convient de convertir les scores obtenus à l'aide de la méthode TOPSIS en termes d'amélioration ou de détérioration par rapport à l'architecture de référence. Nous proposons d'appeler ces nouveaux scores « scores d'amélioration ». Pour une alternative a de score $u(a)$, le score d'amélioration $SA(a)$ est défini par :

$$SA(a) = u(a) - u(a^{ref}) \quad (III-23)$$

- Comparabilité des scores d'une méthode à une autre

Etant donné que les 3 méthodes que nous étudions ont des principes d'élaboration des scores différents, les plages de variations de ces scores peuvent être différentes d'une méthode à l'autre. C'est ce que nous avons constaté et représenté dans le Tableau 21.

Tableau 21 - Plages de variation des scores d'amélioration obtenus pour les différentes méthodes

	Min	Max
TOPSIS	-0,15	0,19
MAUT	-0,41	0,15

Ces variations des scores d'une méthode à l'autre rendent difficile la comparaison. En effet, un score d'amélioration de -0,15 pourra représenter :

- la moins bonne architecture selon la méthode TOPSIS,
- une architecture faiblement moins bonne que la référence, dans le cadre de la méthode MAUT.

Pour pallier à ces inconsistances des scores d'amélioration des 3 méthodes mises en œuvre, nous proposons l'introduction de scores d'amélioration relatifs (SAR). Pour une alternative a de l'ensemble des alternative A , ce score est noté $SAR(a)$ et défini par :

$$SAR(a) = \begin{cases} \frac{SA(a)}{\max_{b \in A}(SA(b))} , si SA(a) \geq 0 \\ \frac{SA(a)}{\min_{b \in A}(SA(b))} , si SA(a) < 0 \end{cases} \quad (III-24)$$

Ce nouveau score permet de vraiment pouvoir comparer les classifications obtenues avec les différentes méthodes. En effet, un SAR de 50%, par exemple, représentera pour les trois méthodes une amélioration de 50% du score par rapport à l'architecture de référence. Il sera donc utilisé dans la suite pour toute activité de comparaison des résultats des différentes méthodes.

IV.D.2. Sélection des meilleures architectures

Afin de sélectionner les meilleures architectures, en s'appuyant sur les résultats des méthodes TOPSIS et MAUT, deux approches complémentaires ont été proposées et mises en œuvre. Nous en avons représenté le fonctionnement imbriqué en Figure 83.

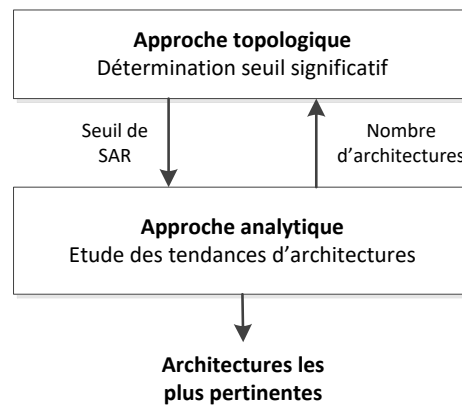


Figure 83 - Complémentarité des deux approches mises en œuvre pour la sélection des meilleures architectures

Ces deux approches sont :

- **L'approche topologique** : elle consiste à analyser de manière statistique quelle population d'architectures paraît la plus pertinente d'après chaque méthode.
- **L'approche analytique** : elle consiste à analyser les briques et assemblages de briques présents dans les meilleures architectures afin d'en dégager les meilleures briques ou combinaisons de briques.

Au cours de la mise en œuvre de ces deux approches, c'est la synthèse des résultats de la méthode TOPSIS et de la méthode MAUT qui sera recherchée. Elle permettra de donner au décideur une vision synthétique des meilleures options d'architectures.

IV.D.2.a) Approche topologique

Nous avons proposé et mis en place cette approche topologique pour la sélection des meilleures architectures. Elle se base sur la définition d'un seuil de SAR, délimitant les architectures pouvant être considérées comme les meilleures, des autres.

(1) Topologie des solutions

Les SAR de chaque méthode étant à présent définis, la comparaison des résultats de chaque méthode peut débuter. Nous avons représenté en Figure 84 l'évolution de ces scores pour chaque méthode, et en fonction de leur rang. On constate tout d'abord que la répartition des scores des solutions suit globalement la même forme entre les 3 techniques.

On note ainsi la présence de 3 zones distinctes dans ces représentations graphiques, reliées entre

elles par des zones de transition. On observe :

1. Pour des rangs inférieurs à 130, soit environ les premiers 6% des architectures : une phase de forte diminution du SAR avec le rang
2. Pour des rangs compris entre 250 et 2050, ce qui représente 80% des architectures : une phase de faible variation du score des architectures
3. Pour les rangs supérieurs à 2150, ce qui représente les 4% des architectures de plus faible SAR : à nouveau une phase de forte diminution du SAR avec le rang.

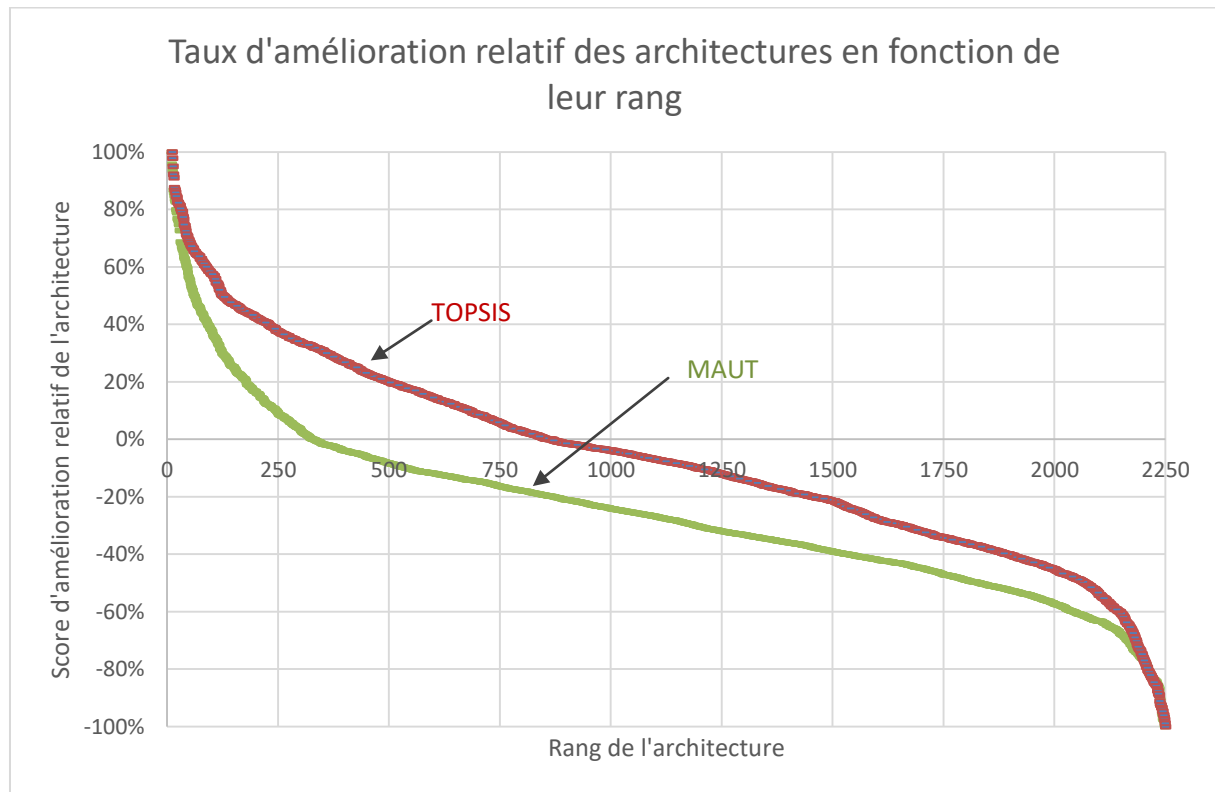


Figure 84 – Répartition globale des scores relatifs des architectures en fonction de leur rang

La présence de cette première zone de forts gradients pour les 100 meilleures architectures ne facilite pas notre prise de décision. Cela entraîne en effet que :

- les architectures les mieux classées ont les différences de valeur les plus importantes entre elles.
- plus on descend dans le classement des architectures, plus la différence de valeur entre les architectures de classement voisin diminue.

Ainsi, il ne se détache pas naturellement un groupe d'architectures, dont les scores d'amélioration relatifs seraient proches, et qui seraient significativement meilleures que toutes les autres.

(2) Définition du seuil de SAR

Le but de cette représentation est d'avoir une vision suffisamment précise de la topologie des meilleures solutions de chaque classement afin de pouvoir en distinguer des groupes d'architectures qui seraient significativement meilleures que les autres. Pour ce faire, il convient de représenter graphiquement les meilleures solutions de chaque classement. Le nombre exact de solutions à représenter peut varier d'un cas à l'autre. Dans notre exemple, nous avons choisi de représenter les 30 meilleures architectures de chaque classement (voir en Figure 85). On observe qu'un premier groupe, appelé A sur la figure, se forme naturellement avec un premier seuil de 90% de score d'amélioration. Les architectures de ce groupe ont des SAR variant de 90% à 100% et sont distantes de la première architecture non sélectionnée d'au minimum 8% selon la méthode MAUT et 3% selon la méthode TOPSIS. Cet ensemble est donc un bon exemple de groupement d'architectures de SAR relativement proches, dont la distance avec les autres architectures est significative. On constate par la suite que le classement TOPSIS ne présente pas d'autre groupe de ce type. En effet, les architectures suivantes ont toutes des SAR relativement proches les uns des autres. Pour ce qui est

du classement MAUT, nous observons un second groupe, noté B sur la Figure 85. Les 6 architectures de ce groupe ont des SAR relativement proches (compris entre 79% et 83%) et sont distantes d'au moins 3% avec l'architecture suivante dans le classement.

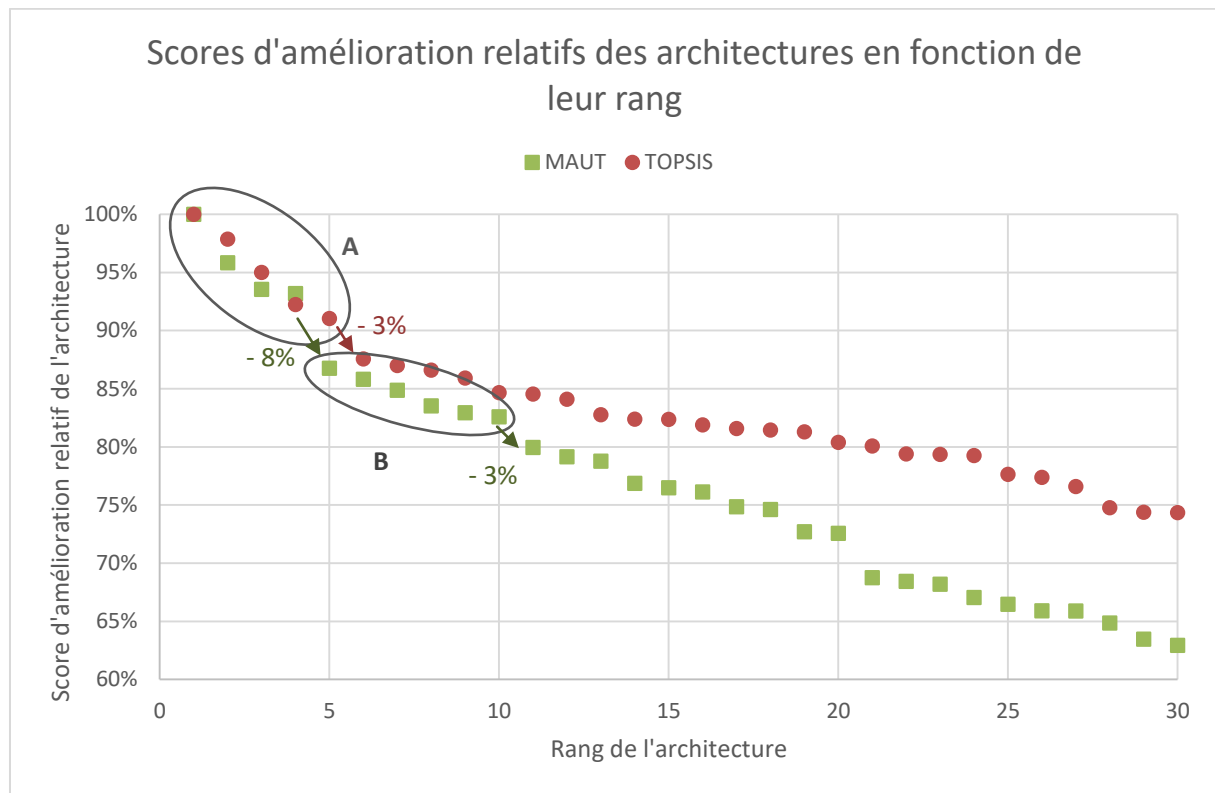


Figure 85 - Représentation des meilleures architectures de chaque classement

Ainsi, les observations de la répartition des meilleures architectures selon chaque classement nous amène à définir un premier seuil de SAR à 90%, valable pour les deux méthodes, et un second seuil à 78% valable uniquement pour la méthode MAUT. Deux groupes A et B ont ainsi été constitués. Le groupe A étant le plus intéressant car il rassemble les meilleures architectures des deux méthodes. Le groupe B est moins intéressant car il ne s'adresse qu'à une seule méthode, tout en proposant des architectures de SAR inférieur à ceux du groupe A. Ainsi, pour la suite de l'approche de sélection d'architectures, nous nous intéresserons dans un premier temps uniquement aux architectures du groupe A.

(3) Différences de classement entre les 2 méthodes

Comme nous avons pu le remarquer en Figure 84 et Figure 85, les SAR obtenus par les méthodes TOPSIS et MAUT paraissent sensiblement différents. Ceci peut s'expliquer par le fait que la méthode TOPSIS possède son propre opérateur de normalisation. Ce constat est confirmé par l'analyse plus détaillée des architectures des groupes A et B mis en valeur précédemment. Nous avons représenté en Tableau 22 les architectures appartenant au groupe A selon le classement TOPSIS (Tableau 22a) et celles appartenant aux groupes A et B selon le classement MAUT (Tableau 22b). Le premier constat que l'on peut faire c'est qu'il n'y a aucune architecture qui appartient à la fois au groupe A TOPSIS et aux groupes A ou B MAUT. Cela signifie que les meilleures architectures de chaque classement sont différentes. A ce titre, on notera qu'il n'y a que deux architectures qui ont des SAR supérieurs à 75% selon les deux méthodes. Il s'agit des architectures numéro 5622 et 428.

(a) Classement TOPSIS				(b) Classement MAUT			
Groupe A	Identifiant de l'architecture	SAR TOPSIS	SAR MAUT	Groupe A	Identifiant de l'architecture	SAR TOPSIS	SAR MAUT
	3276	100%	63%		5622	79%	100%
	640	98%	57%		4196	67%	96%
	832	95%	65%		1841	64%	94%
	554	92%	58%		428	77%	93%
	5059	91%	47%	Groupe B	1416	71%	86%
Groupe B	1416	71%	86%		4529	69%	84%
	4529	69%	84%		547	73%	87%
	547	73%	87%		4186	65%	83%
	4186	65%	83%		506	64%	85%
	506	64%	85%		714	61%	83%
	714	61%	83%				

Tableau 22 - Tableau comparatif des SAR des architectures sélectionnées précédemment

L'écart entre les SAR selon TOPSIS et MAUT est très marqué pour les meilleures architectures du classement selon TOPSIS (Tableau 22a), avec un écart moyen de 42% absolu²⁰ de SAR. Pour les meilleures architectures du classement selon MAUT en revanche, l'écart est toujours significatif mais plus contenu : 23% en moyenne d'écart absolu pour les architectures du groupe A et 14% pour celles du groupe B.

IV.D.2.b) Approche analytique

En complément de l'approche topologique, développée dans le paragraphe précédent, nous avons proposé et mis en œuvre une approche analytique de sélection des architectures. Cela consiste à dégager les associations de briques constituant les meilleures architectures pour proposer une synthèse des briques et/ou architectures les plus intéressantes. Pour ce faire, nous considérerons dans cette partie le groupe A, précédemment sélectionné. Il contient en effet les meilleures architectures selon les deux méthodes (celles dont le SAR est supérieur à 90%).

Nous avons représenté les briques constituant les architectures appartenant au groupe A selon la méthode TOPSIS dans le Tableau 23, et selon la méthode MAUT dans le Tableau 24. Pour chaque fonction, et pour favoriser une analyse rapide des résultats, nous avons choisi de colorer les cellules dont la brique est identique à celle de la ligne précédente en gris.

Tableau 23 - Meilleures architectures obtenues selon la méthode TOPSIS (Groupe A)

N°	Doser	Conditionner	Amorcer Aspirer Gaver (AAG)	Add-On AAG	Commander	Répartir	TOPSIS	MAUT
3276	D13	C26	A131	A04	Cm22	R21	100%	63%
640	D14	C26	A131	A04	Cm22	R21	98%	57%
832	D13	C26	A132	A04	Cm22	R21	95%	65%
554	D14	C26	A132	A04	Cm22	R21	92%	58%
5059	D14	C26	A131	A04	Cm13	R21	91%	47%

²⁰ Cet écart correspond à un écart absolu. Il a été obtenu via l'équation :

$$Ecart = |SAR_{TOPSIS} - SAR_{MAUT}|$$

Il est exprimé en pourcentage d'amélioration, étant donné que c'est l'unité du SAR.

Tableau 24 - Meilleures architectures obtenues selon la méthode MAUT (Groupe A)

N°	Doser	Conditionner	Amorcer Aspirer Gaver (AAG)	Add-On AAG	Commander	Répartir	TOPSIS	MAUT
5622	D13	C22	A131	A04	Cm22	R21	79%	100%
4196	D14	C22	A131	A04	Cm11	R21	67%	96%
1841	D13	C22	A131	A04	Cm11	R21	64%	94%
428	D14	C22	A131	A04	Cm22	R21	77%	93%

Pour des raisons de confidentialité, les briques retenues sont désignées par leur code d'identification plutôt que par leur intitulé.

Les résultats obtenus selon les deux méthodes possèdent tous deux ce que nous appellerons des points fixes, c'est à dire des briques qui sont sélectionnées pour toutes les architectures du groupe. C'est notamment les cas des fonctions Répartir, Add-On Amorcer Aspirer Gaver (AAG) et Conditionner, pour les deux méthodes. La méthode MAUT présente un point fixe supplémentaire sur la fonction AAG. Pour le reste des fonctions, les deux méthodes proposent deux briques. Nous avons proposé de représenter ces résultats sous forme graphique en Figure 86. Ce format permet une meilleure lisibilité des architectures sélectionnées. Nous avons également entouré les briques qui ont été uniquement sélectionnées par une des deux méthodes. Cela permet de se rendre compte au premier coup d'œil quelles briques ont été sélectionnées par les deux méthodes ou seulement par une.

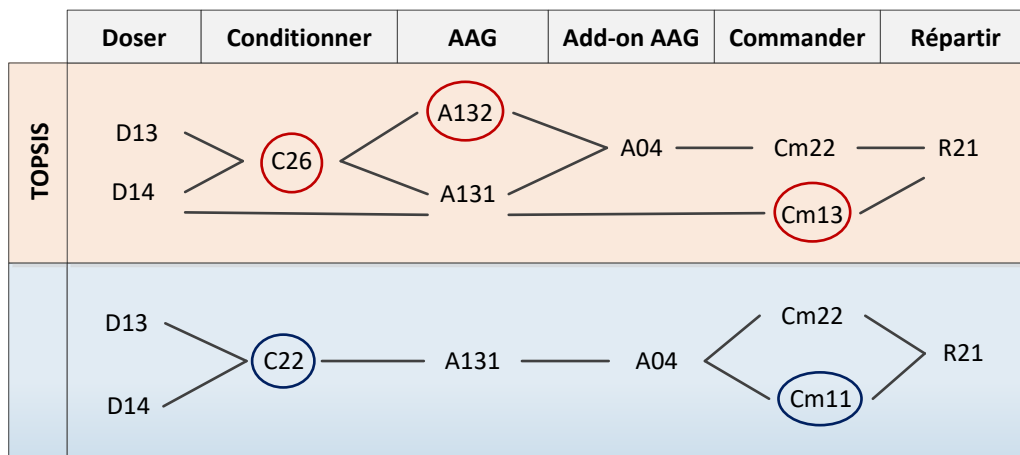


Figure 86 – Représentation graphique des architectures sélectionnées selon les deux méthodes

L'analyse que nous pouvons faire de ces résultats est la suivante :

- Les briques R21 pour la fonction Répartir, et A04, pour la fonction Add-On AAG, sont très adaptées à notre cas d'étude. Elles sont en effet présentes dans toutes les architectures sélectionnées via les deux méthodes.
- Pour la fonction Dosier, les résultats de nos sélections montrent les solutions D13 et D14 conviennent toutes deux aussi bien.
- Pour la fonction Conditionner, les deux classements mettent en avant des briques différentes. Les architectures du classement MAUT utiliseront la C22, tandis que celles du classement TOPSIS auront recours à la C26.
- Pour la fonction AAG, la brique A131 a été retenue dans les deux cas. La sélection TOPSIS ajoute également la brique A132 en complément.
- Pour ce qui est de la fonction Commander, les briques Cm11, Cm13 et Cm22 sont bien adaptées à notre cas d'étude. Le choix de la dernière semble cependant plus robuste car elle est présente dans les deux sélections.

Lors d'une analyse basée sur les briques, similaire à celle que nous venons de faire, il est primordial

de garder à l'esprit que les briques présentes uniquement dans l'une des deux sélections (entourées en Figure 86) ne peuvent pas être associées. Cela aurait pour effet de produire une architecture qui ne fait partie d'aucune des deux sélections et dont le SAR est inconnu.

Discussion

Cette démarche nous a permis de sélectionner 9 architectures qui répondent, d'après les scores obtenus par les méthodes TOPSIS et MAUT, le mieux au cahier des charges que nous nous sommes fixé. Cette sélection d'architecture passe par la sélection des briques les constituant. Le nombre de briques finalement sélectionnées varie de 1 à 3 par fonction. Dans le cas où ces architectures et briques ne s'avèreraient pas satisfaisantes, il est possible d'élargir le seuil de sélection de SAR. Dans notre cas, cela pourrait consister à s'intéresser aux solutions du classement MAUT groupe B, défini plus haut. Une étude pourrait être menée également en abaissant la valeur du seuil de sélection du classement TOPSIS. Néanmoins, ces démarches vont dans le sens d'une baisse de la qualité globale des solutions proposées vis-à-vis du problème formulé (baisse du SAR). Aussi, il pourrait être dans ce cas plus pertinent de se demander si :

- On résout le bon problème : les contraintes du problème ont-elles été correctement renseignées ? Les pondérations des critères représentent-elles bien les préférences des décideurs ?
- Les architectures ont été correctement évaluées : l'évaluation des architectures est un point aussi crucial que délicat dans notre contexte d'études de concepts préliminaires et fortement innovants. Ainsi, il convient de se demander si la matrice d'évaluation des briques correspond bien au ressenti des experts ? Les poids permettant d'assembler les notes des briques en note d'architecture sont-ils représentatifs ?

Du point de vue industriel, les résultats obtenus par l'application de la démarche de sélection d'architectures proposée a permis de mettre en avant ou d'écarter certaines briques technologiques, selon leur potentiel à apporter de la valeur au circuit carburant, vis-à-vis des besoins clients. Les résultats se sont cependant montrés surprenants pour l'industriel, à deux égards :

- *Une brique, plutôt bien pressentie en interne, ne s'est pas retrouvée sélectionnée à la suite de l'application de la méthodologie.*

Dans ce cas, la démarche de thèse a permis de mettre en garde contre une solution qui pouvait paraître très intéressante sous certains aspects, mais qui, d'un point de vue global de satisfaction client pouvait être surclassée par une autre solution plus conventionnelle. On peut voir deux explications à ce constat. En un sens, il est possible que l'évaluation par les experts de la solution en rupture ait été biaisée par une forme d'inertie psychologique. De plus, nous avons vu que l'innovation de rupture pouvait introduire un nouveau concept pouvant être moins performant que l'actuel sur le court terme, mais qui pourra s'avérer bien plus prometteur à l'avenir, une fois optimisé et amélioré. Ainsi, une « bonne » solution d'innovation de rupture peut paraître moins performante qu'une solution conventionnelle dans une vision court-terme. A l'inverse, ce résultat peut être vu comme un signe fort que cette brique technologique n'est peut-être pas si prometteuse qu'elle peut en avoir l'air, du point de vue de la performance globale du moteur. On se retrouve alors dans le cas typique de l'innovation de rupture, où la direction à prendre doit être conditionnée par un besoin très long terme, peut être inexistant aujourd'hui mais imaginé (mais pas encore forcément exprimé) pour l'avenir. Même si la démarche proposée n'apporte pas de réponse préconçue à cette question éminemment stratégique, elle a le mérite d'énoncer clairement la situation en s'appuyant sur une démarche rigoureuse et fondamentalement tournée vers les besoins des clients finaux. En d'autres termes, l'intérêt essentiel de la démarche proposée dans ce cas est de proposer un avis technique structuré, dans une phase extrêmement préliminaire du projet (avant même qu'une étude de concept ait été lancée). Ainsi, la démarche proposée et l'outil associé lors de sa mise en œuvre, permettent d'obtenir rapidement des indicateurs de performances globales en faisant varier les performances d'une brique ou les attentes d'un projet. Il peut donc être perçu comme un outil agile et préliminaire permettant rapidement de se faire une idée en fonction de données de performances ou de besoins pouvant être changeants.

- *A l'inverse, une brique totalement en rupture, mais qui semble peu adaptée à l'ensemble des besoins, s'est retrouvée très bien classée par le critère unique TOPSIS.*

Dans ce cas, il est important de comprendre quel mécanisme a permis de sélectionner cette brique-là plutôt qu'une autre. Cette analyse peut faire ressortir deux effets :

- o un écart entre les notes attribuées à la brique et le ressenti réel. Il est important dans ce cas d'avoir la vision de la notation relative de cette brique par rapport aux briques

concurrentes.

- un écart entre la pondération des critères et leur importance relative effective. L'explication peut alors venir soit de la pondération des critères de haut niveau, soit de leur allocation via la matrice QFD.

Ces deux effets peuvent intervenir ensemble ou séparément pour expliquer la sélection d'une brique qui paraît mal appropriée.

Dans les deux cas présentés ci-dessus, la démarche mise en œuvre a permis d'ouvrir et de faciliter la discussion sur des sujets clés tels que les besoins futurs, l'importance relative des critères ou les performances escomptées d'une brique technologique inconnue. En permettant un traitement rationnel de ces données, les incohérences ou questionnements sont alors rapidement pointés du doigt et peuvent être discutés en se basant sur des résultats concrets fournis par l'outil.

V. Poursuite des travaux de conception

Nos travaux ont porté sur l'étude conceptuelle d'architecture de circuit carburant pour les moteurs d'hélicoptère. Ils ont permis, pour un cahier des charges donné, de sélectionner les meilleures architectures, et leurs briques associées. La suite du processus de conception implique l'investigation plus détaillée de ces solutions dans le but de n'en retenir qu'une pour la conception de détail. La prochaine étape consiste en l'évaluation quantitative des performances des différentes solutions. Le nombre de concepts étant réduit, on peut s'autoriser à mettre en œuvre des modèles plus spécifiques, mais toujours préliminaires, permettant de mieux quantifier les performances des architectures vis-à-vis des différents critères.

Nous avons mis en œuvre, à titre illustratif, cette approche d'évaluation par les modèles au cas de la brique pompe doseuse à entraînement électrique, également appelée électro-pompe doseuse (EPD). Cet exemple a été choisi pour son caractère fortement multiphysique, qui implique une approche de modélisation complète. Cette partie présente la démarche que nous avons mise en œuvre.

V.A. Architecture du système EPD

Contenu masqué par mesure de confidentialité

Contenu masqué par mesure de confidentialité

Les éléments dimensionnés lors de l'étude sont :

- Les parties actives des moteurs électriques : rotor et stator (carter, arbre, roulements non pris en compte)
- Les parties actives de la pompe (les deux pignons de la pompe à engrenage)
- L'échangeur avec le carburant, considéré comme un circuit en forme d'hélice enroulé autour du moteur électrique (voir illustration en Figure 88).



Figure 88 – Exemple d'échangeur thermique en hélice sur les moteurs électriques (source : SERVAX - High Speed Drives Motor Elements – synchronous and asynchronous)

V.B. Modélisation du système EPD

Etant donné la symétrie de l'architecture du système EPD considérée, des simplifications ont pu être effectuées pour la modélisation. Ainsi, un seul moteur électrique a été considéré pour la modélisation. En effet, les deux moteurs sont identiques et doivent être dimensionnés pour assurer la mission séparément.

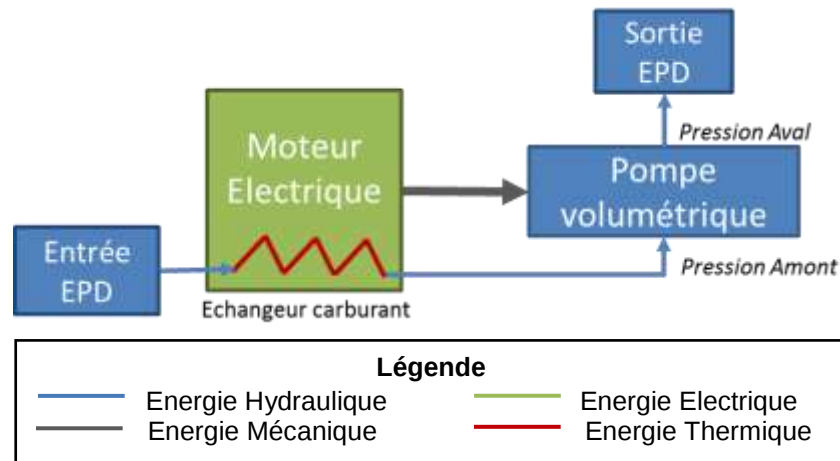


Figure 89 - Architecture du modèle d'EPD utilisé pour le prédimensionnement

L'approche de dimensionnement du système a été réalisée en collaboration avec Scott Delbecq, doctorant de l'équipe, qui propose un environnement Python pour le prédimensionnement de systèmes mécatroniques (Delbecq et al. 2017). L'outil logiciel qu'il a développé au cours de sa thèse permet une approche collaborative entre les spécificateurs (contraintes et objectifs globaux) et les concepteurs de chaque métier (modèles métiers, contraintes locales) pour le dimensionnement optimisé de systèmes multiphysiques. Il se base sur une approche par les métamodèles construits à partir de calculs éléments finis (Sanchez & Delbecq 2016).

V.B.1. Définition du problème d'optimisation pour le dimensionnement de l'EPD

Pour résoudre un problème d'optimisation il convient d'en définir l'objectif, les paramètres et les contraintes. Le point de dimensionnement considéré est celui le plus sollicitant en termes de couple sur l'arbre de pompe.

V.B.1.a) Objectif

L'optimisation a été conduite dans le but de minimiser la masse du système. Ce paramètre de masse inclut : la masse des parties actives du moteur, la masse des parties actives de la pompe (engrenages) et la masse de l'échangeur thermique (considéré en aluminium).

V.B.1.b) Paramètres d'optimisation

Les paramètres d'optimisation représentent les degrés de liberté sur lesquels l'algorithme d'optimisation peut jouer pour obtenir la masse minimale. Nous les avons représentés dans le Tableau 25.

Tableau 25 - Paramètres d'optimisation

Composant	Paramètres d'optimisation	Mini	Maxi	Unité
Echangeur thermique	Epaisseur radiale de l'échangeur thermique	1	20	mm
	Angle d'inclinaison de l'hélice de l'échangeur	1,5	45	degré
	Epaisseur entre deux canaux de l'échangeur	4,5	50	mm

Moteur électrique	Diamètre du moteur	10	200	mm
	Epaisseur de culasse	0,5	10	mm
	Densité de courant dans les bobinages du moteur électrique	1	30	A/mm ²
Pompe	Cylindrée de la pompe	0,1	10	cm ³ /tr

On remarque que les contraintes en termes de valeurs minimale et maximale sont formulées pour chaque paramètre.

V.B.1.c) Contraintes d'optimisation

Des contraintes supplémentaires ont été implémentées dans l'algorithme d'optimisation. Nous avons :

- limité les pertes de charge dans l'échangeur à 0,5 bar, pour qu'elles restent faibles vis-à-vis de la différence de pression aux bornes de la pompe.
- limité le facteur de forme du moteur électrique (rapport entre la longueur et le diamètre) à 2 afin de s'assurer de la faisabilité du moteur proposé.

V.B.2. Modèles

Des modèles ont été établis pour les différents composants de l'EPD. Etant donné leur caractère préliminaire, nous avons choisi de ne représenter que les phénomènes physiques les plus déterminants. Ainsi, des phénomènes d'importance marginale pour le dimensionnement tels l'augmentation de température de carburant lié aux pertes dans la pompe, ou encore l'échange thermique entre l'air et le carter de l'échangeur thermique ont été négligés. Ceci a pour effet de simplifier le modèle global, permettant de gagner du temps lors de sa mise en place, tout en conservant une bonne confiance dans les résultats. Nous présentons dans ce chapitre les différents modèles mis en œuvre dans notre étude.

Modèle de pompe

Pour le modèle de la pompe à engrenages, nous avons considéré uniquement un modèle hydraulique, sans prise en compte des aspects thermiques. Ces derniers ont un effet marginal du fait de la bonne évacuation de la chaleur produite au sein de la pompe dans le carburant, entraînant une augmentation maximale de l'ordre de 1°C de la température du carburant. Cette augmentation de température est négligeable devant la température du carburant considérée à 90°C.

Pour le modèle hydraulique, nous avons utilisé une table de performance donnant le rendement volumétrique en fonction du point de fonctionnement (vitesse de rotation et différence de pression). Pour le rendement mécanique, une valeur constante a été considérée. Ces données proviennent de l'expérience de Safran Helicopter Engines dans la fabrication de ce type de pompe. Le comportement hydraulique de la pompe est ainsi représenté par les équations suivantes :

$$N_{pompe} = \frac{Q}{\eta_v(N_{pompe}, \Delta P) \cdot d} \quad \text{et} \quad T_{pompe} = \frac{\Delta P \cdot d}{\eta_m} \quad (\text{III-24})$$

Avec :

N_{pompe} la vitesse de rotation de la pompe (en rad/s)

T_{pompe} le couple sur l'arbre de pompe (en N.m)

η_v et η_m les rendements volumétriques et mécaniques de la pompe (sans unité)

Q le débit volumique en sortie de la pompe (en m³/s)

ΔP la différence de pression aux bornes de la pompe (en Pa)

d la cylindrée de la pompe (en m³/rad)

Modèle d'échangeur

- Modèle hydraulique

Pour les pertes de charge dans l'échangeur, un modèle très simple a été considéré. L'objectif étant, non pas d'avoir une quantification exacte des pertes de charges, mais bien d'en donner une valeur

approchée permettant d'être utilisée comme contrainte dans le dimensionnement de l'EPD. Ainsi, nous avons considéré les pertes de charges dans l'échangeur comme celles d'une conduite droite de même longueur. L'effet de la courbure du canal, qui est enroulé autour du moteur électrique, n'a donc pas été pris en compte. Cet effet devra être ajouté pour une appréciation plus précise des pertes de charge dans l'échangeur. Le modèle de pertes de charge utilisé se base sur la formulation générale des pertes de charge dans une conduite horizontale de section constante :

$$\Delta P_{pertes} = \lambda \cdot \frac{L_{canal}}{D_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (III-25)$$

Avec :

$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$, formulation de Blasius pour le coefficient de pertes de charge pour un écoulement turbulent (avec $4000 < Re < 100000$) e dans l'hypothèse d'une conduite lisse

L_{canal} la longueur du conduit de l'échangeur thermique (en m)

D_h le diamètre hydraulique de la conduite (en m)

ρ la masse volumique du carburant considéré (en kg/m^3)

v la vitesse moyenne de l'écoulement dans le conduit (en m/s)

On notera que dans notre modèle, la perte de pression dans l'échangeur a été négligée devant la différence de pression imposée à la pompe. Ainsi, nous n'avons pas pris en compte les pertes de charge des échangeurs comme une différence de pression supplémentaire à fournir par la pompe. Cette hypothèse implique une légère sous-estimation du couple à fournir par le moteur électrique.

- Modèle thermique

Nous avons considéré une résistance de convection représentant la capacité d'échange entre le carter du moteur et le carburant circulant dans l'échangeur. Le coefficient d'échange convectif a été calculé en utilisant la corrélation Dittus-Boelter (Incropera et al. 2007), particulièrement adaptée aux conditions de régime turbulent vérifiant la condition $Re > 10000$. Le nombre de Nusselt (Nu) est alors obtenu via l'équation :

$$Nu = 0,023 Re^{4/5} Pr^{0,3} \quad (III-26)$$

où Re le nombre de Reynolds et Pr le nombre de Prandtl. On en déduit alors la résistance thermique entre le carburant et le carter moteur au sein de l'échangeur par la relation :

$$R_{échangeur} = \frac{L_c}{\lambda \cdot S \cdot Nu} \quad (III-27)$$

Avec :

L_c est la longueur caractéristique (en m)

λ la conductivité thermique du carburant (en W/m/K)

S la surface d'échange entre le carburant et le carter (en m^2)

La valeur du nombre de Reynolds a été vérifiée dans les résultats obtenus. Elle se situe selon les cas entre 24500 et 26000. Ainsi, les formulations choisies ont bien été utilisées dans leurs plages de validité.

Modèle moteur

Les modèles thermique et électromagnétique du moteur utilisés sont issus d'un métamodèle obtenu à partir des caractéristiques d'un moteur sans balais à courant continu de type PARVEX N310, comme décrit dans la thèse de Florian Sanchez (Sanchez 2017). Il permet de réduire les propriétés d'un tel moteur à partir de 3 paramètres que sont la densité de courant, l'épaisseur de culasse et le diamètre du moteur.

Modèle thermique global du système

Les aspects thermiques jouent un rôle crucial pour le dimensionnement du moteur électrique. En effet, la limitation en couple permanent d'un moteur électrique est liée à sa capacité à évacuer la chaleur produite à l'intérieur des bobinages. Pour un dimensionnement moteur donné, meilleur est le refroidissement des bobinages, meilleur est le couple maximal continu. C'est pourquoi des échangeurs thermiques à carburant ont été prévus sur les moteurs électriques de l'EPD.

Au niveau du moteur électrique, les échanges thermiques à considérer sont représentés en Figure 90. La chaleur, produite dans les bobinages du moteur électrique, est transmise au carter extérieur du moteur par conduction, via une résistance thermique R_{moteur} , obtenue via le modèle moteur. Elle est ensuite transmise au corps de l'échangeur à travers une résistance de contact $R_{contact}$. Cette résistance thermique représente l'imperfection de l'assemblage entre le carter externe du moteur électrique et l'échangeur. Cette résistance est modélisée par un film d'air immobile (conduction seule) de 10 μm d'épaisseur. Une fois dans le corps de l'échangeur, la chaleur peut être transmise soit au carburant qui y circule, via une résistance thermique $R_{échangeur}$ calculée précédemment, soit à l'air ambiant via une résistance R_{air} .

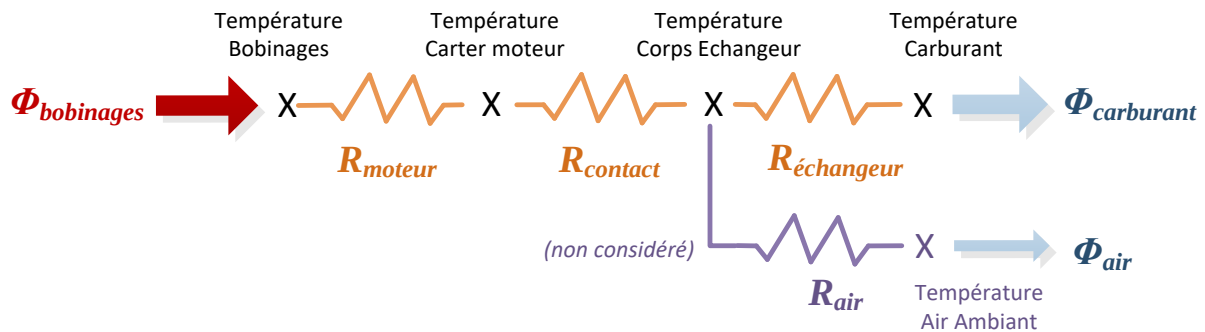


Figure 90 – Représentation nodale des transferts thermiques à considérer pour le refroidissement des bobinages du moteur

L'échange thermique de convection naturelle entre le corps de l'échangeur thermique et l'air a été négligé devant la convection forcée avec le carburant. Ce phénomène est bien négligeable au vu des ordres de grandeurs des coefficients d'échange convectif h . Dans le cas de l'échange avec l'air, l'ordre de grandeur du coefficient d'échange est de 10 $\text{W/m}^2/\text{K}$ alors qu'il est de 10 000 $\text{W/m}^2/\text{K}$ pour l'échange avec le carburant.

V.C. Résultats

Ce dimensionnement préliminaire du système EPD a permis de déterminer la cylindrée de la pompe pour laquelle la masse du système est minimisée. La masse des parties actives du moteur électrique a été évaluée. Afin d'obtenir la masse du moteur total, nous avons recherché sur catalogue un moteur similaire. En plus d'obtenir la masse du moteur électrique entier, cela nous a permis d'avoir une bonne estimation du coût de cet équipement.

Bilan de la partie V

A travers cette approche par les modèles, une brique de solution de type pompe doseuse à entraînement électrique a été prédimensionnée. Ce dimensionnement préliminaire permet d'avoir une estimation plus précise de performances de type de masse et coût. Il permettra également la mise en œuvre de modèles ou essais complémentaires permettant d'en évaluer les performances selon d'autres critères. De plus, les informations obtenues de par ces premiers modèles peuvent être réinjectés dans la matrice d'évaluation des briques de notre étude conceptuelle. Ceci permettant de gagner en précision dès le niveau conceptuel, pour affiner ce premier niveau de sélection.

Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie de sélection d'architectures a été proposée et mise en œuvre dans le cadre du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère. Le caractère fortement innovant des architectures proposées nous a contraints à réduire grandement le nombre d'architectures au cours de la sélection. En effet, en partant de plus d'un million d'architectures potentielles, notre méthode de sélection a permis de mettre en avant moins de 10 architectures, pour un cahier des charges donné, en prenant en compte des critères d'évaluation diversifiés. Pour faire face à ce nombre important d'architectures candidates, plusieurs méthodes ont été utilisées comme l'évaluation préliminaire, et

l'approche par les briques plutôt que par les architectures elles-mêmes. Ceci nous a permis par la suite de procéder à une évaluation qualitative des briques, puis d'en déduire les performances des différentes architectures vis-à-vis des critères d'évaluation. Une méthode a également été proposée et mise en œuvre pour la pondération des différents critères d'évaluation. Elle a été complétée par une approche d'aide à la décision multicritère basée sur les méthodes TOPSIS et MAUT, permettant de réduire grandement le nombre d'architectures pour ne conserver que les plus pertinentes. Finalement, une illustration de la suite du processus de conception a été donnée à travers la proposition et mise en œuvre d'une approche basée sur les modèles pour le prédimensionnement d'une brique.

Conclusion Générale

Rappel du contexte et des objectifs

Dans un contexte industriel fortement concurrentiel, l'innovation de rupture est un levier essentiel pour dégager des marges fonctionnelles et ainsi proposer des produits en mesure de mieux répondre aux besoins présents, ou en satisfaire de nouveaux. Les développements industriels étant essentiellement menés dans une logique d'innovation incrémentale, un véritable besoin méthodologique a été identifié pour favoriser l'innovation de rupture. Ainsi, ces travaux de thèse se sont focalisés sur l'étude conceptuelle d'architectures pour un système fortement innovant. Dès lors, deux objectifs principaux ont été fixés pour nos travaux de thèse :

- Proposer une méthodologie d'étude conceptuelle d'architectures système en rupture, conforme à l'état de l'art, et pouvant être implémentée dans un contexte industriel.
- Mettre en œuvre la méthodologie proposée sur le cas d'étude concret du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère, au sein de l'entreprise Safran Helicopter Engines. L'objectif de cette étape est d'obtenir une sélection d'architectures de circuit carburant innovantes les plus prometteuses vis-à-vis des besoins identifiés pour les circuits carburant futurs.

Ces deux objectifs sont intimement liés dans la mesure où :

- la méthodologie proposée a été développée pour être adaptée au cas d'étude du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère,
- la mise en œuvre de la méthodologie chez l'industriel a fourni un retour d'expérience permettant son amélioration tout au long des travaux de thèse. En outre, cette étape de mise en pratique a également contribué à valider la pertinence de la méthode proposée dans un contexte industriel.

Positionnement et cheminement des travaux de thèse

Les travaux de thèse se sont concentrés sur les étapes d'ingénierie des besoins et des exigences, de génération d'architectures fortement innovantes et de sélection qualitative d'architectures les plus pertinentes. Ce cadre d'étude a évolué au cours de l'avancement de la thèse. Il était initialement prévu d'effectuer une sélection quantitative des architectures, en se basant sur des modèles de prédimensionnement de haut niveau. Cependant, il est apparu qu'étant donné la quantité et la diversité des architectures candidates et des critères d'évaluation, une approche par modélisation quantitative s'est avérée irréaliste. En effet, la génération de modèles ne pouvant être automatisée, l'effort de modélisation aurait été trop important dans le temps imparti. De plus, notre approche systémique implique de prendre en compte des critères variés ne pouvant être directement évalués quantitativement par des modèles de haut niveau. Ces différents verrous nous ont donc conduit à proposer et mettre en œuvre une démarche davantage basée sur l'évaluation qualitative des architectures. Dès lors, il ne s'agit donc plus de prédimensionner les architectures mais d'en sélectionner les plus pertinentes. L'étape de prédimensionnement est ainsi repoussée en aval des travaux de thèse, et pourra ainsi être menée sur un nombre réduit d'architectures sélectionnées. Cette modification de la philosophie d'évaluation des architectures est arrivée relativement tard dans nos travaux. Il a en effet fallu attendre la fin de l'étape de génération des architectures, et le début de leur évaluation pour constater la difficulté à évaluer quantitativement des architectures aussi nombreuses et diverses. A ce moment-là, un long travail de spécification d'exigences quantitatives pour un cas d'étude sélectionné avait déjà été réalisé. Le passage à une démarche qualitative d'évaluation des architectures a rendu inutile à la thèse une grande partie de ce travail de spécification. Cette expérience est néanmoins positive : elle montre qu'il faut à l'avenir utiliser un processus plus itératif en raisonnant par strates plutôt qu'en profondeur.

Concernant la démarche générale de la thèse, notre objectif aurait pu être considéré à première vue comme un problème de sélection d'architectures. Cependant, cette activité nécessite d'être alimentée par des architectures candidates et des critères d'évaluation. Dans un cadre d'étude faiblement innovant, ces données auraient pu être disponibles directement dans l'entreprise. Néanmoins, dans le cadre de l'innovation de rupture, les architectures candidates se doivent d'être fortement innovantes. Il en est de même pour les critères d'évaluation qui se doivent de refléter les attentes des clients de demain vis-à-vis du produit de l'entreprise. C'est donc véritablement la dimension d'innovation radicale qui nous a poussés à débiter notre étude dès l'analyse des besoins, point de départ de l'activité de conception. L'idée a été de permettre à l'innovation de rupture de s'exprimer dès cette étape, pour qu'elle rayonne à travers les activités suivantes que sont la génération et la sélection

d'architectures.

Ces deux derniers paragraphes nous amènent à conclure que pour conduire nos travaux de recherche sur l'innovation radicale, il est incontournable de s'intéresser aux étapes fortement préliminaires du cycle de conception.

Ainsi, les travaux de thèse se sont déroulés sur trois activités principales :

- **L'analyse des besoins**, qui a consisté en un travail de communication et de concertation avec les différentes parties prenantes pour en extraire les besoins actuels et futurs.
- **La génération d'architecture**, qui a reposé sur des étapes de décomposition fonctionnelle, de créativité pour la recherche de briques de solutions innovantes, et d'assemblage des architectures. Cette dernière activité repose sur le fait qu'une architecture est obtenue par combinaison de briques pour les différentes fonctions du système. La compatibilité des briques entre elles a été prise au compte via la mise en œuvre d'une matrice de compatibilité.
- **La sélection d'architecture**, qui repose sur un processus de pondération des critères d'évaluation, de prise en compte des contraintes du cahier des charges, et d'évaluation des architectures. Cette dernière étape repose sur l'évaluation qui a été faite de chaque brique. Les évaluations des briques sont ensuite judicieusement combinées à l'aide d'une matrice d'agrégation des notes, pour obtenir finalement l'évaluation de l'architecture.

Valeur ajoutée des travaux de thèse

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, c'est bien l'aspect d'innovation de rupture qui, appliqué à une activité de conception, fait l'originalité de nos travaux de thèse. De par la diversité des solutions à considérer, nous avons proposé de combiner sous une forme originale diverses approches qualitatives pour parvenir à une sélection d'architectures. C'est une première source d'originalité car la plupart des travaux de conception préliminaire que nous connaissons s'attachent à une évaluation quantitative, souvent basée sur les modèles.

La valeur ajoutée de nos travaux de thèse réside essentiellement dans la combinaison de techniques ou bribes de techniques, à l'état de l'art dans leurs domaines, réunies en une méthodologie structurée qui est adaptée aux besoins et caractéristiques de notre cas d'étude.

Ainsi, le Chapitre 1 a proposé une approche basée sur l'ingénierie système mais adaptée à un cas d'innovation de rupture. Cette dernière a apporté un cadre structurant dans le sens de l'identification des parties prenantes et de leurs besoins, ainsi que des contextes opérationnels du système. Au sein même de ce cadre d'ingénierie système, des éléments innovants ont été introduits au cours de réunions transverses avec les parties prenantes. Ces réunions ont été menées dans un climat de réflexion sur le long terme, plutôt que sur les problématiques du moment.

D'un point de vue industriel, l'approche proposée et mise en œuvre a permis de porter une réflexion de différents métiers sur l'évolution des systèmes et des besoins associés.

Le Chapitre 2 s'appuie sur un important travail bibliographique. Il a proposé une technique de créativité originale et particulièrement adaptée à une application industrielle, ainsi qu'une mise en œuvre concrète s'appuyant sur le concept de matrice morphologique. La première permet de générer, au cours d'une séance de travail de groupe de deux heures, plusieurs dizaines d'idées innovantes. Cette technique de créativité proposée et mise en œuvre dans ces travaux de thèse s'appuie sur la concaténation de principes issus de techniques déjà existantes (KCP, Brainwriting 635, Diagramme KJ). Outre l'intérêt de proposer une méthode hybride, particulièrement adaptée au cas d'étude et à son contexte industriel, la plus grande valeur ajoutée repose sur le fait d'avoir pu la tester et la valider dans un contexte industriel. Le retour d'expérience obtenu suite à cette mise en œuvre permet de disposer aujourd'hui d'une technique de créativité à la fois novatrice et mature. La deuxième forte contribution de ce chapitre a été l'exploitation du concept de matrice morphologique. Etant donné le nombre important de solutions générées, un formalisme original basé sur une représentation plus graphique de l'espace des solutions a été proposé et mis en œuvre.

Du point de vue de l'industriel, le déploiement de cette approche a permis de faire ressortir des briques ou concepts d'architecture fortement innovants. C'est la première étape qui permet de faire apparaître concrètement l'innovation de rupture, à travers les concepts générés.

Dans le Chapitre 3, une étude bibliographique approfondie a permis de proposer et mettre en œuvre une approche originale de sélection des architectures candidates, en se basant sur les résultats des processus des deux chapitres précédents. La valeur ajoutée principale se trouve dans :

- L'intégration de différentes méthodes, chacune correspondant à l'état de l'art dans son domaine, dans une approche unifiée permettant de pondérer les critères (matrice QFD), d'évaluer et de sélectionner des architectures (outils d'aide à la décision).
- Le choix de l'utilisation de deux techniques d'obtention d'un critère unique que sont TOPSIS et MAUT, comme deux angles de vue complémentaires sur les notations des architectures, représente également un apport important à nos yeux. Cela a consisté à analyser les résultats obtenus à l'aide de ces deux critères, en combinant une approche topologique (mathématique) et une approche analytique (orientée vers les résultats techniques). Cette combinaison offre un équilibre appréciable entre l'approche mathématique, efficace pour diminuer le nombre d'architectures mais forcément réductrice car résumant vingt critères d'évaluation en un critère unique de décision, et l'approche technique qui permet d'apporter une véritable interprétation technique aux résultats mathématiques.

L'approche méthodologique présentée dans la thèse, et plus particulièrement dans le Chapitre 3, a fait l'objet de la création d'un outil implémenté dans l'environnement Microsoft Excel/VBA permettant sa mise en œuvre sans recours à des logiciels spécialisés.

Du point de vue industriel, les résultats obtenus par l'application de la méthodologie proposée a permis de mettre en avant ou d'écarter certaines briques technologiques, selon leur potentiel à apporter de la valeur au circuit carburant, vis-à-vis des attentes du client. La démarche mise en œuvre a permis d'ouvrir et de faciliter la discussion sur des sujets clés tels que les besoins futurs, l'importance relative des critères ou les performances escomptées d'une brique technologique inconnue. En permettant un traitement rationnel de ces données, les incohérences ou questionnements sont alors rapidement pointés du doigt et peuvent être discutés en se basant sur des résultats concrets fournis par l'outil.

Perspectives

Même si la méthodologie présentée dans ces travaux de thèse a été appliquée dans le cas très particulier du circuit carburant d'un moteur d'hélicoptère, elle n'est en est pas moins applicable à différents domaines industriels et à différents niveaux de décomposition du produit (système, sous-système, équipements...). Même si elle donnera sa plus forte valeur ajoutée dans des projets d'innovation de rupture, cette méthode peut également être adaptée pour des projets d'innovation incrémentale ou de développement. Il s'agira pour cela d'adapter le degré de nouveauté des besoins et des briques candidates. La démarche proposée reste donc relativement générique et applicable à différents niveaux de l'entreprise.

Le temps imparti pour les travaux de thèse étant limité, certaines améliorations ont été imaginées sans pouvoir être réalisées.

C'est le cas notamment de l'étude de sensibilité de la méthodologie aux données d'entrées. Cette activité consiste à analyser la robustesse des conclusions face à une modification des données d'entrée. Telle qu'elle a été implémentée, la méthode proposée se prête bien à l'utilisation de logiciels dédiés à l'exploration de design et à l'étude de sensibilité paramétrique, par exemple Optimus ou OptiY.

Une amélioration pouvant être apportée à notre approche méthodologique consiste en l'ajout d'un indicateur de compatibilité technologique. Il permettrait d'évaluer la connaissance de la solution proposée en interne de l'entreprise, ainsi que sa compatibilité avec les systèmes en interface déjà existants, comme le calculateur du moteur par exemple. Ce critère avait été tout d'abord écarté de notre étude afin de ne pas être contre-productif en termes d'innovation de rupture. En effet, les solutions actuellement déployées seront les mieux notées sur ce critère, qui risque de pénaliser les solutions les plus innovantes. Cependant, utiliser la maturité et la compatibilité technologique comme simple indicateur, et non comme critère d'évaluation et de sélection, pourrait permettre in fine de départager deux solutions dont les performances peuvent être proches. Cet indicateur permettrait également d'accentuer la capacité de l'outil à intervenir sur des projets d'innovation incrémentale ou même des développements, pour lesquels la maturité et la compatibilité aux systèmes existants est, respectivement, importante et cruciale.

Comme nous l'avons vu précédemment, la subjectivité de la notation des briques par les experts apporte un biais certain dans les résultats de l'évaluation. Ce caractère subjectif des données d'entrée est d'autant plus prononcé que l'on travaille sur un projet d'innovation de rupture ou de conception

préliminaire. Ce biais ne peut pas être supprimé au moment de la notation, mais il peut en revanche être pris en compte. C'est un axe d'amélioration que nous proposons par l'introduction de logique floue dans le processus de sélection d'architectures. Comme l'exposent les auteurs de (Rathod & Kanzaria 2011) dans leur cas de sélection multicritère d'un matériau à changement de phase, la méthode TOPSIS floue est préférée dans le cadre de notations des performances vagues. La prise en compte d'incertitudes dans le processus de sélection lui-même pourra alors permettre de gagner en précision quant à la sélection finale des architectures.

Enfin, comme nous l'avons vu dans la partie V du chapitre 3, les résultats de thèse sont amenés à donner suite à des travaux d'études préliminaires quantitatives sur les briques ou architectures sélectionnées. Ces travaux complémentaires et quantitatifs permettront de gagner en maturité sur les concepts ayant été jugés les plus pertinents dans les travaux de thèse. Ces informations pourront également être réinjectées dans la démarche de cette thèse par une réévaluation de la brique concernée. Cette rétroaction permettra de valider ou de mettre en garde contre la valeur ajoutée d'une telle brique, maintenant que l'on en connaît les performances avec plus de précision. Ainsi la démarche présentée lors de ces travaux de thèse pourra également accompagner la suite du processus de conception du système.

Références

- Afnor, 2014. *NF X50-150 , NF EN 1325 Management par la valeur - Vocabulaire - Termes et définitions*,
- Airbus Helicopters, 2018. Médiathèque d'Airbus Helicopters. Available at: http://gallery.airbushelicopters.com/index_fr.html [Accessed February 14, 2018].
- Akay, D., Kulak, O. & Henson, B., 2011. Computers in Industry Conceptual design evaluation using interval type-2 fuzzy information axiom. *Computers in Industry*, 62(2), pp.138–146. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2010.10.007>.
- Akincilar, A. & Dağdeviren, M., 2014. A Hybrid Multi-Criteria Decision Making Model to Evaluate Hotel Websites. *International Journal of Hospitality Management*, 36(2000), pp.263–271.
- Altshuller, G., 1984. *Creativity As an Exact Science*, Amsterdam: Gordon and Breach Publishers.
- Anderson, N., Hardy, G. & West, M., 1992. Management Team. *Management Decision*, 30(2).
- Arnoux, F., 2013. *Modéliser et organiser la conception innovante : le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d'énergie aeronautiques Le cas de l'innovation radicale dans les systèmes d ' énergie aéronautiques*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Aruldoss, M., Lakshmi, T.M. & Venkatesan, V.P., 2013. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), pp.31–43. Available at: <http://pubs.sciepub.com/ajis/1/1/5/>.
- Badreau, S. & Boulanger, J.-L., 2014. *Ingénierie des exigences - Méthodes et bonnes pratiques pour construire et maintenir un référentiel*. Dunod., Paris.
- Biltgen, P.T. & Mavris, D.N., 2007a. A technique for interactive probabilistic multiple attribute decision making. *Collection of Technical Papers 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, (January), pp.1–13.
- Biltgen, P.T. & Mavris, D.N., 2007b. A Technique for Interactive Probabilistic Multiple Attribute Decision Making. In *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, Nevada, pp. 1–13.
- Bonjour, E., Deniaud, S. & Micaëlli, J., 2009. Conception complexe et ingénierie système. In *Les systèmes techniques. Lois d'évolution et méthodologies de conception*. pp. 83–101. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00433926/en/>.
- De Bono, E., 1970. *Lateral Thinking - Creativity Step by Step*, New York, NY (US): Harper & Row.
- Brans, J.P., Mareschal, B. & Vincke, P., 1984. PROMETHEE: A new family of outranking methods in multi-criteria analysis. *Operational Research*, pp.408–21.
- Buisine, S., Boisadan, A. & Richir, S., 2017. L'innovation radicale par la méthode de l'utilisateur extraordinaire. *Psychologie du Travail et des Organisations*.
- Carrillo, J.M. et al., 2012. Requirements engineering tools : Capabilities , survey and assessment. *INFORMATION AND SOFTWARE TECHNOLOGY*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2012.04.005>.

- Charania, A. & Olds, J.R., 2002. Application of the Abbreviated Technology Identification, Evaluation, and Selection (ATIES) methodology to a Mars Orbit Basing (MOB) Solar Clipper architecture. In *53rd International Astronautical Congress*.
- Choquet, G., 1954. Theory of capacities. *Annales de l'institut Fourier*, 5, pp.131–295.
- Choulier, 2000. *TRIZ, un état d'esprit*, Available at: www.trizfrance.org.
- Choulier, D. & Weite, P.-A., 2011. *Découvrir et appliquer les outils de TRIZ*, Belfort (France).
- Christian Höfling, 2017. 6-3-5-Methode. Available at: <http://www.hp-qmservice.de/6-3-5-methode> [Accessed October 2, 2017].
- Churchmann, C.W. & Ackoff, R.L., 1954. An approximate measure of value. *Journal of Operations Research Society of America*, 2(1), pp.172–187.
- CNRTL, 2018. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales - Portail Lexical. Available at: <http://www.cnrtl.fr/definition/>.
- Couger, J.D., 1995. *Creative Problem Solving and Opportunity Finding (Decision Making and Operations Management)*, Boyd & Fraser Pub Co.
- Coulin, C.R., 2007. *A situational approach and intelligent tool for collaborative requirements elicitation*. Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Craisse, J. et al., 2016. Creation of a Decision-Support Methodology for Selecting More-Electric Aircraft Subsystem Technologies. In *Systems Conference (SysCon)*.
- Delbecq, S. et al., 2017. A framework for sizing embedded design systems during preliminary design. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), pp.4354–4359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.875>.
- Derumier, J.-P., 2016. *Les méthodes de l'innovation de rupture*, Paris.
- Design & Develop For You, Morphological Chart and Concept Generation. Available at: <http://doubled4u.blogspot.com/2013/11/morphological-chart-and-concept.html> [Accessed December 9, 2016].
- Dieter, G.E. & Schmidt, L.C., 2013. *Engineering Design* 5th editio.,
- Eberle, R.F., 1971. *SCAMPER: Games for Imagination Development*, Buffalo: DOK Publishing.
- ECSS, 2004. *ECSS P-001B Glossary of terms*,
- Engler, W.O., Biltgen, P.T. & Mavris, D.N., 2007. Concept Selection Using an Interactive Reconfigurable Matrix of Alternatives (IRMA). *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (January), pp.1–8.
- Falessi, D. et al., 2011. Decision-making Techniques for Software Architecture Design : A Comparative Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 43(4).
- Fanmuy, G., 2014. *Bonnes pratiques en expression du besoin* Cépaduès E., Toulouse.
- Fanmuy, G., 2012. *Bonnes pratiques en ingénierie des exigences* Cépaduès E., Toulouse.

- Fanmuy, G. et al., 2001. *Recommandations pour l'élaboration d'un référentiel d'exigences techniques*, Available at: <https://www.afis.fr/Processus d'Ingénierie Système/Bonnes pratiques pour l'élaboration d'un référentiel d'exigences.pdf>.
- Felk, Y., 2011. *Evaluation et pilotage des activités de recherche dans la R & D centrale de STMicroelectronics : nouveaux principes de management de la recherche industrielle pour l'innovation de rupture*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. eds., 2005. *Multiple Criteria Decision Analysis - State of the Art Surveys* Springer S., Boston.
- Figueira, J., Mousseau, V. & Roy, B., 2005. ELECRES Methods. In *Multiple Criteria Decision Analysis - State of the Art Surveys*. Boston.
- Fiorèse, S. & Meinadier, J.-P., 2012. *Découvrir et Comprendre l'Ingénierie Système* Cépaduès E., Toulouse.
- Fraj, A., 2014. *Nouvelles approches en conception préliminaire basée sur les modèles des actionneurs embarqués*. Université de Toulouse.
- Gadd, K., 2011. *TRIZ For Engineers : Enabling Inventive Problem Solving* J. W. & Sons, ed.,
- Gal, T., Stewart, T.J. & Hanne, T. eds., 1999. *Multicriteria Decision Making: Advances in MCDM Models, Algorithms, Theory, and Applications*,
- Gaouas Oussama, 2014. *Approches multicritères en conception bioclimatique et optimisation par le biais d'un langage architecturale*. Université Mohamed Khider Biskra.
- Gavel, H., 2007. *On Aircraft Fuel Systems Conceptual Design and Modeling*. Linköping University.
- Gavel, H., Ölvander, J. & Johansson, B., 2006. An algorithmic morphology matrix for aircraft fuel system conceptual design. In *25th International Congress of the Aeronautical Sciences*.
- George, D., 2012. *Concept Generation Using Morphological And Options Matrices*. Clemson University.
- Geschka, H., 1983. Creativity techniques in product planning and development: A view from West Germany. *R&D Management*.
- Geschka, H., 2007. *Kreativitätstechniken und Methoden der Ideenbewertung*,
- Gordon, W.J.J., 1961. *Synectics, the Development of Creative Capacity*, New York, NY (US).
- Govindan, K. et al., 2015. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection : a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, pp.66–83. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.046>.
- Grabisch, M., 2005. Une approche constructive de la décision multicritère A constructive approach to multicriteria decision making. *Traitement du signal*, 22(4), pp.321–338.
- Harker, T., 1987. Alternative modes of questioning analytic hierarchy process. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), pp.353–360.
- Hassan, M.H., 2014. *Méthodologies de conception optimale de systèmes de conversion électromécanique*. Université Paris Sud - Paris XI.

- Hatchuel, A., Le Masson, P. & Weil, B., 2009. Design theory and collective creativity: A theoretical framework to evaluate KCP process. In *International Conference on Engineering Design*. Stanford (CA), pp. 277–288.
- Hatchuel, A. & Weil, B., 2002. La théorie C-K : Fondements et usages d’une théorie unifiée de la conception. , (Hatchuel), pp.1–24.
- Hauser, J.R. & Clausing, D., 1988. The House of Quality. *Harvard Business Review*, (66), pp.63–73. Available at: <https://hbr.org/1988/05/the-house-of-quality>.
- Haykin, S., 1994. *Neural networks: A comprehensive foundation*, Prentice Hall PTR.
- Henry, J. & Walker, D., 1991. 3M’s little yellow note pads: “never mind. I’ll do it myself”. In J. Henry & D. Walker, eds. *Managing Innovation*.
- Holley, V., 2011. *A method to envision highly constrained architectural zones in the design of multi-physics systems in severe conditions*. Ecole Centrale Paris.
- Horowitz, R., 1999. *Creative problem solving in engineering design*. Tel-Aviv University.
- Howard, T., Culley, S. & Dekoninck, E., 2007. Creativity in the Engineering Design Process. In *International Conference on Engineering Design*. pp. 1–12.
- Huang, H., Bo, R. & Chen, W., 2006. An integrated computational intelligence approach to product concept generation and evaluation. *Mechanism and Machine Theory*, 41, pp.567–583.
- Hwang, C.-L. & Yoon, K., 1981. *Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications - A State-of-the-Art Survey*,
- Incropera, F. et al., 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* 6th editio.,
- ISO, 2015. ISO 9000 - Système de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire.
- ISO/IEC/IEEE, 2002. 15288 Systems Engineering—System Life Cycle Processes.
- ISO/IEC/IEEE, 2011. ISO / IEC / IEEE 29148 - Systems and software engineering - Requirements engineering.
- ISO/IEC/IEEE, 2015. *ISO/IEC/IEEE 15288 - Systems and software engineering — System life cycle processes*,
- ISO/IEC/IEEE, 2010. *ISO/IEC/IEEE 24765 Systems and software engineering - Vocabulary*,
- Jankovic, M. et al., 2012. Multiple-domain design scorecards: a method for architecture generation and evaluation through interface characterisation. *Journal of Engineering Design*, 23(December 2012), pp.743–763.
- Jensen, F. V. & Nielsen, D.T., 2007. *Bayesian networks and decision graphs*, New-York: Springer.
- Jones, G. & McFadzean, E., 1997. How can Reboredo foster creativity in her current employees and nurture creative individuals who join the company in the future? *Harvard Business Review*, 75(5).
- Keeney, R.L. & Raiffa, H., 1976. *Decision Analysis with Multiple Conflicting Objectives*, New-York: John Wiley & Sons.

- Keinonen, T. & Takala, R., 2006. *Product Concept Design - A Review of the Conceptual Design of Products in Industry*, Springer Science. Available at: <http://www.springer.com>.
- Kirby, M.R., 2001. *A Methodology for technology identification, evaluation, and selection in conceptual and preliminary aircraft design*. Georgia Institute of Technology.
- Konaté, J., 2009. *Approche système pour la conception d'une méthodologie pour l'élicitation collaborative des exigences*. Université Paul Sabatier - Toulouse III. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00435878>.
- Kossiakoff, A. & Sweet, W.N., 2003. *Systems Engineering Principles and Practice* John Wiley., Hoboken (USA).
- Kotonya, G. & Sommerville, I., 1998. *Requirements Engineering : Process and Techniques* John Wiley., Great Britain.
- Kroll, E., Condoor, S.S. & Jansson, D.G., 2004. *Innovative Conceptual Design* C. U. Press, ed.,
- Larousse, Dictionnaire de français. Available at: <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais> [Accessed October 18, 2017].
- Li, Y. et al., 2007. Design creativity in product innovation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(3), pp.213–222.
- Limayem, F., 2001. *Modèles de pondération par les méthodes de tri croisé pour l'aide à la décision collaborative en projet*. Ecole Centrale Paris.
- Liscouët, J., 2010. *Conception préliminaire des actionneurs électromécaniques - Approche hybride, directe/inverse*. Université de Toulouse.
- Liscouët-Hanke, S., 2008. *A model-based methodology for integrated preliminary sizing and analysis of aircraft power system architectures*. Université de Toulouse.
- Liu, D., 2016. *Systems engineering - Design Principles and Models* C. Press, ed.,
- Lo, M., 2013. *Contribution à l'évaluation d'architectures en Ingénierie Système : application en conception de systèmes mécatroniques*. Université de Montpellier II.
- Mammeri, M., 2013. *Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation*. Université Paris Dauphine - Paris IX.
- Manami, K., Ridgway, K. & Roshdi, M., 2015. Modelling the Conceptual Design Process with Hybridization of TRIZ Methodology and Systematic Design Approach. *Procedia Engineering*, 131, pp.1064–1072.
- Markman, A.B. et al., 2011. An Experimental Study of Group Idea Generation Techniques: Understanding the Roles of Idea Representation and Viewing. *Journal of Mechanical Design*, 133(3), pp.1–15.
- Marsh, K. et al., 2014. Assessing the Value of Healthcare Interventions Using Multi-Criteria Decision Analysis : A Review of the Literature. *PharmacoEconomics*, 32(4), pp.345–365.
- Martel, J. & Roy, B., 2006. Analyse de la signifiante de diverses procédures d'agrégation multicritère. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 44(3).

- Martin, J.N., 2017. Overview of an Emerging Standard on Architecture Evaluation – ISO / IEC 42030. In *27th Annual INCOSE International Symposium*.
- Mavin, A. et al., 2009. EARS (Easy Approach to Requirements Syntax). In *17th IEEE International Requirements Engineering Conference*. Atlanta, GA (US), pp. 317–322.
- Mayda, M. & Borklu, H.R., 2014. Development of an innovative conceptual design process by using Pahl and Beitz's systematic design , TRIZ and QFD. , 8(3), pp.1–12.
- McFadzean, E., 1998a. Enhancing creative thinking within organisations. *Management Decision*, 36(5), pp.309–315.
- Mcfadzean, E., 1996. *The classification of creative problem solving techniques*, Henley-on-Thames, Oxon.
- McFadzean, E., 1998b. The Creativity Continuum: Towards a Classification of Creative Problem Solving Techniques. *Creativity and innovation management*, 7(3), pp.131–139.
- Mcfadzean, E. & Nelson, T., 1998. Facilitating problem-solving groups: a conceptual model. *Leadership & Organization Development Journal*, 19(1), pp.6–13.
- Mckoy, F.L. et al., 2001. Influence of design representation on effectiveness of idea generation. In *Desing Engineering Technical Conferences*. pp. 1–10.
- Mhenni, F. et al., 2014. A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design. *Advanced Engineering Informatics*, 28(3), pp.218–231.
- Monsimer, A., Maré, J.-C. & Sicaire, P., 2017. Requirements engineering for radical innovation – Application to helicopter engine fuel system. In *27th Annual INCOSE International Symposium (IS2017)*.
- Moullec, M., 2014. *Towards decision support for complex system architecture design with innovation integration in early design stages*. Ecole Centrale Paris.
- Mycoted, KJ MEdhod. Available at: <https://www.mycoted.com/KJ-Method> [Accessed December 5, 2016].
- Nagasundaram, M. & Bostrom, R.P., 1993. *The Structuring of Creative Processes: Implications for GSS Research* Terry College of Business The University of Georgia, Athens, Georgia.
- Ngassa, A., Bigand, M. & Yim, P., 2003. A new approach for the generation of innovative concept for product design. In *International Conference on Engineering Design*. Stockholm.
- Norman, D.A. & Verganti, R., 2014. Incremental and Radical Innovation : Design Research vs Technology and Meaning Change. *Design Issues*, 30(1), pp.78–96.
- Nuseibeh, B. & Easterbrook, S., 2000. Requirements Engineering : A Roadmap. In A. Press, ed. *International Conference on Software Engineering*, Limerick, Ireland, pp. 35–46.
- Osborn, A., 1940. *Applied Imagination*, New York, NY (US): Charles Scribner's Sons.
- Osborn, A., 1948. *Your Creative Power*, New York, NY (US): Charles Scribner's Sons.
- Pahl, G. et al., 2007. *Engineering Design - A systematic Approach* 3rd editio., London: Springer-Verlag.

- Perrin, J., 2001. *Concevoir l'innovation industrielle : méthodologie de conception de l'innovation*, CNRS Edition.
- Peugeot, T., 2014. System Engineering, for a Cognitive Sciences Approach. In *Complex Systems Design & Management Conference*. Paris, France.
- Pialot, O., 2009. *L'approche PST comme outil de rationalisation de la démarche de conception innovante*. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- Project Management Institute, 2008. *A guide to the project management body of knowledge (BOK® guide) - 4th edition* Newton Squ., Etats-Unis.
- Rathod, M.K. & Kanzaria, H. V, 2011. A methodological concept for phase change material selection based on multiple criteria decision analysis with and without fuzzy environment. *Materials and Design*, 32, pp.3578–3585. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.040>.
- Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, pp.49–57. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>.
- Roy, B., 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2(8), pp.57–75.
- Runco, M.A., 2007. *Creativity. Theories and Themes: Research, Development and Practice* Elsevier.,
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp.234–81.
- Saaty, T.L., 1980. *The analytical hierarchy process*, McGraw Hill.
- SAE, 2010. *Aerospace Recommended Practice (ARP) 4754A*,
- Safran, 2018. Media Gallery Safran. Available at: <http://www.safran-medialibrary.com> [Accessed February 14, 2018].
- Safran Helicopter Engines, 2016. Inventer les hélicoptères du futur. Available at: https://www.safran-group.com/fr/media/20160624_inventer-les-helicopteres-du-futur [Accessed September 19, 2017].
- Samuel, P. & Jablolkow, K., 2010. Psychological Inertia and the Role of Idea Generation Techniques in the Early Stages of Engineering Design. In *Mid-Atlantic ASEE Conference*. Villanova.
- Sanchez, F., 2017. *Génération de modèles analytiques pour la conception préliminaire de systèmes multi-physiques : application à la thermique des actionneurs et des systèmes électriques embarqués*. Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- Sanchez, F. & Delbecq, S., 2016. Surrogate modeling technique for the conceptual and preliminary design of embedded actuation systems and components. In *ICAS 2016*.
- Schöllhammer, S., 2015. *Idea generation & evaluation - Training to iDEA Lab staff*,
- Schrage, D.P., 1999. Technology for Rotorcraft Affordability Through Integrated Product/Process Development (IPPD). In *American Helicopter Society 55th Annual Forum*. Montreal, Canada.
- Senthil, S., Srirangacharyulu, B. & Ramesh, A., 2014. Expert Systems with Applications A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-

- party reverse logistics. *Expert Systems With Applications*, 41(1), pp.50–58. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.010>.
- Shah, J.J., 1998. Experimental Investigation of Progressive Idea Generation Techniques in Engineering Design. *Design Engineering Technical Conference*, pp.1–15.
- Shah, J.J., Kulkarni, S. V & Vargas-hernandez, N., 2016. Evaluation of Idea Generation Methods for Conceptual Design: Effectiveness Metrics and Design. , 122(December 2000), pp.377–384.
- Shah, J.J., Vargas-hernandez, N. & Smith, S.M., 2003. Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies*, 24(2), pp.111–134.
- Solid Creativity, La Matrice TRIZ. Available at: http://www.triz40.com/aff_Matrice_TRIZ.php [Accessed December 1, 2016a].
- Solid Creativity, TRIZ. Available at: http://www.triz40.com/TRIZ_Fr.php [Accessed December 1, 2016b].
- Sun, J. et al., 2000. Design candidate identification using neural network-based fuzzy reasoning. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16, pp.383–396.
- Svahn, C., 2006. *An automated approach to aircraft fuel system synthesis*. Linköping University.
- The Standish Group, 1994. *CHAOS Report*,
- Thompson, G. & Lordan, M., 1999. A review of creativity principles applied to engineering design. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. pp. 17–31.
- Tran, P.N., 2010. *Modèles de décision pour la sélection d'interface et l'association flux/interface pour les terminaux mobiles multi- interfaces*. Télécom Paris-Tech.
- Tyl, B., 2011. *L'apport de la créativité dans les processus d'éco-innovation - Proposition de l'outil EcoASIT pour favoriser l'éco-idéation de systèmes durables*. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- Tzeng, G.-H. & Huang, J.-J., 2011. *Multiple Attribute Decision Making*, CRC Press.
- Ullman, D.G., 2010. *The Mechanical Design Process* Fourth Edi., Mc Graw Hill.
- Ulrich, K.T. & Eppinger, S.D., 2012. *Product Design and Development*, Mc Graw Hill.
- Valeins, H., 2009. La maîtrise des 5M ou le diagramme d'Ishikawa. Available at: <http://qualite-en-recherche.cnrs.fr/spip.php?article7> [Accessed December 5, 2016].
- Vanderpooten, D., 2008. *Aide multicritère à la décision - Concepts, méthodes et perspectives*, Available at: <http://www.dptinfo.ens-cachan.fr/Conferences/vanderpooten.pdf>.
- Vangundy, A.B., 1988. *Techniques of Structured Problem Solving*, New York, NY (US).
- Walden, D.D. et al. eds., 2015. *INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities* 4th ed., San Diego, CA (US): INCOSE.
- Wang, Y.M. & Luo, Y., 2009. On rank reversal in decision analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5-6), pp.1221–1229. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2008.06.019>.

-
- Weber, R.G., Condoor, S.S. & Louis, S., 1998. Conceptual Design Using a Synergistically Compatible Morphological Matrix. In *28th Annual Frontiers in Education Conference*.
- Weiss, M.P. & Gilboa, Y., 2004. More on synthesis of concepts as an optimal combination of solution principles. In *International Design Conference*.
- Weiss, M.P. & Hari, A., 2015. Extension of the Pahl & Beitz systematic method for conceptual design of a new product. *Procedia CIRP*, 36, pp.254–260. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.010>.
- Yan, Y. & Childs, P.R.N., 2015. Creativity tool selection for design engineers in idea generation. In *International Conference on Engineering Design*. pp. 1–12.
- Yannou, B., Lamé, G. & Cluzel, F., 2018. Radical Innovation Design : Innover par les usages grâce à l'identification de poches de valeur. *Valeur(s) et Management*.
- Yilmaz, S. & Seifert, C.M., 2010. Cognitive Heuristics in Design Ideation. In *International Design Conference*. Dubrovnik (Croatia), pp. 1007–1016.
- Zadeh, L.A., 1988. Fuzzy logic. *Computer*, 21(4), pp.83–93.
- Zwicky, F., 1948. *The Morphological Method of Analysis and Construction*, New-York: Wiley-Interscience.

Annexe

Annexe A Méthodologie de prédimensionnement pour l'évaluation préliminaire d'un système de dosage

Cette annexe présente la démarche utilisée pour le prédimensionnement des briques « Doser » en vue de leur évaluation préliminaire. Pour ce faire, nous considérerons la brique « Section commandée – Pression amont quelconque ». L'objectif de ce prédimensionnement est d'obtenir, pour le débit maximal, les valeurs minimales et maximales de tailles d'orifices et pression maximale.

I. Présentation du problème

Points de fonctionnement

Deux points de fonctionnement ont été choisis pour ce prédimensionnement : le point de plus faible débit (Ralenti Sol) et celui de débit maximal (OEI). Le premier point permet d'obtenir le diamètre minimal de l'orifice de dosage, tandis que le dernier permet d'obtenir le diamètre maximal de l'orifice de dosage ainsi que les pressions maximales aux bornes du système de dosage.

Le carburant utilisé pour le prédimensionnement est un Jet A-1 typique à 15°C.

Circuit modélisé

Comme nous l'avons représenté en Figure 91, le circuit utilisé pour le prédimensionnement du système de dosage est constitué :

- D'une pompe, dont le débit Q_{ppe} est imposé par la vitesse de rotation du moteur.
- D'un système de dosage, composé de :
 - o Une vanne de dosage : modélisé par un orifice dont la section S_{dos} peut varier selon le point de fonctionnement. Elle est traversée par un débit Q_{dos} , imposé par le point de fonctionnement.
 - o Un orifice de retour : modélisé par un orifice de section fixe S_r .

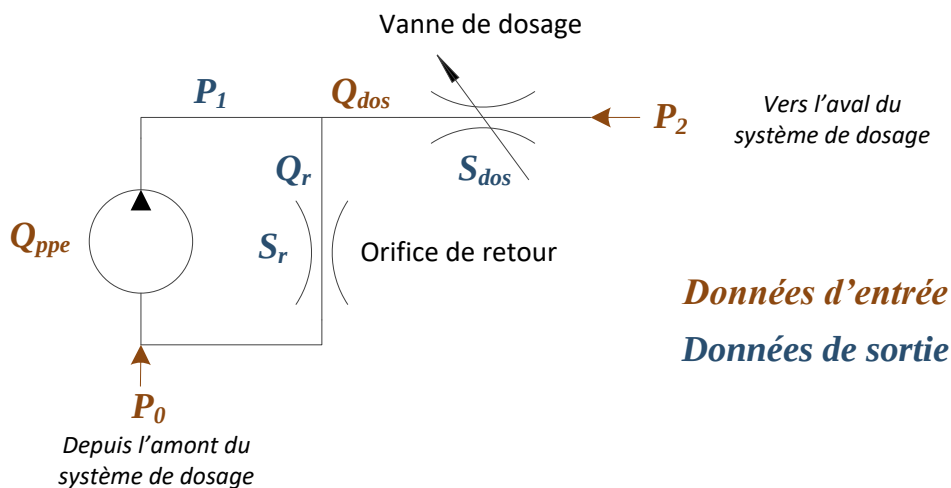


Figure 91 - Circuit modélisé pour le prédimensionnement du système de dosage par restriction "Pression amont quelconque"

Les circuits en amont et en aval du système de dosage n'ont pas été représentés dans ce modèle. Les conditions aux limites imposées pour le prédimensionnement sont :

- Une pression P_0 en entrée du circuit,
- Une pression P_2 en sortie du circuit,

Ces deux pressions sont imposées par le point de fonctionnement.

L'objectif de notre travail de prédimensionnement du système de dosage est alors de déterminer l'ensemble des points des dimensionnements (P_1 , S_{dos} , S_r) du système.

II. Prédimensionnement du système de dosage

II.A. Prédimensionnement de la pression et de la taille d'orifices

Nous avons donnés en Figure 93 une représentation symbolique du problème de prédimensionnement, en faisant apparaître les variables d'entrée (fixées par le point de fonctionnement) et les variables de sorties (à calculer).

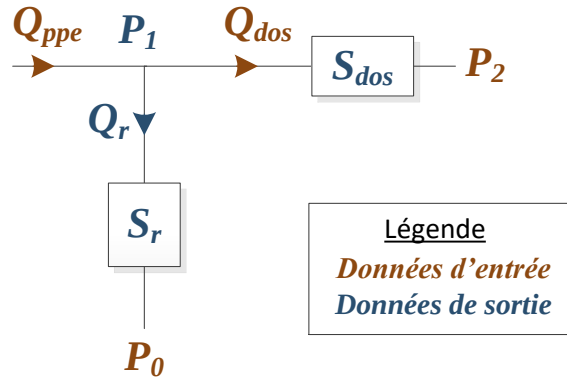


Figure 92 – Représentation initiale du problème de dimensionnement

En utilisant le théorème de conservation de la masse, et en négligeant les effets de compressibilité, on obtient directement la valeur du débit dans la boucle de retour :

$$Q_r = Q_{ppe} - Q_{dos} \quad (A-28)$$

Ce dernier étant désormais connu, le problème de dimensionnement devient celui présenté en Figure 93.

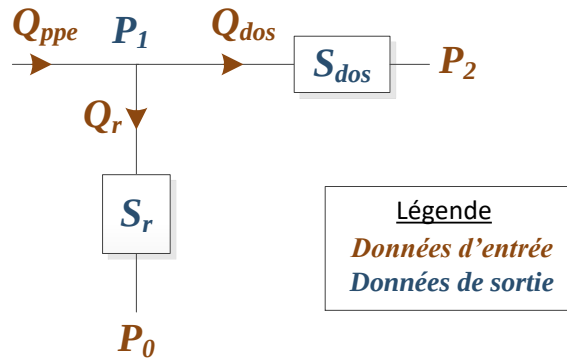


Figure 93 - Représentation finale du problème de dimensionnement

Il reste alors trois variables dont les valeurs sont à déterminer au cours de l'activité de prédimensionnement : la pression P_1 et les sections S_r et S_{dos} . Pour ce faire, nous disposons des deux équations de caractérisation des orifices de dosage et de retour :

$$Q_{dos} = C_{dos} \cdot S_{dos} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_1 - P_2|} \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \quad (A-29)$$

$$Q_r = C_{dr} \cdot S_r \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_1 - P_0|} \cdot \text{sign}(P_1 - P_0) \quad (A-30)$$

où C_{dos} et C_{dr} sont respectivement les coefficients de débits des orifices de dosage et de retour. L'écoulement étant turbulent, ces coefficients ne dépendent donc pas de la viscosité du carburant, mais uniquement de la géométrie des orifices.

Le bon fonctionnement de notre système de dosage impose que les débits Q_{dos} et Q_r soient positifs. D'après les caractéristiques des orifices de dosage et de retour, données en (A-29) et (A-30), les deux conditions suivantes doivent ainsi être vérifiées :

$$P_1 > P_2 \quad (A-31)$$

$$P_1 > P_0 \quad (A-32)$$

Etant donné que nous avons deux équations liant trois inconnues, le système de dosage possède un degré de liberté. Celui-ci doit être fixé afin d'être en mesure d'obtenir les valeurs des deux autres variables. Nous choisissons de fixer le paramètre de section de l'orifice de retour. C'est en effet le seul paramètre qui ne varie pas d'un point de fonctionnement à l'autre. Les équations (A-29) et (A-30) deviennent alors :

$$P_1 = P_0 + \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_r}{C_{dr} \cdot S_r} \right)^2 \quad (A-33)$$

$$S_{dos} = \frac{Q_{dos}}{C_{dos} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2 - P_1}} \quad (A-34)$$

Les prédimensionnements ainsi obtenus ont été résumés dans la Figure 94. Pour chaque valeur de la section de l'orifice de retour, un nouveau dimensionnement est généré.

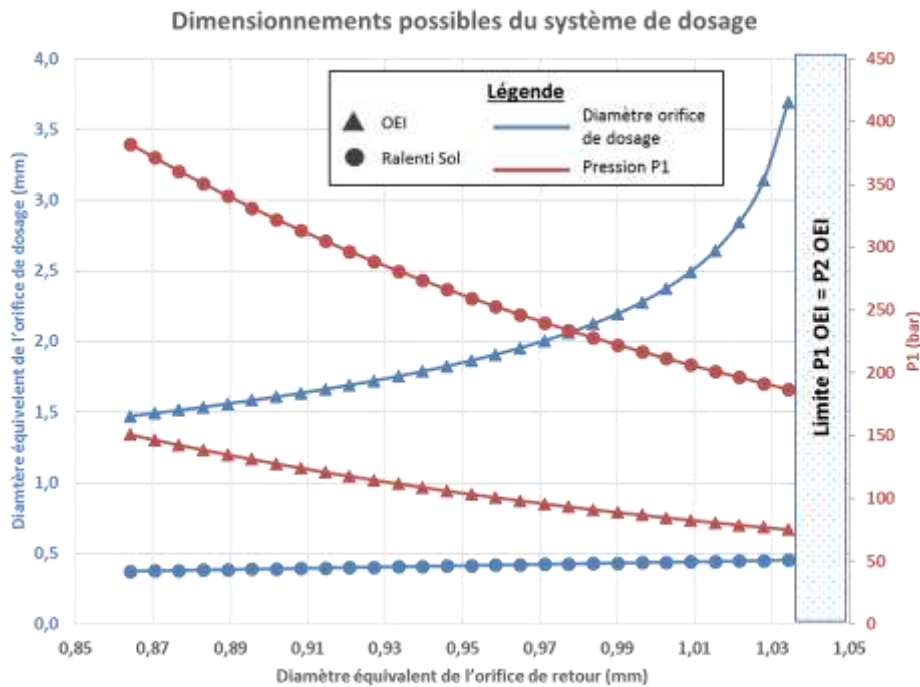


Figure 94 - Dimensionnements possibles du système de dosage

Il est à noter qu'une limite a été placée sur la droite du graphique. Elle représente le cas où la condition (A-31) n'est pas satisfaite. Il s'agit donc de points pour lesquels le système n'est pas fonctionnel et donc le dimensionnement non valable.

Analyse des résultats

Les résultats obtenus par le dimensionnement sont analysés au regard des 3 paramètres définis initialement : niveaux de pression, taille des orifices et pilotabilité.

- Niveaux de pression

Sur le reste du domaine de dimensionnement, on observe que les pressions P_1 obtenues pour les points de ralenti sol sont très élevées (de 190 bars à 395 bars). Ceci est dû au fait qu'une grande partie (88%) du débit générée par la pompe au ralenti doit être recirculé via la boucle de retour. Ces valeurs élevées de pression auront une répercussion sur la masse et/ou la fiabilité des équipements du circuit carburant, ce qui est un inconvénient majeur pour une conception de système aéronautique.

- Diamètre des orifices

Les diamètres d'orifices obtenus à la suite de ce prédimensionnement semblent réalistes, tant en valeur absolue qu'en variation entre les deux points de fonctionnement (pour l'orifice de dosage).

A l'issue de cette première partie de l'évaluation du système de dosage par restriction à « Pression amont quelconque », nous avons choisi de retenir le dimensionnement avec un orifice de retour de diamètre 1.03 mm. Comme nous l'avons vu en Figure 94, ce dimensionnement permet d'avoir les pressions les plus basses tout en conservant des tailles d'orifices convenables.

II.B. Evaluation de la pilotabilité du système de dosage

L'évaluation de la pilotabilité consiste à évaluer le gain du système de dosage pour un point de fonctionnement donné. Ce gain représente l'effet sur le débit dosé Q_{dos} d'une variation du paramètre de commande, ici la section de la vanne de dosage S_{dos} . Pour ce faire, il convient de trouver une expression du débit dosé dans laquelle la seule variable est la section de la vanne de dosage. Si l'on en revient à la caractéristique de la vanne de dosage, équation (A-29), on s'aperçoit que l'expression du débit dosé dépend également de la variable P_1 . En combinant les équations (A-28) et (A-30), on obtient une expression de P_1 en fonction du débit dosé et de la section de l'orifice de dosage :

$$P_1 = P_0 + \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{ppe} - Q_{dos}}{C_{dr} \cdot S_r} \right)^2 \quad (A-35)$$

En réinjectant cette expression de P_1 dans l'équation (A-29), on obtient une équation du second degré en débit dosé :

$$Q_{dos}^2 * \left(\left(\frac{C_{dr} \cdot S_r}{C_{dos} \cdot S_{dos}} \right)^2 - 1 \right) + Q_{dos} * 2 \cdot Q_{ppe} + \frac{2}{\rho} \cdot (C_{dr} \cdot S_r)^2 \cdot (P_2 - P_0) - Q_{ppe}^2 = 0 \quad (A-36)$$

La résolution de cette équation pour un point de fonctionnement donné permet d'obtenir numériquement la pente de la courbe d'évolution du débit dosé en fonction de la surface de l'orifice de dosage, au voisinage du point de fonctionnement considéré. Nous avons représenté graphiquement ce résultat en Figure 95. Cette résolution a été considérée avec un orifice de retour de diamètre 1,03 mm.

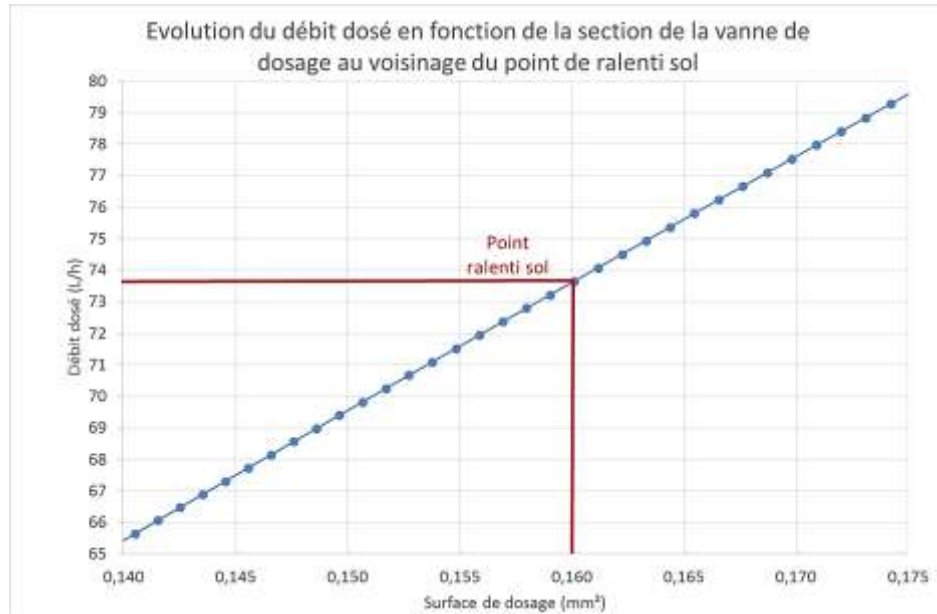


Figure 95 – Evolution du débit dosé en fonction de la section de l'orifice de vanne de dosage au voisinage du point de ralenti sol

Le gain au point de ralenti sol a été évaluée de manière numérique à 398 L/h/mm^2 . De la même manière, le gain au point d'OEI a été évalué à 5 L/h/mm^2 . Ces résultats de gain vont à l'encontre du cahier des charges du système de régulation en termes de pilotabilité. Il serait en effet bénéfique d'avoir un gain faible à bas débit et un gain plus élevé à haut débit. En effet, ce fort gain à faible débit impose une grande précision dans la régulation de la section de passage de la vanne de dosage. A l'inverse, à haut débit un gain trop faible peut entraîner un retard du fait du temps nécessaire au positionnement correct de la vanne de dosage.

III. Conclusion

Du fait de ses mauvaises performances en termes de pilotabilité, ainsi que des niveaux de pression trop élevés engendrés dans le système, cette brique de dosage par restriction à « Pression amont quelconque » a été retirée de la liste des briques candidates pour notre étude d'architectures.

Des études similaires ont été menées pour les quatre autres briques de la famille de dosage par restriction. La prise en compte de spécificités de chacune des briques a permis d'adapter l'approche que nous avons présentée dans cette annexe aux autres systèmes de dosage candidat. Cette étape d'évaluation préliminaire a ainsi permis d'éliminer 3 des 5 briques initialement candidates.